

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL DOUTORADO**

CAMILA SIMONETTI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE PLACAS DE VEDAÇÃO DE
CONCRETO COM INSERÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS**

**São Leopoldo
2020**

CAMILA SIMONETTI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE PLACAS DE VEDAÇÃO DE
CONCRETO COM INSERÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS

Tese apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –
UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)

São Leopoldo
2020

S598a Simonetti, Camila.
Avaliação do comportamento ao fogo de placas de vedação de concreto com inserção de resíduos de pneus inservíveis / por Camila Simonetti. – 2020.
304 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.
Orientador: Dr. Bernardo Fonseca Tutikian.
Coorientador: Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

1. Segurança contra incêndio. 2. Reação ao fogo.
3. Resistência ao fogo. 4. Placa de vedação de concreto.
5. Pneu inservível. I. Título.

CDU: 691:620.1

CAMILA SIMONETTI

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AO FOGO DE PLACAS DE VEDAÇÃO DE
CONCRETO COM INSERÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em 25 de maio 2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Prof. Dr. George Cajaty Barbosa Braga
Corpo de Bombeiros do Distrito Federal

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profa. Dra. Ângela Gaio Graeff
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dedico este trabalho à minha família, por todo carinho, apoio e compreensão, sendo a maior incentivadora na concretização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Bernardo Fonseca Tutikian, orientador, pela confiança depositada e pelo constante suporte durante esses quatro anos. Ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, coorientador, pela participação na concretização dessa tese.

À toda equipe do itt Performance da UNISINOS, em especial aos colegas de pós-graduação Fernanda Pacheco e Roberto Christ, obrigada pela receptividade, pela amizade e pelos conhecimentos transmitidos.

Agradecimento ao Laboratório de Segurança contra Incêndio e ao Laboratório de Segurança Estrutural, por viabilizarem com eficiência a parte experimental dessa pesquisa. Em especial, aos membros Gustavo Luis Prager, Hinoel Zamis Ehrenbring, Vanessa Oerle Kautzmann, Augusto Masiero Gil, Bruno Matheus Gabe Mendez, Gian de Fraga Moreira, Gustavo Carniel Manica, José Augusto Pianezzola Malvessi, Lucas Bastian, Lucas Marx Führ, Lucas Rafael Lerner, Nicolas Gomes Laurentino, Nicolás Taufer Schorn e Thomas Zorn Arnold.

Ao Anderson Leffa Bauer e ao Anderson Junior Almeida Batista, por trilharem comigo a etapa preliminar deste trabalho e me permitirem fazer parte dos seus trabalhos de conclusão de curso.

À minha mãe, Maria Augusta Kniphoff, pelo incentivo e apoio incondicional, por estar sempre ao meu lado em todas as minhas jornadas. Ao meu amor, Marco Antonio Knob Caldieraro, pelo carinho e pela compreensão. À minha família e amigos, pelo companheirismo e pela torcida, certamente tornaram essa caminhada mais leve.

Aos colegas da Superintendência de Infraestrutura da UFRGS, em especial Andrea Pinto Loguércio e Edy Isaias Junior, que foram grandes apoiadores e incentivadores durante esse período de aprendizagem. Agradeço ao coleguismo da Prefeitura *Campus* Centro e da Gerência Administrativa.

Ao Programa de Incentivo Educacional e à Escola de Desenvolvimento de Servidores da UFRGS, pelo suporte financeiro concedido e pelo estímulo aos servidores da Universidade a qualificarem sua formação.

Ao itt Performance pelo financiamento da pesquisa, concedendo a equipe e os equipamentos necessários. À Construtora Premold, Newton Napoli e Luiz Renato Cavalieri, pelo apoio operacional e pela doação de materiais para a etapa principal do programa experimental. À Concredul, Marcelo Krumenauer, pela doação de materiais para a etapa preliminar dessa pesquisa. À Industrial Batistella de Artefatos de

Borracha Ltda, Marcelo Zanoni de Paula, pela doação dos resíduos de pneu. À Hilti, Paulo Bellintani, pela doação do selante corta-fogo.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta tese fosse realizada e este sonho fosse alcançado!

“Ignorance more frequently begets confidence than does knowledge: it is those who know little, and not those who know much, who so positively assert that this or that problem will never be solved by science.”

Charles Darwin

RESUMO

A deposição inadequada de pneus inservíveis é um caso de destaque quando se discute a mitigação de impactos sanitários e ambientais, fato que tem motivado várias pesquisas sobre possíveis métodos de aproveitamento desse tipo de rejeito. A construção civil vem se mostrando como uma consumidora potencial de resíduos, dada a sua capacidade de absorver grandes quantidades de material, a busca por alternativas para superar a escassez de matérias-primas naturais, o interesse em reduzir a pegada ambiental das obras e a boa capacidade de encapsulamento de diversos contaminantes pelas matrizes de concreto. A possibilidade de incorporação de resíduos reciclados de pneus inservíveis em concreto já foi consolidada em pesquisas anteriores. Entretanto, nota-se uma lacuna acerca do desempenho desses concretos quando submetidos a elevadas temperaturas. O presente trabalho busca avaliar o comportamento ao fogo de placas de vedação de concreto, elaboradas com material reaproveitado de pneus inservíveis, empregando tanto a fibra metálica reciclada quanto agregado reciclado da borracha. O programa experimental envolveu a caracterização de propriedades físicas e mecânicas dos concretos, além de ensaios de reação e de resistência ao fogo. Além do concreto referência sem resíduos, foram testados traços com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha nas proporções de 5% e 10%, em volume; e outras misturas com adição de teores de fibra metálica reciclada de pneus da ordem de 0,5% e 1,5%, em volume. Quanto à reação ao fogo, os resultados obtidos indicam que os concretos com resíduos de pneu testados, exceto o concreto referência, são classificados como combustíveis, devido à ocorrência de chamejamento durante o ensaio de incombustibilidade. Não houve propagação de chamas, nem registro de emissão de fumaça significativo. Quanto à resistência ao fogo, os concretos com fibra metálica reciclada, e com 5% de borracha, evidenciaram comportamento similar ao concreto referência frente aos parâmetros verificados durante este ensaio. Já o concreto com 10% de borracha registrou deslocamento explosivo e resultou em desempenho inferior em termos de isolamento térmico e de estanqueidade.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio. Reação ao fogo. Resistência ao fogo. Placa de vedação de concreto. Pneu inservível.

ABSTRACT

The inappropriate disposal of waste tires represents a major concern regarding the mitigation of sanitary and environmental impacts from this action. This issue has motivated several studies on possible methods for reusing these elements. Civil construction can be a potential consumer of this type of waste due to the following reasons: its capacity for consuming large amounts of materials, its search for alternatives to overcome the shortage of raw materials, its interest in reducing the environmental footprint from construction projects, and its capacity to encapsulate contaminants in the cement matrix. The possibility of incorporating waste tires residue into concrete has already been consolidated in several previous studies, but there is a gap in the knowledge about how the concrete made with recycled tire materials behaves when exposed to high temperatures. This study aims to investigate the performance of precast concrete panels made with waste tires residues when exposed to fire when using the recycled steel fiber and the recycled rubber aggregate separately. The experimental design consisted in essays for the characterization of the physical and mechanical properties of the concrete produced with the recycled materials, as well as fire reactions and fire resistance tests. Besides the reference concrete without any residues, mixtures were prepared containing rubber particles used as partial replacement of fine aggregate at a proportion of 5% and 10% in volume, and other mixtures containing recycled steel fibers included at 0.5% and 1.5% of total volume. In terms of fire reaction, the results indicated that both groups of concretes with residues, unlike the conventional concrete, were classified as combustible due to the presence of sustained flaming during non-combustibility tests. There was neither flame propagation nor the register of smoke optical density. In the fire resistance tests, the recycled steel fiber reinforced concretes and those containing 5% recycled rubber aggregate presented similar behavior when compared to the conventional concrete on thermal insulation, sealing, and stability. The concrete made with 10% recycled rubber aggregate registered the occurrence of explosive spalling and worse thermal insulation and sealing.

Keywords: Fire safety. Fire reaction. Fire resistance. Precast concrete panels. Waste tire.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pneu de passeio em corte e elementos constituintes	45
Figura 2 – Ciclo de vida simplificado do pneu	50
Figura 3 – Aterro de pneus inservíveis em picos, Piauí, Brasil.....	59
Figura 4 – Incêndio em depósito de pneus em Uberaba, Minas Gerais, Brasil	60
Figura 5 – Cronologia da legislação ambiental brasileira sobre pneus inservíveis....	61
Figura 6 – Microestrutura de concreto convencional com agregado silicioso aquecido a 600 °C – aumento 50x.....	73
Figura 7 – MEV da superfície de fratura do concreto com 10% de substituição de areia por borracha aos 28 dias (a) aumento 100x e (b) aumento 17x.....	82
Figura 8 – Face exposta do CAR (a) sem adição de borracha e (b) com 3% de borracha – após o teste de fogo.....	87
Figura 9 – Comparação entre (a) fibra de aço tipo corrugada e (b) fibra metálica oriunda de pneu inservível	95
Figura 10 – Etapa preliminar do programa experimental	106
Figura 11 – Amostra do agregado reciclado de borracha da etapa preliminar	110
Figura 12 – Amostra da fibra de aço reciclada da etapa preliminar	111
Figura 13 – Imagem das fibras de aço (a) após limpeza manual e (b) escaneadas através do Digimizer®.....	112
Figura 14 – Amostragem para ensaio de absorção de água por capilaridade	115
Figura 15 – Amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade	115
Figura 16 – Execução do ensaio VeBe	119
Figura 17 – Esquema de execução do ensaio de resistência à tração na flexão	120
Figura 18 – Comparativo dos ensaios de resistência à tração na flexão	146
Figura 19 – Etapa final do programa experimental.....	154
Figura 20 – Amostra do agregado reciclado de borracha da etapa final: (a) máquina fotográfica comum e (b) microscópio digital	159
Figura 21 – Amostra da fibra de aço reciclada da etapa final: (a) máquina fotográfica comum e (b) microscópio digital.....	160
Figura 22 – Formas de madeira das placas de vedação: (a) vista lateral e (b) frontal	167
Figura 23 – Formas de madeira das (a) placas menores e (b) na pista de concretagem	168

Figura 24 – Armadura de uma placa de vedação.....	168
Figura 25 – Montagem das alças da placa de vedação	169
Figura 26 – Central dosadora: (a) silos individuais e (b) painel de controle	170
Figura 27 – Central dosadora: (a) transporte de agregados e (b) misturador	170
Figura 28 – Polvilhamento da fibra metálica antes da moldagem do traço FIB1,5%	171
Figura 29 – Formação de grumos de fibra metálica reciclada no concreto	172
Figura 30 – Concreto fresco: (a) transporte e (b) lançamento.....	172
Figura 31 – Placas de vedação (a) com as formas laterais removidas (b) armazenadas dentro da fábrica	173
Figura 32 – Exemplo de extração de amostras para tomografia 3D	175
Figura 33 – Ensaio de incombustibilidade: (a) aparato de ensaio e (b) amostras...	176
Figura 34 – Determinação do índice de propagação superficial de chama: (a) amostras e (b) aparato de ensaio	177
Figura 35 – Ensaio de densidade óptica específica de fumaça: (a) equipamento e (b) câmara interna de ensaio	180
Figura 36 – Ensaio de densidade óptica específica de fumaça: (a) corpo de prova, (b) aparato de fixação e (c) posicionado na câmara de ensaio	181
Figura 37 – Detalhe do forno vertical: (a) queimadores acesos e (b) quadro de comando.....	183
Figura 38 – Acoplamento do pórtico metálico no forno vertical	184
Figura 39 – Montagem das placas de vedação no pórtico metálico.....	184
Figura 40 – Junta preenchida com (a) fibra cerâmica e (b) selante corta-fogo	185
Figura 41 – Termopares internos do forno: (a) ilustração e (b) alinhamentos com unidade em metros.....	186
Figura 42 – Termopares internos da face exposta: (a) ilustração e (b) alinhamentos com unidade em metros.....	186
Figura 43 – Termopares da face não exposta: vista frontal com unidade em metros	188
Figura 44 – Termopares da face não exposta: em corte com unidade em metros..	188
Figura 45 – Teste de estanqueidade: (a) execução e (b) algodão	190
Figura 46 – Teste de estabilidade: (a) ilustração e (b) cotas em metros.....	190
Figura 47 – Execução do teste de estabilidade.....	191
Figura 48 – Pontos para acompanhamento do deslocamento	192

Figura 49 – Marcação para extração de pó para análises DRX e FRX.....	194
Figura 50 – Extração de pó para análises DRX e FRX	194
Figura 51 – Imagens de BOR5%: (a) amostra em 3D e (b) eixos	204
Figura 52 – Imagens de BOR5% conforme eixos (a) XY, (b) ZX e (c) ZY	204
Figura 53 – Imagens de BOR10%: (a) amostra em 3D e (b) eixos	204
Figura 54 – Imagens BOR10% conforme eixos (a) XY, (b) ZX e (c) ZY	205
Figura 55 – Imagens de FIB0,5%: (a) eixos, (b) amostra e (c) fibras metálicas em 3D	205
Figura 56 – Imagens FIB0% conforme eixos: (a) XY, (b) ZX e (c) ZY	206
Figura 57 – Imagens de FIB1,5%: (a) eixos, (b) amostra e (c) fibras metálicas em 3D	206
Figura 58 – Imagens FIB1,5% conforme eixos: (a) XY, (b) ZX e (c) ZY	206
Figura 59 – Evidência de chamejamento: BOR10%	208
Figura 60 – Amostras BOR10% (a) antes e (b) após o ensaio.....	211
Figura 61 – Amostras BOR5%: (a) antes e (b) após o ensaio	215
Figura 62 – Amostras FIB1,5%: (a) antes, (b) após o ensaio sem chama (c) e após ensaio com chama	220
Figura 63 – Amostras REF, BOR5% e BOR10% aos 150 min de ensaio de resistência ao fogo	226
Figura 64 – Superfície exposta REF, BOR5% e BOR10% após ensaio de resistência ao fogo	227
Figura 65 – Superfície não exposta: REF, BOR5% e BOR10% após ensaio de resistência ao fogo	228
Figura 66 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: (a) perda de seção média e (b) foto ampliada da superfície da amostra	228
Figura 67 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: fragmentos de concreto	229
Figura 68 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: vista interna do forno vertical	229
Figura 69 – Superfície exposta REF, FIB0,5% e FIB1,5% após ensaio de resistência ao fogo	231
Figura 70 – Detalhe da superfície exposta FIB0,5% após ensaio de resistência ao fogo	232

Figura 71 – Superfície não exposta REF, FIB0,5% e FIB1,5% após ensaio de resistência ao fogo	232
Figura 72 – Detalhe do selante do REF após ensaio de resistência ao fogo: (a) na superfície não exposta e (b) exposta	233
Figura 73 – Perda de estanqueidade de BOR10%	244
Figura 74 – BOR10%: (a) pós-ensaio de resistência ao fogo e (b) imagem da câmera termográfica aos 70 min e (c) 200 min	245
Figura 75 – Imagem da câmera termográfica para BOR10% aos (a) 20 min, (b) 30 min e (c) 45 min	245
Figura 76 – Sentido da deformação das placas de vedação.....	253

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Vendas totais de pneus no Brasil entre 2007 e 2019.....	54
Gráfico 2 – Canais de vendas totais de pneus no Brasil entre 2014 e 2019	54
Gráfico 3 – Número de pneus coletados e destinados no Brasil entre 2010 e 2019.	56
Gráfico 4 – Ampliação dos pontos de coleta de pneus inservíveis no Brasil.....	56
Gráfico 5 – Curva padrão de incêndio.....	67
Gráfico 6 – Diminuição da resistência à compressão do concreto convencional em função da temperatura e do tipo de agregado.....	75
Gráfico 7 – Comportamento de carga versus deflexão de concreto convencional e reforçado com fibras.....	100
Gráfico 8 – Relação de resistência à compressão residual de misturas de CAR em diversas temperaturas versus temperatura referência a 20 °C	104
Gráfico 9 – Curva granulométrica do cimento CP-IV 32.....	107
Gráfico 10 – Dispersão das características das fibras de aço recicladas utilizadas na etapa preliminar.....	111
Gráfico 11 – Critério da JSCE-SF4 (1984) para a determinação da tenacidade na flexão.....	120
Gráfico 12 – Evolução da resistência à compressão: concreto com ARB na etapa preliminar.....	124
Gráfico 13 – Taxa de absorção de água aos 28 dias	128
Gráfico 14 – Taxa de saturação de água aos 28 dias	129
Gráfico 15 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	135
Gráfico 16 – Evolução da resistência à compressão: concreto com fibra metálica reciclada na etapa preliminar	142
Gráfico 17 – Curvas carga versus deflexão alcançadas após o ensaio de tenacidade	148
Gráfico 18 – Curva granulométrica do cimento CP-V ARI.....	155
Gráfico 19 – Dispersão das características das fibras de aço recicladas utilizadas na etapa final.....	161
Gráfico 20 – Ensaio TGA e DTGA para o agregado reciclado de borracha	163
Gráfico 21 – Ensaio DSC para o agregado reciclado de borracha.....	164
Gráfico 22 – Ensaio TGA para a fibra metálica reciclada.....	165
Gráfico 23 – Evolução da resistência à compressão: misturas da etapa final.....	198

Gráfico 24 – Evolução do módulo de elasticidade: misturas da etapa final.....	201
Gráfico 25 – Curvas de temperatura média ao longo do ensaio para a calibração e para as amostras.....	214
Gráfico 26 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: REF.....	217
Gráfico 27 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: BOR5%	217
Gráfico 28 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: BOR10%	218
Gráfico 29 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: FIB0,5%	218
Gráfico 30 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: FIB1,5%	219
Gráfico 31 – Curva média de temperatura interna do forno para todas as amostras (TA e TB)	234
Gráfico 32 – Curva média de temperatura na face exposta ao fogo para todas as amostras (T1 a T5).....	235
Gráfico 33 – REF: temperatura da face não exposta ao fogo	236
Gráfico 34 – BOR5%: temperatura da face não exposta ao fogo.....	237
Gráfico 35 – BOR10%: temperatura da face não exposta ao fogo.....	237
Gráfico 36 – FIB0,5%: temperatura da face não exposta ao fogo.....	238
Gráfico 37 – FIB1,5%: temperatura da face não exposta ao fogo.....	238
Gráfico 38 – REF: temperatura do interior da seção da amostra	239
Gráfico 39 – BOR5%: temperatura do interior da seção da amostra	240
Gráfico 40 – BOR10%: temperatura do interior da seção da amostra	240
Gráfico 41 – FIB0,5%: temperatura do interior da seção da amostra.....	241
Gráfico 42 – FIB1,5%: temperatura do interior da seção da amostra.....	241
Gráfico 43 – Medições de deslocamento em TL1 ao longo do tempo.....	247
Gráfico 44 – Medições de deslocamento em TL2 ao longo do tempo.....	248
Gráfico 45 – Medições de deslocamento em REF ao longo do tempo (ET).....	251
Gráfico 46 – Medições de deslocamento em BOR5% ao longo do tempo (ET)	251
Gráfico 47 – Medições de deslocamento em BOR10% ao longo do tempo (ET)	252
Gráfico 48 – Medições de deslocamento em FIB0,5% ao longo do tempo (ET)	252
Gráfico 49 – Medições de deslocamento em FIB1,5% ao longo do tempo (ET)	253
Gráfico 50 – Comparação entre valores de massa das amostras do REF.....	257

Gráfico 51 – Comparação entre valores de massa das amostras BOR5% e BOR10%	257
Gráfico 52 – Comparação entre valores de massa das amostras FIB0,5% e FIB1,5%	258

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem de concreto com agregado reciclado de borracha.....	37
Quadro 2 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre concreto com agregado reciclado de borracha submetido a altas temperaturas.....	38
Quadro 3 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem e emprego de fibras metálicas no concreto	39
Quadro 4 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre concreto com fibra metálica submetido a altas temperaturas	40
Quadro 5 – Categorias de tratamentos para reciclagem de pneus	51
Quadro 6 – Tempo de degradação de diversos materiais.....	57
Quadro 7 – Proporção de destinação final aos pneus inservíveis.....	62
Quadro 8 – Metas para a reciclagem de pneus (fabricantes e importadores).....	64
Quadro 9 – Efeito da alta temperatura no concreto.....	71
Quadro 10 – Tipos de tratamentos superficiais para o resíduo de borracha	89
Quadro 11 – Pesquisas com substituição de agregado miúdo por ARB	91
Quadro 12 – Função da fração volumétrica das fibras.....	97
Quadro 13 – Percentuais em volume já ensaiados de fibras de aço em concretos ..	97
Quadro 14 – Inspeção visual em fissuras em concretos expostos a altas temperaturas	102
Quadro 15 – Características físicas do agregado miúdo.....	108
Quadro 16 – Características físicas do agregado graúdo	109
Quadro 17 – Características físicas do ARB	110
Quadro 18 – Qualidade do concreto em relação à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	117
Quadro 19 – Características físicas do agregado miúdo: areia fina	156
Quadro 20 – Características físicas do agregado miúdo: areia média	157
Quadro 21 – Características físicas do agregado graúdo: brita 4,75/12,5 mm.....	157
Quadro 22 – Características físicas do agregado graúdo: brita 9,5/25 mm	158
Quadro 23 – Características físicas do ARB	159
Quadro 24 – Descrição da nomenclatura utilizada.....	166
Quadro 25 – Descrição das amostras de concreto produzidas	166

Quadro 26 – Classificação do ensaio de índice de propagação superficial de chama	179
Quadro 27 – Classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas.....	180
Quadro 28 – Termopares internos do forno e da face exposta da amostra	187
Quadro 29 – Termopares da face não exposta da amostra	188
Quadro 30 – Caracterização das moldagens	195
Quadro 31 – Classificação quanto à reação ao fogo dos concretos ensaiados	221
Quadro 32 – Classe dos materiais a serem utilizados considerando o grupo/divisão da ocupação/uso em função da finalidade do material	221
Quadro 33 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: REF	223
Quadro 34 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: BOR5% e BOR10%	224
Quadro 35 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: FIB0,5% e FIB1,5%	225
Quadro 36 – Classificação das amostras quanto à NBR 10636 (ABNT, 1989).....	254
Quadro 37 – Classificação dos resultados de FRX	256
Quadro 38 – Fases identificadas nos difratogramas de DRX: REF temperatura ambiente.....	259
Quadro 39 – Fases identificadas nos difratogramas de DRX: demais amostras.....	259
Quadro 40 – Descrição das fases encontradas nos difratogramas de DRX	260

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição geral de um pneu radial para automóvel	46
Tabela 2 – Constituição química média de um pneu.....	46
Tabela 3 – Aditivos químicos utilizados na composição típica do aço de pneus.....	49
Tabela 4 – Produção de novos pneus no Brasil de 2012 a 2016	53
Tabela 5 – Classificação do estado geral de rodovias públicas	55
Tabela 6 – Classificação de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso e produtos de isolamento térmico de tubulações e dutos com seção circular de diâmetro externo não superior a 300 mm.....	68
Tabela 7 – Redução da resistência à compressão em concretos conforme percentual de substituição de resíduo de borracha de pneu inservível	81
Tabela 8 – Propriedades típicas de fibras	96
Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado miúdo	108
Tabela 10 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	109
Tabela 11 – Composição granulométrica do ARB.....	110
Tabela 12 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos com ARB	113
Tabela 13 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos com fibra de aço reciclada.....	117
Tabela 14 – Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone.....	122
Tabela 15 – Valores obtidos de resistência à compressão	123
Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão.....	124
Tabela 17 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão conforme teste de Tukey.....	125
Tabela 18 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias	125
Tabela 19 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade.....	126
Tabela 20 – Agrupamento de resultados de módulo de elasticidade conforme teste de Tukey	126
Tabela 21 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade – 7 dias	127
Tabela 22 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade – 28 dias	127
Tabela 23 – Análise de variância dos resultados de absorção efetiva	129
Tabela 24 – Agrupamento de resultados de absorção efetiva conforme teste de Tukey	130

Tabela 25 – Análise de variância dos resultados de resistência e taxa de absorção capilar.....	130
Tabela 26 – Resultados médios de ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real.....	131
Tabela 27 – Análise de variância dos resultados de absorção de água.....	131
Tabela 28 – Agrupamento de resultados de absorção de água conforme teste de Tukey	132
Tabela 29 – Análise de variância dos resultados índice de vazios.....	132
Tabela 30 – Agrupamento de resultados de índice de vazios conforme teste de Tukey	133
Tabela 31 – Análise de variância dos resultados de massa específica real.....	133
Tabela 32 – Agrupamento de resultados de massa específica real conforme teste de Tukey	134
Tabela 33 – Resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	135
Tabela 34 – Análise de variância dos resultados de VPU.....	136
Tabela 35 – Agrupamento de resultados de VPU conforme teste de Tukey.....	137
Tabela 36 – Resumo dos ensaios realizados para os traços com agregado reciclado de borracha na etapa preliminar.....	137
Tabela 37 – Ensaio de abatimento de tronco de cone e características das moldagens	139
Tabela 38 – Resultados do ensaio VeBe	140
Tabela 39 – Valores obtidos de resistência à compressão	141
Tabela 40 – Incremento da resistência à compressão do CRFA aos 28 dias	143
Tabela 41 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão.....	143
Tabela 42 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão conforme teste de Tukey.....	144
Tabela 43 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias	144
Tabela 44 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade.....	145
Tabela 45 – Valores médios obtidos para tração na flexão aos 28 dias	145
Tabela 46 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão.....	147
Tabela 47 – Agrupamento de resultados de resistência à tração na flexão conforme teste de Tukey.....	147
Tabela 48 – Resultados obtidos para o fator de tenacidade aos 28 dias	148
Tabela 49 – Análise de variância dos resultados de tenacidade.....	149

Tabela 50 – Agrupamento de resultados de tenacidade conforme teste de Tukey.	149
Tabela 51 – Resumo dos ensaios realizados para os traços com fibra de aço reciclada na etapa preliminar.....	150
Tabela 52 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão de todas as misturas da etapa preliminar	152
Tabela 53 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão de todas as misturas da etapa preliminar conforme teste de Tukey.....	152
Tabela 54 – Composição granulométrica do agregado miúdo: areia fina	156
Tabela 55 – Composição granulométrica do agregado miúdo: areia média	156
Tabela 56 – Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 4,75/12,5 mm	157
Tabela 57 – Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 9,5/25 mm	158
Tabela 58 – Composição granulométrica do ARB.....	159
Tabela 59 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos	169
Tabela 60 – Plano de caracterização mecânica dos concretos	174
Tabela 61 – Valores obtidos de resistência à compressão	196
Tabela 62 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das misturas da etapa final	199
Tabela 63 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão das misturas da etapa final conforme teste de Tukey	199
Tabela 64 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade.....	200
Tabela 65 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade das misturas da etapa final	202
Tabela 66 – Agrupamento de resultados de módulo de elasticidade das misturas da etapa final conforme teste de Tukey	202
Tabela 67 – Avaliação do volume ocupado por vazios e por fibras metálicas	203
Tabela 68 – Ensaio de incombustibilidade: REF	207
Tabela 69 – Ensaio de incombustibilidade: BOR5%	208
Tabela 70 – Ensaio de incombustibilidade: BOR10%	208
Tabela 71 – Ensaio de incombustibilidade: FIB0,5%	209
Tabela 72 – Ensaio de incombustibilidade: FIB1,5%	209
Tabela 73 – Resultados médios do ensaio de incombustibilidade	209
Tabela 74 – Propagação do ensaio de painel radiante: REF	212
Tabela 75 – Propagação do ensaio de painel radiante: BOR.....	212

Tabela 76 – Propagação do ensaio de painel radiante: FIB.....	212
Tabela 77 – Índice de propagação superficial de chama	213
Tabela 78 – Densidade óptica específica de fumaça: resultados por amostra	215
Tabela 79 – Densidade óptica específica máxima de fumaça: resultados globais..	216
Tabela 80 – Densidade óptica específica média de fumaça em tempos determinados	219
Tabela 81 – Condições climáticas durante os ensaios de resistência ao fogo.....	223
Tabela 82 – Temperatura nos termopares 6 a 10 aos 120 minutos	233
Tabela 83 – Termopares da face exposta ao fogo	235
Tabela 84 – Termopares da face não exposta ao fogo	239
Tabela 85 – Temperatura máxima da seção interna das amostras.....	242
Tabela 86 – Perda de isolamento térmico das amostras	242
Tabela 87 – Leitura dos termopares da face não exposta para BOR5% e BOR10% durante a perda de isolamento térmico	243
Tabela 88 – Medições de deslocamento apuradas com a trena a laser	247
Tabela 89 – Medições de deslocamento da estação total.....	249
Tabela 90 – Comparativo de medições entre trena a laser e estação total.....	250

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AINF	Associação Internacional do Negro de Fumo
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ARB	Agregado Reciclado de Borracha
AREBOP	Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BMB	Belgo Mineira Bekaert
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CAB	Concreto com Agregado de Borracha
CAR	Concreto de Alta Resistência
CBPMSP	Corpo de Bombeiros Polícia Militar do Estado de São Paulo
CC	Concreto Convencional
CF	Corta-Fogo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CP	Cimento Portland
CRFA	Concreto Reforçado com Fibra de Aço
CTF	Cadastro Técnico Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difratometria de Raio X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTGA	Termogravimetria Derivada
FRX	Fluorescência de Raio X
FT	Fator de Tenacidade
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IN	Instrução Normativa
INDIBA	Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IS	<i>Indian Standard</i>

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
itt Performance	Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MQ	Quadrado Médio
NBR	Normas Brasileira
NM	Norma MERCOSUL
NR	Borracha Natural
PC	Para-Chamas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages</i>
RS	Rio Grande do Sul
SBR	Estireno-Butadieno
SINDIPNEUS	Sindicato das Empresas de Revenda e Prestação de Serviços de Reforma de Pneus e Similares do Estado de Minas Gerais
SINPEC	Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos Câmaras de Ar e Camelback
SQ	Soma dos Quadrados
TGA	Termogravimetria
TRF	Tempo de Resistência ao Fogo
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
δ	Deslocamento
β	Constante adimensional
<	Menor
®	Marca registrada
°C	Grau Celsius
μ	Micro
a/c	Relação água/cimento
B	Largura
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
D _c	Densidade óptica específica calculada após o término do ensaio
d _e	Diâmetro equivalente
D _m	Densidade óptica específica máxima
D _{m corr}	Densidade óptica específica máxima corrigida
D _s	Densidade óptica específica
g	Gramas
gl	Graus de Liberdade
GPa	Gigapascal
h	Hora
h	Altura
I _p	Índice de propagação superficial de chama
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kN	Quilonewton
L ou l	Comprimento
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mim	Minuto

MJ	Megajoules
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
nm	Nanômetro
n ^o	Número
p	Probabilidade de significância
P _c	Fator de propagação de chama
P _{ef}	Absorção efetiva
Q	Fator de evolução de calor
R	Resistência capilar
S	Taxa de absorção capilar
s – s ²	Segundo - segundo quadrado
t _r	Tempo de chamejamento
W	Watt
Δm	Varição de perda de massa
Δt	Varição da temperatura
λ	Fator de forma

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	32
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	32
1.2 TEMA	35
1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	35
1.4 OBJETIVOS	36
1.4.1 Objetivo geral	36
1.4.2 Objetivos específicos	36
1.5 JUSTIFICATIVA	36
1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA	42
2 PANORAMA GERAL SOBRE PNEUS	44
2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UM PNEU	44
2.1.1 Borracha	47
2.1.2 Negro de fumo	48
2.1.3 Aço	49
2.2 RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS	50
2.3 PRODUÇÃO E COLETA DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL	53
2.4 PROBLEMÁTICA SANITÁRIA E AMBIENTAL	57
2.5 REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA SOBRE PNEUS INSERVÍVEIS	60
2.5.1 Resolução nº 258 de 26 de agosto de 1999 (CONAMA)	62
2.5.2 Resolução nº 416 de 30 de setembro de 2009 (CONAMA)	63
2.5.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos	64
3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS E COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS	66
3.1 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS	66
3.1.1 Segurança contra incêndio	66
3.1.2 Alterações na microestrutura do concreto	70
3.1.3 Redução das propriedades mecânicas	74
3.1.4 Deslocamento	76
3.2 CONCRETO ELABORADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU	79
3.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco elaborado com resíduo de borracha de pneu	79

3.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido elaborado com resíduo de borracha de pneu	80
3.2.2.1 Resistência à compressão	80
3.2.2.2 Resistência à tração	83
3.2.2.3 Resistência ao impacto	84
3.2.2.4 Módulo de elasticidade	85
3.2.2.5 Comportamento em altas temperaturas	86
3.2.2.6 Tratamento superficial da borracha	89
3.2.2.7 Teores de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de borracha	91
3.3 CONCRETO ELABORADO COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE AÇO	92
3.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco elaborado com a incorporação de fibra de aço	92
3.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido elaborado com a incorporação de fibra de aço	94
3.3.2.1 Fibras de aço para concreto	94
3.3.2.2 Resistência à compressão	98
3.3.2.3 Módulo de elasticidade	98
3.3.2.4 Resistência à tração	99
3.3.2.5 Tenacidade	99
3.3.2.6 Resistência à flexão	101
3.3.2.7 Comportamento em altas temperaturas	102
4 ETAPA PRELIMINAR DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	106
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL PRELIMINAR	107
4.1.1 Caracterização dos materiais empregados na etapa preliminar	107
4.1.1.1 Cimento	107
4.1.1.2 Agregado miúdo	107
4.1.1.3 Agregado graúdo	108
4.1.1.4 Agregado reciclado de borracha	109
4.1.1.5 Fibra de aço reciclada	110
4.1.1.6 Aditivo superplastificante e água	112
4.1.2 Concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível	113
4.1.2.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone	113

4.1.2.2 Resistência à compressão	113
4.1.2.3 Módulo de elasticidade.....	114
4.1.2.4 Absorção de água por capilaridade.....	114
4.1.2.5 Índice de vazios, massa específica e absorção total de água.....	116
4.1.2.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	116
4.1.3 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica	117
4.1.3.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone	118
4.1.3.2 Ensaio VeBe.....	118
4.1.3.3 Resistência à compressão	119
4.1.3.4 Módulo de elasticidade.....	119
4.1.3.5 Resistência à tração na flexão	119
4.1.3.6 Fator de tenacidade.....	120
4.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PRELIMINARES	121
4.2.1 Concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível.....	122
4.2.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone	122
4.2.1.2 Resistência à compressão	123
4.2.1.3 Módulo de elasticidade.....	125
4.2.1.4 Absorção de água por capilaridade	126
4.2.1.5 Absorção total de água, índice de vazios e massa específica real	130
4.2.1.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	134
4.2.1.7 Considerações acerca do concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível.....	137
4.2.2 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica	139
4.2.2.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone	139
4.2.2.2 Ensaio VeBe.....	140
4.2.2.3 Resistência à compressão	141
4.2.2.4 Módulo de elasticidade.....	144
4.2.2.5 Resistência à tração na flexão	145
4.2.2.6 Fator de tenacidade.....	147
4.2.2.7 Considerações acerca do concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica.....	150

4.2.3 Considerações finais acerca da etapa preliminar	151
5 ETAPA FINAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	154
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA ETAPA FINAL	154
5.1.1 Cimento	155
5.1.2 Agregados miúdos	155
5.1.3 Agregados graúdos.....	157
5.1.4 Agregado reciclado de borracha	158
5.1.5 Fibra de aço reciclada.....	160
5.1.6 Aditivo superplastificante e água	161
5.1.7 Análise térmica da borracha e da fibra metálica	161
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	166
5.2.1 Características e moldagem das amostras.....	166
5.2.2 Caracterização das propriedades mecânicas dos concretos	174
5.2.3 Caracterização física.....	174
5.3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS	175
5.3.1 Reação ao fogo.....	175
5.3.1.1 Ensaio de incombustibilidade	175
5.3.1.2 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante.....	177
5.3.1.3 Ensaio de densidade óptica específica de fumaça.....	180
5.3.2 Resistência ao fogo.....	182
5.3.3 Análise química microestrutural.....	193
6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	195
6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	195
6.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	195
6.1.2 Resistência à compressão	196
6.1.3 Módulo de elasticidade	199
6.1.4 Caracterização física.....	203
6.2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS	207
6.2.1 Reação ao fogo.....	207
6.2.1.1 Ensaio de incombustibilidade	207

6.2.1.2 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante.....	211
6.2.1.3 Ensaio de densidade óptica específica de fumaça.....	215
6.2.1.4 Classificação dos compósitos em relação à reação ao fogo	220
6.2.2 Resistência ao fogo.....	223
6.2.2.1 Aspectos gerais	223
6.2.2.2 Avaliação do isolamento térmico	234
6.2.2.3 Avaliação da estanqueidade	244
6.2.2.4 Avaliação da estabilidade.....	246
6.2.2.5 Classificação dos compósitos em relação à resistência ao fogo	254
6.2.3 Análise química microestrutural	255
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	263
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	263
7.1.1 Concreto com agregado reciclado de borracha	263
7.1.2 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada.....	264
7.1.3 Resíduos de pneus inservíveis	265
7.2 CONCLUSÕES	266
7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	267
REFERÊNCIAS.....	269
APÊNDICE A – ANÁLISE TÉRMICA DA FIBRA METÁLICA RECICLADA.....	289
APÊNDICE B – RESULTADOS DE FRX	293
APÊNDICE C – RESULTADOS DE DRX	294

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o tema de estudo proposto para a tese, que versa sobre o aproveitamento de resíduos de pneus inservíveis em placas de vedação de concreto submetidas a altas temperaturas. A exposição se inicia com uma breve contextualização, seguida pela descrição do tema e suas delimitações, destacando os objetivos e a justificativa, finalizando com a demonstração da estrutura da tese.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O rápido desenvolvimento tecnológico, o aumento da população e a demanda por novas tecnologias com redução do ciclo de vida dos produtos têm contribuído para o aumento do descarte de produtos inservíveis. Como consequência, ocorre o aumento do volume destinado a aterros, do consumo de recursos naturais, da poluição e do custo envolvido no processo de coleta e destinação dos resíduos. (LAGARINHOS, 2011).

O acúmulo dos resíduos dispostos inadequadamente resultante do consumo da sociedade é um problema ambiental que, embora conte com diversas tentativas para minimizar o impacto gerado, não foi ainda resolvido. O descuido com o meio ambiente ocasionado pela falta de políticas mitigadoras públicas e privadas pode tornar a situação irreversível e comprometer a médio e longo prazo o desenvolvimento econômico. (MOTTA, 2008).

Entre os resíduos sólidos produzidos pela população, os pneus, considerados resíduos especiais, ocupam um papel de destaque na discussão dos impactos sanitários e ambientais. (GOBBI, 2002).

A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1999) determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos são responsáveis pela coleta e pela destinação final dos pneus inservíveis existentes. Desde a vigência da referida resolução, o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis (RECICLANIP, 2020b) já coletou e destinou adequadamente mais de 821 milhões de pneus de carros de passeio.

Neste contexto, surge a necessidade de reavaliar o descarte de pneus inservíveis tanto pela indústria de reciclagem de resíduos sólidos quanto pelo mercado que se articula em torno da coleta e da transformação de quantidades crescentes

desse resíduo. A construção civil pode participar desse processo, uma vez que o concreto é o material estrutural mais utilizado neste campo e pode conter tanto o agregado reciclado de borracha quanto a fibra metálica reciclada.

O aproveitamento de partículas de pneus inservíveis no concreto já tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores, demonstrando ser uma alternativa de disposição nobre e adequada para esses resíduos, transformando-os em um coproduto comerciável. (MARQUES, 2005; GIACOBBE, 2008; ALBUQUERQUE, 2009; GRAEFF, 2011). Assim, permite modificações benéficas nas propriedades do concreto para atendimento a requisitos específicos, como o comportamento na exposição ao fogo.

A utilização do agregado reciclado de borracha de pneus inservíveis na matriz cimentícia pode trazer benefícios no que se refere ao isolamento térmico, ao alívio de tensões internas e à redução do comportamento explosivo em temperaturas elevadas. (HERNÁNDEZ-OLIVARES; BARLUENGA, 2004; YESILATA; BULUT; TURGUT, 2011).

Apesar de existir um considerável número de aplicações para a borracha dos pneus inservíveis, pouca atenção se dá à reutilização dos outros constituintes dos pneus, tais como as fibras de aço. Fibras de aço recicladas de pneus inservíveis têm proporcionado resultados de propriedades mecânicas semelhantes às fibras de aço manufaturadas, com a vantagem de estimularem a reciclagem na engenharia civil e de reduzirem custos. (GRAEFF *et al.*, 2011).

A adição de fibras de aço no concreto, quando submetidas a temperaturas elevadas, garante menores perdas residuais das propriedades mecânicas dos concretos reforçados em relação aos concretos convencionais. (BEZERRA, 2012; MELO *et al.*, 2002; SIMONETTI *et al.*, 2019). Ainda, a inclusão das fibras de aço pode inibir a propagação de microfissuras bem como evitar os deslocamentos explosivos que ocorrem em altas temperaturas. (LAU; ANSON, 2006; LIMA, 2005).

A segurança contra incêndio é reconhecida por diversos países como uma área científica do conhecimento e como um problema que merece investimentos pesados para diminuir as perdas. (CARLO, 2008). Nesse cenário, é importante conhecer o desempenho em uso de produto ou material da construção civil, durante a sua vida útil, em exposição à ação do fogo.

O desempenho das edificações no Brasil é um tema que vem sendo amplamente discutido, principalmente após a vigência da norma de desempenho das

edificações NBR 15575. (ABNT, 2013). Dentre os diversos requisitos de segurança da norma, está a resistência ao fogo dos sistemas constituintes das edificações, tais como o de vedação vertical. (BOLINA *et al.*, 2015).

A NBR 15575 – Parte 4 (ABNT, 2013) recomenda a aplicação de ensaios experimentais laboratoriais aos sistemas de vedação vertical por meio da NBR 5628 (ABNT, 2001a) e da NBR 10636 (ABNT, 1989) para elementos com e sem função estrutural, respectivamente. Esses experimentos indicados servem para simular a ação do fogo em amostras a fim de projetar o potencial comportamento em uso quanto à resistência ao fogo. (LORENZI, 2013).

O concreto é reconhecido pela sua boa resistência em temperaturas elevadas em virtude de suas características térmicas, tais como a incombustibilidade e a baixa condutividade térmica. Além disso, o concreto não exala gases tóxicos ao ser aquecido. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No entanto, quando outros materiais são agregados ao concreto, combustíveis ou com características desconhecidas, obtém-se um novo produto que deve ser avaliado quanto ao seu desempenho ao fogo. (ONO, 2007). Conforme alertado pela autora, a inserção do agregado reciclado de borracha e das fibras metálicas recicladas extraídas de pneus inservíveis faz com que a matriz compósita do concreto necessite ser testada em relação à reação e à resistência ao fogo.

Este é um momento oportuno para a implementação desta pesquisa, tendo em vista que a segurança contra incêndio é um tema em evidência no cenário brasileiro desde as últimas catástrofes nacionais, como o incêndio na Boate Kiss, em Santa Maria, e no edifício Wilton Paes de Almeida, em São Paulo. As leis nacionais de segurança contra incêndio foram reformuladas, as normas foram atualizadas e os sistemas construtivos estão sendo revistos. (BOLINA *et al.*, 2015).

Lorenzi (2013) menciona que os ensaios experimentais de desempenho têm papel de destaque na NBR 15575 (ABNT, 2013), pois permitem que componentes, elementos e sistemas construtivos sejam avaliados, reproduzindo condições de exposição e de uso muito próximas das reais. Dada a gravidade que abrange a ocorrência de um incêndio, é desaconselhável adotar qualquer novo material sem compreender a sua resposta ao fogo.

Para esclarecer o comportamento do agregado reciclado de borracha e das fibras metálicas recicladas oriundas de pneus inservíveis inseridos no concreto

quando expostos a altas temperaturas, é evidente a necessidade de testar o desempenho e de ensaiar esses materiais compósitos ao fogo.

1.2 TEMA

O tema desta pesquisa aborda a incorporação de partículas de borracha e de fibras metálicas recicladas de pneus inservíveis em placas de vedação de concreto sob a perspectiva do comportamento quando submetidas a elevadas temperaturas.

1.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Dada a complexidade do tema abordado nesta pesquisa, para que os objetivos do trabalho fossem alcançados, foram delimitadas condições de contorno, considerando os limitantes inerentes à realização de um programa experimental estatisticamente significativo. A seguir, relacionaram-se algumas delas, que são relevantes para a grande maioria das pesquisas realizadas na área.

As condições ambientais, temperatura e umidade foram monitoradas, porém não controladas devido à carência de uma câmara de exposição ambiental específica para contemplar a moldagem das amostras e o armazenamento dos moldes de concreto, em especial as placas de vedação em tamanho real.

Alguns fatores não foram abordados neste trabalho, como intensidade e tipo de carregamento externo. Também não foi testada a variação das dimensões das placas ensaiadas ou de diferentes sistemas em função da limitação dos recursos disponíveis para a montagem e para os ensaios.

Esta pesquisa empregou agregado reciclado de borracha e fibra metálica reciclada de pneus inservíveis, mas não foi objeto deste estudo a avaliação desses materiais em relação à viabilidade de distribuição em larga escala comercial ou à quantificação do custo agregado ao valor do concreto.

Para confecção dos concretos, foi eleito um tipo de cimento, determinados tipos de agregados miúdos e graúdos e um tipo de aditivo, tendo em vista que a avaliação de múltiplos constituintes do concreto iria tornar o programa experimental extenso e oneroso.

Cabe ressaltar que a maioria dos materiais empregados é de origem local, comumente encontrados no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Portanto, futuras

comparações de resultados obtidos neste trabalho com estudos que usem materiais de outras regiões devem levar em consideração este fato.

A mesma ressalva deve ser feita acerca dos resíduos de pneus obtidos, borracha granulada e fibras metálicas, sendo empregados os materiais de um reciclador local. A empregabilidade desses materiais pode variar conforme a recicladora e conforme o tipo de pneu reciclado.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é avaliar o comportamento de placas de vedação de concreto elaboradas com material reaproveitado de pneus inservíveis, fibras metálicas recicladas e agregados reciclados de borracha quando submetidas a elevadas temperaturas no que diz respeito à reação e à resistência ao fogo.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar o desempenho dos concretos nos estados fresco e endurecido;
- b) classificar a reação e a resistência ao fogo das matrizes cimentícias produzidas;
- c) mensurar o efeito do agregado reciclado de borracha e da fibra metálica reciclada de pneus inservíveis nas características de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico de placas de vedação de concreto quando submetidos a altas temperaturas;
- d) analisar as alterações químicas microestruturais das matrizes cimentícias após exposição ao fogo.

1.5 JUSTIFICATIVA

Inicialmente, um aspecto de relevância para justificar a utilização de resíduos de pneus inservíveis no concreto são os benefícios ao meio ambiente que podem ser

obtidos pela minimização dos impactos ambientais e sociais gerados pelo descarte indevido de pneus inservíveis, pelo acúmulo deste material sem destinação, bem como pela redução da extração de agregados naturais.

Após a realização de uma intensa revisão bibliográfica referente à aplicação de agregado reciclado de borracha e de fibra metálica em concreto, foi possível partir de premissas previamente consolidadas no que diz respeito à composição, à dosagem, às características no estado fresco e ao comportamento esperado em relação às propriedades mecânicas desses concretos. Essa discussão é apresentada no capítulo 3 de forma prolongada.

Contudo, foram identificadas brechas no conhecimento sobre o desempenho desses compósitos cimentícios quando submetidos ao fogo, o que subsidiou a definição da estratégia desta pesquisa.

O Quadro 1 apresenta um cenário resumido de estudos, mostrando que o concreto com utilização de agregado reciclado de borracha é um material legitimado, sendo que trabalhos desenvolvidos abordaram desde a avaliação no estado fresco, propriedades mecânicas, uso em concretos especiais, bem como possibilidade de confecção de elementos estruturais.

Quadro 1 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem de concreto com agregado reciclado de borracha

Fonte	Objetivo da pesquisa	País
Topçu (1995)	Propriedades de concretos com borracha	Turquia
Toutanji (1996)	Uso de partículas de borracha de pneus em substituição a agregados minerais	Porto Rico
Segre (1999)	Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento	Brasil - SP
Santos (2005)	Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha com aplicação em placas pré-moldadas	Brasil - AL
Martins (2005)	Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu	Brasil - SP
Freitas (2007)	Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas	Brasil - PR
Trigo (2008)	Estudo de lajes de concreto com adição de resíduo de pneu	Brasil - SP
Giacobbe (2008)	Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto com adição de borracha de pneus	Brasil - SP
Albuquerque (2009)	Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu	Brasil - RS
Sukontasukkul (2009)	Uso de borracha para melhoria das propriedades acústicas e térmicas de painéis de concreto	Tailândia

Fonte	Objetivo da pesquisa	País
Najim e Hall (2010)	Propriedades no estado fresco e no estado endurecido de concretos convencionais e autoadensáveis com a utilização de borracha	Iraque
Fazzan (2011)	Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com resíduo de borracha de pneu	Brasil - SP
Silva Júnior (2014)	Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária em compósitos cimentícios	Brasil - RN
Noor (2014)	Avaliação da durabilidade de concretos com utilização de borracha	Japão
Guneyisi <i>et al.</i> (2014)	Investigação experimental da durabilidade de concretos com utilização de borracha	Turquia
Meherier (2016)	Investigação de propriedades mecânicas e da durabilidade de concretos com substituição de agregado miúdo por borracha triturada	Canadá

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Todavia, pesquisas sobre o uso de borracha no concreto voltadas para a qualificação do desempenho térmico e do comportamento ao fogo ainda não estão consolidadas. O Quadro 2 indica uma súmula acerca da utilização de borracha triturada oriunda de pneus descartados no concreto no que se refere a altas temperaturas.

Quadro 2 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre concreto com agregado reciclado de borracha submetido a altas temperaturas

Fonte	Objetivo da pesquisa	País	Tipo de espécimes
Hernández-Olivares e Barluenga (2004)	Desempenho ao fogo de concreto de alta resistência com agregado reciclado de borracha	Espanha	Corpos de prova cúbicos e prismáticos
Macedo e Tubino (2005)	Comportamento térmico e acústico de placas pré-moldadas com borracha de pneu	Brasil - GO	Placas ~ 1,27 x 0,50 m
Marques (2005)	Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura	Brasil - SP	Corpos de prova cilíndricos
Scuracchio, Waki e Bretas (2006)	Caracterização térmica e reológica de borracha de pneu	Brasil - SP	-
Albuquerque (2009)	Comportamento termomecânico de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu	Brasil - RS	Corpos de prova cilíndricos
Sukontasukkul (2009)	Propriedades térmicas e sonoras de painéis de concreto pré-moldado com borracha de pneu	Tailândia	Painéis de 1,0 x 1,0 m
Marques (2010)	Comportamento ao fogo de concreto com agregado reciclado de borracha	Lisboa	Corpos de prova cúbicos e cilíndricos

Fonte	Objetivo da pesquisa	País	Tipo de espécimes
Yesilata, Bulut e Turgut (2011)	Comportamento térmico de paredes exteriores de concreto com agregado reciclado de borracha	Turquia	Modelo reduzido com 1,39 x 1,10 x 0,90 m.
Correia <i>et al.</i> (2012)	Reação ao fogo do concreto fabricado com agregado de borracha reciclada – somente ASTM E1354 (ASTM, 2017)	Portugal	Corpos de prova cúbicos
Marques, Akasaki e Fioriti (2012)	Resistência mecânica de concretos com borracha de pneu submetidos à elevada temperatura	Brasil - SP	Corpos de prova cilíndricos
Arf, Abdullah e Abdulkadir (2017)	Propriedades mecânicas de concreto com borracha após exposição ao fogo	Iraque	Corpos de prova cúbicos e cilíndricos

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Nota-se que pesquisas específicas envolvendo as propriedades do concreto com resíduo de borracha de pneu submetido a altas temperaturas ainda estão em desenvolvimento tanto na esfera nacional quanto internacional. O concreto com agregado reciclado de borracha ainda não foi classificado quanto à reação e à resistência ao fogo.

É possível constatar a escassez de experimentos com elementos de concreto com agregado reciclado de borracha em escala real. A maior parte das pesquisas utilizou corpos de prova cilíndricos, prismáticos ou cúbicos e esta tese avaliou um sistema de placas de vedação com dimensão total de 3,00 x 3,13 m.

O concreto reforçado com fibra de aço é um material compósito consagrado em pesquisas nacionais e internacionais, sendo que trabalhos desenvolvidos abordaram desde a avaliação do comportamento básico do material, passando pelo controle tecnológico, os procedimentos de dosagem, a normalização até a otimização de aplicações específicas. De forma prática, é possível encontrar, no mercado brasileiro, o concreto reforçado com fibra para revestimento de túneis, pavimentos e tubos de concreto para obras de saneamento. (FIGUEIREDO, 2011).

O Quadro 3 retrata um painel de estudos acerca do concreto com utilização de fibra metálica, corroborando que o concreto com utilização desse elemento é um material sancionado e disponível para aplicação na construção civil.

Quadro 3 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a dosagem e emprego de fibras metálicas no concreto

Fonte	Objetivo da pesquisa	País
ACI (2002)	ACI 544.1R-96: Estado da arte sobre concreto reforçado com fibra	Estados Unidos

Fonte	Objetivo da pesquisa	País
Tlemat (2004)	Fibras de aço recicladas de pneus adicionadas ao concreto: ensaio, modelagem e projeto	Reino Unido
Garcez (2005)	Análise do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impactos	Brasil - RS
Van Chanh (2005)	Concreto reforçado com fibra de aço	Vietnã
Marangon (2006)	Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço	Brasil - RJ
Pasa (2007)	Análise de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos	Brasil - RS
Velasco (2008)	Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas	Brasil - RJ
ACI (2008)	ACI 544.3R-08: Guia para especificação, proporção, mistura, moldagem e acabamento de concreto reforçado com fibra de aço	Estados Unidos
Figueiredo (2011)	Concreto reforçado com fibras	Brasil - SP
Graeff (2011)	Análise da longa duração de concretos reforçados com fibras de aço recicladas para aplicação em pavimentos de concreto	Reino Unido
Quinino (2015)	Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras.	Brasil - RS
Gil (2018)	Contribuição ao estudo de dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas	Brasil - RS
Christ (2019)	Proposição de método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho com utilização de fibra de aço	Brasil - RS

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No entanto, a inserção de fibras metálicas industrializadas no concreto vem sendo estudada para mitigar os efeitos de fissuração e do deslocamento, assim como o aumento das propriedades mecânicas residuais quando submetido a altas temperaturas. O Quadro 4 apresenta um horizonte resumido de trabalhos sobre o emprego de fibra metálica no concreto submetido a altas temperaturas.

Quadro 4 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre concreto com fibra metálica submetido a altas temperaturas

Fonte	Objetivo da pesquisa	País	Tipo de espécimes
Melo <i>et al.</i> (2002)	Influência da temperatura no desempenho de concretos reforçados com fibras de aço	Brasil - MG	Corpos de prova prismáticos
Lima <i>et al.</i> (2003)	Presença de fibras de polipropileno e de aço em concretos de alto desempenho expostos a temperaturas elevadas	Brasil - RS	Corpos de prova cilíndricos

Fonte	Objetivo da pesquisa	País	Tipo de espécimes
Chen e Liu (2004)	Resistências residuais do concreto de alta resistência reforçado com fibras híbridas após a exposição a altas temperaturas	China	Corpos de prova cúbicos
Lau e Anson (2006)	Efeito de altas temperaturas no concreto de alto desempenho reforçado com fibra de aço	China	Corpos de prova cúbicos, cilíndricos e vigas de 10 x 10 x 40 cm
Colombo, Di Prisco e Felicetti (2010)	Propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibra de aço exposto a altas temperaturas	Itália	Corpos de prova prismáticos, cilíndricos e vigas de 15 x 15 x 60 cm
Bezerra (2012)	Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura	Brasil - MG	Corpos de prova prismáticos e cilíndricos
Doherty <i>et al.</i> (2012)	Deslocamento explosivo de pilares de concreto com fibras de aço e de polipropileno	Reino Unido	Pilares de 1,27 x 1,27 x 1,80 m
Guedon (2013)	Projeto e execução de elementos pré-moldados em arco de com fibra de aço para túneis	França	Placas pré-moldadas em formato de arco para túneis
Novák e Kohoutkova (2018), Goremikins <i>et al.</i> (2017)	Investigação experimental do concreto reforçado com fibra de aço sob temperatura elevada	República Tcheca	Corpos de prova cúbicos e vigas de 15 x 15 x 70 cm
Figueiredo <i>et al.</i> (2019)	Efeito do deslocamento explosivo de concretos com fibras de aço e polímero recicladas de pneus	Reino Unido	Corpos de prova cilíndricos e lajes de 10 x 22 x 50 cm
Simonetti <i>et al.</i> (2019)	Propriedades mecânicas residuais de concretos com fibra de aço reciclada de pneus após exposição a altas temperaturas	Brasil - RS	Corpos de prova cilíndricos

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Ao analisar o Quadro 4, é possível notar a carência de estudos com a fibra metálica reciclada de pneus inservíveis, sobre a validação da fibra metálica industrializada ou reciclada no concreto em relação à reação e à resistência ao fogo e de estudo sobre os elementos de concreto reforçado com fibra metálica em escala real. Da mesma forma que no Quadro 2, a maior parte das pesquisas utiliza espécimes em pequena escala.

Nos panoramas apresentados nos Quadros 2 e 4, não é constatada a verificação da normativa brasileira no que se refere à segurança contra incêndio, quesitos de reação e de resistência ao fogo, nem para o concreto com agregado de borracha reciclada nem para o concreto com fibra metálica reciclada.

Portanto, é possível notar que ainda há uma lacuna técnica e científica acerca da efetiva performance do concreto com a inserção de resíduo de pneus descartados quando submetidos a altas temperaturas, quando utilizados como placas de vedação. Diante dessas evidências, justifica-se o desenvolvimento desta tese de doutorado.

1.6 ESTRUTURA DA PESQUISA

No primeiro capítulo, será feita uma introdução à pesquisa, apresentando a contextualização do tema e a justificativa para o seu desenvolvimento. Foram enumerados o objetivo principal e os objetivos específicos, bem como as limitações da pesquisa e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, será realizada uma revisão sobre o pneu inservível, abrangendo a disponibilidade do resíduo, a problemática ambiental acerca da disposição incorreta desse material, bem como a legislação ambiental brasileira vigente sobre o tema. A definição e os componentes, o histórico e as propriedades dos pneus também foram abordados no segundo capítulo, juntamente com possíveis destinações ambientalmente corretas para os pneus descartados.

No terceiro capítulo, será discutido o comportamento do concreto e suas propriedades quando submetido a altas temperaturas, enfatizando as alterações verificadas na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto, junto com uma discussão sobre deslocamento. Nesse mesmo capítulo, foi apresentada uma revisão conceitual sobre o comportamento do concreto com a inserção de agregado reciclado de borracha e das fibras metálicas recicladas de pneus inservíveis, buscando enfatizar o desempenho em altas temperaturas.

No quarto capítulo, será relatada a etapa preliminar desta pesquisa, um programa piloto com caráter exploratório dos materiais reciclados. Foram feitas considerações com base nos resultados preliminares que influenciaram na etapa final.

No quinto capítulo, será descrito o método de pesquisa da etapa final, detalhando o procedimento experimental. Este capítulo contém a descrição dos materiais empregados, da confecção dos elementos de concreto e dos ensaios realizados.

No sexto capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados da etapa final. As constatações pertinentes foram feitas por meio de uma análise quantitativa e qualitativa dos dados coletados do programa experimental final.

No sétimo e último capítulo, serão apresentadas as considerações finais e as conclusões do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros na área, de modo a continuar o estudo do comportamento de elementos de concreto com a inserção de resíduos de pneus inseríveis.

As referências bibliográficas, que foram utilizadas como embasamento teórico sobre o tema da pesquisa, e os apêndices estão dispostos em capítulos complementares.

2 PANORAMA GERAL SOBRE PNEUS

Este capítulo apresenta um panorama geral da produção de pneus no Brasil, fazendo uma descrição da estrutura física e da composição deste elemento, material-base utilizado nesta pesquisa. Demonstra-se o problema ambiental ocasionado pela disposição incorreta deste resíduo sólido no meio ambiente, bem como possíveis formas de destinação. Também foi indicada a logística reversa de pneus usados e inservíveis, embasada pela legislação ambiental brasileira vigente, para controlar o descarte inadequado deste material.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UM PNEU

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, pela Resolução nº 258 (CONAMA, 1999), caracteriza um pneu ou pneumático como sendo todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos. A mesma resolução define o pneu inservível como um pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura, não se prestando mais à rodagem ou à reforma.

A Portaria nº 5 do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO (2000) complementa este conceito, definindo um pneu como um componente do sistema de rodagem constituído de elastômero, produtos têxteis, aço e outros materiais que, quando montado numa roda de veículo e contendo fluídos sob pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo.

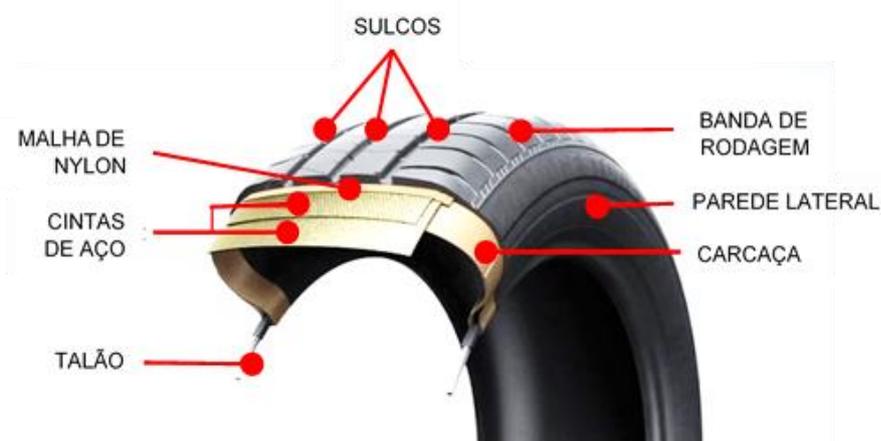
Esse item básico da composição de um veículo é utilizado para atividades desde o lazer de uma família até práticas de serviços à sociedade, como o transporte de pessoas e de carga. Para garantir a confiabilidade dos pneus dos carros de passeio, ônibus e caminhões, os materiais responsáveis pela produção dos pneus passam pela certificação compulsória do INMETRO. Ainda, os pneus contam com a certificação da União Europeia e do Departamento de Transportes dos Estados Unidos, condição essencial para a exportação. (ANIP, 2020).

Segundo Bridgestone (2020), o pneu é o único ponto de união entre o veículo e o solo, e mesmo com poucos centímetros quadrados de contato deve cumprir alguns requisitos de funcionalidade, como suportar o peso do veículo e resistir às

sobrecargas dinâmicas, garantir a rodagem do veículo de forma mais segura, guiar o veículo com precisão em qualquer tipo de solo e condição climática, amortecer as irregularidades da estrada, assegurar conforto ao condutor e aos passageiros e manter o melhor nível de performance durante a sua vida útil.

A Figura 1 apresenta um pneu com os elementos que o compõem. Todos os itens têm fundamental importância na fabricação dos pneus, com destaque para banda de rodagem, paredes laterais, talão e cinta de aço, que originam os resíduos utilizados nesta pesquisa.

Figura 1 – Pneu de passeio em corte e elementos constituintes



Fonte: Adaptado de Bridgestone (2020).

A Portaria nº 5 do INMETRO (2000), o Sindipneus (2012) e o Bridgestone (2020) adotam as seguintes definições em relação aos principais elementos componentes dos pneus:

- a) banda de rodagem:** parte do pneu que entra em contato com o solo, constituída por um composto especial de borracha que oferece grande resistência ao desgaste, formada por blocos (as partes cheias) e sulcos (partes vazias);
- b) carcaça:** estrutura resistente do pneu constituída de uma ou mais camadas sobrepostas de lonas de poliéster, *nylon* ou aço; tem a função de reter o ar sob pressão para suportar o peso total do veículo;
- c) cintas de aço:** são feixes de cintas colados sobrepostos de maneira a suportarem as cargas em movimento, sendo que a sua principal finalidade é garantir maior área de contato e menor pressão sobre o solo;

- d) malha de nylon:** malha de cordões de *nylon* embutidos nas camadas de borracha ao longo de toda circunferência do pneu com a função de reduzir o calor provocado pelo atrito;
- e) parede lateral:** são as laterais dos pneus desenvolvidas por compostos de borrachas com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga;
- f) sulcos:** são responsáveis pela drenagem de água e de lama;
- g) talão:** partes do pneumático constituídas internamente de arames de aço de grande resistência, em forma de anéis, recobertas de lonas e elastômeros especiais que lhes atribuem forma apropriada para o correto assentamento do pneu na roda, mantendo o pneu acoplado no aro.

Em relação à composição, o pneu é uma combinação de processos e de matérias-primas como borracha natural, borracha sintética, negro de fumo derivado do petróleo, cabos de aço, cordonéis de aço ou náilon e produtos químicos como o enxofre. A Tabela 1 indica a composição usual para pneus radiais para automóveis, já a Tabela 2 indica a constituição química média de um pneu.

Tabela 1 – Composição geral de um pneu radial para automóvel

Material	Quantidade aproximada (%)
Borracha sintética	27,0
Borracha natural	14,0
Negro de fumo e sílica	22,0
Reforço metálico	15,0
Óleo	10,0
Produtos químicos	5,0
Fibra orgânica	5,0
Outros	2,0

Fonte: Adaptado de BNDES (1998) e Gursel, Akca e Sen (2018).

Tabela 2 – Constituição química média de um pneu

Elemento ou composto	Quantidade aproximada (%)
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Fonte: Paraná (2005, p. 5).

Sobre a composição geral de um pneu, o Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback (SINPEC, 2020) explica que a parcela de utilização de cada um desses itens varia de acordo com o uso que será dado ao produto final. Prova disso é a diferença da composição química entre os pneus destinados aos automóveis de passeio e os pneus de caminhões de carga.

O sindicato exemplifica que, no pneu de passeio, a borracha se classifica em 27% sintética e em 14% natural. Já nos pneus de caminhões, a quantidade de borracha natural está em torno de 30%. Esta diferença ocorre em razão de que os pneus de automóveis são projetados para suportar altas velocidades, enquanto os pneus de carga são fabricados de acordo com o peso que deverão sustentar.

A seguir, foram descritos três componentes essenciais dos pneus.

2.1.1 Borracha

A borracha é o principal componente dos pneus, representando 41% da massa total, e pode ser classificada em 2 tipos, natural ou sintética. Avaliando o consumo de borracha, o Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES, 1998) afirma que a borracha natural representa 33% do consumo mundial, enquanto que a borracha sintética representa 67%.

A borracha natural (NR – *natural rubber*) é o único elastômero extraído de fonte perene, a seringueira *Hevea brasilienses*. As demais borrachas sintéticas são obtidas, em sua maioria, de derivados do petróleo. A NR é a mais elástica, chegando a atingir alongamento de 900% em relação ao comprimento inicial. No entanto, não resiste ao ozônio, à radiação solar e ao intemperismo. (GRISON, 2010). A NR ainda é utilizada em larga escala, pois tem uma combinação excepcional de propriedades desejáveis.

Conforme Albuquerque (2009), a borracha sintética dos pneus é composta basicamente por um polímero elastomérico que foi submetido a diversos processos termoquímicos até adquirir as características desejáveis de resistência e durabilidade requeridas para sua aplicação final.

Callister Júnior e Rethwisch (2012) definem os elastômeros como materiais poliméricos que podem sofrer deformações elásticas grandes e reversíveis, assemelhando-se à elasticidade de uma borracha.

O elastômero mais importante é o de estireno-butadieno (SBR - *styrene-butadiene rubber*), usado na maior parte dos pneus. O SBR é compatível com a maior

parte dos elastômeros e é bastante parecido com a NR, sendo mais homogêneo. A melhoria das propriedades físico-químicas é obtida com a adição de cargas reforçadoras, como o negro de fumo. (GRISON, 2010).

Dos 15 milhões de toneladas de borracha (natural e sintética) consumidas anualmente no mundo, aproximadamente 9 milhões se destinam aos pneumáticos, o que representa 60% do total. Essa situação se verifica também no Brasil, onde mais de 50% do total de borracha consumida é utilizada na indústria de pneumáticos. A participação da NR neste total é de 25%, enquanto a borracha sintética representa 75%. (BNDES, 1998).

2.1.2 Negro de fumo

A Associação Internacional do Negro de Fumo (AINF, 2016) explica que o negro de fumo é o carbono puro sob a forma de partículas coloidais que são produzidas pela combustão parcial ou decomposição térmica de hidrocarbonetos líquidos ou gasosos em condições controladas. O negro de carbono, como também é conhecido, é proveniente da combustão incompleta de derivados do petróleo.

A aparência física do negro de fumo é a de um pó preto ou granulado fino, com tamanho de partícula de 11 a 19 nm. A sua utilização em pneus, borracha, materiais plásticos, tintas de impressão e revestimentos está relacionada com propriedades da área específica de superfície, o tamanho e a estrutura da partícula, condutividade e cor. (AINF, 2016; GRISON, 2010).

Quando o negro de fumo é adicionado à borracha vulcanizada, é aumentada a resistência à tração, à compressão, ao impacto e ao desgaste por abrasão do artefato a ser fabricado. (GRISON, 2010). Essa propriedade faz do negro de fumo um componente essencial para a indústria de pneumáticos, que consome 70% de sua produção mundial. (BNDES, 1998).

Observa-se que o negro de fumo, importante componente para aumentar a resistência mecânica dos pneus, também é responsável pelos maiores problemas ambientais enfrentados pela indústria de pneumáticos, pois dificulta a desvulcanização e a reciclagem dos pneus usados. (BNDES, 1998).

Cabe ressaltar que a vulcanização é um processo que confere resistência e dureza para a conformação da borracha, utilizando o enxofre como principal agente e

elemento de ligação entre macromoléculas, formando uma ligação permanente entre o enxofre e o carbono. (GRISON, 2010).

2.1.3 Aço

O aço usado nos pneus tem duas funções distintas: cordões de aço, no diâmetro externo do pneu constituindo os talões, ou trama elaborada com fibras de aço presente nas cintas. As principais propriedades mecânicas que regem um fio ou cordão de aço são a sua resistência à tração e alta aderência à borracha, sendo que ambos os materiais são elaborados com alto teor de carbono. (BELGO MINEIRA BEKAERT, 2020).

Fibras e cordões de aço são os principais materiais de reforço e de suporte de carga no pneu. Apesar de o fio de aço usado nos pneus ter várias configurações, todos são revestidos de latão para fornecer cordões de diferentes características, dependendo da sua aplicação. O cordão de aço do pneu é fabricado a partir de um aço de alta qualidade, o que é necessário devido às exigências de desempenho e segurança a que os pneus estão sujeitos. (RODGERS; WADDELL, 2005).

O aço usado pela indústria de pneus é o fio máquina categoria ASTM 1070 e possui resistência à tração nominal de 2.750 MPa, sendo que um típico pneu de automóvel, aro 14, contém cerca de 0,90 kg de aço. (PEHLKEN; ESSADIQI, 2005). A Tabela 3 apresenta a análise dos aditivos utilizados na composição típica dos cordões e das cintas de aço dos pneus.

Tabela 3 – Aditivos químicos utilizados na composição típica do aço de pneus

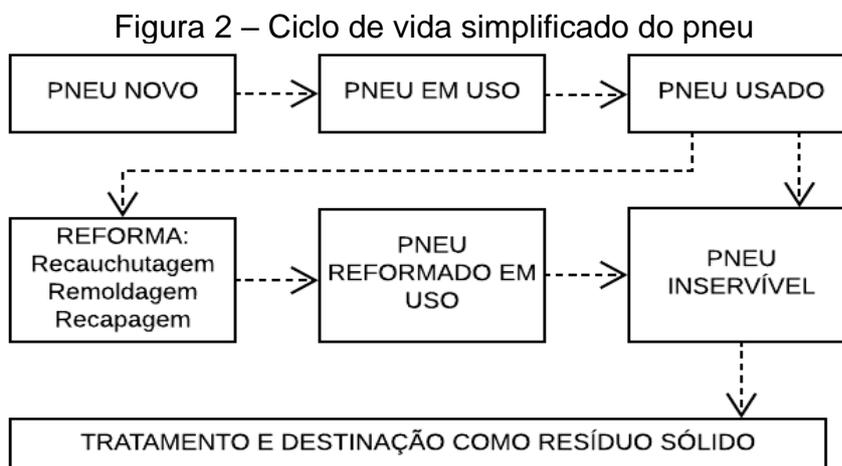
Elemento	Proporção dos elementos	
	Cordão de aço	Cintas de aço
Carbono	0,67 – 0,73%	0,60% mín.
Manganês	0,40 – 0,70%	0,40 – 0,70%
Silício	0,15 – 0,03%	0,15 – 0,30%
Fósforo	0,03% máx.	0,04% máx.
Enxofre	0,03% máx.	0,04% máx.
Cobre	Traços	Traços
Cromo	Traços	Traços
Níquel	Traços	Traços
Revestimento	66% cobre, 34% zinco	98% latão, 2% lata

Fonte: Pehlken e Essadiqi (2005, p. 7).

A análise experimental de fibras de aço recicladas de pneu indica que a resistência à tração do aço reciclado é de 2.000 MPa. (GRAEFF, 2011). Outra característica pertinente é temperatura de derretimento das fibras de aço recicladas, sendo que a EUROREC (2018) indica a faixa de 1.369 °C a 1.704 °C.

2.2 RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS

O ciclo de vida do pneu consiste na extração de matéria-prima, produção, consumo, coleta dos pneus descartados e gerenciamento da destinação do resíduo. A Figura 2 representa de forma esquemática o ciclo de vida do pneu a partir da etapa de produção.



Fonte: Adaptado de Secretariat Basel Convention (1999).

A Portaria nº 554 do INMETRO (2015) regula a qualidade para a reforma de pneus, definindo itens de cumprimento obrigatório referentes à segurança deste produto. A referida portaria define pneu novo como aquele que não sofreu qualquer uso, e pneu usado o que foi submetido a qualquer tipo de uso ou desgaste. Já o pneu inservível, como mencionado em 2.1, é o pneu que apresente danos irreparáveis em sua estrutura.

O número máximo de consertos e reparos para que um pneu possa ser reformado deve estar de acordo com o estabelecido na Portaria nº 554 do INMETRO. (INMETRO, 2015). Por exemplo, o número máximo de reformas para pneus diagonais para automóveis e comerciais leves é igual a três. Desta forma, o pneu só retorna à sua cadeia mediante reutilização pela reforma. Este retorno ao ciclo fica bastante

limitado, dificultando a reutilização do pneu com o mesmo fim para o qual foi produzido.

Uma vez que um pneu tenha sido permanentemente removido de um veículo, sem a possibilidade de ser devolvido à rodagem, ele se torna um elemento a ser descartado. A reciclagem se torna uma excelente opção para a gestão sustentável de pneus inservíveis, pois um resíduo é transformado em uma matéria-prima que pode ser reintegrada ao fluxo econômico como recurso para substituir o uso de recursos virgens. (SHULMAN, 2004).

Os tratamentos e tecnologias existentes não tentam retornar a borracha ao seu composto polimérico de origem. Silva (2015) explica que a desvulcanização da borracha ocasiona a quebra de ligações estruturais e perdas de propriedades do polímero, gerando um material de qualidade muito inferior à do material de origem.

O tratamento que os pneus terão durante a reciclagem é um método especializado de processá-los para alcançar um resultado especificado. Por exemplo, a redução de tamanho é um tratamento projetado para reduzir um pneu em pedaços menores para os quais uma de várias tecnologias diferentes possa ser usada. (SHULMAN, 2004).

Há quatro níveis de tratamentos para os pneus inservíveis conforme as suas funções, que se tornam mais complexas à medida que progredem em níveis sucessivos. O Quadro 5 resume as categorias de tratamentos para reciclagem de pneus.

Quadro 5 – Categorias de tratamentos para reciclagem de pneus

Categoria	Descrição	Exemplo
Reciclagem primária	Destruição mecânica ou física de partes do pneu	Remoção do cordão, cortes
Reciclagem secundária	Separação dos elementos do pneu para segregar os componentes principais	Separação da borracha, dos metais e dos têxteis
Reciclagem terciária	Processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos	Pirólise e desvulcanização
Reciclagem quaternária	Processo tecnológico de recuperação de energia por resíduos poliméricos	Incineração controlada

Fonte: Adaptado de Spinacé e Paoli (2005) e Shulman (2004).

Os materiais reciclados utilizados nesta pesquisa, como abordado nos itens 4.1 e 5.1, são oriundos de pneus inservíveis e passaram pelas etapas primária e secundária descritas no Quadro 5. Para a obtenção do agregado reciclado de

borracha, o primeiro passo consiste na trituração dos pneus inservíveis por um processo mecânico, usando um triturador com jogo de facas até se obter pedaços de borracha em diferentes granulometrias.

Nos moinhos de trituração, estão acopladas peneiras vibratórias para selecionar e classificar as partículas conforme a dimensão máxima. Outra forma de moagem dos pneus é a criogenia, congelando os pneus com nitrogênio líquido e triturando-os em seguida.

Após a trituração do pneu, as fibras de aço são destacadas da borracha e coletadas por meio de ímãs. Resíduos têxteis e outras impurezas são removidas das fibras de aço ainda na usina recicladora.

Pode-se citar, no ramo da construção civil, algumas aplicações já consolidadas, como o uso de partículas de borracha em argamassas (CANOVA; BERGAMSCO; DE ANGELIS NETO, 2015; CINTRA, 2013; MENEGUINI, 2003), muros de contenção e estabilização executados com pneus inteiros (SIEIRA *et al.*, 2001; SOUZA, 2002), pavimentação de pistas com incorporação de borracha ao concreto asfáltico (DIAS, 2005), utilização de lascas de pneus como substituto de brita calcária em aterros sanitários (GOMES, 2009) e placas pré-moldadas de concreto com incorporação de borracha. (MACEDO; TUBINO, 2005; RODRIGUEZ; LÓPEZ; VAZ, 2006; SANTOS, 2005).

Mesmo assim, centros de pesquisa, organizações não governamentais e fabricantes de pneus aportam investimentos em novas alternativas para o uso ambientalmente adequado aos pneus inservíveis.

O pó de borracha tem aplicações como aditivo para asfalto para pavimentação de rodovias, pois aumenta a durabilidade da pista de rolamento, como suporte de grama sintética em quadras esportivas, como carga em composição de borracha e como matéria-prima para a produção de regenerado. (GRISON, 2010).

A fabricação de solos esportivos com compostos de borracha triturada tem um custo muito inferior ao composto sintético utilizado normalmente para pisos esportivos, além de trazer uma maior flexibilidade e permeabilidade. Nos pisos esportivos, a borracha triturada fica sob a camada ou na superfície do próprio revestimento. (GOBBI, 2002).

O pneu é uma excelente fonte alternativa de combustível. (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). Isso pode ser verificado comparando-se o valor do poder calorífico do pneu (7.667 kcal/kg) com o gás natural (620 kcal/kg), por exemplo.

O uso de pneumáticos inservíveis na construção de recifes artificiais é uma alternativa interessante de destinação. Essa técnica consiste em unir os pneus inservíveis entre si, assim como as unidades mínimas e os módulos recifais, com cordas trançadas de poliéster de 16 mm de espessura. O estudo mostrou que foi possível estabelecer uma proposta estrutural de recife com resistência e estabilidade adequadas para sustentar espécies marítimas incrustantes e agregadas. (QUINTERO, 2009).

Giacobbe e Figueiredo (2008) também mencionam o uso de pneus inteiros como barreiras antichoque em estradas com o intuito de amortecer impactos, e o uso de pneu triturado para a fabricação de tapetes para automóveis. Outros artefatos de borracha que podem ser encontrados no mercado são saltos e solas de sapatos, rodas domésticos, muros de tiro ao alvo, dentre outros exemplos.

2.3 PRODUÇÃO E COLETA DE PNEUS INSERVÍVEIS NO BRASIL

Os dados sobre a produção de pneus no Brasil são indicados na Tabela 4 conforme as categorias de fabricação, nos anos de 2012 a 2016. Observa-se que a produção anual de pneus de passeio, de moto e de camioneta somam mais de 85% da produção de pneus novos do país.

Tabela 4 – Produção de novos pneus no Brasil de 2012 a 2016

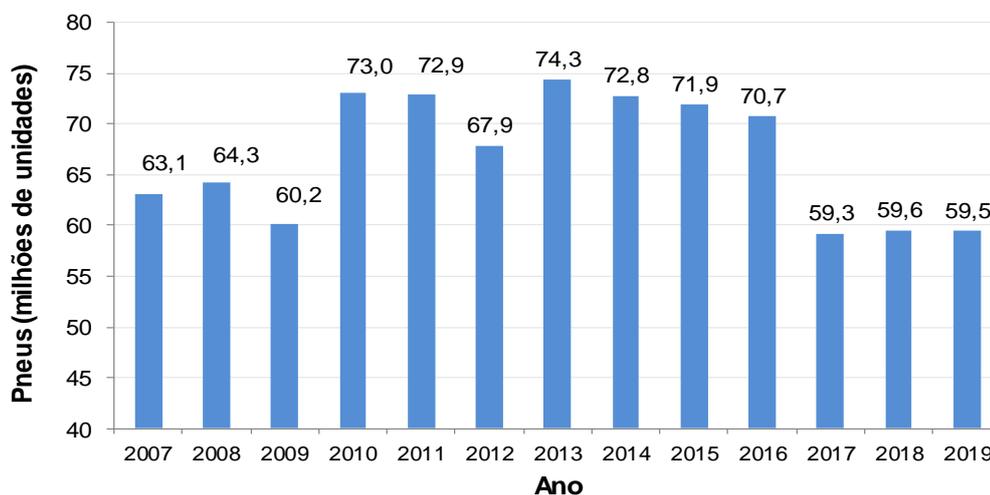
Produção por categoria (em milhões de unidade)	Ano				
	2012	2013	2014	2015	2016
Passeio	30,41	32,55	33,27	37,40	36,58
Moto	14,52	15,04	15,52	14,61	12,89
Camioneta	8,27	9,90	8,86	8,84	10,01
Carga	7,14	8,23	7,89	6,83	7,43
Industrial	1,36	2,07	0,15	0,12	0,05
Agrícola	0,81	0,93	0,87	0,72	0,80
<i>Off the road</i>	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11
Avião	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00
Totais	62,67	68,87	66,73	68,63	67,87

Fonte: Adaptado de ANIP (2016).

O Gráfico 1 indica a representação gráfica de vendas totais de pneus nos últimos anos. Observa-se que a venda de pneus no Brasil cresceu cerca de 12% entre 2007 e 2016. No entanto, o Gráfico 1 indica desaceleração de vendas entre 2017 e

2019, mas sempre superando o patamar de 59 milhões de unidades por ano. Os valores de vendas totais são compostos pelo número de pneus produzidos no Brasil e pneus importados para o país.

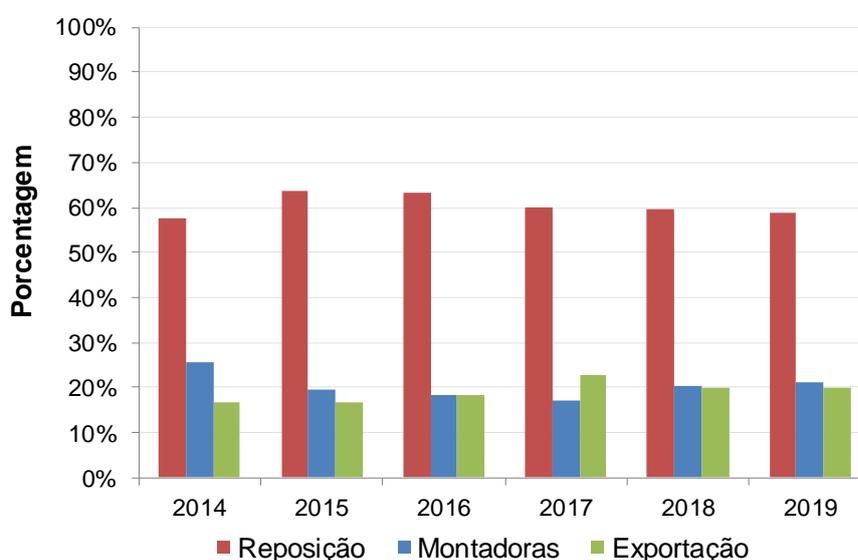
Gráfico 1 – Vendas totais de pneus no Brasil entre 2007 e 2019



Fonte: Adaptado de ANIP (2020).

A finalidade de vendas dos pneus nos anos entre 2014 e 2019 é apresentada no Gráfico 2, demonstrando que os pneus vendidos são substituídos em reposição, empregados por montadoras de automóveis ou exportados do país. Observa-se que cerca de 60% das unidades vendidas anualmente é utilizada para reposição de pneus já desgastados, mostrando o grande potencial de pneus pós-uso acumulados por ano.

Gráfico 2 – Canais de vendas totais de pneus no Brasil entre 2014 e 2019



Fonte: Adaptado de ANIP (2020).

O modal rodoviário tem sido a principal alternativa para a movimentação de pessoas e de bens no Brasil, representa 61,1% da matriz brasileira de transportes, sendo o principal responsável pela integração de todo o sistema de transporte. (CNT, 2019). A infraestrutura brasileira para o transporte de cargas no subsetor rodoviário é mais um fator que propicia o desgaste intensificado de pneus e o acúmulo deste material na condição pós-uso.

A Pesquisa de Rodovias realizada em 2019 pela Confederação Nacional de Transportes analisou a malha rodoviária sob responsabilidade federal e estadual, excluídos os trechos concedidos à operação privada. A pesquisa indicou que 59% do total avaliado apresenta algum tipo de deficiência e está classificado como regular, ruim ou péssimo (Tabela 5).

Tabela 5 – Classificação do estado geral de rodovias públicas

Estado geral	Extensão avaliada (km)	Percentual (%)
Ótimo	12.951	11,9
Bom	31.714	29,1
Regular	37.628	34,6
Ruim	19.039	17,5
Péssimo	7.531	6,9
Totais	108.863	100,0

Fonte: CNT (2019, p. 73).

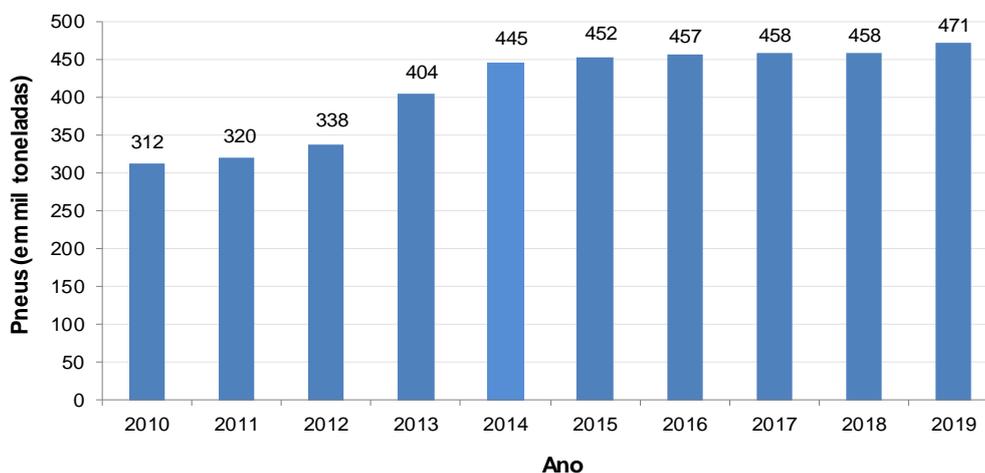
A Tabela 5 indica que mais da metade das rodovias brasileiras não possui adequadas condições de segurança e de desempenho. Os defeitos e as irregularidades na condição da superfície impactam diretamente os custos operacionais em virtude dos maiores gastos com a manutenção dos veículos, com consumo de combustível e com avarias nos pneus. (CNT, 2019).

A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), fundada em 1960, representa a indústria de pneus e câmaras de ar instalada no Brasil. Em março de 2007, a ANIP criou a Reciclanip, voltada para a coleta e destinação de pneus inservíveis no país. Originária do Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, a Reciclanip é considerada uma das principais iniciativas na área de pós-consumo da indústria brasileira por reunir mais de 1.000 pontos de coleta no Brasil.

O programa teve início em 1999 e, até 2017, foram recolhidos e destinados 4,5 milhões de toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 916 milhões de pneus de

passaio. (RECICLANIP, 2020a). No Gráfico 3, é possível visualizar a evolução da coleta de pneus inservíveis entre os anos de 2010 e 2019.

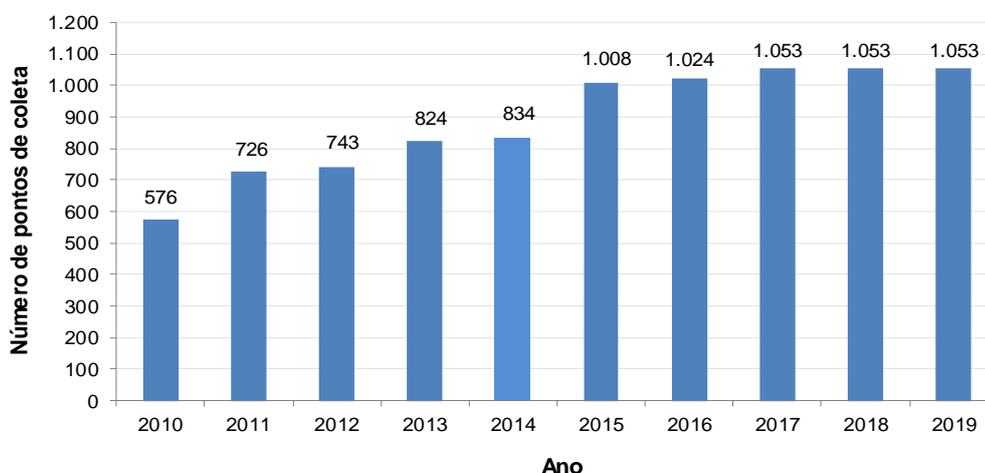
Gráfico 3 – Número de pneus coletados e destinados no Brasil entre 2010 e 2019



Fonte: Reciclanip (2020a).

O aumento do número de pneus coletados e destinados está ligado à ampliação do número de pontos de coleta de pneus por meio do Programa de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis realizado pela Reciclanip. Conforme mostra o Gráfico 4, em 2004, a Reciclanip encerrou o ano com 85 pontos de coleta de pneus, enquanto que em 2017 foram contabilizados 1.053 pontos, um expressivo aumento.

Gráfico 4 – Ampliação dos pontos de coleta de pneus inservíveis no Brasil



Fonte: Reciclanip (2020b).

Outra entidade de destaque é a Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas (AREBOP), que reúne as recicladoras do país. A missão dessa associação é reunir as empresas cuja atividade principal é a reciclagem de pneus e ou de artefatos de borracha. Também colabora com os órgãos governamentais, atuando tecnicamente e de forma consultiva para o efetivo cumprimento da legislação em vigor.

A produção de pneus iniciou no Brasil em 1936, com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha, e a primeira legislação sobre o descarte de pneus entrou em vigor em 1999, com a Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. (CONAMA, 1999). Desde o início de sua fabricação até a sua regulamentação, 63 anos decorridos, não foi possível calcular o número de pneus descartados de forma incorreta e sem destinação adequada.

2.4 PROBLEMÁTICA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Os pneus possuem lenta degradação no meio ambiente, não havendo determinação de tempo para que esta decomposição ocorra. Considerando que o pneu é um material termorrígido, ao ser disposto na natureza, pode levar mais de 600 anos para se degradar. (GRIPPI, 2006). O Quadro 6 compara o tempo de degradação de diversos materiais, mostrando que a indeterminação do tempo de degradação dos pneus causa preocupação quando disposto incorretamente no meio ambiente.

Quadro 6 – Tempo de degradação de diversos materiais

Material	Tempo de degradação
Casca de frutas	3 meses
Chiclete	5 anos
Copo de plástico	de 200 a 450 anos
Embalagens de papel	de 1 a 4 meses
Fralda descartável	600 anos
Garrafas de plástico	mais de 500 anos
Guardanapos de papel	3 meses
Jornais	de 2 a 6 semanas
Latas de alumínio	de 100 a 500 anos
Madeira pintada	13 anos
Nylon	de 30 a 40 anos
Palito de fósforo	2 anos
Pano	de 6 a 12 meses
Pilhas e baterias	de 100 a 500 anos

Material	Tempo de degradação
Pneus	600 anos ou mais
Pontas de cigarro	2 anos
Tampa de garrafa	de 100 a 500 anos
Vidro	Indeterminado

Fonte: Adaptado de Grippi (2006).

Durante seu processamento, a borracha presente nos pneus sofre uma mudança em suas características originais, tornando-a apta às necessidades de utilização, porém com dificuldades de reversibilidade. (GOBBI, 2002).

Os pneus inservíveis descartados de forma inadequada contribuem para entupimentos de redes de águas pluviais e enchentes, além da poluição de rios, e ocupam um enorme volume nos aterros sanitários. (TORNELLI, 2016). Em aterros sanitários, os pneus absorvem os gases que são liberados pela decomposição dos outros resíduos, inchando e podendo até estourar, o que prejudica a cobertura dos aterros, além de ocupar uma área considerável pela sua própria forma. (MOTTA, 2008).

Quando esse material é compactado devido ao acúmulo de gases em seu interior, os pneus tendem a emergir para a superfície rompendo a camada de cobertura do aterro. O rompimento dessa camada compactada de cobertura permite a saída de gases acumulados e possibilita a entrada de água da chuva, de insetos e de roedores. (BLUMENTHAL, 1993).

Tornelli (2016) informa que os pneus são recipientes bastante propícios para o desenvolvimento do mosquito *Aedes aegypti* por acumularem a água das chuvas, como as garrafas e vasos de plantas. O *Aedes aegypti* é o responsável não só pela transmissão do vírus da dengue, mas também da Zika e da Chikungunya. A Figura 3 mostra pneus inservíveis, que são criadouros e abrigo para vetores de diversas doenças.

Figura 3 – Aterro de pneus inservíveis em picos, Piauí, Brasil



Fonte: Portal o Dia (2016).

Conforme Blumenthal (1993), os pneus acumulados formam depósitos que armazenam grande quantidade de líquido, já que não permitem alta taxa de evaporação de água. Pneus acumulados ao ar livre absorvem a luz solar, criando um ambiente quente e estável dentro da pilha. Essas condições de umidade e temperatura são ideais para a reprodução de mosquitos. Como não existem predadores naturais de mosquitos nas pilhas de pneus, ocorre o aumento populacional dessa espécie.

Os criadouros preferenciais para *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, vetores do vírus da dengue, são os recipientes artificiais como latas, vidros, vasos de cemitérios, reservatórios e pneus. Dentre os criadouros artificiais, onde ambas as espécies são encontradas, os pneus têm merecido atenção da vigilância epidemiológica por apresentarem criação relevante desses mosquitos. Honório e Oliveira (2001) evidenciam a presença e reprodução de *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* nos pneus usados como depósito artificial, os quais contribuem para a frequência anual de adultos desses vetores de dengue.

Durante o transporte dos pneus, tanto do depósito para a disposição final quanto em operações comerciais de entrega ou de importação, os pneumáticos podem tornar-se dissipadores de doenças, permitindo a dispersão de diferentes espécies em diferentes regiões.

Em caso de incêndio, quando os pneus são estocados em grande quantidade, existe a dificuldade de se controlar a dissipação de chamas. A Figura 4 mostra um

incêndio em depósito de pneus em Uberaba – Minas Gerais, Brasil – que destruiu, aproximadamente, 100 toneladas de borracha em junho de 2011.

Figura 4 – Incêndio em depósito de pneus em Uberaba, Minas Gerais, Brasil



Fonte: G1 (2011).

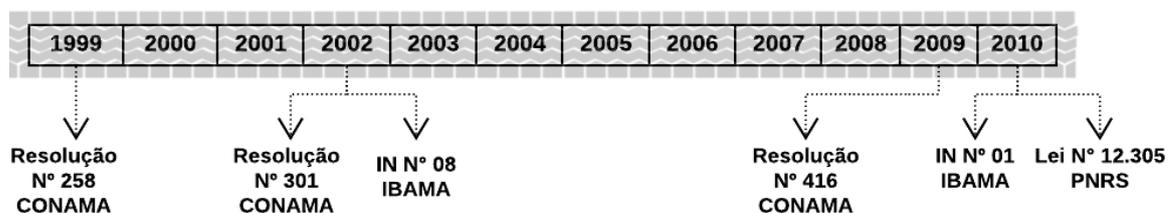
A queima de pneus ao ar livre gera vários produtos de combustão incompleta que são nocivos à saúde. Essas emissões são extremamente tóxicas e, como resultado da queima, há liberação de poluentes como monóxido de carbono, compostos químicos com enxofre, compostos orgânicos voláteis, hidrocarbonetos poliaromáticos, dioxinas, furanos, ácido clorídrico, benzeno e vanádio. Também podem ser liberados, durante a queima, metais pesados como arsênio, cádmio, níquel, zinco, mercúrio e cromo. (LAGARINHOS, 2004).

Lagarinhos (2004) explica que, no local da queima de pneus, permanecem as cinzas e a fração líquida composta por hidrocarbonetos mais pesados, responsáveis pela contaminação do solo, águas superficiais e lençol freático.

2.5 REGULAMENTAÇÃO BRASILEIRA SOBRE PNEUS INSERVÍVEIS

As primeiras regulamentações brasileiras envolvendo pneus surgiram na década de 90 como normas voltadas para prevenir a geração de resíduos de pneus. A Figura 5 apresenta uma linha do tempo com a sequência cronológica de vigência de normativas acerca da legislação ambiental brasileira sobre pneus inservíveis.

Figura 5 – Cronologia da legislação ambiental brasileira sobre pneus inservíveis



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em 1999, o CONAMA colocou em vigor a primeira resolução, nº 258 de 26 de agosto (CONAMA, 1999), definindo que fabricantes e importadores de pneus passam a ter a obrigação de destinar corretamente aos pneus inservíveis, conforme proporção determinada pela referida resolução.

A Resolução nº 301 do CONAMA (2002) altera e inclui determinados dispositivos da Resolução nº 258 do CONAMA (CONAMA, 1999), modificando os prazos e quantidades para coleta e destinação final de pneus inservíveis, visando a sua melhor aplicação.

Em 30 de setembro de 2009, entrou em vigor a Resolução nº 416 do CONAMA (2009), a qual estipulou que fabricantes e importadores de pneus são responsáveis pela coleta e destinação final de 100% dos pneus inservíveis do território nacional.

Para complementação da Resolução nº 416 do CONAMA (2009), foi efetivada a Instrução Normativa nº 1 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2010). Anteriormente, este mesmo órgão implementou a Instrução Normativa nº 8 (CONAMA, 2002), exigindo o cadastramento de todos os comerciantes do setor de pneumáticos.

A Instrução Normativa nº 1 visa instituir, no âmbito do IBAMA (2010), os procedimentos necessários ao cumprimento da Resolução nº 416 do CONAMA (2009) pelos fabricantes e importadores de pneus novos, sobre coleta e destinação final de pneus inservíveis. Além disso, determina fórmula de cálculo da meta de destinação de pneus inservíveis por empresas fabricantes e importadoras.

Em 2010, foi sancionada a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual vem ratificar a Resolução nº 416 do CONAMA (2009), reforçando a obrigatoriedade dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pneus a descartarem os pneus inservíveis adequadamente.

A seguir, são analisadas com especificidade as legislações brasileiras de maior impacto na logística reversa de pneus inservíveis.

2.5.1 Resolução nº 258 de 26 de agosto de 1999 (CONAMA)

Publicada no Diário Oficial da União nº 230, em 2 de dezembro de 1999, a Resolução nº 258 editada pelo CONAMA, do Ministério do Meio Ambiente, considera que os pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, o que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. Essa resolução versa sobre a necessidade de dar destinação final de forma ambientalmente adequada e segura aos pneumáticos inservíveis. (CONAMA, 1999).

A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1999) determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional na proporção definida relativamente às quantidades fabricadas e/ou importadas, conforme descrito no Quadro 7.

Quadro 7 – Proporção de destinação final aos pneus inservíveis

Data de validade	Proporção de destinação final
1º de janeiro de 2002	Para cada quatro pneus novos fabricados no país ou importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível
1º de janeiro de 2003	Para cada dois pneus novos fabricados no país ou importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível
1º de janeiro de 2004	Para cada um pneu novo fabricado no país ou importado, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a um pneu inservível
1º de janeiro de 2005	Para cada quatro pneus novos fabricados no país ou importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis

Fonte: Adaptado de CONAMA (1999).

As empresas fabricantes de pneumáticos devem, a partir de 1º de janeiro de 2002, comprovar junto ao IBAMA, anualmente, a destinação final de forma ambientalmente adequada das quantidades de pneus inservíveis estabelecidas nesta resolução, correspondentes às quantidades fabricadas.

A partir da data de publicação dessa resolução, fica proibida a destinação final inadequada de pneumáticos inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços e a queima a céu aberto.

Os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis a serem localizadas e instaladas de acordo com as normas ambientais e demais normas vigentes para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada.

Desta forma, a Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 1999) inaugurou no Brasil a gestão ambiental da logística reversa para o setor de pneus, mitigando os efeitos negativos de aumento do passivo ambiental do pneu ao final de seu ciclo de vida.

2.5.2 Resolução nº 416 de 30 de setembro de 2009 (CONAMA)

Publicada no Diário Oficial da União nº 188, em 1º de outubro de 2009, a Resolução nº 416 editada pelo CONAMA, do Ministério do Meio Ambiente, dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada e dá outras providências, determinando regras para a destinação final de carcaças inservíveis de pneus, as quais incidem e devem ser cumpridas por fabricantes e por importadores. (CONAMA, 2009).

Segundo essa resolução, os fabricantes e os importadores de pneus novos, com peso unitário superior a dois quilos, ficam obrigados a coletar e a dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Essa ação é fruto da implementação da logística reversa. A contratação de empresa para coleta de pneus pelo fabricante ou importador não os exime da responsabilidade pelo cumprimento das obrigações.

De acordo com a referida resolução, para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível. A nova resolução coloca como desafio aos fabricantes e importadores a obrigação de dar destinação a 100% dos pneus que entram no mercado de reposição. (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2013).

Os fabricantes, importadores, reformadores e os destinadores de pneus inservíveis deverão inscrever-se no Cadastro Técnico Federal (CTF) junto ao IBAMA, conforme já exigido pela Instrução Normativa nº 8 do IBAMA (2002).

Os fabricantes e importadores de pneus novos deverão declarar ao IBAMA a destinação adequada dos pneus inservíveis, cujo descumprimento acarretará a suspensão da liberação de importação. Os destinadores deverão comprovar

periodicamente a destinação dos pneus inservíveis, devidamente licenciada pelo órgão ambiental competente.

Os fabricantes e os importadores de pneus novos deverão implementar pontos de coleta de pneus usados, podendo envolver pontos de comercialização de pneus, municípios, borracheiros e outros. Podem efetuar a destinação adequada dos pneus inservíveis sob sua responsabilidade em instalações próprias ou mediante contratação de serviços especializados de terceiros. Os fabricantes e importadores de pneus novos deverão elaborar um plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação de pneus inservíveis.

É vedada, pela resolução mencionada, a destinação final de pneus usados que ainda se prestam para processos de reforma. Também é vedada a disposição final de pneus no meio ambiente, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto. O armazenamento temporário de pneus deve garantir as condições necessárias à prevenção dos danos ambientais e de saúde pública. É proibido o armazenamento de pneus a céu aberto.

Após a Resolução nº 416 do CONAMA (2009), não houve novas alterações nas metas para a reciclagem de pneus inservíveis pelos fabricantes e importadores no Brasil. O Quadro 8 resume as metas para a reciclagem de pneus a serem atendidas por fabricantes e por importadores desse insumo de 2002 a 2009.

Quadro 8 – Metas para a reciclagem de pneus (fabricantes e importadores)

Ano	Pneus produzidos ou importados no país	Fator para reciclagem
2002	4 pneus novos ou importados = destinação final a 1 pneu inservível	0,25
2003	2 pneus novos ou importados = destinação final a 1 pneu inservível	0,50
2004	1 pneus novos ou importados = destinação final a 1 pneu inservível	1,00
2005	4 pneus novos ou importados = destinação final a 5 pneu inservível	1,25
2006	4 pneus novos ou importados = destinação final a 5 pneu inservível	1,25
2007	4 pneus novos ou importados = destinação final a 5 pneu inservível	1,25
2008	4 pneus novos ou importados = destinação final a 5 pneu inservível	1,25
2009+	1 pneu novo ou importado = destinação final a 1 pneu inservível	1,00

Fonte: Adaptado de CONAMA (1999; 2002; 2009) e Lagarinhos (2011).

2.5.3 Política Nacional de Resíduos Sólidos

Publicada no Diário Oficial da União nº 147, em 3 de agosto de 2010, a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) decretada pelo Congresso Nacional e sancionada pelo Presidente da República institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

A PNRS reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com estados, Distrito Federal, municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. A PNRS integra a Política Nacional do Meio Ambiente e articula-se com a Política Nacional de Educação Ambiental.

Conforme determinado pela PNRS (BRASIL, 2010), os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pneus são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos.

Dessa forma, os consumidores deverão efetuar a devolução após o uso, aos comerciantes ou distribuidores, dos produtos e das embalagens a que se referem os incisos I a VI do artigo 33, incluídos nessa listagem os pneus. Os fabricantes e os importadores darão destinação ambientalmente adequada aos produtos e às embalagens, reunidos ou devolvidos, sendo o rejeito encaminhado para a disposição final ambientalmente adequada na forma estabelecida pelo órgão competente do Sistema Nacional do Meio Ambiente e, se houver, pelo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. (BRASIL, 2010).

São proibidas as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos, incluindo pneus: lançamento em praias, no mar ou em quaisquer corpos hídricos, lançamento *in natura* a céu aberto, queima a céu aberto ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade. (BRASIL, 2010).

Guarnieri (2017) afirma que a responsabilidade pela eficácia da PNRS trata da responsabilidade compartilhada, a qual é de todos os integrantes da cadeia que contribuem na geração dos resíduos. O autor menciona que, além do encargo legal atrelado às pessoas físicas e jurídicas ligadas à fabricação, importação, distribuição e comercialização de pneus, cabe também aos consumidores a responsabilidade pela correta segregação e disposição dos resíduos sólidos gerados.

3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS E COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS

Neste capítulo, discute-se o comportamento do concreto e suas propriedades quando submetido a altas temperaturas, enfatizando as alterações verificadas na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto, adicionando uma breve discussão acerca do deslocamento.

Na sequência, são abordadas as características do concreto a partir da inserção de partículas de borracha e de fibras de aço de pneus inservíveis, abrangendo as propriedades do concreto com os resíduos no estado fresco e no estado endurecido, em temperatura ambiente e em alta temperatura.

3.1 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

3.1.1 Segurança contra incêndio

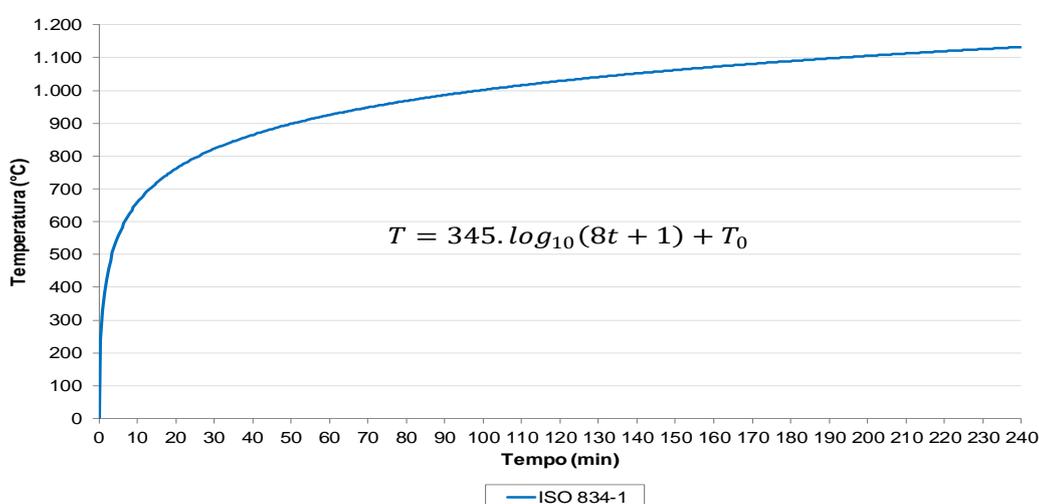
A segurança contra incêndio nas edificações é um requisito necessário para preservar a vida dos usuários durante o evento de um incêndio. A necessidade de atestar os sistemas construtivos em relação à resistência ao fogo torna-se uma poderosa ferramenta para assegurar a integridade da edificação em chamas por um determinado período de tempo que seja suficiente para oportunizar a evacuação dos usuários, garantir o trabalho das equipes de resgate e proteger as edificações vizinhas. (TUTIKIAN; RIBEIRO, 2018).

Os conceitos que definem fogo e incêndio são esclarecidos pela NBR 13860 (ABNT, 1997), sendo o fogo um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz, e o incêndio é o fogo fora de controle.

A NBR 16626 (ABNT, 2017a) descreve um cenário com três situações de incêndio correspondentes a diferentes estágios de desenvolvimento. A primeira fase inclui o início do fogo pela ignição de um produto, com uma pequena chama, em uma área limitada. O segundo estágio aborda o crescimento do fogo, podendo alcançar a inflamação generalizada (*flashover*). Na última fase, de pleno desenvolvimento do sinistro, todos os produtos combustíveis contribuem para a carga de incêndio até a extinção.

A simulação de um incêndio real ou natural é muito complexa e singular, pois cada incêndio apresenta características específicas dependentes de fatores como a taxa de aquecimento, a temperatura máxima e a duração do sinistro. (COSTA; BRITZ, 2011). Para possibilitar avaliações e ensaios experimentais das estruturas e dos materiais em situação de incêndio, curvas normatizadas de simulação de incêndio foram desenvolvidas. A normativa brasileira adota a curva padronizada estabelecida pela ISO 834-1 (1999), demonstrada no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Curva padrão de incêndio



Fonte: Adaptado de ISO 834-1 (1999).

As exigências da norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) para a segurança contra incêndio são pautadas em proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, dificultar a propagação do incêndio, proporcionar meios de controle e extinção do incêndio e dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros.

Complementando a legislação brasileira de segurança contra incêndio, devem ser mencionadas a NBR 15200 (ABNT, 2012), que trata de projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, e a Instrução Técnica nº 8 (CBPMSP, 2018a), que estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações.

Para todos os produtos de construção, considera-se o início do incêndio como uma ignição em um compartimento, que pode crescer e atingir a inflamação generalizada. Desta maneira, a avaliação da segurança contra incêndio das estruturas de concreto é dividida em duas principais etapas: reação e resistência ao fogo.

Segundo a NBR 16626 (ABNT, 2017a), a reação ao fogo é a resposta de um produto ao contribuir, pela sua própria decomposição, para um fogo a que está exposto em condições específicas. Denoël (2007) corrobora que a reação ao fogo se aplica aos materiais de construção, medindo as suas propriedades em relação ao início e ao desenvolvimento de um incêndio.

A classificação de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso e produtos de isolamento térmico de tubulações e dutos com seção circular de diâmetro externo não superior a 300 mm, pode ser observada na Tabela 6, obtida na NBR 16626 (ABNT, 2017a).

Tabela 6 – Classificação de produtos de construção em geral, exceto revestimento de piso e produtos de isolamento térmico de tubulações e dutos com seção circular de diâmetro externo não superior a 300 mm

Classe	Método de ensaio		
	ISO 1182 (ISO, 2010)	NBR 9442 (ABNT, 1988 ^a)	ASTM E 662 (ASTM, 2018)
I	Incombustível $\Delta t \leq 30^{\circ}\text{C}$ $\Delta m \leq 50\%$ $t_f \leq 10 \text{ s}$	-	-
II	A	Combustível $I_p \leq 25$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $I_p \leq 25$	$D_m > 450$
III	A	Combustível $25 < I_p \leq 75$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $25 < I_p \leq 75$	$D_m > 450$
IV	A	Combustível $75 < I_p \leq 150$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $75 < I_p \leq 150$	$D_m > 450$
V	A	Combustível $150 < I_p \leq 400$	$D_m \leq 450$
	B	Combustível $150 < I_p \leq 400$	$D_m > 450$
VI	Combustível	$I_p > 400$	-

Fonte: Adaptada de NBR 16626 (ABNT, 2017a).

Legenda: (Δt) variação de temperatura; (Δm) variação de perda de massa; (t_f) tempo de combustão ou chamejamento; (I_p) índice de propagação superficial de chama; (D_m) densidade óptica específica máxima corrigida.

Para a classificação de um produto quanto à reação ao fogo, a primeira etapa é estabelecer se ele pode contribuir no crescimento de um incêndio, determinando se é combustível ou incombustível. O ensaio de incombustibilidade é realizado de acordo com a norma ISO 1182 (ISO, 2010). Caso seja classificado como incombustível, classe I, é possível afirmar que não emite gases combustíveis que podem alimentar um incêndio.

No entanto, caso o material ensaiado seja classificado como combustível, torna-se necessário determinar o quão combustível é e quais os efeitos de sua combustão. Desta forma, ensaios subsequentes devem ser realizados para a investigação de outros parâmetros, sendo estes: índice de propagação superficial de chama (I_p) e densidade óptica específica de fumaça (D_m), respectivamente NBR 9442 (ABNT, 1988a) e ASTM E 662 (ASTM, 2018).

A definição de resistência ao fogo de elementos de vedação pode ser dada pela NBR 10636 (ABNT, 1989), que versa sobre paredes divisórias sem função estrutural, indicando que é a propriedade de suportar o fogo e a de proteger contra a sua ação. Também é caracterizada pela capacidade de manter a estabilidade, a estanqueidade e o isolamento térmico.

Em adição, a resistência ao fogo aplica-se a elementos estruturais. Pode ser vista como uma medida da capacidade de desempenhar o papel que lhes foi atribuído, determinado em projeto, apesar da ação de um incêndio. (DENOËL, 2007).

A propriedade de suportar o fogo, em geral, é medida pelo tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), em minutos, preconizado pela NBR 14432 (ABNT, 2001b), que é o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio padrão. Em consonância com a NBR 14432 (ABNT, 2001b) e a Instrução Técnica nº 8 (CBPMSP, 2018a), os TRRF mínimos das edificações habitacionais praticados no Brasil variam entre 30 e 180 minutos conforme a ocupação, o uso e a altura da edificação.

Já o tempo de resistência ao fogo (TRF) é o tempo máximo que o elemento construtivo pode manter a sua função segundo os critérios de resistência ao fogo (COSTA, 2008), também aferido em minutos. O TRF pode ser determinado por meio de métodos tabulares, métodos simplificados e avançados de cálculo, bem como ensaios em escala real. (KHOURY *et al.*, 2007).

Os ensaios de resistência ao fogo elaborados nesta pesquisa podem indicar o TRF dos sistemas propostos com o material reciclado de pneus inservíveis, indicando a potencialidade como sistema construtivo ao comparar com a Tabela A.1 da NBR 14432 (ABNT, 2001b), a qual apresenta os TRRF para diversos tipos de edificações. Para que os critérios de segurança estrutural em situação de incêndio sejam atendidos, o TRF deve ser superior ao TRRF.

3.1.2 Alterações na microestrutura do concreto

Alterações na microestrutura do concreto durante o seu aquecimento resultam em modificações de suas propriedades. No entanto, não é possível estabelecer uma comparação linear e direta entre as alterações físico-químicas microestruturais e o comportamento do material em relação aos quesitos térmicos e mecânicos. (KHOURY *et al.*, 2007).

A análise precisa das alterações na microestrutura do concreto é bastante complexa, visto que cada concreto possui sua particularidade em função das alternativas de insumos e de adições disponíveis, bem como das diferentes tecnologias de dosagem. (COSTA; BRITZ, 2011).

As transformações físicas e químicas, devido ao aquecimento do concreto, iniciam na matriz cimentícia endurecida. Todos os componentes da pasta de cimento endurecida sofrem transformações com a perda de umidade decorrente da ação das altas temperaturas.

Os principais cristais que formam a pasta endurecida são os silicatos hidratados de cálcio (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH – portlandita) e os compostos menores, como os sulfoaluminatos de cálcio hidratados. O efeito do aumento da temperatura na pasta de cimento hidratada depende do seu grau de hidratação e de umidade. (LIMA *et al.*, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A pasta de cimento hidratada contém grandes quantidades de água livre e capilar, além de água absorvida, que são perdidas rapidamente com o aumento da temperatura do concreto. Devido ao considerável calor necessário para a conversão de toda a água do concreto em vapor, a temperatura deste material não aumentará até toda a água evaporável ter sido removida. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A água livre e a capilar presentes na pasta de cimento começam a evaporar após a temperatura de 100 °C. A evaporação total da água capilar ocorre entre 200 °C e 300 °C, mas neste patamar ainda não são significativas as alterações na estrutura do cimento hidratado, bem como seu reflexo na resistência do concreto. (LIMA *et al.*, 2004).

Hager (2013) complementa que a água livre evapora primeiro, seguida pela água capilar e, finalmente, pela água de ligação. O processo de remoção da água quimicamente ligada aos hidratos de cimento é o último a ser iniciado.

De forma geral, as alterações físico-químicas que ocorrem devido ao aquecimento do concreto iniciam na pasta de cimento endurecida acima de 80 °C, uma vez que entre 4 e 80 °C os produtos de hidratação do cimento Portland se mantêm quimicamente inalterados. (KHOURY *et al.*, 2007).

A decomposição do gel de hidratação do cimento e a perda da água de ligação iniciam em cerca de 80 °C e a conversão química do gel de hidratação segue de forma não linear, sendo 70% concluída em 500 °C e totalmente concluída cerca de 850 °C. (KHOURY *et al.*, 2007). Durante este processo de decomposição do C-S-H, o primeiro estágio é em torno de 150 °C.

Hager (2013) explica que, durante o aquecimento do concreto, a etringita se decompõe primeiro, mesmo antes da temperatura atingir 100 °C. A autora ressalta que, nessa temperatura, a estrutura da pasta de cimento está parcialmente danificada devido à desidratação.

Assim que a pasta de cimento é aquecida a uma temperatura próxima de 500 e 550 °C, o teor de portlandita diminui rapidamente, pois ocorre a decomposição de hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água.

No segundo estágio de decomposição do C-S-H, aos 700 °C, ocorre a sua decomposição em β -C₂S (belita), β CS (wollastonita) e água, acarretando a retração da pasta de cimento e uma grande redução da resistência. A água originada no segundo estágio de decomposição do C-S-H também é vaporizada, promovendo um incremento na porosidade e contribuindo para a redução de resistência. (FERNANDES *et al.*, 2017; KHOURY *et al.*, 2007).

Outra alteração incidente a partir de temperaturas maiores que 700 °C é a descarbonatação do carbonato de cálcio, transformando-o em óxido de cálcio e água. (DENOËL, 2007; HAGER, 2013).

O Quadro 9 fornece um resumo das transformações que ocorrem durante o aquecimento do concreto, considerando tanto a pasta de cimento hidratada quanto os agregados do concreto.

Quadro 9 – Efeito da alta temperatura no concreto

Temperatura (°C)	Efeito ou transformação
20 – 80	Processo de hidratação acelerado, perda lenta de água capilar e redução de forças coesivas
100	Reações hidrotérmicas e perda de água livre

Temperatura (°C)	Efeito ou transformação
80 – 200	Aumento da perda de água capilar e consequente perda de água de ligação
80 – 850	Perda da água quimicamente combinada com gel de cimento
150	Primeiro estágio de decomposição do C-S-H
300	Desidratação da água interlamelar e combinada do C-S-H
300+	Aumento acentuado na porosidade e na microfissuração
350	Fragmentação de alguns agregados
374	Ponto crítico em que não há mais água livre disponível
400 – 600	Decomposição de hidróxido de cálcio em óxido de cálcio e água [Ca(OH) ₂ → CaO + H ₂ O]
500	Desidratação da pasta de cimento devido à decomposição do Ca(OH) ₂
573	Transformação dos agregados (quartzo e areias) da forma α em β
550 – 600+	Aumento acentuado dos efeitos térmicos
600 – 700+	Descarbonatação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e água [CaCO ₃ → CaO + CO ₂]
720	Segundo estágio de decomposição do C-S-H
800	Substituição da estrutura hidráulica por uma cerâmica – modificação das ligações químicas
900	Decomposição completa do C-S-H
1.150 – 1.200	Início do derretimento do concreto
1.300 – 1.400	Ligação de compostos de cálcio com SiO ₂ e Al ₂ O ₃ – concreto parece uma massa fundida

Fonte: Adaptado de Denoël (2007), Khoury *et al.* (2007) e Mehta e Monteiro (2014).

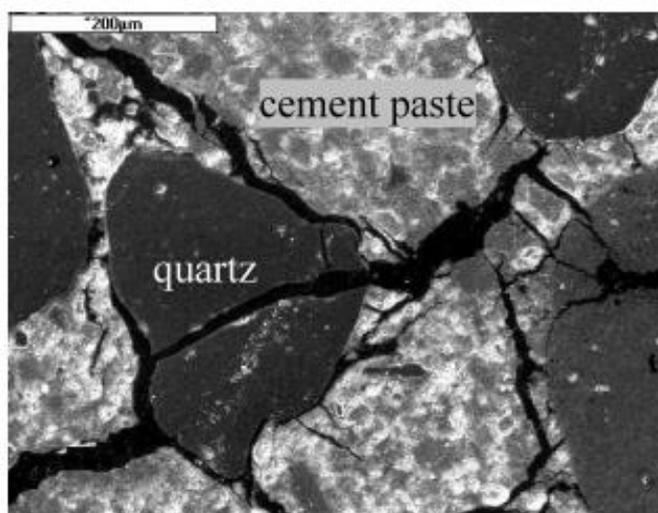
Os agregados ocupam de 60 a 80% do volume do concreto e, portanto, a variação de suas propriedades durante o aquecimento pode influenciar significativamente as características e as propriedades do material. (KHOURY *et al.*, 2007; LIMA *et al.*, 2004).

Mehta e Monteiro (2014) informam que a porosidade e a mineralogia do agregado influenciam sobre o comportamento do concreto exposto ao fogo. Os autores explicam que, dependendo da taxa de aquecimento e da dimensão, da permeabilidade e da umidade do agregado, os agregados porosos podem ser suscetíveis à expansão destrutiva.

Em decorrência do tipo de agregado utilizado, a partir de 300 °C, é possível observar mudanças físico-químicas microestruturais. (KHOURY *et al.*, 2007). Agregados siliciosos contendo quartzo podem causar danos ao concreto a cerca de 573 °C, pois, nessa temperatura, a transformação do quartzo da forma α em β está associada a uma expansão de cerca de 0,85%. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Exemplos de agregados siliciosos são cascalho de rio, arenito e quartzito. Os autores adicionam que essa expansão volumétrica pode ter efeito prejudicial ao concreto, já que ocorre o aumento de tensões internas e pode haver contribuição ao deslocamento.

A Figura 6 evidencia a tendência de alguns agregados siliciosos se romperem a 350 °C. Na imagem, é possível visualizar fissuras atravessando a pasta de cimento, prosseguindo pela zona de transição e passando pelo agregado silicioso presente.

Figura 6 – Microestrutura de concreto convencional com agregado silicioso aquecido a 600 °C – aumento 50x



Fonte: Hager (2013, p. 3).

Rochas carbonáticas também podem apresentar expansão a partir de 700 °C em função da descarbonatação. Até 700 °C, tendem a ser estáveis, quando o carbonato de cálcio começa a sua decomposição em óxido de cálcio e dióxido de carbono. O pico dessa decomposição é atingido em cerca de 800 °C e, finalizado aos 898 °C, é endotérmico e tende a retardar a evolução da temperatura em concretos constituídos por agregados desta natureza. (KHOURY *et al.*, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A temperatura de derretimento dos agregados varia consideravelmente, sendo 1.060 °C para basalto, 1.700 °C para dolerito, 1.210 a 1.260 °C para granito, 1.700 °C para quartzo e 2.570 °C para óxido de cálcio puro. (FERNANDES *et al.*, 2017; KHOURY *et al.*, 2007).

3.1.3 Redução das propriedades mecânicas

Quando o concreto no estado endurecido é exposto a altas temperaturas, na ação direta do fogo, ocorrem transformações físicas e químicas que levam a uma perda de resistência mecânica do material, que abrange a diminuição da resistência à compressão, do módulo de elasticidade, ocorrência de fissuração e deslocamento. (CASTELLOTE *et al.*, 2004; FERNANDES *et al.*, 2017).

Lima (2005) faz uma clara reflexão indicando que o ponto-chave do comportamento do concreto em altas temperaturas é que ele deve permanecer intacto, sem sofrer fissuração ou deslocamentos explosivos, de forma que as camadas mais externas continuem atuando como barreira térmica, protegendo as camadas mais internas e as armaduras.

De forma geral, as propriedades mecânicas do concreto variam com um comportamento decrescente de acordo com o aumento de temperatura no interior do material, sendo a intensidade dessa variação vinculada à taxa de aquecimento e ao tempo em que ocorrem as ações térmicas externas causadas pelo fogo. (COSTA; BRITZ, 2011).

Hager (2013) complementa com outros fatores que afetam o nível de dano ao concreto exposto a altas temperaturas, sendo estes: temperatura máxima atingida no concreto, tempo de exposição a elevadas temperaturas, carga aplicada durante o aquecimento, teor de umidade do material, dentre outros fatores.

Neste contexto, as alterações físicas e químicas, que provocam mudanças na pasta cimentícia e nos agregados quando expostos a altas temperaturas, reforçam que a retração térmica, a fissuração e a ruptura da interface entre a matriz e o agregado contribuem para a perda da resistência mecânica.

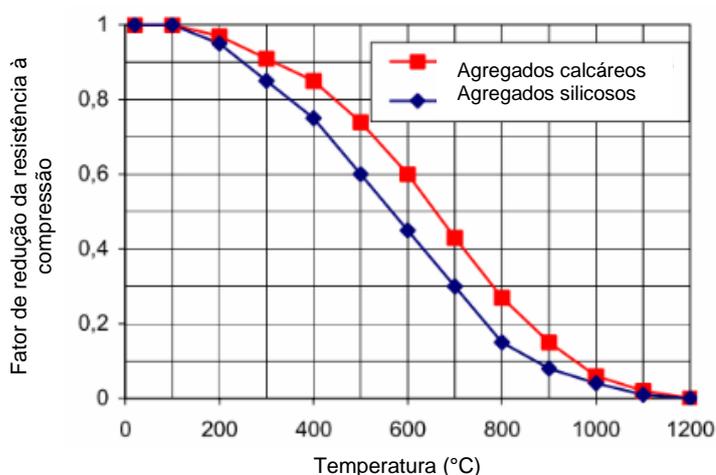
O aquecimento do concreto provoca o aumento do volume dos agregados, causando a retração da pasta de cimento que o cerca. Como resultado, a ligação do agregado e da pasta de cimento se torna um ponto fraco no material compósito aquecido. Em grande parte, os danos ao concreto são causados por fissuras que

ocorrem devido a tensões térmicas incompatíveis entre os agregados e a matriz cimentícia. (HAGER, 2013).

Neville (2016) explica que, para fins práticos, a temperatura próxima de 600 °C pode ser considerada a temperatura limite para manter a integridade estrutural do concreto produzido com cimento Portland. O autor ressalta que a temperatura relevante nessa análise é a temperatura do próprio concreto, não das chamas ou dos gases.

O Gráfico 6 apresenta a diminuição da resistência à compressão do concreto convencional em função da temperatura e do tipo de agregado, mostrando que, em 600 °C, o percentual de redução de resistência à compressão é cerca de 45% para agregados silicosos e 60% para agregados calcários. Silva (2012) também comenta que os agregados silicosos têm comportamento inferior quando expostos ao fogo.

Gráfico 6 – Diminuição da resistência à compressão do concreto convencional em função da temperatura e do tipo de agregado



Fonte: Adaptado de Denoël (2007).

Khoury *et al.* (2007) esclarecem que a resistência à compressão é a propriedade mais testada do concreto quando submetido a altas temperaturas, uma vez que essa propriedade é vital para o projeto estrutural e geralmente fornece uma impressão geral da qualidade do material.

Observando um estudo sobre o concreto exposto em altas temperaturas, comparando resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral residuais, Neville (2016) elucida que a perda na resistência à tração por compressão diametral é similar à perda da resistência à compressão.

Em relação ao módulo de elasticidade do concreto, Neville (2016) pontua que é fortemente afetado pelo aumento da temperatura, ocorrendo uma redução progressiva dessa propriedade entre cerca de 500 a 800 °C.

Lima (2005) aponta que o concreto terá seu comportamento melhorado em relação ao calor quando os agregados possuírem baixo coeficiente de dilatação térmica, o concreto for bem compactado, possuir baixa condutividade térmica, baixa umidade e alta resistência à tração.

3.1.4 Deslocamento

O deslocamento, ou *spalling*, é o fenômeno violento ou não violento de desprendimento de lascas ou pedaços do concreto da superfície de um elemento estrutural quando exposto a altas temperaturas e a rápidas taxas de aquecimento, como um cenário de incêndio. (COSTA; BRITZ, 2011; KHOURY *et al.*, 2007).

Tutikian e Ribeiro (2018) complementam o conceito do deslocamento descrevendo-o como um fenômeno semidestrutivo com origem na distribuição não uniforme de temperatura na seção e na quantidade de água evaporável do concreto.

Para avaliar a gravidade do deslocamento, três classes foram definidas por Ali *et al.* (2004), sendo elas: menor grau, maior grau e grau severo. Menor grau é descrito quando o deslocamento limita-se ao cobrimento, na superfície do concreto, sem exposição das armaduras. A categoria de maior grau abrange a exposição das armaduras. Já o grau severo implica o deslocamento em grandes profundidades, além do alinhamento das armaduras e com alta energia explosiva.

A *Fédération Internationale du Béton* (KHOURY *et al.*, 2007) categoriza o deslocamento em seis grupos, sendo: o deslocamento nos agregados, o explosivo, da superfície do concreto, nos cantos e quinas, durante o resfriamento e o deslocamento completo do elemento estrutural.

Os autores destacam que o deslocamento explosivo é considerado o mais sério e preocupante dos deslocamentos em uma situação de incêndio, pois poderia resultar na remoção de cerca de 25 a 100 mm da superfície de concreto de um elemento estrutural.

Em relação ao tempo de ensaio em que geralmente é registrado o deslocamento, Khoury *et al.* (2007) elucidam que a ocorrência superficial nos agregados e o tipo explosivo ocorrem entre 7 e 30 minutos de ensaio. Ao ensaiarem

resistência ao fogo de pilares de concreto, Ali *et al.* (2004) registraram deslocamento explosivo durante os primeiros 45 minutos de ensaio.

Em relação à temperatura em que geralmente é registrado o deslocamento, Tutikian e Ribeiro (2018) indicam a ocorrência de deslocamentos superficiais entre 250 e 420 °C, sendo que Khoury *et al.* (2007) apontam a ocorrência do deslocamento entre 100 e 300 °C. Conforme o Quadro 9, essas temperaturas elencadas estão relacionadas à desidratação da pasta de cimento endurecida.

Kalifa, Menneteau e Quenard (2001) explicam que o deslocamento resulta de dois processos principais: o primeiro está relacionado aos gradientes de dilatação térmica, ocorrendo no elemento estrutural, denominado processo termomecânico. O segundo, processo termo-hidráulico, está associado à transferência de massa (ar, vapor, água líquida) na rede porosa, que resulta na acumulação de pressão nos poros. Portanto, os autores ponderam que o deslocamento é um processo combinado: térmico, hidráulico e mecânico.

Alguns fatores são citados por múltiplos autores como influentes no deslocamento do concreto, como taxa de aquecimento superficial, água livre interna, porosidade, teor de umidade, natureza e granulometria do agregado, idade do elemento estrutural, temperatura máxima atingida, forma e tamanho da seção transversal, presença de fissuras, taxa de aço, arranjo das armaduras e presença de fibras. (COSTA; BRITZ, 2011; KHOURY *et al.*, 2007; KITCHEN, 2001; TUTIKIAN; RIBEIRO, 2018).

A discussão térmica, hidráulica e mecânica acerca do deslocamento e das características isoladas ou combinadas que propiciam a manifestação do fenômeno é bastante extensa. Desta forma, esta seção enfatizou fatores ligados ao deslocamento que possuem maior relação com o programa experimental proposto.

Neville (2016) cita a influência do teor de umidade, sendo que a umidade excessiva no momento da exposição ao fogo é prejudicial ao concreto, pois favorece o deslocamento. O autor esclarece que, quanto menor for a permeabilidade do concreto e maior for a velocidade de elevação da temperatura, maior será o risco de lascamento explosivo.

Kalifa, Menneteau e Quenard (2001) adicionam que, embora a permeabilidade seja um parâmetro-chave, o seu efeito está correlacionado com o conteúdo inicial de água.

Neste contexto, ao estudar a influência do teor de umidade na resistência ao fogo de placas maciças pré-fabricadas de concreto, Moreira (2017) observou que os menores teores de umidade estavam presentes em amostras com idades de cura mais elevadas, apresentando melhor desempenho quando submetidos a altas temperaturas. As idades de cura ensaiadas pelo autor foram 7, 14, 28, 56 e 84 dias.

Costa e Britez (2011) esclarecem que os experimentos envolvendo concreto submetido a elevadas temperaturas deveriam ser realizados em amostras com pelo menos um ano de idade, para que o teor de umidade, a maturidade e o grau de hidratação sejam mais compatíveis com as edificações de concreto existentes e em pleno uso.

A porosidade, a permeabilidade e a distribuição dos poros estão relacionadas à facilidade de transporte do fluido. A interconectividade dos poros é mais relevante na compreensão do deslocamento do que a porosidade total ou as dimensões dos poros. Já a permeabilidade do elemento é influenciada pelo tipo e pelas condições de cura do concreto, bem como pela relação a/c da mistura. (TUTIKIAN; RIBEIRO, 2018).

Assim, pode-se entender que, quanto maior for a relação a/c da mistura, maior a porosidade do concreto e maior a facilidade com que ocorre a transferência de ar, vapor e água líquida entre os poros. Esse exemplo demonstra uma situação de menor risco de deslocamento do concreto em um incêndio.

Em relação ao uso de fibras no concreto, diversos autores citam o uso de fibras de polipropileno para prevenção de deslocamento explosivo. Sob temperaturas relativamente baixas, estágio inicial do incêndio, as fibras de polipropileno derretem, deixando uma rede de canais orientada aleatoriamente dentro do concreto, o que ajuda o vapor a escapar e a aliviar a pressão no interior do concreto, evitando deslocamento explosivo. (ALI *et al.*, 2004; KITCHEN, 2001; MAZZUCCO; XOTTA, 2016).

Costa e Britez (2011) ponderam que o deslocamento não é um mecanismo de falha ou de colapso estrutural do elemento. O fenômeno pode ser leve ou severo e, conseqüentemente, conduzir ou não a uma rápida perda de seção transversal, o que poderia desencadear um mecanismo de colapso estrutural como falhas ocasionadas por flexão ou cisalhamento.

Entre os prejuízos ocasionados por *spalling*, Lima (2005) destaca os danos causados ao sistema de compartimentação contra o fogo em edificações, no qual a abertura de orifícios em lajes ou painéis permite a passagem da chama para o outro

ambiente e, conseqüentemente, o alastramento do incêndio. O autor complementa que, caso as armaduras fiquem expostas, a ação da alta temperatura é acelerada com a condução de calor desses elementos metálicos, e a resistência da seção decairá instantaneamente, sendo as vigas e as lajes os elementos mais suscetíveis de serem afetados dessa maneira.

3.2 CONCRETO ELABORADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEU

3.2.1 Propriedades do concreto no estado fresco elaborado com resíduo de borracha de pneu

A incorporação de partículas nos compósitos de matriz cimentícia pode alterar seu comportamento quanto à fluidez e, conseqüentemente, interferir no processo de moldagem do material. As principais propriedades de interesse no estado fresco são a trabalhabilidade, o teor de ar incorporado e a massa específica. (ALBUQUERQUE, 2009).

Conforme Marques, Nirschl e Akasaki (2006), a quantidade e a granulometria da borracha adicionada ao concreto interferem em sua trabalhabilidade. Foi observado que, quanto maior a quantidade de borracha adicionada à mistura, menor o abatimento. Percebeu-se ainda que os traços contendo a borracha de partículas mais finas apresentaram melhor trabalhabilidade do que os traços com maiores partículas.

A redução da trabalhabilidade implica maior dificuldade durante o procedimento de concretagem, prejudicando a dispersão das partículas de borracha na mistura e a moldagem dos corpos de prova. Uma alternativa viável para manter a trabalhabilidade adequada sem a redução da relação a/c é o emprego de aditivos plastificantes, os quais facilitam as condições de trabalho do concreto no estado fresco por sua maior fluidez.

Em pesquisa realizada por Lopes *et al.* (2005) sobre dosagens para concretos com resíduos de pneus, foi evidenciado que ocorreu o aumento do teor de ar incorporado após a adição da borracha de pneu no concreto. A maior incorporação de ar, além de contribuir para um peso específico menor, também contribuiu para menores resultados de resistência à compressão.

Quando se comparam concretos com adição de borracha de pneu com concretos tradicionais, observa-se a diminuição da massa específica. Akasaki e Vita (2008) realizaram um estudo com produção de concretos com diferentes teores de substituição e de granulometria do resíduo de borracha e observaram que, em todos os traços, houve uma diminuição da massa específica do concreto com a adição do resíduo de borracha de pneu de, aproximadamente, 2,4% em relação ao concreto sem adição de borracha.

Lopes *et al.* (2005), ao estudarem dosagens para concretos com resíduos de pneus, também verificaram a diminuição da massa específica para todos os traços do concreto com borracha, com redução entre 4,8 e 7,5%. Albuquerque (2009) esclarece que é esperado que a massa específica do concreto seja reduzida com a substituição do agregado miúdo pelo agregado reciclado de borracha, pois a massa específica da areia é aproximadamente o dobro da massa específica da borracha.

3.2.2 Propriedades do concreto no estado endurecido elaborado com resíduo de borracha de pneu

3.2.2.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é considerada uma das propriedades mais importantes do concreto, uma vez que oferece uma indicação geral da qualidade da mistura, visto que está diretamente relacionada com a estrutura da pasta de cimento hidratada. Além disso, é um fator fundamental no projeto estrutural e um indício da durabilidade do material. (NEVILLE, 2016).

Na maioria dos trabalhos envolvendo a adição ou a substituição de fragmentos de pneu na matriz cimentícia, observou-se a redução da resistência à compressão. (ALBUQUERQUE, 2009; LOPES *et al.*, 2005; MARQUES; NIRSCHL; AKASAKI, 2006; REIS; DUARTE; SILVA, 2010; SCHIMELFENIG *et al.*, 2017; SOUSA *et al.*, 2017).

Em função do aumento do teor de borracha empregado, os concretos estudados por Silva *et al.* (2017a), Pinheiro *et al.* (2017) e Sousa *et al.* (2017) com adição de borracha apresentaram resistências menores que os concretos convencionais e, quanto maior a porcentagem de partículas de borracha adicionadas, maior foi a perda da resistência à compressão.

A Tabela 7 resume percentuais de redução da resistência à compressão aos 28 dias encontrados por alguns dos autores supracitados, quando comparados os resultados obtidos para o concreto referência. Certa variabilidade nos percentuais relacionados, para um mesmo teor de substituição, pode ser encontrada devido ao tipo e granulometria do resíduo empregado.

Tabela 7 – Redução da resistência à compressão em concretos conforme percentual de substituição de resíduo de borracha de pneu inservível

Autores	Percentual de substituição da areia pelo resíduo de borracha de pneu	Perda da resistência à compressão aos 28 dias
Silva <i>et al.</i> (2017a)	5%	10,37%
	10%	25,47%
	15%	63,46%
Pinheiro <i>et al.</i> (2017)	5%	34,30%
	10%	34,26%
	15%	50,41%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

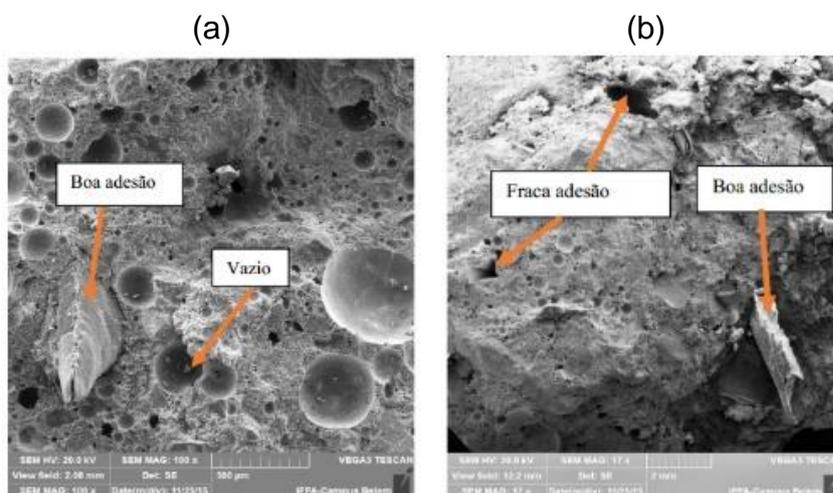
Albuquerque (2009), ao estudar as propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu, verificou a influência da granulometria e do percentual de substituição sobre a resistência à compressão do concreto. Foi observado que, independentemente da granulometria, quanto maior o percentual de substituição, maior a redução da resistência à compressão. Além disso, a autora verificou que a redução da resistência à compressão foi maior com o uso de partículas menores, de 0,42 mm, com as quais ocorreu a maior incorporação de ar, do que com partículas maiores de 1,5 mm e 4,8 mm.

Quando o concreto desenvolvido foi obtido pela substituição do agregado miúdo ou gráudo pelo resíduo de borracha, a diminuição da resistência pode estar vinculada à substituição de um agregado por outro de menor resistência. O módulo de deformação de agregados naturais é superior ao da borracha, tornando este resíduo um ponto vulnerável na matriz cimentícia.

Do mesmo modo, a redução na resistência à compressão pode estar relacionada à falta de aderência entre a pasta e o resíduo de borracha. Sousa *et al.* (2017) verificaram, a partir de micrografias de algumas regiões, a fraca aderência das fibras de borracha com a matriz cimentícia. A aderência foi prejudicada na mesma medida em que a porcentagem de partículas ou de fibras de borracha aumentou. A Figura 7 mostra duas imagens obtidas por meio de microscopia eletrônica de

varredura (MEV), evidenciando a baixa aderência entre a borracha e a matriz cimentícia.

Figura 7 – MEV da superfície de fratura do concreto com 10% de substituição de areia por borracha aos 28 dias (a) aumento 100x e (b) aumento 17x



Fonte: Sousa *et al.* (2017, p. 14).

Albuquerque (2009) também observou, em imagens de MEV, situações semelhantes às observadas por Sousa *et al.* (2017), evidenciando regiões de fraca aderência entre a matriz de concreto e a borracha do pneu.

Ainda dentro do estudo realizado por Sousa *et al.* (2017), a análise por MEV permitiu a verificação da porosidade da matriz com o resíduo de borracha. Os poros puderam ser notados nas micrografias obtidas no MEV (Figura 7), sendo observado que o aumento da incorporação de partículas de borracha provocou um aumento nas quantidades de microporos presentes na matriz.

Ao avaliar a reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento, Segre (1999) verificou que a borracha é um material de baixa hidrofiliabilidade e esta característica dificulta a continuidade dos produtos da hidratação do cimento sobre a superfície das partículas de borracha. Essa propriedade da borracha gera uma interface com pouca aderência entre o resíduo e a matriz cimentícia, afetando diretamente a resistência mecânica do material.

3.2.2.2 Resistência à tração

Conforme já evidenciado por diversos autores, a resistência à tração diminui em concretos com adição de resíduo de borracha quando comparados a concretos convencionais. (ALBUQUERQUE, 2009; FREITAS, 2007; PINHEIRO *et al.*, 2017; SCHIMELFENIG *et al.*, 2017; SOUSA *et al.*, 2017). Contudo, verifica-se que o percentual de diminuição dessa propriedade é menor que o percentual de perda da resistência à compressão.

Resultados coletados em pesquisas experimentais indicam que, da mesma forma que observado para a resistência à compressão, quanto maior o percentual de substituição da borracha no concreto, maior é a perda da resistência à tração. (ALBUQUERQUE, 2009; SCHIMELFENIG *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2017b; TOPÇU, 1995).

Giacobbe (2008) verificou que, quanto maior o teor de borracha, maior é a resistência à tração em relação à resistência à compressão. Tradicionalmente, considera-se que, em concretos convencionais, a resistência à tração corresponde a 10% da resistência à compressão. Ao estudar concreto com adição de borracha de pneus com teor de 15% de substituição do agregado miúdo, a autora observou que a resistência à tração na flexão foi de, aproximadamente, 30% da resistência à compressão. Isso ocorreu pela diferença de redução das resistências em relação ao concreto de referência.

Ao realizar ensaio de compressão diametral em corpos de prova de concreto com borracha, Topçu (1995) verificou que os espécimes rompidos resistiram a cargas pós-fissuras significativas e sofreram deslocamento, que foi parcialmente recuperável. Assim, a matriz de concreto foi capaz de suportar cargas mesmo quando estava altamente fissurada. Amostras contendo borracha não exibiram falhas frágeis sob compressão devido ao comportamento plástico da borracha. Ao testar diferentes granulometrias e diferentes percentuais de inserção, o autor constatou que a perda da resistência à tração foi gradual dependendo do tipo e da quantidade de borracha empregada.

3.2.2.3 Resistência ao impacto

Conforme explicado por Fioriti, Ino e Akasaki (2009), o ensaio de resistência ao impacto é usado para medir a tendência de um material de se comportar de maneira frágil. O choque, ou impacto, representa um esforço de natureza dinâmica, porque a carga é aplicada repentina e bruscamente. No impacto, não é só a força aplicada que conta; outro fator é a velocidade de aplicação da força. Os autores explicam que o ensaio de impacto consiste em medir a quantidade de energia absorvida por uma amostra do material quando submetida à ação de um esforço de choque de valor conhecido.

Um dos métodos mais comuns para ensaiar a resistência ao impacto dos materiais é o do golpe desferido por um peso. Devido à inexistência de norma específica para a avaliação dessa propriedade, foi observado em diversas pesquisas que os ensaios realizados são uma adaptação da extinta NBR 9454 (ABNT, 1986), tendo como auxílio um aparato específico. (FIORITI; INO; AKASAKI, 2009; GARCEZ, 2005; KOBAYASHI; PIMENTEL; ELISABETE, 1999).

Segundo estudo realizado por Kobayashi, Pimentel e Elisabete (1999) sobre viabilidade técnica de concretos contendo borracha aplicados à sinalização rodoviária, resultados indicaram que a resistência ao impacto dos concretos elaborados com borracha de pneu tem maior capacidade de absorção de energia de impacto. Ou seja, quando comparado a concretos convencionais, concretos com adição de partículas de borracha necessitam de maior energia de impacto para o aparecimento da primeira fissura.

Fioriti, Ino e Akasaki (2009), a partir da pesquisa de resistência ao impacto em blocos intertravados de concreto acrescido com partículas de pneus, observaram que os blocos intertravados contendo o resíduo suportaram maior absorção de energia antes do seccionamento quando comparados com os blocos intertravados de controle. Ainda, os autores afirmam que os blocos intertravados possuem bom potencial para aplicação em ambientes que exijam baixa resistência mecânica como, por exemplo, calçadas e praças.

Bolina *et al.* (2013) também pesquisaram a aplicação de pneus inservíveis para calçadas ecológicas, tendo em vista que o concreto ensaiado com 5% de adição de borracha de pneus inservíveis atende aos requisitos normativos para uso em pavimentação de calçadas.

Ao estudarem concretos produzidos com substituição de agregado miúdo natural por agregado de borracha vulcanizada, Silva *et al.* (2017a) verificaram que, após a conclusão do ensaio de tração por compressão diametral, os corpos de prova do concreto-referência apresentaram ruptura com grande propagação de fissuras, enquanto que os corpos de prova do concreto com adição de borracha apresentaram fissuração reduzida. Os agregados fibrosos de borracha permitiram aos concretos capacidade de resistir melhor a propagação de fissuras. Esse fenômeno também já foi identificado por Topçu (1995).

3.2.2.4 Módulo de elasticidade

Segundo diversos estudos realizados, os resultados de módulo de elasticidade seguem a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão, uma vez que são duas propriedades relacionadas. (LOPES *et al.*, 2005; KOBAYASHI; PIMENTEL; ELISABETE, 1999). Assim, o módulo de elasticidade em concretos com adição de partículas de borracha tende a obter menores valores em relação aos concretos tradicionais.

Cavichilo, Heckler e Campos (2017) também verificaram esse fenômeno ao estudarem a incorporação de borracha de pneu em concreto com substituição parcial do agregado miúdo. Os autores explicam que, devido ao módulo de elasticidade ser diretamente proporcional à resistência à compressão, e tendo em vista que essa última foi reduzida a com a incorporação de borracha, era esperado que o módulo também reduziria.

Conforme Freitas (2007), ao substituir o agregado mineral de alto módulo de elasticidade pelo agregado de borracha com um módulo baixo, é de se esperar uma diminuição no módulo do concreto. No entanto, o baixo módulo de elasticidade permitiu que o material tivesse maior capacidade de deformação antes da ruptura, aliviando o surgimento de fissuras e melhorando a durabilidade do concreto.

Albuquerque (2009) complementa que a introdução de um comportamento mais dúctil se baseia no fato de que, no concreto, o agregado é um dos principais elementos que restringem a deformação. A inclusão da borracha em substituição parcial do agregado atenua essa restrição, fornecendo ao concreto maior deformabilidade.

Pinheiro *et al.* (2017) observaram que houve uma redução do módulo de elasticidade com a adição de resíduo de pneu e mencionaram que o concreto com adição de borracha demonstrou um comportamento mais dúctil quando comparado com o concreto sem adição.

Assim como Freitas (2007) e Albuquerque (2009), Schimelfenig *et al.* (2017) explicam que o módulo de elasticidade representa o comportamento mecânico da deformação do corpo de prova em função do carregamento aplicado sobre ele, sendo essa propriedade afetada com a substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu. Ainda, Schimelfenig *et al.* (2017) verificaram que a quantidade de resíduo incorporado também influenciou nos resultados. Quando a substituição de agregado miúdo por resíduo de borracha foi de 5%, a perda do módulo de deformação se mostrou menor do que 5% ao ser comparada com o concreto referência. Já ao analisar a substituição de 15%, essa perda se tornou significativa, próxima de 20%.

3.2.2.5 Comportamento em altas temperaturas

A quantidade de pesquisas sobre o comportamento do concreto com agregado reciclado de borracha submetido a altas temperaturas é bastante reduzida. Sabe-se que o comportamento ao fogo do concreto será modificado pelas propriedades dos agregados introduzidos, por isso se torna essencial conhecer o desempenho de concretos com agregados de borracha.

Albuquerque (2009) explica que a redução da condutividade e da difusividade se deve a características intrínsecas da borracha quanto à baixa condução de calor, transferindo parcialmente esta característica ao material compósito, além do maior teor de ar incorporado encontrado nas amostras com borracha.

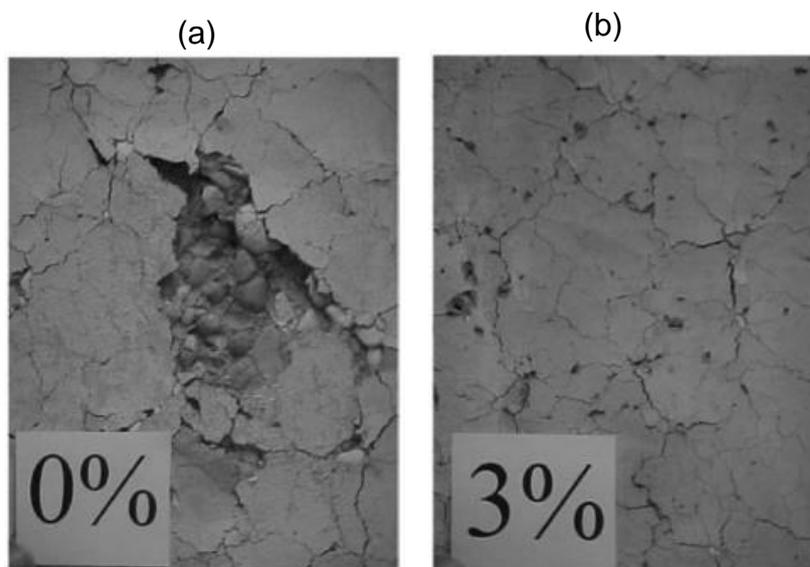
Marques, Akasaki e Fioriti (2012) também verificaram a baixa condução de calor ao estudarem a exposição de corpos de prova com e sem a inserção de resíduo de borracha, aquecidos a uma temperatura de 600 °C. Os autores verificaram, a partir das curvas geradas pelas leituras das medidas dos termopares, que é possível alcançar melhor isolamento térmico do concreto com a inserção da borracha.

As reações de degradação da borracha triturada do pneu iniciam aproximadamente em 300 °C (SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006), indicando que a fibra de borracha pode atuar no concreto de forma similar à fibra de polipropileno.

As fibras de polipropileno começam a derreter em torno de 160 °C e, ao se fundirem, criam pequenos vazios e canais que permitem a dissipação dessa pressão de vapor, diminuindo as tensões de tração internas e a deterioração do concreto. (CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI, 2011; FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002; KITCHEN, 2001).

Em pesquisa sobre o desempenho ao fogo de concreto de alta resistência (CAR) com a inclusão de borracha reciclada, Hernández-Olivares e Barluenga (2004) verificaram que a inclusão da fibra de borracha no CAR eliminou o rompimento explosivo do concreto. As fibras de borracha podem manter os lados das fissuras unidos de modo que a perda de capacidade resistente ocorra de forma progressiva e não abrupta. Hernández-Olivares e Barluenga (2004) explicam que o comportamento do CAR em incêndio muda quando a borracha é incluída na composição. Os canais abertos deixados quando as partículas de borracha são queimadas permitem que o vapor de água escape da amostra, reduzindo as tensões internas devido à pressão de vapor. Pequenos orifícios podem ser observados na superfície exposta ao fogo dos espécimes com fibra de borracha, sendo que não houve falhas na amostra sem borracha (Figura 8).

Figura 8 – Face exposta do CAR (a) sem adição de borracha e (b) com 3% de borracha – após o teste de fogo



Fonte: Hernández-Olivares e Barluenga (2004, p. 114).

A redução do comportamento explosivo também foi verificada por Macedo e Tubino (2005) ao estudarem o comportamento térmico de placas pré-moldadas com borracha de pneu. As autoras verificaram a ocorrência de deslocamento em todas

as placas ensaiadas, mas do tipo explosivo apenas nas amostras de concreto convencional. Assim, apontaram que o teor de borracha de 5% auxiliou no alívio de pressões internas das placas de concreto.

Yesilata, Bulut e Turgut (2011) realizaram um estudo experimental para investigar os benefícios térmicos da adição de resíduo de pneus inservíveis em materiais de envelopamento de edificações. Foram construídas duas salas idênticas, sendo uma com paredes exteriores de concreto com adição de pneu e outra com paredes exteriores de concreto convencional. Ambas as salas foram expostas a condições ambientais idênticas durante um ano. Os resultados mostraram que a sala com paredes de concreto com borracha apresentou maior uniformidade e estabilidade de temperatura interna frente à variação de temperatura externa. Os autores concluíram que a introdução da borracha do pneu reduziu a transferência de calor, aumentando sua resistência térmica.

Marques (2010) avaliou as propriedades mecânicas residuais dos concretos com agregados de borracha (CAB) em relação à resistência à compressão e à resistência à tração por compressão diametral, após a exposição a diferentes níveis térmicos: 400 °C, 600 °C e 800 °C. Para a temperatura de 400 °C, os resultados demonstraram que as perdas de desempenho dos CAB foram semelhantes à do concreto convencional tanto no nível da resistência à compressão como no nível da resistência à tração por compressão diametral. Para a temperatura de 600 °C, a resistência à compressão residual apresentou a mesma tendência. Já para a temperatura de 800 °C, registraram-se perdas de resistência residual à compressão e tração mais acentuadas em todas as composições de CAB. O autor explica que esse comportamento está relacionado com o fato de os agregados de borracha sofrerem um elevado grau de decomposição a temperaturas mais elevadas, apresentando comportamento no interior do concreto semelhante a um vazio, o que diminui a sua contribuição para o incremento da resistência.

Em pesquisa sobre o uso de borracha para melhorar as propriedades térmicas de placas pré-moldadas de concreto, Sukontasukkul (2009) verificou que o concreto com adição do resíduo exibe propriedades térmicas superiores ao concreto convencional, medido pela diminuição em cerca de 20 a 50% do coeficiente de condutividade térmica. Ensaio adicionais foram realizados pelo autor, indicando que o concreto com borracha exibiu uma menor taxa de transferência de calor e uma maior resistividade ao calor do que o concreto simples. O percentual de diminuição das

propriedades aferidas depende do tamanho da borracha e da proporção de inserção na dosagem do concreto.

Em um estudo em argamassa, Arf, Abdullah e Abdulkadir (2017) observaram o efeito de altas temperaturas nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas com agregado reciclado borracha (ARB). Os autores concluíram que a substituição parcial da areia natural por ARB em até 9% não afetou a estabilidade físico-mecânica de argamassa com o uso de borracha para exposições térmicas até 200 °C.

3.2.2.6 Tratamento superficial da borracha

A redução de propriedades mecânicas de concretos com adição de borracha pode estar associada à deficiência de aderência entre a borracha e a matriz cimentícia. Uma das alternativas para mitigar esta questão é a utilização de tratamentos superficiais da borracha antes de sua imersão na matriz cimentícia, sendo que alguns exemplos são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 – Tipos de tratamentos superficiais para o resíduo de borracha

Pesquisadores	Tipo de tratamento superficial
Segre (1999)	Solução aquosa de H ₂ SO ₄ e de NaOH
Albano <i>et al.</i> (2005)	Solução de NaOH e silano A-174
Albuquerque <i>et al.</i> (2006)	Aditivos poliméricos de base acrílica, vinílica e estirenobutadieno
Balaha, Badawy e Hashish (2007)	Acetato de polivinila, microssílica e NaOH

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O concreto com incorporação de partículas de borracha tratadas apresentou melhores resultados do que o concreto com a borracha sem tratamento. A redução da resistência à compressão no caso da borracha tratada com acetato de polivinila foi de 14%, tratada com microssílica foi de 15% e tratada com hidróxido de sódio (NaOH) foi 17% em relação ao concreto convencional. Por outro lado, no caso de borracha não tratada, a redução foi de 27% para a mesma porcentagem de borracha empregada. (BALAHA; BADAWY; HASHISH, 2007).

Ao investigarem experimentalmente concreto com borracha em pó, Youssf *et al.* (2014) verificaram que o pré-tratamento de borracha com solução de NaOH aumentou a resistência à compressão do concreto em 6% e 15% aos 7 e 28 dias,

respectivamente, em comparação com o concreto com adição de borracha não tratada.

No entanto, o benefício da utilização de solução de NaOH não foi verificado por outros pesquisadores ao testarem esse tipo de tratamento superficial no resíduo de borracha antes de ser adicionado ao concreto. (ALBANO *et al.*, 2005; MARQUES *et al.*, 2008).

Albano *et al.* (2005) estudaram a reciclagem de borracha de pneu de automóvel como substituto parcial de agregados miúdos em concreto. O tratamento prévio de borracha com NaOH e silano A-174 não produziu mudanças significativas na resistência à compressão e na resistência à tração dos compósitos em comparação com o composto de concreto e borracha não tratada.

Segre (1999) avaliou o emprego de soluções aquosas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e NaOH para tratamento de partículas de borracha com intuito de aumentar a hidrofiliabilidade da superfície para conciliá-las com a matriz de cimento. A autora observou que a borracha tratada com NaOH apresentou melhor compatibilização com a matriz de cimento, como mostram resultados exploratórios de absorção de água e de resistência ao ataque ácido.

Apesar dos resultados positivos com o tratamento superficial de NaOH, Segre (1999) não verificou alterações expressivas nos grupos funcionais superficiais da borracha ao avaliar o resíduo após tratamento por microespectroscopia no infravermelho.

Albuquerque *et al.* (2006), ao estudarem o efeito do tratamento superficial da borracha nas propriedades do concreto compactado com rolo, observaram que os tratamentos realizados com aditivos poliméricos de base estireno-butadieno e acrílica foram eficientes em minimizar a queda da resistência à compressão do concreto com teores de borracha de até 10% e 20%, respectivamente. Já o tratamento com polímero tratamento de base vinílica incidiu em decréscimo dos valores de resistência à compressão e à tração.

Balaha, Badawy e Hashish (2007) explicam que a resistência mecânica dos concretos com borracha ainda não se equipara ao concreto sem a inserção de borracha. Os autores complementam que os resultados de menor resistência mecânica de matrizes cimentícias contendo resíduo de borracha com tratamento superficial, em comparação com misturas referência, demandam que outras estratégias de mitigação de perda de resistência sejam exploradas.

O agregado reciclado de borracha utilizado nesta presente pesquisa não passou por nenhum tipo de tratamento antes da incorporação no concreto. Essa opção foi adotada uma vez que não houve consenso entre os autores pesquisados em uma técnica que comprovadamente aumentasse significativamente a aderência entre o grânulo de borracha e a matriz cimentícia. Ainda, buscou-se minimizar os custos e simplificar os métodos para utilização do resíduo de borracha para torná-lo economicamente viável para a indústria da construção civil, avaliando seu comportamento no modo como é disponibilizado pela recicladora.

3.2.2.7 Teores de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de borracha

Os três percentuais de substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de borracha empregados na etapa preliminar (5%, 7,5% e 10%) foram definidos baseando-se em pesquisas já realizadas, buscando explorar um percentual baixo, um intermediário e um elevado, conforme investigado no Quadro 11.

Quadro 11 – Pesquisas com substituição de agregado miúdo por ARB

Percentuais utilizados	Forma de substituição	Fonte
10%	volume	Marques (2005)
5%, 10%, 15% e 20%	volume	Trigo (2008)
2%, 4%, 6%, 8% e 10%	volume	Albuquerque (2009)
10%	volume	Fazzan (2011)
10%, 15% e 20%	volume	Noor (2014)
5%, 15% e 25%	volume	Guneysi <i>et al.</i> (2014)
5% e 10%	massa	Sousa <i>et al.</i> (2017)
4% e 8%	volume	Santos <i>et al.</i> (2017)
5% e 15%	massa	Schimelfenig <i>et al.</i> (2017)
5%, 10% e 15%	massa	Silva <i>et al.</i> (2017b)
5%, 10% e 15%	massa	Pinheiro <i>et al.</i> (2017)
10% e 20%	volume	Ferreira <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Nesta pesquisa, a substituição foi realizada pela areia devido às características físicas do material reciclado empregado que são compatíveis com a composição granulométrica do agregado miúdo.

Li *et al.* (2004) avaliaram a substituição de 15% do agregado graúdo em volume por resíduo de borracha em forma de lascas ou fibras e obtiveram redução de 46,7% na resistência à compressão e de 36% na resistência à tração por compressão

diametral quando os concretos com borracha foram comparados ao convencional. Outros autores também verificaram acentuada perda de resistência do concreto ao substituírem o agregado graúdo ou ambos agregados pelo resíduo de borracha, corroborando que a substituição do agregado miúdo é a opção adequada. (AKASAKI *et al.*, 2003; ALBUQUERQUE, 2009; TOPÇU, 1995; TOUTANJI, 1996).

Utilizou-se a substituição em volume com a intenção de manter o volume total das misturas, realizando um comparativo adequado entre os traços elaborados. A substituição em massa ocasionaria uma alteração considerável de volume entre os materiais a serem substituídos, tendo em vista a diferença de massa unitária existente entre o agregado miúdo ($1,49 \text{ g/cm}^3$) e o agregado reciclado de borracha ($0,54 \text{ g/cm}^3$).

A pesquisa realizada por Albuquerque (2009) contou com a substituição de agregado miúdo por partículas de pneu em teores de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%, em volume. A autora obteve resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e tração por compressão diametral satisfatórios quando empregado até 10%. Dessa forma, esta pesquisa também utilizou 10% como percentual máximo de substituição.

3.3 CONCRETO ELABORADO COM A INCORPORAÇÃO DE FIBRA DE AÇO

3.3.1 Propriedades do concreto no estado fresco elaborado com a incorporação de fibra de aço

O concreto reforçado com fibras é definido como aquele constituído com cimento, agregados graúdos e miúdos e fibras descontinuamente discretas. Os objetivos do reforço da matriz cimentícia com fibras são o aumento da resistência à tração pelo retardo da propagação de fissuras e o aumento da tenacidade pela transmissão de tensões através de uma seção fissurada, de modo que seja possível uma deformação muito maior após a tensão de pico do que sem o reforço com fibras. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Mehta e Monteiro (2014) complementam que a rápida propagação de microfissuras sob tensão aplicada é a responsável pela baixa resistência à tração do concreto. Segundo os autores, a inserção das fibras na matriz obstrui a propagação de microfissuras, retarda o aparecimento de fissuras de tração e, conseqüentemente, aumenta a resistência à tração do material.

Mehta e Monteiro (2014) e Neville e Brooks (2013) indicam que a adição de qualquer tipo de fibra ao concreto convencional reduz a trabalhabilidade. Independentemente do tipo de fibra, a perda da trabalhabilidade é proporcional ao teor de inserção no concreto.

Além do teor de fibras, a redução da trabalhabilidade é motivada pela geometria da fibra, pelo fator de forma, pelo traço do concreto, pela granulometria do agregado e pela aderência das fibras com a matriz. Geralmente, fibras longas e com elevado fator de forma tendem a reduzir mais a trabalhabilidade. (BRAZ; NASCIMENTO, 2015; VAN CHANH, 2005).

Van Chanh (2005) ratifica que o tipo de fibra, a orientação e a porcentagem de fibras influenciam na trabalhabilidade da mistura, diminuindo essa propriedade à medida que o tamanho e a quantidade de agregados maiores que 5 mm aumentam.

A fibra é afetada pela mobilidade relativa de partículas de agregados graúdos devido à compatibilidade dimensional entre ambas. Portanto, quanto maior o volume e o comprimento da fibra, mais difícil se torna o movimento relativo entre os agregados graúdos e o movimento da mistura. (FIGUEIREDO; CECCATO, 2015).

Figueiredo (2000) complementa que a adição de fibras altera as condições de consistência do concreto e que isso ocorre, principalmente, porque, ao se adicionar a fibra ao concreto, está se adicionando também uma grande área superficial que demanda água de molhagem.

Mehta e Monteiro (2014) elucidam que o ensaio de abatimento de tronco de cone não é um bom índice de trabalhabilidade, uma vez que as fibras proporcionam estabilidade considerável a uma massa de concreto fresco. O ensaio VeBe (ACI, 2009) é considerado mais apropriado para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concretos reforçados com fibras.

A utilização de aditivos superplastificantes pode mitigar a diminuição da trabalhabilidade ao se adicionarem fibras metálicas em grandes porcentagens ao concreto, uma vez que esse tipo de aditivo produz concretos com mobilidade mais elevada mantendo a mistura coesa. (NEVILLE, 2016).

Um exemplo da utilização de aditivo superplastificante é a produção de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço visto que, devido ao uso desse tipo de aditivo, pode garantir a alta trabalhabilidade ao concreto autoadensável mesmo com elevadas frações volumétricas de fibras. (GIL, 2018; MARANGON, 2006; VELASCO, 2008).

A inserção de fibra de aço no concreto pode causar dificuldades para mistura, manuseio, lançamento e acabamento do concreto fresco. Uma das dificuldades causada pelas fibras no processo de mistura é a tendência a gerar aglomerações, também chamadas de bolos, novelos ou ouriços. (FIGUEIREDO; CECCATO, 2015).

Em relação à formação de bolos, a adição da fibra de forma muito rápida e sem controle dificulta a dispersão uniforme deste elemento no concreto. O excesso de fibras na mistura, superior a 2% em volume, um concreto pouco trabalhável mesmo sem as fibras, tempo excessivo de mistura ou emprego de alta porcentagem de agregado graúdo também incidem na formação de novelos. (ACI, 2008).

No caso da incorporação de ouriços no concreto, será promovida a redução do teor de fibra homogeneamente distribuído, como também ocorrerá um ponto fraco e muito poroso no local onde cada ouriço se alojar. (FIGUEIREDO, 2011).

3.3.2 Propriedades do concreto no estado endurecido elaborado com a incorporação de fibra de aço

Neste capítulo, foram enfatizadas as fibras de aço buscando-se, na literatura, referências acerca de concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) oriundas de pneus inservíveis e do concreto com fibras industrializadas, uma vez que a literatura sobre fibras de aço recicladas é escassa.

3.3.2.1 Fibras de aço para concreto

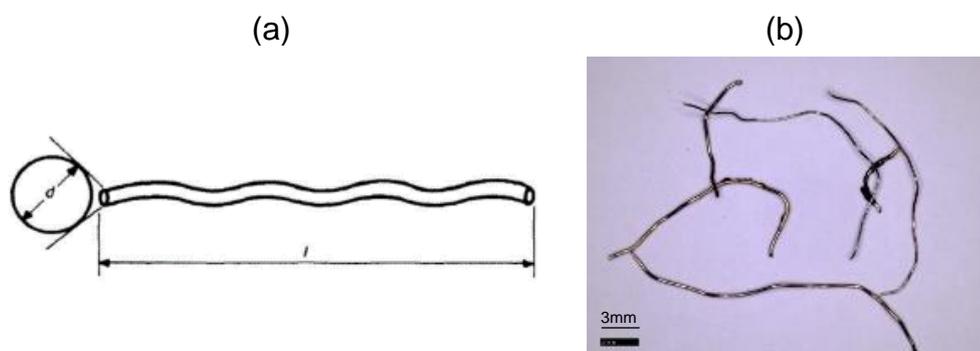
As fibras de aço têm o potencial de melhoria de diversas propriedades mecânicas do concreto, sendo que o ACI 544.1R-96 (ACI, 2002) destaca incremento na tenacidade, controle de fissuras, resistência à flexão, resistência ao impacto e à fadiga. Dessa forma, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) apresenta vantagens sobre o concreto armado convencional em várias possibilidades de uso na construção civil.

A NBR 15530 (ABNT, 2019a) define as fibras de aço para concreto como arames de aço trefilados a frio, escarificados ou não, chapas cortadas, produzidas por fusão ou usinadas a partir de blocos de aço, sendo elementos produzidos especificamente para o uso em concretos e em argamassas, formando misturas homogêneas. Com base em sua forma, podem ser retas ou em outras conformações.

Dentro do Grupo I de fibras de aço, arames trefilados a frio, a NBR 15530 (ABNT, 2019a) define a conformação das fibras em três tipos: o tipo A com ancoragem nas extremidades, o tipo C corrugada e o tipo R reta e sem ancoragem nas extremidades. As fibras de aço utilizadas nesta pesquisa se assemelham ao tipo C, uma vez que não são retilíneas e não possuem ancoragem.

A Figura 9 apresenta uma comparação entre a Figura 9a descrita na NBR 15530 (ABNT, 2019a) para fibra de aço tipo C corrugada e a fibra metálica reciclada utilizada nesta pesquisa. A imagem da Figura 9b foi capturada com um microscópio digital marca Zeiss modelo Smartzoom 5, no itt Fuse, na UNISINOS.

Figura 9 – Comparação entre (a) fibra de aço tipo corrugada e (b) fibra metálica oriunda de pneu inservível



Fontes: (a) NBR 15530 (ABNT, 2019a, p. 3); (b) Elaborada pela autora (2020).

Figueiredo (2008) explica que o formato da seção transversal dependerá do tipo de aço utilizado na produção da fibra que pode ser trefilado ou laminado. Assim, além dos tipos de fibras, a especificação brasileira para fibras de aço prevê três classes de fibras, as quais foram associadas ao tipo de aço que as originou. A classe I de fibra é oriunda de arame trefilado a frio, a classe II, de chapa laminada cortada a frio e a classe III, de arame trefilado e escarificado.

Uma das principais preocupações observada na especificação das fibras de aço para concreto é a de evitar uma variação exagerada de desempenho do CRFA, provocada pela variabilidade do fator de forma da fibra (λ). (FIGUEIREDO, 2008). De acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2019a), o fator de forma é a relação entre o comprimento da fibra (l) e o diâmetro equivalente de sua seção transversal (d). O fator de forma de uma fibra é dado pela Equação 1.

$$\lambda = \frac{l}{d} \quad (1)$$

Onde:

λ = fator de forma da fibra;

l = comprimento da fibra (mm);

d = diâmetro equivalente da fibra (mm).

O ACI 544.1R-96 (ACI, 2002) caracteriza as fibras de aço destinadas ao reforço de concreto como curtas, com fator de forma entre 20 e 100, sendo suficientemente pequenas para serem dispersas aleatoriamente em uma mistura de concreto não endurecida, usando procedimentos de mistura usuais.

A Tabela 8 reúne propriedades físicas e mecânicas de fibras comumente empregadas no mercado para fins de comparação com a fibra de aço, uma vez que o desempenho que a fibra exercerá no concreto dependerá das suas características. Figueiredo (2011) comenta que as fibras de aço possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, e graças a estas propriedades atuam como um reforço do concreto endurecido.

Tabela 8 – Propriedades típicas de fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5 - 500	7,84	190 - 210	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,4	2,6	160 - 200	3 - 3,5	2 - 3
Polipropileno fibrilado	20 - 200	0,9	1 - 7,7	0,5 - 0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,6	2,1 - 4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1,0	3

Fonte: Adaptada de Bentur e Mindess (2007).

A fibra de alto módulo de elasticidade apresenta um elevado nível de tensão no momento em que o compósito atinge sua deformação crítica, pouco antes de sua ruptura. Isso permite a esse tipo de fibra proporcionar um elevado nível de reforço da matriz quando esta se romper, mesmo com consumos mais baixos. (FIGUEIREDO, 2011).

Mehta e Monteiro (2014) explicam que o tipo de fibra e sua fração volumétrica têm um efeito significativo nas propriedades do concreto reforçado com fibras. É conveniente classificar os compósitos reforçados com fibras como uma função da fração volumétrica, conforme indicado no Quadro 12.

Quadro 12 – Função da fração volumétrica das fibras

Fração volumétrica	Proposição	Utilização
Baixa - menor que 1%	Redução da fissuração por retração	Lajes e pavimentos com grande superfície exposta
Moderada - entre 1% e 2%	Aumento do módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto	Estruturas que exigem capacidade de absorção de energia, maior capacidade de resistência à fadiga delaminação e lascamento
Alta - maior que 2%	Fibras levam ao endurecimento por deformação de compósitos	Compósitos de alto desempenho reforçados com fibras

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Os três percentuais de inserção de fibra metálica reciclada empregados na etapa preliminar (0,5%, 1,0% e 1,5%) foram definidos baseando-se em pesquisas já realizadas com a utilização de fibra metálica industrializada no concreto, buscando tangenciar um percentual baixo, um intermediário e um elevado. O Quadro 13 apresenta uma busca em percentuais já ensaiados.

Quadro 13 – Percentuais em volume já ensaiados de fibras de aço em concretos

Porcentagem de inserção da fibra de aço (em volume)	Fonte
0,38 a 0,76%	Adaptado de Garcez (2005)
2%	Marangon (2006)
0,64%	Adaptado de Colombo, Di Prisco e Felicetti (2007)
1%, 1,5%, 2% e 2,5%	Velasco (2008)
0,6%, 0,8% e 1,15%	Quinino (2015)
1,2%, 2,4% e 3,6%	Amorim e Barbosa (2017)
0,38%	Adaptado de Silva <i>et al.</i> (2017a)
0,89%	Adaptado de Goremikins <i>et al.</i> (2017)
0,5%, 0,75% e 1%	Gil (2018)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O ACI 544.1R (ACI, 2002), Bentur e Mindess (2007) e Van Chanh (2005) recomendam a inserção de fibra em volume numa faixa de 0,6 a 1,6% para concreto

convencional reforçado com fibra de aço, utilizando agregado graúdo com diâmetro máximo de 19 mm.

Marangon (2006) e Velasco (2008), ao ensaiarem percentuais de 2 e 2,5%, encontraram muita dificuldade em dispersar as fibras na matriz cimentícia, obtendo segregação da pasta e aglomeração excessiva de fibras. Assim, não foram elencados percentuais acima de 1,5%.

3.3.2.2 Resistência à compressão

Para teores de fibras baixos e moderados, a contribuição mais importante do reforço no concreto não é para a resistência, e sim para a tenacidade do material. O aumento da tenacidade é de ordem de grandeza superior ao aumento da resistência à compressão, que é apenas moderado. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Bentur e Mindess (2007) também explicam que as fibras não atuam com o objetivo de aumentar a resistência à compressão estática do concreto, sendo que o aumento nesta propriedade pode variar de 0% a 25% para a faixa normal de teor de fibra (inferior a 2%). Mesmo em elementos que contêm reforço convencional em conjunto com as fibras de aço, as fibras têm pouco efeito na resistência à compressão. Os autores informam ainda que mesmo concretos com teores extremamente elevados de fibras não aumentam significativamente a resistência à compressão.

Em investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras, Quinino (2015) não constatou ganhos significativos de resistência à compressão com a inserção de fibras, seja em misturas simples ou híbridas.

3.3.2.3 Módulo de elasticidade

Mehta e Monteiro (2014) explicam que a inclusão de fibras de aço no concreto tem pouco efeito sobre o módulo de elasticidade. O ACI 544.1R-96 (ACI, 2002) indica que, na prática, quando o percentual volumétrico das fibras é inferior a 2%, o módulo de elasticidade de um concreto reforçado com fibra de aço é geralmente considerado igual ao de um concreto sem fibras.

No entanto, estudos experimentais indicam que o módulo de elasticidade do concreto pode ser significativamente melhorado com a adição de fibras de aço. Gul,

Bashir e Naqash (2014) trabalharam com teores de inserção de fibra de aço de 0,5%, 1,0% e 1,5%, verificando acréscimo de até 31% no módulo de elasticidade com a inserção da fibra. Já Akash e Sambowo (2014) averiguaram que o uso de fibra de aço com teor de inserção de 1,25% pode melhorar cerca de 40% o módulo de elasticidade do concreto.

3.3.2.4 Resistência à tração

Bentur e Mindess (2007) indicam que, quando as fibras estão alinhadas na direção da tensão de tração, o incremento na resistência à tração direta pode ser grande, chegando a 133% para 5% em volume de fibras de aço lisas e retas. No entanto, os autores esclarecem que para fibras distribuídas aleatoriamente, o aumento na força é menor, variando de um pequeno aumento em alguns casos a talvez 60%.

O ACI 544.1R-96 (ACI, 2002) também menciona aumentos da ordem de 30 a 40% relatados para a adição de 1,5% em volume de fibras de aço em argamassa ou concreto acerca da tração direta, indicando que a melhoria na resistência à tração pode ser significativa.

Ao estudarem adição de fibras de aço no concreto exposto ao ambiente marítimo, Tasca *et al.* (2010) verificaram que o acréscimo de resistência à tração por compressão diametral no concreto com adição de cerca de 1,15% de fibra de aço foi de 53,5% aos 28 dias em relação ao concreto sem fibra. Já no ensaio de resistência à tração na flexão, realizado aos 120 dias de idade, os autores verificaram que o ganho de resistência médio foi de 33,95% em relação ao concreto sem fibra de aço.

Amorim e Barbosa (2017), ao pesquisarem o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras metálicas nos percentuais de 1,2%, 2,4% e 3,6%, verificaram que a adição da fibra metálica aumentou a resistência ao esforço de tração em todos os traços ensaiados, havendo relação diretamente proporcional ao teor de fibra adicionada. O aumento mais relevante atingiu um valor 34% maior do que a resistência do concreto simples à tração.

3.3.2.5 Tenacidade

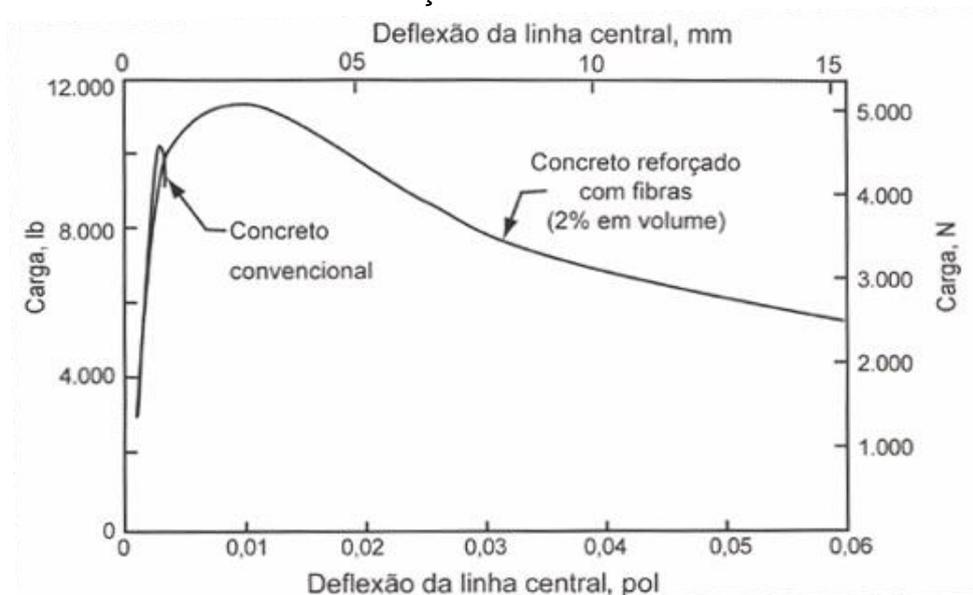
Em relação à tenacidade, Mehta e Monteiro (2014) explicam que o concreto convencional se rompe repentinamente assim que a deflexão correspondente à

resistência à flexão última é superada. No entanto, o concreto reforçado com fibras continua a suportar cargas consideráveis até mesmo com deformações maiores que a deflexão na fratura do concreto convencional.

Figueiredo (2011) elucida que a definição mais aceita para a tenacidade é a energia absorvida pelo compósito quando carregado, abrangendo a energia absorvida antes e após a fissuração da matriz, quando as fibras passam a atuar de maneira mais efetiva. Bentur e Mindess (2007) complementam esse conceito, indicando que a tenacidade é definida como a área sob a curva carga *versus* deflexão, ou tensão *versus* deformação.

As restrições à abertura e propagação das fissuras promovidas pelas fibras alteram os diagramas tensão *versus* deformação dos compósitos gerados, resultando no aumento da absorção de energia durante o processo de fratura. (FIGUEIREDO, 2000; GARCEZ, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2014). O Gráfico 7 apresenta as curvas carga *versus* deflexões típicas para concreto convencional e reforçado com fibras.

Gráfico 7 – Comportamento de carga *versus* deflexão de concreto convencional e reforçado com fibras



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 519).

A ponte de transferência de tensão que a fibra realiza através das fissuras do concreto é um mecanismo de aumento da energia associado à ruptura do material à tração. O comportamento auxilia também na restrição à propagação de fissuras por reduzir o efeito da concentração de tensões em sua borda. (FIGUEIREDO, 2011).

Ao analisar o comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos ao ensaio de tenacidade verifica-se que as curvas de carga *versus* deflexão para os diferentes tipos e volumes de fibras de aço podem variar enormemente. No entanto, é consenso entre os autores que a tenacidade de concretos reforçados com fibra de aço é maior que nos convencionais, crescendo significativamente com o aumento do teor de fibras. (FIGUEIREDO, 2011; GARCEZ, 2005; QUININO, 2015; VAN CHANH, 2005).

Além disso, fibras de aço com melhores características de ancoragem alcançam maiores percentuais de acréscimo de tenacidade do que as fibras lisas e retas nas mesmas concentrações de volume. (BENTUR; MINDESS, 2007; VAN CHANH, 2005).

3.3.2.6 Resistência à flexão

Os incrementos na resistência à flexão do concreto reforçado com fibras de aço são substancialmente maiores que os incrementos na resistência à compressão e à tração. Dados têm mostrado que a resistência à flexão do concreto reforçado com fibras de aço é cerca de 50 a 70% maior que a resistência à flexão de um concreto não reforçado (ACI, 2002), podendo alcançar até 100% de acréscimo. (BENTUR; MINDESS, 2007).

A resistência à flexão do concreto reforçado com fibra de aço é significativamente afetada pela fração volumétrica e pelo fator de forma das fibras, bem como pela aderência entre a fibra e a matriz e concreto. (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2007). Autores indicam que maiores fatores de forma da fibra levam a maiores acréscimos de resistência à flexão. (BENTUR; MINDESS, 2007; VAN CHANH, 2005).

Quinino (2015) verificou experimentalmente o efeito positivo da presença de fibra de aço no concreto, indicando que esse desempenho satisfatório pode ser associado ao efeito de retardo que essas fibras exercem no processo instável de abertura das fissuras quando a peça está submetida à flexão, resultando numa melhoria no comportamento pós-pico, sobretudo quando há maior quantidade de fibras passando pelo plano de ruptura.

Pesquisas experimentais com o uso de fibra de aço reciclada no concreto apontam para o acréscimo da resistência à flexão da matriz compósita. (GRAEFF,

2011; TLEMAT, 2004). Smrkić, Damjanović e Baričević (2017) explicam que, com um teor ideal de fibra de aço reciclada e industrializada, é possível projetar um concreto híbrido com excelente resistência à flexão.

3.3.2.7 Comportamento em altas temperaturas

A adição de fibras metálicas ao concreto, além de proporcionar ao composto características dúcteis, melhora consideravelmente seu comportamento após ser submetido a temperaturas elevadas, promovendo um aumento significativo da sua capacidade quando comparado a um concreto sem fibra sujeito às mesmas condições térmicas. (MELO *et al.*, 2002).

Novák e Kohoutková (2017) explicam que o ponto de fusão do aço é relativamente alto em comparação com outros materiais, por isso, o uso de fibras de aço traz benefícios ao concreto submetido a altas temperaturas, mesmo quando exposto a temperaturas de até 1.200 °C.

O Quadro 14 demonstra, por meio de dados experimentais, a eficácia do CRFA exposto a altas temperaturas quando comparado ao concreto convencional no que tange à fissuração. É evidente que o uso de fibras de aço no concreto retarda o aparecimento de fissuras.

Quadro 14 – Inspeção visual em fissuras em concretos expostos a altas temperaturas

Análise de fissuras	Concreto sem fibras	Concreto reforçado com fibras de aço
Fissuras capilares	a partir de 300 °C	a partir de 600 °C
Microfissuras	a partir de 600 °C	a partir de 800 °C
Macrofissuras e fissuras severas	a partir de 800 °C	a partir de 1.000 °C

Fonte: Adaptado de Lau e Anson (2006).

Ao ensaiar as propriedades residuais de corpos de prova de concreto reforçado com fibras de aço frente a temperaturas entre 100 °C a 1.200 °C, Lau e Anson (2006) não verificaram em suas amostras o deslocamento explosivo, apesar de esse fenômeno ter sido evidenciado por outros autores. (GUEDON, 2013; LIMA, 2005). No entanto, é possível observar que a inserção da fibra de aço posterga o período em que o deslocamento ocorre e reduz os danos ao concreto sob alta temperatura. (DOHERTY *et al.*, 2012).

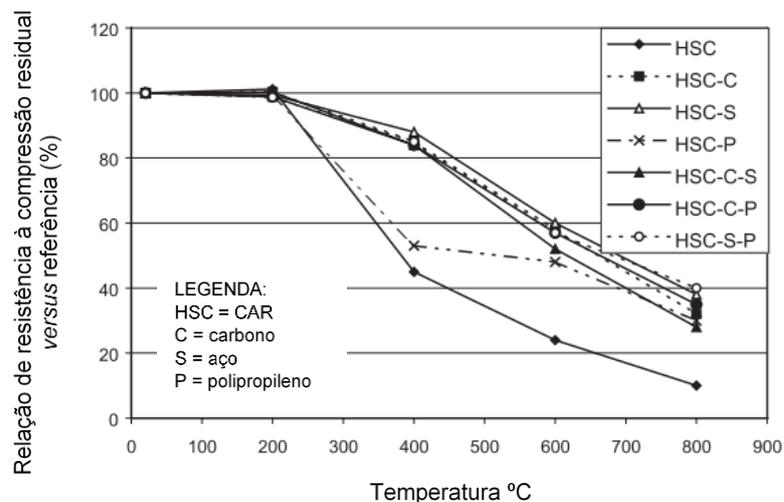
Simonetti *et al.* (2019) também verificaram a resistência à compressão residual de concreto convencional com a inserção de fibra metálica reciclada de pneu inservível após a ação de altas temperaturas. Em 600 °C, o concreto com 1,5% de inserção de fibra metálica reciclada manteve 65,2% da resistência à compressão do concreto original, enquanto o concreto sem adição de fibra obteve 45,9% dessa propriedade.

Figueiredo *et al.* (2019) também estudaram o efeito de fibras de aço recicladas de pneus inservíveis em concretos com deslocamento explosivo, verificando que as fibras de aço recicladas podem contribuir para a redução do risco de deslocamento, bem como podem evitar danos sérios mantendo o concreto fragmentado preso à superfície aquecida e, de certa forma, protegendo as barras de aço.

Ao estudarem o concreto de alto desempenho com fibras de aço, Lima *et al.* (2003) verificaram que, a 400 °C, as fibras de aço tiveram um efeito positivo mantendo 65% da resistência original do concreto. Já corpos de prova sem a adição de fibras, a 400 °C, estavam totalmente comprometidos com resistência 90% inferior à resistência original. No entanto, os autores constataram que, a 800 °C, as fibras de aço não foram eficientes, apresentando a mesma resistência residual do concreto sem fibras nesta temperatura.

Resultados apontam que a redução na resistência à compressão de CRFA é considerável entre 400 e 800 °C (Gráfico 8). Abaixo de 400 °C dados indicam que a redução na resistência é perceptível, mas não tão significativa. (CHEN; LIU, 2004; LAU; ANSON, 2006).

Gráfico 8 – Relação de resistência à compressão residual de misturas de CAR em diversas temperaturas *versus* temperatura referência a 20 °C



Fonte: Adaptado de Chen e Liu (2004).

Ao compararem concreto de alta resistência, com e sem adição de fibra de aço, Chen e Liu (2004) verificaram que a adição de fibras melhorou a resistência à tração do compósito. Os autores esclarecem que as fibras de aço podem, até certo ponto, restringir a iniciação e a expansão de fissuração no concreto devido à sua resistência à tração, que mantém maiores resistências residuais dos concretos após a exposição a alta temperatura.

Kodur (2014) também reforça esse conceito, indicando que a perda de resistência à tração do concreto reforçado com fibra de aço diminui a uma taxa menor do que a do concreto convencional quando submetido a uma faixa de temperatura entre 20 a 800 °C. Esse incremento da resistência à tração pode atrasar a propagação de trincas nos elementos estruturais de concreto reforçado com fibra de aço quanto expostos em altas temperaturas.

Novák e Kohoutková (2017) também relatam que as fibras de aço melhoram consideravelmente a resistência à tração em temperaturas até 400 °C. Os autores explicam que o comportamento à tração do CRFA sujeito a temperatura elevada é mais sensível ao volume de inserção da fibra de aço que o seu tipo.

Lau e Anson (2006) verificaram que, para todos os valores de temperatura testados, os concretos reforçados com fibras de aço apresentam melhor resistência à flexão do que os concretos sem fibras de aço, embora não haja diferença significativa na resistência à flexão entre o CRFA e as misturas não fibrosas após a exposição a 1.000 °C. Goremikins *et al.* (2017) indicam que a resistência à flexão de concretos

reforçados com fibra de aço a 400 °C é reduzida em 25% quando comparados a elementos ensaiados a 20 °C, enquanto que a 600 °C esta redução é de 59%.

No que diz respeito à tenacidade e à resistência à flexo-tração, nos concretos reforçados com fibras não há perda significativa dessas características, como ocorre com os compostos sem adição de fibras. Resultados indicam que as fibras metálicas são uma adição necessária ao concreto quando se vislumbra a possibilidade de ocorrência de incêndios ou elevadas temperaturas de serviço. (MELO *et al.*, 2002).

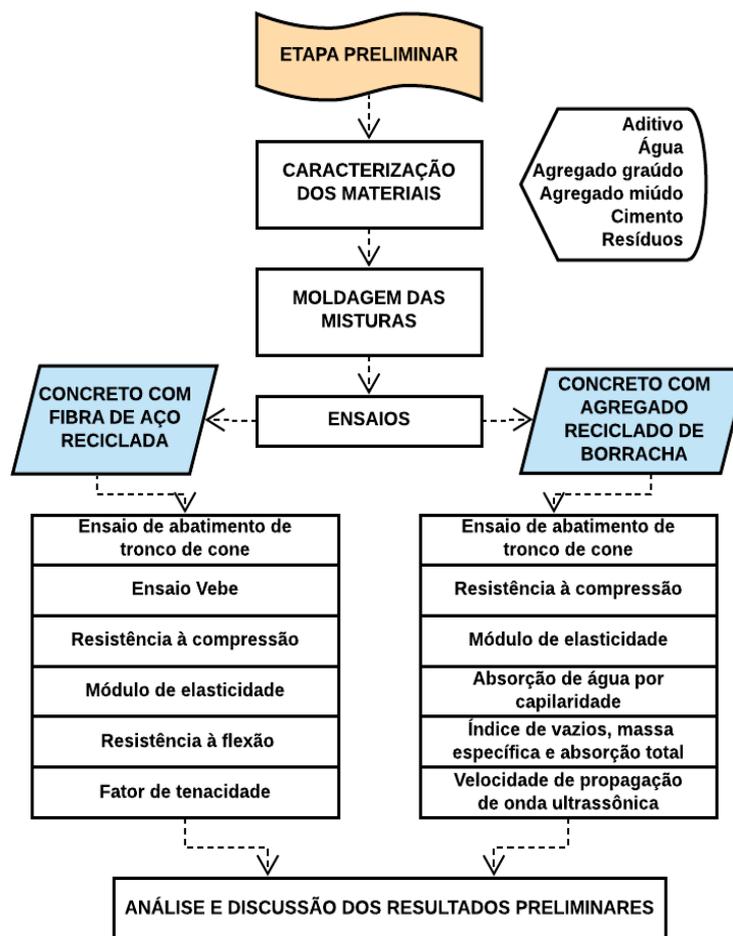
De forma geral, a fibra de aço confere ao concreto certa resistência mecânica residual mesmo quando exposto a altas temperaturas, melhorando a capacidade de suporte da própria estrutura e diminuindo a perda de resistência em temperaturas elevadas. (COLOMBO; DI PRISCO; FELICETTI, 2010; KODUR, 2014).

4 ETAPA PRELIMINAR DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em duas fases, sendo a primeira uma etapa preliminar, que corresponde a um programa piloto com caráter exploratório dos materiais reciclados. Em sequência, a segunda etapa é denominada etapa final e abrange os ensaios principais em altas temperaturas, de reação e de resistência ao fogo, conforme descrito no quinto capítulo.

A etapa preliminar iniciou com a caracterização dos materiais e prosseguiu com a moldagem de corpos de prova de concretos com a substituição do agregado miúdo por agregado reciclado de borracha e, em separado, com a inserção da fibra metálica reciclada. A etapa preliminar teve como intuito a avaliação física e mecânica dos concretos elaborados em pequena escala em corpos de prova cilíndricos. A Figura 10 ilustra a estratégia da etapa preliminar do programa experimental.

Figura 10 – Etapa preliminar do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

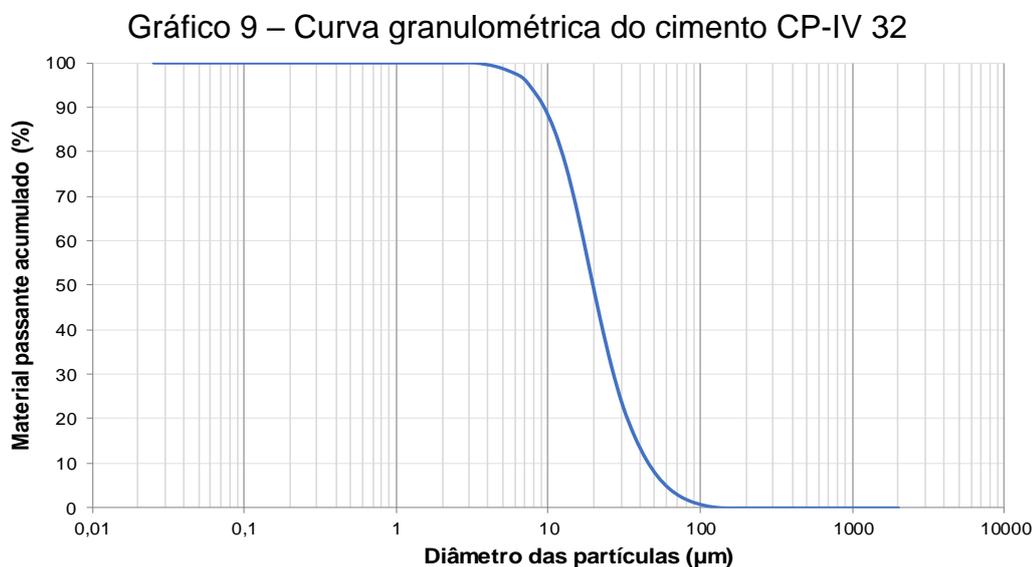
Cabe ressaltar que os resultados e o conhecimento adquiridos na etapa preliminar desta pesquisa deram origem a dois trabalhos de conclusão de curso (BATISTA, 2018; BAUER, 2018) e quatro publicações.

4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL PRELIMINAR

4.1.1 Caracterização dos materiais empregados na etapa preliminar

4.1.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção dos concretos foi o tipo CP-IV 32. Foi realizada granulometria a *laser* no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), utilizando como fluído o álcool isopropílico e o equipamento Microtrac modelo S3500. O material apresentou os diâmetros característicos de D10 igual a 7,91 μm , D50 igual a 16,55 μm , D90 igual a 38,40 μm e Dmédio igual a 19,05 μm (Gráfico 9).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia de origem quartzosa. Para caracterizar o agregado miúdo, foi realizado ensaio de composição granulométrica, conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a) cujos

resultados podem ser observados na Tabela 9. Outras características físicas do agregado miúdo são apresentadas no Quadro 15.

Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
6,3	0,0	0,0	0,0
4,75	0,4	0,1	0,1
2,36	1,7	0,3	0,4
1,18	2,7	0,5	0,9
0,60	38,6	7,7	8,7
0,30	215,4	43,0	51,7
0,15	208,2	41,6	93,3
Fundo	33,5	6,7	100,0
TOTAL	500,5	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 15 – Características físicas do agregado miúdo

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	1,18 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	1,55	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,49 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,61 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado seco	2,59 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,60 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no estudo tem origem basáltica, sendo extraído de regiões próximas a Porto Alegre/RS. Para caracterizar o agregado graúdo, foi realizado ensaio de composição granulométrica conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 10. Outras características físicas do agregado graúdo são apresentadas no Quadro 16.

Tabela 10 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
25	0,0	0,0	0,0
19	830,0	16,6	16,6
12,5	3.492,1	69,8	86,4
9,5	574,6	11,5	97,9
6,3	101,5	2,0	100,0
4,75	1,9	0,0	100,0
<4,75	0,0	0,0	0,0
TOTAL	4.996,6	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 16 – Características físicas do agregado graúdo

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	25 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	7,15	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,52 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,69 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado seco	2,82 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,74 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.1.4 Agregado reciclado de borracha

O agregado reciclado de borracha (ARB) foi fornecido pela empresa INDIBA – Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda., de Nova Santa Rita, Rio Grande do Sul (RS), especializada na reciclagem de pneus e confecção de percintas para a indústria moveleira, borracha moída, solados e saltos a partir de pneus usados.

O material fornecido pela recicladora possui faixas granulométricas de 0,7 a 2 mm (Figura 11). A caracterização desse material foi semelhante ao do agregado miúdo, utilizando as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003), da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a) e da NBR NM 45 (ABNT, 2006a). No entanto, para determinação da massa específica, optou-se pelo método dos frascos de Chapman, descrito pela extinta norma NBR 9776 (ABNT, 1988b), utilizando querosene devido à sua baixa massa específica (0,786 g/cm³), o que permite a total decantação do material suspenso.

Figura 11 – Amostra do agregado reciclado de borracha da etapa preliminar



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Tabela 11 apresenta a distribuição granulométrica do material, e o Quadro 17 mostra os resultados das propriedades físicas do ARB.

Tabela 11 – Composição granulométrica do ARB

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
6,3	0,0	0,0	0,0
4,75	0,3	0,2	0,2
2,36	120,3	80,2	80,4
1,18	28,2	18,8	99,2
0,60	1,3	0,8	100,0
0,30	0,0	0,0	100,0
0,15	0,0	0,0	100,0
Fundo	0,0	0,0	100,0
TOTAL	150,1	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 17 – Características físicas do ARB

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	4,75 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	3,80	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	0,54 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica	1,21 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

4.1.1.5 Fibra de aço reciclada

As fibras metálicas utilizadas neste trabalho (Figura 12) são recicladas e originadas de pneus inservíveis que passaram por um processo de tratamento para remoção de partículas de borracha e outros resíduos. Também foram fornecidas pela

empresa Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda. (INDIBA), de Nova Santa Rita, RS.

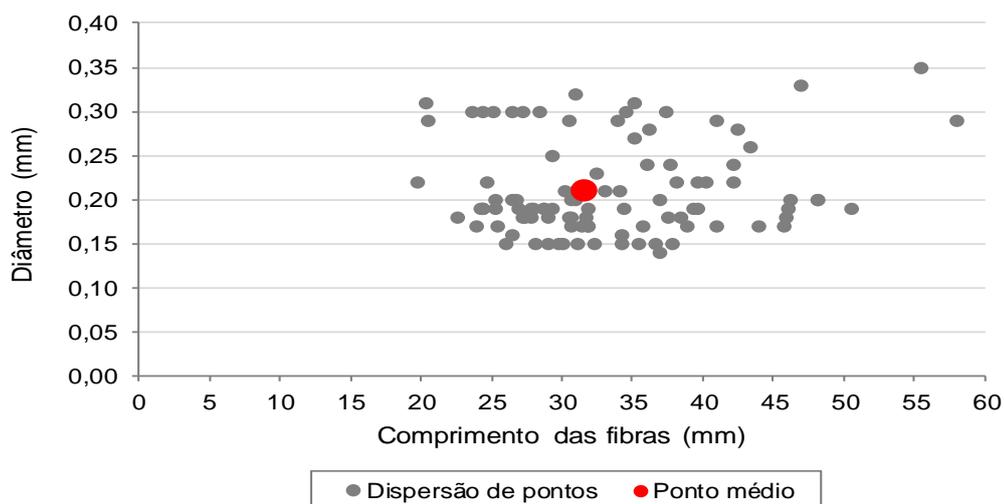
Figura 12 – Amostra da fibra de aço reciclada da etapa preliminar



Fonte: Acervo da autora (2020).

As fibras recicladas utilizadas no estudo possuem diâmetro médio de 0,21 mm e comprimento médio de 31,50 mm. O Gráfico 10 mostra a dispersão do diâmetro e do comprimento das fibras recicladas empregadas na etapa preliminar desta pesquisa, sendo que essa difusão aleatória é atribuída à falta de padronização durante o processamento do pneu inserível para obtenção do resíduo.

Gráfico 10 – Dispersão das características das fibras de aço recicladas utilizadas na etapa preliminar



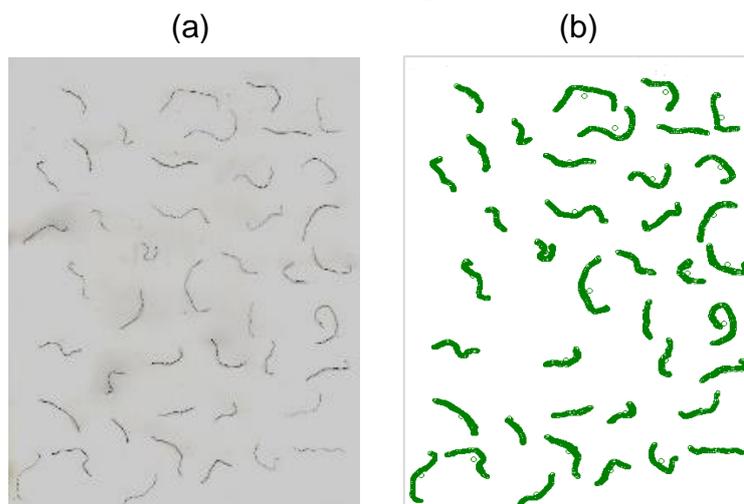
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Para determinar o comprimento médio das fibras, foram realizadas imagens com a utilização de um escâner comum, sendo analisadas pelo *software* Digimizer®. Este programa computacional permite a medição precisa do comprimento médio das

fibras, a qual foi determinada a partir de uma amostragem de 210 unidades, realizada por quarteamento, de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001c). O diâmetro médio das fibras foi obtido pela medida unitária de cada elemento da amostra, utilizando-se um paquímetro digital.

Antes de ser escaneada, a amostra passou por um processo de limpeza manual no qual foram selecionadas apenas as fibras metálicas. Resíduos, como pequenas partículas de borracha ou náilon, foram descartados para que a análise fosse realizada exclusivamente sobre as fibras, sem interferência. Cabe ressaltar que esse processo de limpeza fina não foi realizado sobre as fibras metálicas que foram inseridas no concreto. A Figura 13 apresenta duas imagens feitas das fibras (a) com a limpeza manual e (b) a imagem analisada pelo Digimizer®.

Figura 13 – Imagem das fibras de aço (a) após limpeza manual e (b) escaneadas através do Digimizer®



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.1.1.6 Aditivo superplastificante e água

O aditivo empregado foi o MC-PowerFlow 1180® da MC-Bauchemie, um superplastificante sintético de alto desempenho baseado na tecnologia de polímeros policarboxilatos; encontra-se no estado líquido, cor marrom e possui densidade de 1,09 g/cm³.

A água utilizada na moldagem das amostras foi a do abastecimento da rede pública realizado pelo Serviço Municipal de Água e Esgotos de São Leopoldo/RS.

4.1.2 Concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível

Nesta etapa, foram moldadas amostras de três diferentes misturas de concreto, variando a porcentagem de substituição agregado miúdo por agregado reciclado de borracha. Todos os demais parâmetros de mistura foram mantidos constantes.

Os concretos foram dosados com base no traço desenvolvido por Pacheco (2016). Foi utilizado traço de 1:2,9:3,0 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), relação água/cimento fixa de 0,53 e percentual de 0,6% de aditivo superplastificante sobre a massa do cimento.

Foi empregado ARB com granulometria de 0,7 a 2 mm, e percentuais de substituição, em volume em relação ao agregado miúdo, de 5% (BOR5%), 7,5% (BOR7,5%) e 10% (BOR10%). Os dados das dosagens elaboradas estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos com ARB

Insumo	Traços			
	REF	BOR5%	BOR7,5%	BOR10%
Cimento (kg/m ³)	320,87	320,87	320,87	320,87
Areia (kg/m ³)	930,51	884,0	860,7	837,5
Brita (kg/m ³)	962,6	962,6	962,6	962,6
Água (kg/m ³)	170,1	170,1	170,1	170,1
Aditivo (kg/m ³)	1,93	1,93	1,93	1,93
ARB (kg/m ³)	-	16,8	25,2	33,7

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.1.2.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

No estado fresco, para cada traço, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e os resultados foram classificados de acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2002).

4.1.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo adotada uma velocidade de aplicação de carga de 0,3 MPa por minuto. Esse ensaio ocorreu nas idades de 7 e 28

dias, para registro e acompanhamento do desenvolvimento da resistência à compressão ao longo do tempo. Foram ensaiados 3 corpos de prova por idade confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Os corpos de prova foram retificados para distribuição uniforme de tensão na superfície das amostras durante o ensaio. Utilizou-se uma prensa hidráulica INSTRON-EMIC, modelo 23-300, com capacidade de 2.000 kN, localizada no Laboratório de Segurança Estrutural do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance), na UNISINOS.

4.1.2.3 Módulo de elasticidade

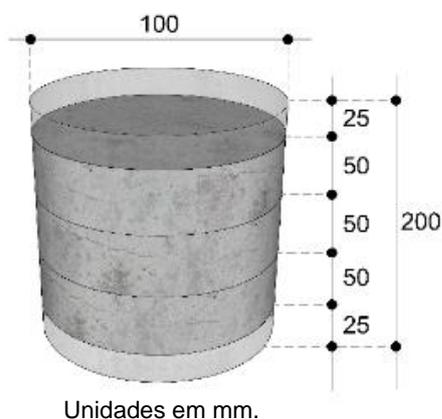
O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos concretos foi realizado segundo as prescrições da norma brasileira NBR 8522 (ABNT, 2017b), na idade de 28 dias, sendo ensaiados 3 corpos de prova confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Os valores de carga e deslocamentos verticais foram coletados e armazenados em um computador conectado à prensa. Utilizou-se, para essa análise, uma prensa hidráulica INSTRON-EMIC, modelo 23-300, com capacidade de 2.000 kN, localizada no Laboratório de Segurança Estrutural do itt Performance, na UNISINOS.

4.1.2.4 Absorção de água por capilaridade

Para a aferição da absorção do teor de água por capilaridade, foi realizado o ensaio pelo método RILEM TC 116 PCD (RILEM, 1999). Os corpos de prova foram ensaiados aos 7 e 28 dias de idade, confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. As amostras foram obtidas pela divisão dos corpos de prova em três partes centrais de 50 mm+/-1, de acordo com a Figura 14, excluindo as extremidades. Para cada traço, foram ensaiadas três partes centrais particionadas.

Figura 14 – Amostragem para ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As amostras foram preparadas e ensaiadas no Laboratório de Materiais de Construção, na UNISINOS, em sala climatizada sob as condições de temperatura e umidade controladas, com umidade relativa do ar $65 \pm 5\%$ e temperatura 23 ± 2 °C.

Os espécimes foram previamente secos em estufa até a constância de massa e medidos em relação à altura, diâmetro e massa inicial. Após, verificou-se a massa das amostras submetidas ao nível de água corrente nos períodos de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 1.440, 2.880, 4.320 e 5.760 minutos.

A Figura 15 apresenta as amostras envoltas com balão e fita adesiva de alta adesão, de forma a isolar da influência do ambiente, considerando apenas a avaliação da base em contato com a água.

Figura 15 – Amostras para ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Acervo da autora (2020).

4.1.2.5 Índice de vazios, massa específica e absorção total de água

A aferição do índice de vazios, massa específica e absorção de água foi feita por meio de ensaio definido pela NBR 9778 (ABNT, 2009d). Os corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias de idade e confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016) nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo três amostras para cada um dos traços.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção, na UNISINOS. Os corpos de prova foram armazenados no ambiente de cura, em câmara úmida com umidade relativa do ar $95 \pm 5\%$ e temperatura ambiente $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até a idade dos ensaios. O resfriamento das amostras ocorreu na sala climatizada de temperatura e umidade controladas, com umidade relativa do ar $65 \pm 5\%$ e temperatura ambiente $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.2.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica seguiu o procedimento da NBR 8802 (ABNT, 2019b) e foi realizado em corpos de prova ensaiados aos 28 dias, confeccionados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016) nas dimensões de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, sendo três amostras para cada um dos traços, utilizando-se o valor médio para análise.

Os corpos de prova foram retificados e utilizou-se como material acoplante a vaselina sólida, aplicada nas faces extremas da amostra com uma camada de aproximadamente 5 mm de espessura com intuito de promover a homogeneização da superfície de concreto que recebeu os transdutores e evitar a penetração de ar durante o ensaio.

O instrumento ultrassônico utilizado foi da marca PROCEQ, modelo Pundit Lab. O ensaio foi realizado pelo método de transmissão direta, na qual o transmissor e o transdutor são colocados em faces opostas ao elemento em análise para obter a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. Foram realizadas três repetições de leituras por corpo de prova.

Os resultados médios de velocidade de propagação de onda ultrassônica para cada mistura foram classificados conforme o Quadro 18, que mensura a qualidade do

concreto de acordo com o resultado obtido. Essa classificação foi proposta por Cánovas (1988) e adotada por IS 13311 (BUREAU OF INDIAN STANDARDS, 1992).

Quadro 18 – Qualidade do concreto em relação à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (m/s)	Qualidade do concreto	
	IS 13311-92	Cánovas (1988)
Acima de 4500	Excelente	Excelente
4500 - 3500	Boa	Ótimo
3500 - 3000	Média	Bom
Inferior a 3000	Duvidosa	-
3000 - 2000	-	Regular

Fonte: Adaptado de Cánovas (1988) e de IS 13311 (BUREAU OF INDIAN STANDARDS, 1992).

4.1.3 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica

Nesta etapa, foram moldadas amostras de três diferentes dosagens de concreto, variando a porcentagem de inserção em volume da fibra de aço proveniente do processo de trituração e moagem de pneus inservíveis.

Os concretos foram dosados com base no traço desenvolvido por Pacheco (2016), com um traço de 1:2,9:3,0 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo), relação água/cimento de 0,53 e percentual fixo de 0,6% de aditivo superplastificante sobre a massa do cimento para todos os concretos confeccionados.

A fibra de aço inserida na matriz de concreto é reciclada, e os percentuais de inserção foram 0,5% (FIB0,5%), 1,0% (FIB1,0%) e 1,5% (FIB1,5%) em volume. A Tabela 13 apresenta o traço referência e a quantidade de cada percentual de fibra empregado. O cálculo do volume da fibra de aço foi realizado de acordo com Christ (2014), empregando valor da densidade do aço igual a 7.850 kg/m³.

Tabela 13 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos com fibra de aço reciclada

(continua)

Insumo	Traços			
	REF	FIB0,5%	FIB1,0%	FIB1,5%
Cimento (kg/m ³)	320,9	320,9	320,9	320,9
Areia (kg/m ³)	930,5	930,5	930,5	930,5
Brita (kg/m ³)	962,6	962,6	962,6	962,6

Tabela 13 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos com fibra de aço reciclada

(conclusão)

Insumo	Traços			
	REF	FIB0,5%	FIB1,0%	FIB1,5%
Água (kg/m ³)	170,1	170,1	170,1	170,1
Aditivo (kg/m ³)	1,93	1,93	1,93	1,93
Fibra de aço reciclada (kg/m ³)	-	39,2	78,5	117,7

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.1.3.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

No estado fresco, para cada traço, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e os resultados foram classificados de acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2002).

Conforme já mencionado no item 3.3.1, sabe-se que o abatimento de tronco de cone não é o ensaio mais apropriado para avaliar a trabalhabilidade de misturas de concretos reforçados com fibras. No entanto, esse ensaio foi utilizado como forma de qualificar o comparativo com o concreto referência.

4.1.3.2 Ensaio VeBe

De acordo com Figueiredo (2011), o baixo teor de fibras adicionadas ao concreto não interfere de modo significativo na sua trabalhabilidade, porém, quando se aumenta esse teor, aumenta-se o tempo de compactação pelo ensaio de VeBe, em virtude de uma maior coesão do material.

A determinação da consistência do concreto no estado fresco foi realizada pelo consistômetro VeBe, de acordo com a norma técnica DNIT 064 (2004). Esta norma brasileira é utilizada na determinação da consistência de concretos muito secos, com foco na utilização em pavimentos rígidos de estradas de rodagem, e ocorre pela contagem de tempo necessário para remoldagem de um tronco de cone de concreto fresco em um cilindro sob vibração padronizada (Figura 16).

Figura 16 – Execução do ensaio VeBe



Fonte: Acervo da autora (2020).

4.1.3.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo o procedimento descrito no item 4.1.2.2, nas idades de 7, 14 e 28 dias.

4.1.3.4 Módulo de elasticidade

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dos concretos produzidos foi realizado de acordo o procedimento descrito no item 4.1.2.3, na idade de 28 dias.

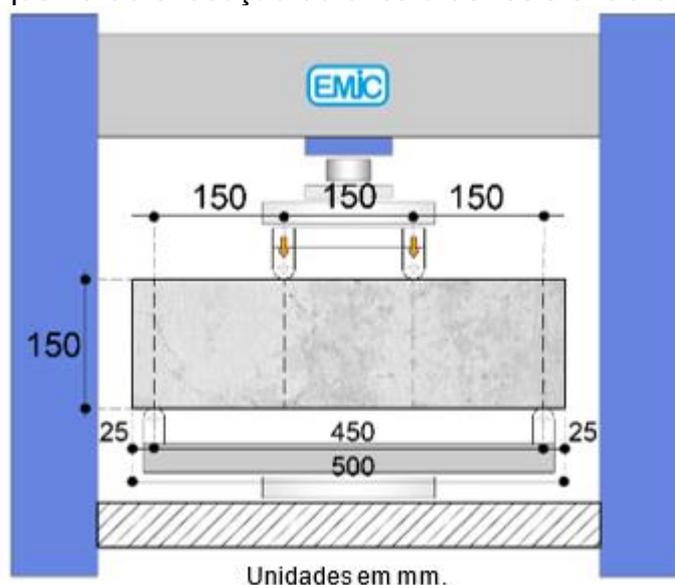
4.1.3.5 Resistência à tração na flexão

A determinação da resistência à tração na flexão foi determinada de acordo com a norma brasileira NBR 12142 (ABNT, 2010) e em conformidade com a norma japonesa JSCE-SF4 (1984), utilizando corpos de prova prismáticos que recebem carregamento nos terços do vão.

O ensaio foi realizado aos 28 dias, com corpo de prova prismático com dimensões de 150 mm de largura, 150 mm de altura e 500 mm de comprimento, sendo avaliadas três unidades para cada percentual de inserção de fibra no concreto.

Como parâmetros do ensaio, a distância entre apoios inferiores é de 450 mm, a distância entre rótulas para aplicação de carga é de 150 mm e a velocidade de aplicação de carga é 1,05 MPa/min (Figura 17).

Figura 17 – Esquema de execução do ensaio de resistência à tração na flexão

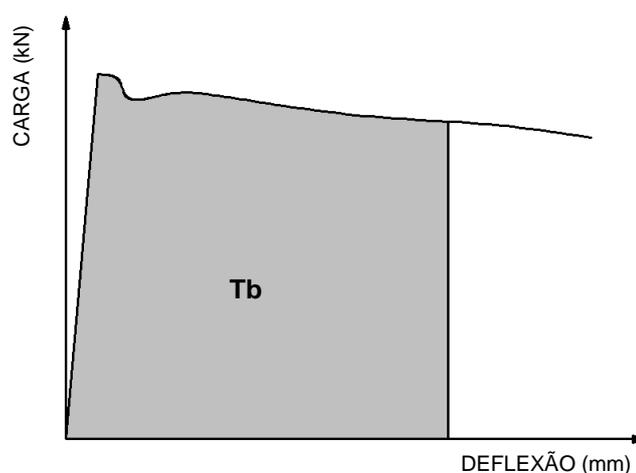


Unidades em mm.
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.1.3.6 Fator de tenacidade

A partir dos dados coletados por meio do ensaio de quatro pontos da norma japonesa JSCE-SF4 (1984), foi possível plotar uma curva de carga *versus* deflexão, da qual se pode obter a tenacidade à flexão do material calculando a área sob a curva, conforme indicado no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Critério da JSCE-SF4 (1984) para a determinação da tenacidade na flexão



Fonte: Adaptado de JSCE-SF4 (1984).

A norma japonesa utiliza o valor do fator de tenacidade para qualificar a tenacidade à flexão, que é obtida pela área total (T_b) até a deflexão equivalente (δ_{tb}),

igual a $L/150$. No caso de $L = 450$ mm, a deflexão resultante é de 3 mm. Dessa forma, o valor de T_b será utilizado para se obter o fator de tenacidade (FT) expresso em MPa, a partir da Equação 2.

$$FT = \frac{T_b}{\delta_{T_b}} \cdot \frac{L_v}{b_v \cdot h_v^2} \quad (2)$$

Onde:

FT = fator de tenacidade (MPa);

T_b = área do gráfico até o deslocamento equivalente de $L/150$ (N.mm);

δ_{T_b} = deslocamento equivalente a $L/150$ (mm);

B_v = largura da viga (mm);

L_v = vão da viga durante o ensaio (mm);

h_v = altura da viga (mm).

4.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PRELIMINARES

Nesta etapa preliminar, todos os resultados dos ensaios aplicados foram submetidos a testes estatísticos para verificação do grau de significância do efeito das variáveis nas propriedades estudadas. Foi realizada a análise de um delineamento fatorial hierárquico, quando eram avaliados o tipo de resíduo e o percentual de substituição ou inserção simultaneamente. Para as variáveis que foram mensuradas em somente um dos materiais, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de uma via.

As comparações múltiplas dos diferentes percentuais de substituição ou inserção foram realizadas com o Teste de Tukey, utilizando o pacote *emmeans* versão 1.4.3.01. (LENTH *et al.*, 2019). Todas as análises foram realizadas com um nível de significância de 5% com auxílio do *software* R® versão 3.6.1. (R CORE TEAM, 2019).

4.2.1 Concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível

4.2.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos no ensaio de abatimento de tronco de cone para os diferentes concretos. Cabe salientar que as moldagens foram concluídas em um mesmo turno, sendo que as condições climáticas no momento da moldagem foram de temperatura igual a 22,6 °C e umidade relativa do ar igual a 80%.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone

Traço	Abatimento (mm)
REF	170
BOR5%	130
BOR7,5%	165
BOR10%	155

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Observa-se, na Tabela 14, que não é possível verificar um comportamento linear entre o abatimento de tronco de cone e o teor de incorporação de ARB, possivelmente justificado pela estreita diferença nos percentuais de substituição do ARB entre os diferentes traços estudados. Entretanto, a diminuição da trabalhabilidade ocorre em todos os traços com a inserção do resíduo quando comparado ao concreto referência, concordando com outros estudos encontrados na literatura. (ALBUQUERQUE, 2009; MARQUES; NIRSCHL; AKASAKI, 2006; SANTOS *et al.*, 2017).

A redução na consistência atinge um máximo de, aproximadamente, 24% com relação ao BOR5%. Já os traços BOR7,5% e BOR10% apresentam redução no abatimento de 3% e 9%, respectivamente. Cabe salientar que a redução do abatimento constatada não impediu ou causou prejuízo significativo para a moldagem dos corpos de prova.

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), os traços REF e BOR7,5% se enquadram na classe de consistência S160, enquanto os concretos BOR5% e BOR10% integram a classe S100.

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone não foram submetidos à análise quantitativa analítica, tendo em vista que foi coletado um único

valor dessa propriedade para cada mistura. Desta forma, foi feita apenas a classificação conforme a NBR 7212. (ABNT, 2012).

4.2.1.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 7 e 28 dias e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 15, sendo destacados os valores de resistência potencial e resistência média.

Tabela 15 – Valores obtidos de resistência à compressão

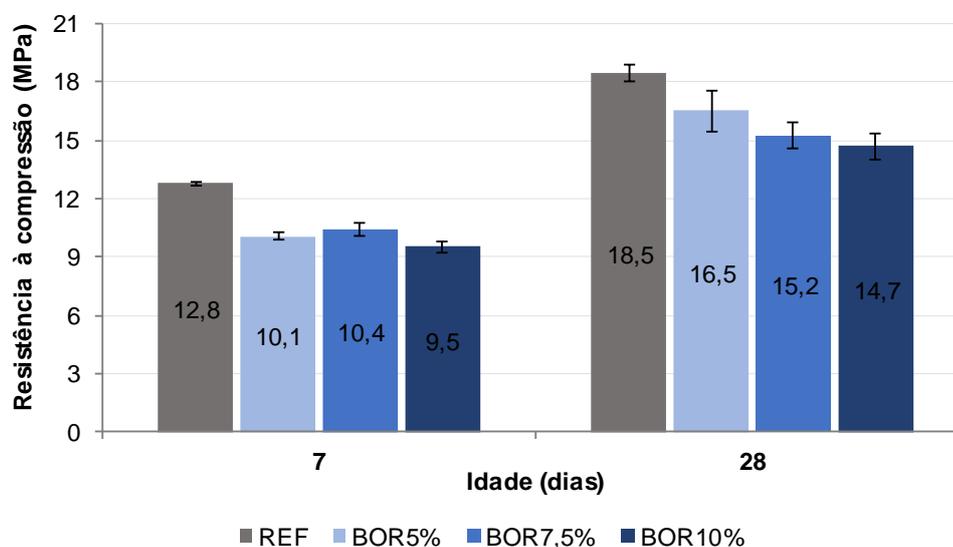
Traço	7 dias			28 dias		
	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
REF	13,0	12,8	0,11	19,0	18,5	0,44
BOR5%	10,2	10,1	0,19	17,2	16,5	1,05
BOR7,5%	10,7	10,4	0,37	15,8	15,2	0,68
BOR10%	9,8	9,5	0,26	15,2	14,7	0,69

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 15, percebe-se a pequena variabilidade entre os resultados das amostras aos 7 dias, tendo um desvio padrão máximo de 0,40. Entretanto, para a análise conduzida aos 28 dias, obteve-se um desvio padrão de até 1,05.

O Gráfico 12 indica a evolução da resistência à compressão entre os 7 e os 28 dias de idade para todas as misturas elaboradas. Como pode ser observado, o decréscimo da resistência à compressão foi de 11%, 18% e 21% para os traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10%, respectivamente, aos 28 dias. A incorporação do ARB no concreto ocasionou a diminuição da resistência à compressão nas duas idades ensaiadas, como já era esperado, conforme resultados encontrados em outras pesquisas. (ALBUQUERQUE, 2009; SCHIMELFENIG *et al.*, 2017; SOUSA *et al.*, 2017).

Gráfico 12 – Evolução da resistência à compressão: concreto com ARB na etapa preliminar



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade de resistência à compressão, aos 28 dias, foi realizada análise de variância, e os resultados estão apresentados na Tabela 16. Com nível de confiança de 95%, é possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à resistência à compressão.

Tabela 16 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	25,5	8,5	0,0012
Resíduos	8	4,494	0,562	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 17), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de resistência à compressão inferiores ao da amostra referência (grupo 2). Os resultados da Tabela 17 são compatíveis com o Gráfico 12.

Tabela 17 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
10%	14,714	13,333	16,096	1
7,5%	15,226	13,844	16,608	1
5%	16,258	15,146	17,909	1
REF	18,490	17,108	19,871	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), mesmo que a análise descritiva tenha mostrado comportamento decrescente em até 21% para a propriedade resistência à compressão conforme o incremento do ARB.

4.2.1.3 Módulo de elasticidade

A Tabela 18 mostra os valores médios obtidos do módulo de elasticidade na idade de 28 dias, bem como o desvio padrão obtido nas distintas dosagens. Conforme já esperado, o módulo de elasticidade foi menor para todos os traços que contêm ARB quando comparado ao concreto referência, comportamento demonstrado também em outros estudos. (KOBAYASHI; PIMENTEL; ELISABETE, 1999; LOPES *et al.*, 2005).

Tabela 18 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias

Traço	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
REF	29,5	0,73
BOR5%	24,9	1,69
BOR7,5%	23,8	0,96
BOR10%	23,0	2,14

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10% indicaram decréscimos de 16%, 19% e 22%, respectivamente, evidenciando uma proporcionalidade entre o aumento do incremento de ARB e a redução do módulo de elasticidade.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação ao módulo de elasticidade, aos 28 dias, foi realizada análise de variância, e os resultados estão apresentados na Tabela 19. Com nível de confiança de 95%, é possível

constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação ao módulo de elasticidade.

Tabela 19 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	73,99	24,66	0,0032
Resíduos	8	17,75	2,219	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 20), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de módulos de elasticidade inferiores ao da amostra referência (grupo 2).

Tabela 20 – Agrupamento de resultados de módulo de elasticidade conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR10%	23,037	20,291	25,783	1
BOR7,5%	23,848	21,102	26,594	1
BOR5%	24,915	22,169	27,661	1
REF	29,458	26,712	32,204	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), mesmo que a análise descritiva tenha mostrado comportamento decrescente em até 22% para a propriedade módulo de elasticidade conforme o incremento do ARB. Esse comportamento é compatível com os valores da análise quantitativa analítica para a resistência à compressão, uma vez que são duas propriedades relacionadas.

4.2.1.4 Absorção de água por capilaridade

Nas Tabelas 21 e 22, estão apresentados dados baseados nos resultados de absorção de água por capilaridade aos 7 e 28 dias, sendo estes: resistência capilar

(R), taxa de absorção capilar (S) e a absorção efetiva (P_{ef}). A absorção capilar se divide em duas fases: a fase de absorção e a fase de saturação, sendo o valor da absorção efetiva referente à absorção total.

Tabela 21 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade – 7 dias

Traço	R (h/m^2)		S ($\text{mm}.\sqrt{\text{h}}$)		P _{ef} (g/cm^3)	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
REF	9.676	2.110,34	11,73	0,94	0,117	0,00
BOR5%	8.033	1.096,61	8,93	0,62	0,083	0,00
BOR7,5%	6.123	1.372,74	9,74	0,61	0,080	0,01
BOR10%	4.900	548,70	9,46	0,51	0,070	0,00

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Legenda: (R) resistência capilar; (S) taxa de absorção capilar; (P_{ef}) absorção efetiva.

Tabela 22 – Dados do ensaio de absorção de água por capilaridade – 28 dias

Traço	R (h/m^2)		S ($\text{mm}.\sqrt{\text{h}}$)		P _{ef} (g/cm^3)	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
REF	7.152	1.492,26	7,29	0,56	0,064	0,007
BOR5%	6.653	1.792,00	6,12	0,62	0,052	0,001
BOR7,5%	6.977	2.303,71	5,91	0,93	0,051	0,001
BOR10%	5.989	546,83	6,07	0,66	0,050	0,004

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Legenda: (R) resistência capilar; (S) taxa de absorção capilar; (P_{ef}) absorção efetiva.

Observando os resultados de resistência capilar, taxa de absorção capilar e absorção efetiva aos 7 e 28 dias expostos na Tabela 22, percebeu-se que os maiores valores foram atingidos pelo traço referência.

Não foi possível indicar uma diminuição linear da taxa de absorção capilar para os 7 e 28 dias, uma vez que os dados se comportaram de modo aleatório. Já para a resistência capilar e a absorção efetiva, observou-se a diminuição destas propriedades com o aumento do percentual de inserção de borracha.

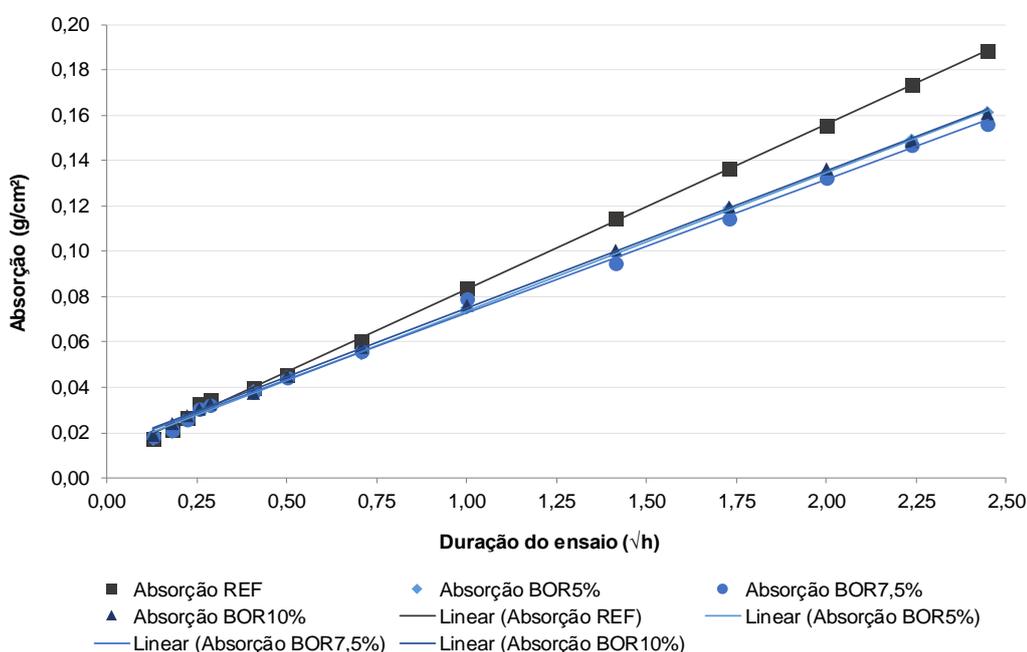
Analisando de maneira descritiva a absorção efetiva aos 28 dias, notou-se um comportamento decrescente conforme o incremento do ARB, apresentando decréscimos de 19%, 20% e 22% para os traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10%, respectivamente, em relação aos valores do concreto sem substituição de resíduo.

Percebeu-se, ainda, que todos os traços apresentaram melhor desempenho aos 28 dias, uma vez que o concreto se encontra em um estado de hidratação mais

avançado e, conseqüentemente, apresenta menor índice de porosidade o que, por sua vez, acarreta a redução da absorção de água.

O Gráfico 13 apresenta a taxa de absorção aos 28 dias para os concretos confeccionados. É possível perceber que, para todos os traços com ARB, têm-se inclinações das retas inferiores ao traço de referência, corroborando os resultados da Tabela 22. Observa-se ainda que os traços com ARB não apresentaram variações significativas entre os diferentes percentuais de substituição.

Gráfico 13 – Taxa de absorção de água aos 28 dias

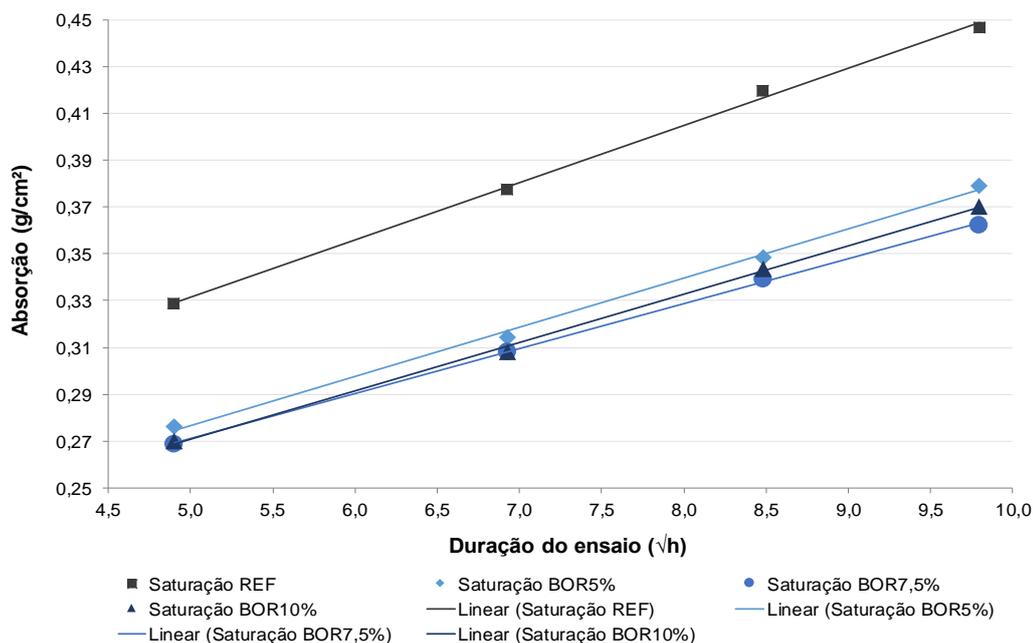


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Shankar e Rao (2017) explicam que, se um fluido se move através do material a uma baixa taxa de absorção de água, é de se esperar maior durabilidade, uma vez que o concreto será mais resistente à entrada de agentes agressivos.

O Gráfico 14 apresenta a taxa de saturação aos 28 dias para os concretos confeccionados. É possível perceber que, para todos os traços com ARB, têm-se inclinações das retas inferiores ao traço de referência, corroborando os resultados da Tabela 22. Observa-se ainda que os traços com ARB não apresentaram variações significativas entre os diferentes percentuais de substituição.

Gráfico 14 – Taxa de saturação de água aos 28 dias



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade de absorção efetiva, aos 28 dias, foi realizada análise estatística cujos resultados estão apresentados na Tabela 23. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à absorção efetiva.

Tabela 23 – Análise de variância dos resultados de absorção efetiva

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	0,0004	0,00013	6,782	0,0137
Resíduos	8	0,00015	1,848e-05	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 24), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de absorção inferiores ao da amostra referência (grupo 2).

Tabela 24 – Agrupamento de resultados de absorção efetiva conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR10%	0,050	0,042	0,058	1
BOR7,5%	0,051	0,043	0,059	1
BOR5%	0,052	0,044	0,060	1
REF	0,064	0,056	0,071	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), o que é corroborado pela análise quantitativa descritiva, já que não houve variação maior do que 4% entre BOR5% e BOR10%.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à resistência (R) e taxa de absorção capilar (S), aos 28 dias, foi realizada análise estatística cujos resultados estão apresentados na Tabela 25. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que não houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à resistência e taxa de absorção capilar.

Tabela 25 – Análise de variância dos resultados de resistência e taxa de absorção capilar

	Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
R	Percentuais	3	2367280	789093	0,834
	Resíduos	8	22088409	2761051	-
S	Percentuais	3	3,64	1,213	0,140
	Resíduos	8	3,99	0,499	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.1.5 Absorção total de água, índice de vazios e massa específica real

A Tabela 26 apresenta os resultados médios de ensaio de absorção total de água, índice de vazios e massa específica real para as amostras aos 28 dias.

Tabela 26 – Resultados médios de ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real

Traço	Absorção de água (%)		Índice de vazios (%)		Massa específica real (kg/m ³)	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
REF	6,62	0,11	13,59	0,22	2.374,76	7,05
BOR5%	5,82	0,23	11,53	0,41	2.240,18	10,24
BOR7,5%	5,66	0,09	11,24	0,13	2.234,79	18,27
BOR10%	5,80	0,10	11,36	0,17	2.210,40	9,14

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Em relação à absorção de água, todos os traços com ARB obtiveram resultados de absorção de água inferiores ao concreto referência. Numa análise descritiva, as proporções de redução são de 12%, 15% e 12% para os traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10%, respectivamente. Observa-se que os dados coletados para os concretos com ARB não apresentaram uma linearidade em seu comportamento.

Albuquerque (2009), Guo *et al.* (2017) e Gupta, Chaudhary e Sharma (2014) também demonstraram uma redução da absorção de água dos concretos com resíduos de borracha em pequenas proporções, corroborando com os resultados obtidos.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade de absorção de água, aos 28 dias, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 27. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à absorção.

Tabela 27 – Análise de variância dos resultados de absorção de água

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	1,7050	0,56830	0,00016
Resíduos	8	0,1686	0,02107	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 28), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de absorção inferiores aos da amostra referência (grupo

2). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), mesmo que a análise tenha mostrado comportamento decrescente para a propriedade absorção conforme o incremento do ARB.

Tabela 28 – Agrupamento de resultados de absorção de água conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR10%	5,665	5,398	5,933	1
BOR7,5%	5,798	5,531	6,066	1
BOR5%	5,820	5,552	6,088	1
REF	6,621	6,353	6,888	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O comportamento verificado para o índice de vazios (Tabela 28) é semelhante ao de absorção de água, ou seja, foram obtidos valores menores para os traços com ARB. As reduções calculadas em percentuais foram de 15%, 17% e 16% para os traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10%, respectivamente.

Os dados obtidos condizem com os resultados encontrados por Albuquerque (2009). A autora afirma que, para pequenas proporções de incorporação de resíduo de borracha, tem-se um decréscimo do teor de ar incorporado.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade índice de vazios, aos 28 dias, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 29. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação ao índice de vazios.

Tabela 29 – Análise de variância dos resultados índice de vazios

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	11,12	3,706	p<0,001
Resíduos	8	0,53	0,066	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 30), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo

partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de índice de vazios inferiores ao da amostra referência (grupo 2). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), mesmo que a análise descritiva tenha apontado percentuais de redução de até 17% em comparação ao de referência.

Tabela 30 – Agrupamento de resultados de índice de vazios conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR7,5%	11,237	10,762	11,712	1
BOR10%	11,360	10,885	11,835	1
BOR5%	11,533	11,058	12,008	1
REF	13,587	13,112	14,062	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Na Tabela 30, é possível observar que todos os traços com ARB apresentaram valores de massa específica real inferiores ao concreto referência. Numa análise descritiva, as proporções de redução são de 6% para os traços BOR5% e BOR7,5%; e 7% para BOR10%. Verifica-se comportamento decrescente da massa específica real à medida que é aumentado o teor de ARB na matriz do concreto.

Os valores obtidos de massa específica apresentaram um comportamento dentro do esperado e de acordo com outras pesquisas realizadas (ALBUQUERQUE, 2009; FERREIRA *et al.*, 2017; FREITAS, 2007), demonstrando que a incorporação de resíduos de borracha ao concreto tende a torná-lo menos denso.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade massa específica real, aos 28 dias, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 31. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à massa específica real.

Tabela 31 – Análise de variância dos resultados de massa específica real

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	49682	16561	p<0,001
Resíduos	8	1144	143	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 32), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo partículas de borracha podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de massa específica real inferiores ao da amostra referência (grupo 2). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais de substituição testados (5%, 7,5% e 10%), mesmo que a análise descritiva tenha mostrado comportamento decrescente para massa específica real conforme o incremento do ARB.

Tabela 32 – Agrupamento de resultados de massa específica real conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR10%	2.210,42	2.188,37	2.232,46	1
BOR7,5%	2.234,84	2.212,79	2.256,88	1
BOR5%	2.240,21	2.218,16	2.262,25	1
REF	2.374,80	2.352,76	2.396,85	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De forma geral, mesmo com menor massa específica, o concreto com a inserção de ARB apresentou menor absorção de água e menor índice de vazios. A análise estatística para as propriedades absorção de água, índice de vazios e massa específica real ressaltou que existe diferença significativa entre os resultados das amostras com ARB e a referência. Para as propriedades discutidas, entre os três percentuais ensaiados (5%, 7,5% e 10%), a análise quantitativa analítica não apontou diferença significativa entre as percentagens, mesmo que a análise quantitativa descritiva de cada propriedade indicasse fatores de redução relevantes.

4.2.1.6 Velocidade de propagação de onda ultrassônica

São apresentados, na Tabela 33, os resultados médios obtidos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU), aos 7 e aos 28 dias, para todos os concretos confeccionados. Na idade de 7 dias, foi possível identificar um comportamento decrescente da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas à medida que foi incrementado o ARB à matriz do concreto. Aos 28 dias, observou-se

certa variabilidade nos dados; mesmo assim, as misturas com ARB apresentaram resultados de VPU inferiores aos da referência.

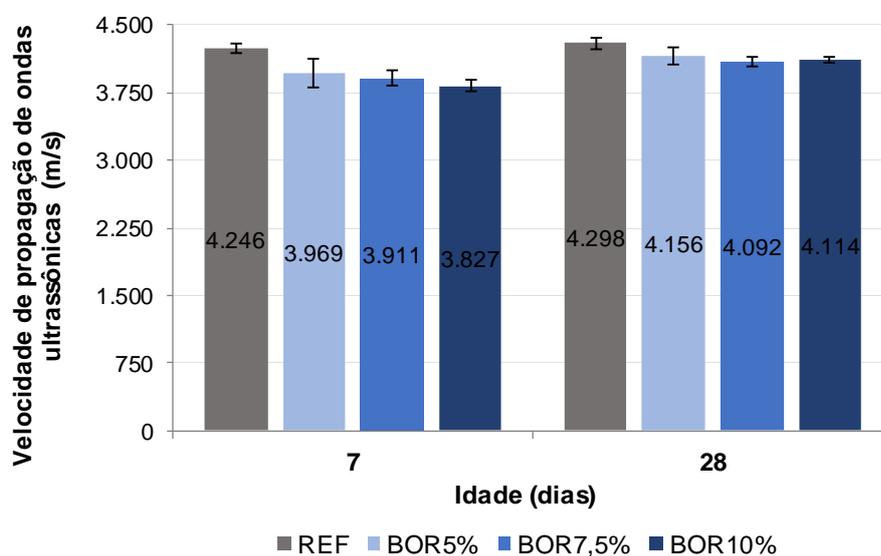
Tabela 33 – Resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Traço	VPU (m/s) – 7 dias		VPU (m/s) – 28 dias	
	Valor médio	Desvio padrão	Valor médio	Desvio padrão
REF	4.246	53,89	4.298	62,38
BOR5%	3.969	150,37	4.156	92,13
BOR7,5%	3.911	82,11	4.092	54,78
BOR10%	3.827	63,40	4.114	27,12

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O Gráfico 15 apresenta a evolução das médias da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas entre 7 e 28 dias de idade. Em uma análise descritiva, houve o aumento da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas da idade de 7 dias para 28 dias, com acréscimos de 1%, 5%, 5% e 8%, respectivamente, para os traços REF, BOR5%, BOR7,5% e BOR10%.

Gráfico 15 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Nota-se que o concreto referência teve o menor ganho, enquanto os traços com maiores teores de incorporação de ARB obtiveram os maiores índices de crescimento, concordando com o comportamento obtido de evolução da resistência à compressão.

Quanto maior a redução da resistência à compressão, maior o decréscimo da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Os resultados apontaram para um decréscimo da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na medida em que foi aumentado o incremento do ARB, assim como os estudos de Marie (2016) e Noor (2014). Sugapriya e Ramkrishnan (2018) explicam que esse comportamento indica um aumento da porosidade, bem como a redução da densidade do concreto contendo ARB.

Analisando resultados da Tabela 33 e a classificação da qualidade do concreto de acordo com o Quadro 18, todas as misturas em questão foram classificadas como boas e ótimas, segundo IS 13311 (BUREAU OF INDIAN STANDARDS, 1992) e Cánovas (1988).

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à propriedade velocidade de propagação de onda ultrassônica, aos 28 dias, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 34. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à VPU.

Tabela 34 – Análise de variância dos resultados de VPU

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	77155	25718	0,0044
Resíduos	8	20586	2573	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 35), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo ARB podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), com valores de VPU inferiores ao da amostra referência (grupo 2). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais testados.

Tabela 35 – Agrupamento de resultados de VPU conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
BOR7,5%	4.091,86	3.998,33	4.185,38	1
BOR10%	4.113,80	4.020,28	4.207,32	1
BOR5%	4.156,11	4.062,59	4.249,64	1
REF	4.297,92	4.204,40	4.391,44	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.1.7 Considerações acerca do concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de pneu inservível

A Tabela 36 resume os ensaios realizados para o concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha, conforme resultados apresentados nas seções anteriores, 4.2.1.1 a 4.2.1.6. Em relação ao concreto referência, foram elencados os percentuais de redução ou de acréscimo de cada propriedade analisada para cada traço.

Tabela 36 – Resumo dos ensaios realizados para os traços com agregado reciclado de borracha na etapa preliminar

Ensaio	BOR5%	BOR7,5%	BOR10%
Abatimento de tronco de cone	-24%	-3%	-9%
Resistência à compressão aos 28 dias	-11%	-18%	-21%
Módulo de elasticidade aos 28 dias	-16%	-19%	-22%
Absorção efetiva de água por capilaridade aos 28 dias	-19%	-20%	-22%
Absorção de água	-12%	-15%	-12%
Índice de vazios	-15%	-17%	-16%
Massa específica real	-6%	-6%	-7%
Velocidade de propagação de onda ultrassônica aos 28 dias	-3%	-5%	-4%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A coloração vermelha sobre o percentual indicado na Tabela 36 denota que a utilização do agregado de borracha incide em diminuição da propriedade avaliada. Já a coloração verde indica que houve incremento. A seguir, cada propriedade será discutida individualmente.

No estado fresco, foi avaliada a trabalhabilidade pelo método de abatimento do tronco de cone e se observou redução dessa propriedade para os concretos contendo ARB em relação ao concreto referência. A redução máxima da trabalhabilidade foi de

24% para BOR5%. Conforme descrito em 3.2.1, a redução da trabalhabilidade prejudica a dispersão das partículas de borracha na mistura e a moldagem dos corpos de prova, mas pode ser contornada pelo uso de superplastificantes.

Em relação à resistência à compressão, notou-se redução para todos os traços contendo ARB, percebendo-se um decréscimo proporcional da resistência à medida que foi incrementado o resíduo de borracha, com exceção do resultado traço BOR5% aos 7 dias. Aos 28 dias, o decréscimo máximo da resistência à compressão foi de 21% para BOR10%.

Já os resultados provindos do ensaio do módulo de elasticidade apontaram para um comportamento decrescente dos traços BOR5%, BOR7,5% e BOR10%, indicando decréscimo máximo de 22% para BOR10%. Conforme discutido em 3.2.2.4, a redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade era esperada.

Quanto à absorção de água por capilaridade, os resultados indicaram melhora nessa propriedade, sendo que, aos 28 dias, todos os concretos contendo ARB tiveram valores inferiores ao concreto de referência. Obteve-se, no melhor caso, uma redução de 22% para o BOR10%. Considerando-se a relevância desse ensaio como uma predição da durabilidade do concreto, aponta-se para melhorias decorrentes do uso de ARB.

A absorção total de água para todos os traços contendo ARB foi inferior ao concreto referência, sendo a maior redução para o BOR7,5% de 15%. Comportamento similar foi verificado quanto ao índice de vazios, sendo que todos os concretos com inserção do resíduo apresentaram redução desta característica. A maior redução também foi no traço BOR7,5% de 17%.

Seguindo a mesma avaliação feita para a absorção de água por capilaridade, a diminuição dos percentuais de absorção total de água e de índice de vazios apontam melhorias decorrentes do uso de ARB.

Os resultados do ensaio de massa específica mostraram que os traços contendo ARB apresentaram menor densidade, sendo a maior redução de 7% para o BOR10%. Albuquerque (2009) menciona que a massa específica do concreto no estado fresco pode ser um indicador razoável das características do concreto endurecido.

Os dados obtidos de velocidade de propagação de ondas de ultrassom apontaram o decréscimo da velocidade para todos os traços com a inserção do resíduo. Esse comportamento pode ser justificado pela menor densidade da borracha.

No entanto, observa-se que os percentuais de redução da velocidade são baixos, situando-se entre 3% a 5%.

Por fim, foi possível evidenciar melhora de algumas propriedades desses concretos, como menor absorção de água e menor índice de vazios, demonstrando que a inserção de borracha de pneu ao concreto, nos percentuais ensaiados, pode não prejudicar as características de durabilidade do compósito em relação ao índice de absorção de água e ao índice de vazios.

4.2.2 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica

4.2.2.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos no ensaio de abatimento de tronco de cone para os diferentes concretos confeccionados, bem como as condições climáticas no momento da mistura. Para cada traço, foram realizadas três betonadas; sempre que possível, o abatimento foi aferido em cada betonada.

Tabela 37 – Ensaio de abatimento de tronco de cone e características das moldagens

Traço	Abatimento (mm)				Umidade relativa do ar (%)	Temperatura ambiente (°C)
	1	2	3	Média		
REF	80	85	90	85	52	26,0
FIB0,5%	18	30	-	24	92	21,2
FIB1,0%	-	-	25	25	92	22,0
FIB1,5%	0	0	0	0	79	22,5

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone não foram submetidos à análise quantitativa analítica, tendo em vista que foi coletado um único valor desta propriedade para cada mistura. Dessa forma, foi feita apenas a classificação conforme a NBR 7212. (ABNT, 2012).

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), o concreto referência se enquadra na classe de consistência S50, enquanto que os concretos FIB0,5% e FIB1,0% integram a classe S10. O traço FIB1,5% não se enquadra em nenhuma categoria, pois a primeira classe de consistência possui abatimento mínimo de 10 mm.

O valor médio dos abatimentos (Tabela 37) não permite averiguar um comportamento proporcional entre o abatimento de tronco de cone e o teor de incorporação de fibra de aço, possivelmente justificado pela pequena variabilidade entre as porcentagens de inserção do resíduo. Entretanto, é notável a perda da trabalhabilidade em todos os traços com a inserção da fibra reciclada quando comparada ao concreto referência, chegando ao valor zero para o teor de 1,5%.

Com os dados evidenciados na Tabela 37, nota-se que o concreto altera suas características de trabalhabilidade quando são incorporadas as fibras de aço, perdendo até 100% de sua propriedade original.

A elevada redução da trabalhabilidade pode ser justificada pelo comprimento da fibra (31,50 mm), que é 26% maior que o diâmetro máximo do agregado graúdo (25 mm). Por terem dimensões maiores, as fibras acabam proporcionando um bloqueio à mobilidade dos agregados graúdos, dificultando a fluidez da mistura. Ainda, a fibra metálica, por ser uma fibra rígida, acaba proporcionando maior dificuldade à mobilidade dos concretos. (FIGUEIREDO, 2011).

4.2.2.2 Ensaio VeBe

Em relação ao ensaio VeBe, a Tabela 38 é composta pelos resultados coletados para cada percentual de fibra de aço incorporada, exceto para o concreto referência, pois o equipamento apresentou defeito durante o ensaio, sendo este dado não incluído na análise. Para cada traço, foram moldadas três betonadas.

Tabela 38 – Resultados do ensaio VeBe

Traço	VeBe (s)			
	1	2	3	Média
FIB0,5%	3,37	2,87*	8,78*	3,37
FIB1,0%	5,64	-	2,69*	5,64
FIB1,5%	5,90	6,21	6,20	6,10

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

*Dado espúrio ou desconsiderado de acordo com a norma DNIT 064 (2004).

Foram desconsiderados alguns dados, pois a norma do DNIT 064 (2004) estabelece que os resultados que forem inferiores a 3,0 segundos não oferecem parâmetros significativos e a consistência deve ser determinada por outro método. Ainda, no traço FIB0,5%, o resultado de 8,78 segundos foi considerado um valor

espúrio, provavelmente provocado por problemas na lubrificação do equipamento utilizado. Na segunda betonada do percentual 1,0%, não foi possível realizar o ensaio, pois o aparelho estava em manutenção.

Assim, para os teores FIB0,5% e FIB1,0%, o valor indicado na Tabela 38 não corresponde à média, pois apenas uma leitura de tempo pelo ensaio VeBe foi considerada.

Notou-se que os resultados do ensaio VeBe indicam que quanto maior o percentual de fibras adicionadas na mistura, menor é a trabalhabilidade do compósito, já que o tempo aferido pelo ensaio é maior. Essa conduta é compatível com os resultados de abatimento de tronco de cone descritos em 4.2.2.1. Figueiredo e Ceccato (2015) também verificaram esse mesmo comportamento ao analisarem diversos tipos de fibras industrializadas metálicas, em percentuais de inserção no concreto de 0% a 1,28%.

Os resultados do ensaio VeBe não foram submetidos à análise quantitativa analítica, pois para FIB0,5% e FIB1,5% foi designado um único valor de tempo para cada mistura. Dessa forma, foi feita a apreciação dos resultados conforme a norma do DNIT 064 (2004).

4.2.2.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado nas idades de 7 e 28 dias. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 39, sendo destacados os valores de resistência potencial e resistência média.

Tabela 39 – Valores obtidos de resistência à compressão

(continua)

Traço	Idade (dias)	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
REF	7	14,4	12,4	1,34
	14	20,3	17,6	2,37
	28	24,8	22,4	2,26
FIB0,5%	7	18,9	17,3	1,38
	14	19,8	19,3	0,60
	28	31,0	29,0	1,71

Tabela 39 – Valores obtidos de resistência à compressão

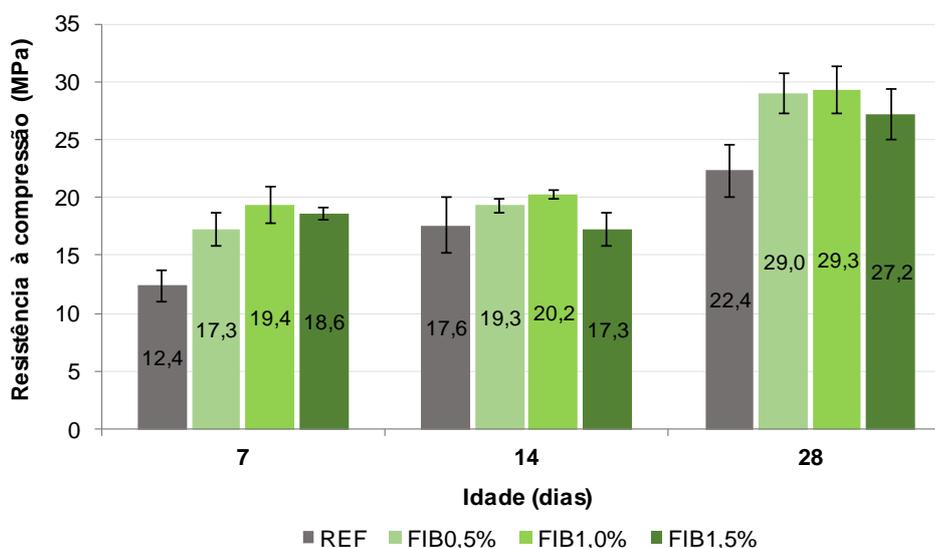
(conclusão)

Traço	Idade (dias)	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
FIB1,0%	7	21,3	19,4	1,54
	14	20,5	20,2	0,39
	28	30,7	29,3	1,98
FIB1,5%	7	19,1	18,6	0,48
	14	18,9	17,3	1,38
	28	28,7	27,2	2,15

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O Gráfico 16 apresenta a evolução da resistência à compressão conforme as idades. De forma geral, observa-se que os concretos com fibra apresentaram, para todos os traços e todas as idades, valores superiores ao de referência.

Gráfico 16 – Evolução da resistência à compressão: concreto com fibra metálica reciclada na etapa preliminar



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A Tabela 40 indica uma análise quantitativa descritiva para o acréscimo de resistência, em percentual, do concreto reforçado com fibras aos 28 dias em relação ao de referência, para todos os traços executados.

Tabela 40 – Incremento da resistência à compressão do CRFA aos 28 dias

Traço	Percentual de acréscimo em relação ao REF
FIB0,5%	30%
FIB1,0%	31%
FIB1,5%	21%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Pode-se observar na Tabela 40 que o menor percentual de acréscimo de resistência à compressão é o FIB1,5%, possivelmente por ser o maior teor de incorporação de fibra e o traço com a trabalhabilidade mais prejudicada, o que pode ter influenciado negativamente na compactação dos corpos de prova cilíndricos.

Segundo Bentur e Mindess (2007), o aumento da resistência à compressão devido às fibras não passa de cerca de 25% para concretos com volumes de fibras até 2,0%. O ACI 544.1R-96 (2002) cita um acréscimo de, no máximo, 15% na resistência à compressão para volumes de fibras até 1,5%. A Tabela 40 indica que os percentuais de acréscimo na resistência à compressão para os concretos ensaiados nesta pesquisa foram superiores aos valores indicados pela literatura.

Um fator que contribui positivamente para o ganho da resistência à compressão é a capacidade das fibras de atuarem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, aumentando a ductilidade pós-fissuração ou a absorção de energia do material. (FIGUEIREDO, 2011; VAN CHANH, 2005).

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à resistência à compressão, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 41. Com nível de confiança de 95%, é possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à resistência à compressão.

Tabela 41 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	103,5	34,51	0,011
Resíduos	7	29,78	4,254	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 42), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras FIB0,5% e

FIB1,0% podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 2), com valores de resistência à compressão superiores aos da amostra referência (grupo 1).

Tabela 42 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
REF	22,375	18,950	25,800	1
1,5%	27,165	22,321	32,009	1 e 2
0,5%	29,033	25,078	32,988	2
1,0%	29,300	24,456	34,144	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.2.4 Módulo de elasticidade

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade estão dispostos na Tabela 43. Por meio da análise quantitativa descritiva, observou-se que a inserção de fibras metálicas de aço recicladas no concreto ocasionou, no módulo de elasticidade, acréscimos de 18%, 18% e 10% para os teores de 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente.

Tabela 43 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade aos 28 dias

Traço	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
REF	26,3	0,76
FIB0,5%	31,0	3,07
FIB1,0%	31,0	4,49
FIB1,5%	29,0	0,18

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Mehta e Monteiro (2014) mencionam que a inclusão de fibras de aço no concreto tem pouco efeito sobre o módulo de elasticidade, e National Research Council (2007) e o ACI 544.1R-96 (2002) indicam que o módulo de elasticidade de um concreto reforçado com fibra de aço é geralmente considerado igual ao de um concreto sem fibras semelhantes. Observa-se que, na Tabela 43, apesar da indicação da literatura, a inserção da fibra impactou positivamente na matriz de concreto em relação ao módulo de elasticidade.

Analisando os traços com inserção de fibra metálica reciclada, pode-se notar 6% de variação entre o módulo de elasticidade do teor 0,5% em comparação ao de 1,5%, indicando que o aumento do teor de fibra foi pouco significativo no incremento do módulo de elasticidade dos concretos estudados. Esse comportamento pode ser justificado pela pequena variabilidade de incremento de fibra entre os diferentes traços.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação ao módulo de elasticidade, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 44. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que não houve evidência estatística de diferença entre os percentuais testados, mesmo que a análise descritiva tenha apontado acréscimo dessa propriedade de até 18% para FIB0,5%.

Tabela 44 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	38,19	12,73	0,285
Resíduos	5	37,79	7,56	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.2.5 Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos para os ensaios de resistência à tração na flexão estão apresentados na Tabela 45. Pode-se constatar que a incorporação de fibra de aço na matriz do concreto influenciou positivamente a resistência à tração na flexão, incidindo em acréscimo desta propriedade para todos os traços com fibra ensaiados.

Tabela 45 – Valores médios obtidos para tração na flexão aos 28 dias

Traço	Tração na flexão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
REF	3,1	0,17
FIB0,5%	4,0	0,12
FIB1,0%	3,9	0,17
FIB1,5%	4,3	0,12

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

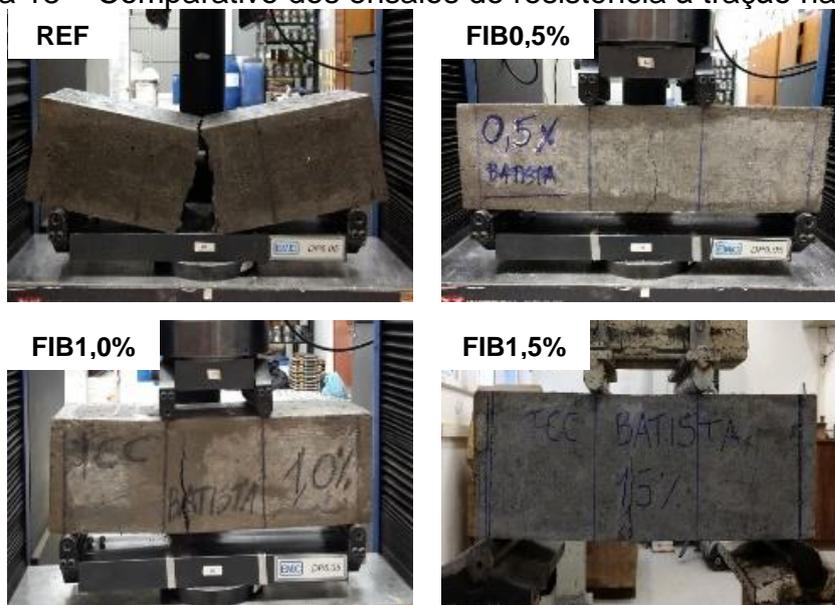
Ao realizar uma análise descritiva sobre as médias dos resultados da Tabela 45, os percentuais de acréscimo de resistência à tração são de 29%, 26% e 39% para

os teores de fibra de 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente. Observou-se também o baixo desvio padrão obtido os resultados desse ensaio. O ACI 544.1R-96 (2002) afirma que a melhora à tração em CRFA é significativa, com aumentos da ordem de 30% a 40% para a adição de 1,5% de fibra metálica em volume no concreto, corroborando os dados coletados nesta pesquisa.

Analisando os traços com inserção de fibra, pode-se notar 8% de variação entre a tensão de tração do teor 0,5% em relação ao 1,5%, indicando que o aumento do teor de fibra foi pouco significativo no incremento da tensão de flexão dos concretos estudados. Esse comportamento pode ser justificado pela pequena variabilidade de incremento de fibra entre os diferentes traços estudados.

A Figura 18 mostra um comparativo da forma de ruptura dos prismas de cada traço ensaiado. Nota-se que a fissura de ruptura do concreto referência foi visivelmente mais acentuada do que nos traços com fibra. De forma visual, observou-se também que, quanto maior o percentual de inserção de fibra, menor a fissura de ruptura.

Figura 18 – Comparativo dos ensaios de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com base na Figura 18, verifica-se que, em todos os traços ensaiados, ocorreu uma única fissura de ruptura no terço médio do prisma, local onde ocorre o momento máximo, conforme recomenda a JSCE-SF4 (JSCE, 1984). Esse comportamento já era

esperado, uma vez que é a região onde acontece o maior acúmulo de tensões. Ehrenbring (2017) também constatou a mesma performance.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à resistência à tração na flexão, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 46. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à resistência à tração na flexão.

Tabela 46 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	2,203	0,735	$p < 0,001$
Resíduos	8	0,174	0,022	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 47), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo a fibra metálica reciclada podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 2), com valores de resistência à tração na flexão superiores ao da amostra referência (grupo 1). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os três percentuais testados.

Tabela 47 – Agrupamento de resultados de resistência à tração na flexão conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
REF	3,145	2,874	3,417	1
1,0%	3,947	3,675	4,218	2
0,5%	4,002	3,731	4,274	2
1,5%	4,303	4,032	4,575	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.2.6 Fator de tenacidade

Os resultados do fator de tenacidade estão descritos na Tabela 48. Assim como os resultados obtidos nos ensaios de resistência à flexão, a tenacidade também obteve significativa melhoria com a inserção da fibra reciclada. Devido a problemas

técnicos no equipamento, para o ensaio do traço FIB1,5% foi considerada apenas uma amostra com resultado válido.

Tabela 48 – Resultados obtidos para o fator de tenacidade aos 28 dias

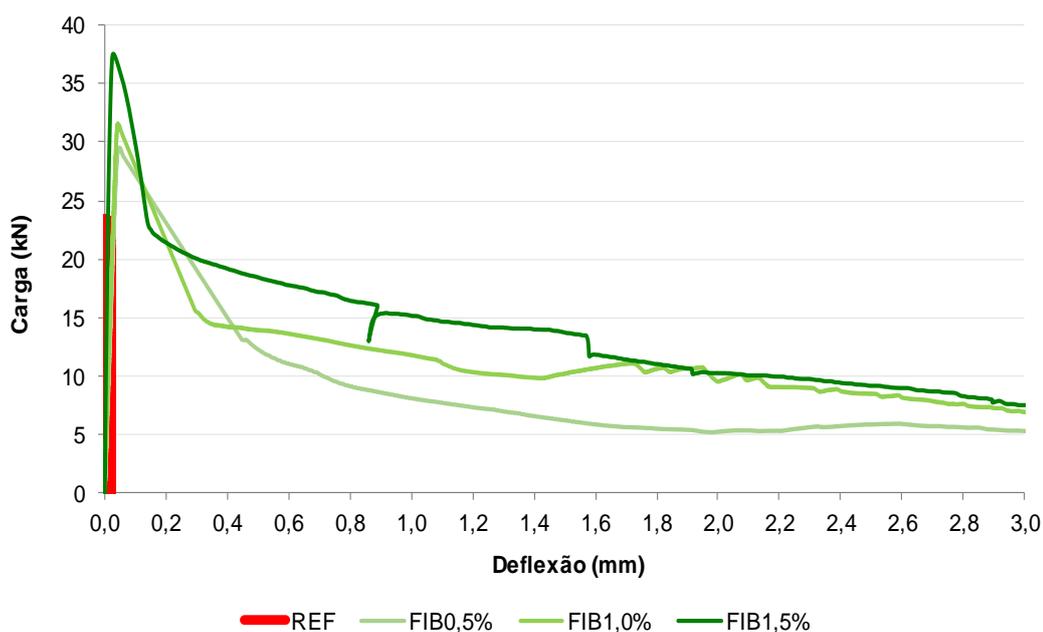
Traço	Fator de tenacidade (kgf.cm ²)	Desvio padrão (kgf.cm ²)
REF	0,4	0,18
FIB0,5%	13,3	2,21
FIB1,0%	14,0	0,85
FIB1,5%	15,8	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao realizar uma análise descritiva sobre as médias dos resultados da Tabela 48, foi possível notar que os traços com fibra apresentaram ganho do fator de tenacidade, sendo este acréscimo de 33 vezes, 35 vezes e 39 vezes para os teores 0,5%, 1,0% e 1,5%, respectivamente.

O Gráfico 17 apresenta as curvas de carga *versus* deflexão obtidas após ensaio de tenacidade para cada traço estudado. O ganho de tenacidade se mostrou gradativo com o aumento do percentual de fibra inserida na matriz, comportamento também observado por outros pesquisadores. (EHRENBRING, 2017; FIGUEIREDO, 2011; QUININO, 2015; SMRKIĆ; DAMJANOVIĆ; BARIČEVIĆ, 2017).

Gráfico 17 – Curvas carga *versus* deflexão alcançadas após o ensaio de tenacidade



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir das curvas de carga *versus* deflexão obtidas no Gráfico 17, pode-se notar que o concreto referência teve um comportamento diferente do CRFA, com desempenho de um material de ruptura frágil, atingindo carga máxima perto de 23,0 kN, rompendo imediatamente com queda brusca após alcançar a máxima tensão. Enquanto isso, os concretos com percentuais de 0,5%, 1,0% e 1,5% alcançaram cargas cerca de 29,0 kN, 32,0 kN e 37,5 kN, respectivamente.

A configuração das curvas no Gráfico 17 indica a modificação na forma de ruptura dos materiais, passando do estado frágil para o pseudo-dúctil. Segundo Bentur e Mindess (2007), esse comportamento é comum em compósitos reforçados com fibras metálicas.

Para avaliar a significância das diferentes misturas propostas com relação à tenacidade, foi realizada análise de variância cujos resultados estão apresentados na Tabela 49. Com nível de confiança de 95%, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados com relação à tenacidade.

Tabela 49 – Análise de variância dos resultados de tenacidade

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Percentuais	3	277,90	92,62	0,0025
Resíduos	4	10,52	2,63	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 50), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para corroborar os resultados da análise de variância. Esse teste indicou que as amostras contendo a fibra metálica reciclada podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 2), com valores de tenacidade superiores aos da amostra referência (grupo 1). Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os três percentuais testados.

Tabela 50 – Agrupamento de resultados de tenacidade conforme teste de Tukey

Variável	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
REF	0,428	-4,492	5,348	1
0,5%	13,274	9,257	17,291	2
1,0%	13,987	9,067	18,907	2
1,5%	15,571	8,794	22,709	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

4.2.2.7 Considerações acerca do concreto com inserção de fibra de aço reciclada de pneu inservível por fração volumétrica

A Tabela 51 resume os ensaios realizados para o concreto com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha, conforme resultados apresentados nas seções anteriores, 4.2.2.1 a 4.2.2.6. Em relação ao concreto referência, foram elencados os percentuais de redução ou de acréscimo de cada propriedade analisada, para cada traço. O sistema de cores adotado é similar ao utilizado na Tabela 36.

Tabela 51 – Resumo dos ensaios realizados para os traços com fibra de aço reciclada na etapa preliminar

Ensaio	FIB0,5%	FIB1,0%	FIB1,5%
Abatimento de tronco de cone	-72%	-71%	-100%
Resistência à compressão - 28 dias	+30%	+31%	+21%
Módulo de elasticidade - 28 dias	+18%	+18%	+10%
Resistência à tração na flexão	+29%	+26%	+39%
Fator de tenacidade	+3225%	+3400%	+3850%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O ensaio VeBe não foi descrito na Tabela 51, pois não foi aferida essa propriedade para o concreto referência, não havendo possibilidade de comparar o concreto convencional com os demais traços com fibra de aço reciclada.

Em relação à trabalhabilidade, o concreto reforçado com fibra de aço reciclada, em todos os traços, apresentou abatimento menor que o referência, mostrando que a fibra de aço influenciou negativamente na consistência do concreto. O traço FIB1,5% apresentou perda de 100% no abatimento.

No ensaio VeBe, apesar de o equipamento apresentar falha em algumas etapas, foi possível realizar os procedimentos experimentais, com ressalvas. Os concretos com adição de fibras na matriz foram os únicos ensaiados, notando-se que o aumento do percentual de fibra aumentou o tempo para que o concreto se amoldasse no cilindro. Esse ensaio constatou a perda progressiva da trabalhabilidade dos CRFA com o aumento do teor de fibra inserida.

Os resultados do abatimento de tronco de cone e do ensaio VeBe são compatíveis com a discussão realizada no item 3.3.1, no qual se explicou que a adição de qualquer tipo de fibra ao concreto convencional reduz a trabalhabilidade da mistura.

Tanto para a resistência à compressão quanto para os ensaios de módulo de elasticidade, notou-se que a fibra metálica influenciou positivamente ocasionando o aumento dessas propriedades. O maior acréscimo para a resistência à compressão foi de 31% para o FIB1,0%.

Para a resistência à flexão, os compósitos apresentaram bom desempenho com a incorporação da fibra metálica, obtendo um ganho de 39% para FIB1,5%. Já o fator tenacidade pode ser considerado a principal vantagem do uso de fibras recicladas de aço nos concretos ensaiados, apresentando acréscimo de 39 vezes para FIB1,5%.

Apesar da notável redução da trabalhabilidade, não foi constatada a diminuição da resistência à compressão, principal propriedade de avaliação do concreto no estado endurecido. A inserção da fibra de aço reciclada no concreto incidiu em melhorias visíveis e muito significativas à flexão e à tenacidade. De forma geral, a incorporação da fibra de aço reciclada de pneu inservível se mostrou uma boa opção de utilização, melhorando determinadas propriedades do concreto.

4.2.3 Considerações finais acerca da etapa preliminar

De forma a realizar um comparativo geral, incluindo os tipos de resíduos testados e os percentuais aplicados, foi realizada uma análise estatística sobre todos os dados de resistência à compressão. Esta propriedade foi eleita como ponto de comparação devido à sua importância para o concreto.

Para avaliar a resistência à compressão em conjunto em relação ao concreto com a substituição de areia por ARB e ao concreto com a inserção de fibra metálica reciclada, foi realizada análise de variância e os resultados estão apresentados na Tabela 52. Com nível de confiança de 95% e com relação à resistência à compressão, foi possível constatar que houve diferença significativa entre os percentuais testados e entre os materiais reciclados quando empregados no concreto.

Tabela 52 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão de todas as misturas da etapa preliminar

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Material	1	583,307	583,307	p<0,001
Percentuais	6	129,026	21,504	0,0002
Resíduos	15	34,270	2,285	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 53), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para complementar os resultados da análise de variância.

Tabela 53 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão de todas as misturas da etapa preliminar conforme teste de Tukey

Percentual	Material	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
10%	B	14,714	11,951	17,477	1
7,5%	B	15,226	12,463	17,989	1
5%	B	16,528	13,765	19,261	1
0%	B	18,490	15,727	21,253	1 e 2
0%	F	22,375	19,982	24,768	2
1,5%	F	27,165	23,781	30,549	3
0,5%	F	29,033	26,270	31,796	3
1,0%	F	29,300	25,916	32,684	3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Legenda: (B) concreto com agregado reciclado de borracha; (F) concreto com fibra metálica reciclada.

O teste de Tukey indicou que as amostras contendo a borracha reciclada podem ser consideradas como pertencendo a um mesmo grupo (grupo 1), que inclui o concreto referência. As amostras contendo a fibra metálica reciclada estão contidas no grupo 3 e apresentam valores de resistência à compressão superiores ao grupo 1. Os resultados médios de resistência à compressão para cada mistura estão na terceira coluna e estão em ordem crescente.

Estatisticamente, não foi verificada diferença significativa entre os percentuais testados, tanto para o concreto contendo a borracha reciclada contidos no grupo 1 (5%, 7,5% e 10%), quanto para o concreto com a inserção da fibra metálica reciclada contidos no grupo 3 (0,5%, 1,0% e 1,5%). Esse mesmo comportamento foi observado em diversas outras propriedades analisadas em 4.2.1 e 4.2.2.

Para a elaboração dos resultados médios, foram ensaiadas poucas amostras, em geral 2 ou 3 corpos de prova de concreto para cada propriedade. O número reduzido de amostras diminui a capacidade estatística para afirmar e comprovar a diferença entre os percentuais pela análise de variância.

Outro fator que pode influenciar é o pequeno intervalo entre os percentuais, tornando as médias de resultados muito próximas. Quanto menos discrepantes são os resultados, mais amostras são necessárias para que se tenha informação suficiente para afirmar diferenciação entre os percentuais testados.

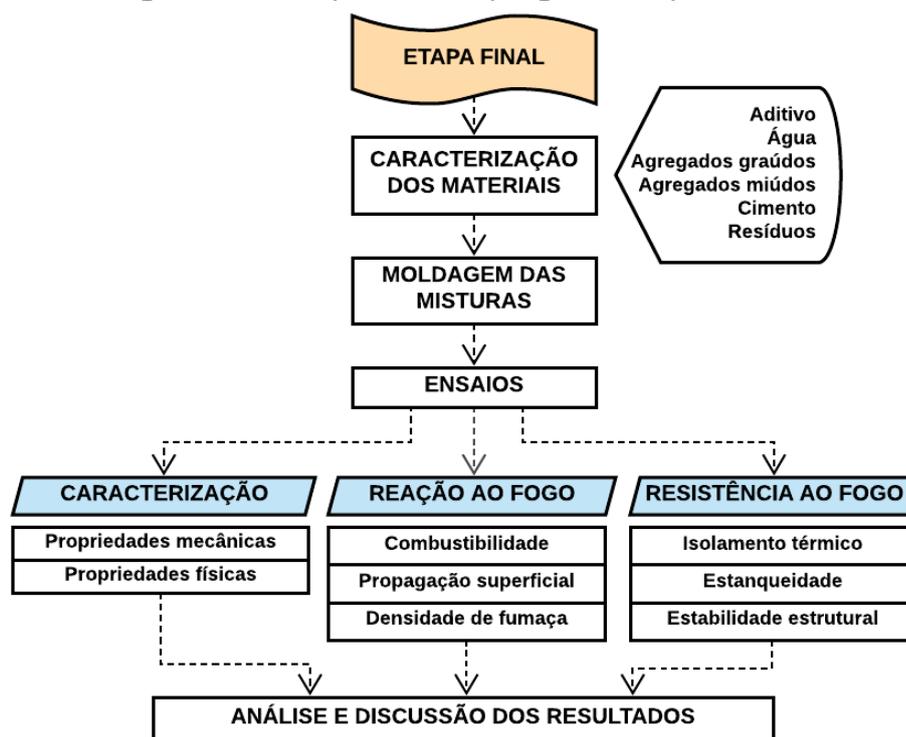
A análise quantitativa descritiva, comparando as médias de resistência à compressão, mostrou que entre BOR5% e BOR10% existe um decréscimo de 11% na resistência à compressão, e entre FIB0,5% e FIB1,5% existe um acréscimo de 6%. Mesmo que, estatisticamente, não se tenha comprovado diferença entre os percentuais testados do ponto de vista das propriedades mecânicas dos materiais da construção civil, esses percentuais de acréscimo ou de redução da resistência à compressão são relevantes.

Após uma visão geral sobre os resultados coletados e com o auxílio da análise estatística, que não indicou diferenças significativas nos resultados entre os percentuais testados, adotou-se, para a próxima etapa, dois percentuais de cada material. Para o concreto com ARB, foram adotados os percentuais de 5% e 10%, excluindo o percentual 7,5%. Para o concreto com a inserção de fibra metálica reciclada, foram adotados os percentuais de 0,5% e 1,5%, excluindo o percentual 1,0%.

5 ETAPA FINAL DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A segunda e última etapa desta pesquisa compreendeu, inicialmente, a caracterização dos insumos utilizados no programa experimental, uma vez que foram empregados materiais de diferentes lotes da etapa preliminar. A moldagem dos protótipos ocorreu na Construtora Premold e os materiais componentes dos concretos foram fornecidos pela empresa. Em sequência, foram desenvolvidos os ensaios de reação e de resistência ao fogo. Como forma de acompanhamento dos parâmetros dos concretos e ensaios realizados, foi feita a caracterização mecânica e a caracterização física da matriz cimentícia de forma a subsidiar e fomentar a análise dos resultados coletados. A Figura 19 ilustra a estratégia da etapa final do programa experimental.

Figura 19 – Etapa final do programa experimental



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NA ETAPA FINAL

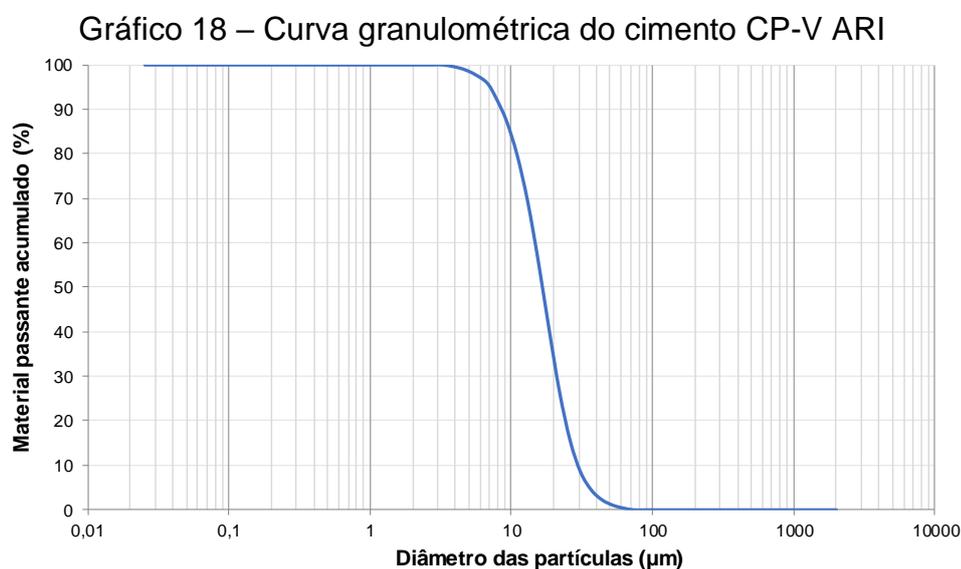
O cimento, o aditivo e os agregados não foram do mesmo lote do material utilizado na etapa preliminar, portanto os ensaios de caracterização descritos nos itens

4.1.1.1 a 4.1.1.5 foram replicados. Esses insumos foram fornecidos pela Construtora Premold, visto que os protótipos foram moldados no pavilhão industrial da empresa.

A fibra de aço e a borracha recicladas foram fornecidas pela mesma recicladora da etapa preliminar, Industrial Batistella de Artefatos de Borracha Ltda. (INDIBA), de Nova Santa Rita/RS. Os ensaios de caracterização descritos em 4.1.1.4 e em 4.1.1.5 foram refeitos para evitar discrepâncias na comparação dos resultados.

5.1.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção dos concretos foi do tipo CP-V ARI, sendo que o consumo deste insumo para as moldagens da etapa final foi proveniente de um mesmo lote de fabricação. Foi realizada granulometria a *laser* no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, na UNISINOS, utilizando como fluido o álcool isopropílico e o equipamento Microtrac, modelo S3500. O material apresentou os diâmetros característicos de D10 igual a 7,21 μm , D50 igual a 14,00 μm , D90 igual a 24,97 μm e Dmédio igual a 14,755 μm (Gráfico 18).



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.1.2 Agregados miúdos

Nesta etapa do programa experimental, foram utilizadas duas granulometrias de areia, uma fina e uma média. A areia fina tem procedência de Osório, sendo uma areia de cava. Para caracterizar os agregados miúdos, foi realizado ensaio de

composição granulométrica conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a). Os resultados podem ser observados nas ilustrações a seguir.

Tabela 54 – Composição granulométrica do agregado miúdo: areia fina

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
6,3	0,0	0,0	0,0
4,75	2,1	0,4	0,4
2,36	1,0	0,2	0,6
1,18	1,6	0,3	0,9
0,60	2,7	0,5	1,5
0,30	47,1	9,4	10,9
0,15	339,8	67,9	78,8
Fundo	105,9	21,2	100,0
TOTAL	500,1	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 19 – Características físicas do agregado miúdo: areia fina

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	0,60 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	0,93	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,41 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,57 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado seco	2,60 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,64 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 55 – Composição granulométrica do agregado miúdo: areia média

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
6,3	0,0	0,0	0,0
4,75	0,1	0,0	0,0
2,36	2,2	0,4	0,5
1,18	29,6	5,9	6,4
0,60	65,5	13,1	19,5
0,30	187,0	37,4	56,9
0,15	203,2	40,7	97,6
Fundo	12,2	2,4	100,0
TOTAL	499,7	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 20 – Características físicas do agregado miúdo: areia média

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	2,36 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	1,81	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,53 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,54 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado seco	2,52 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,51 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.1.3 Agregados graúdos

Nesta etapa do programa experimental, foram utilizadas duas granulometrias de brita, sendo que o agregado graúdo é de origem basáltica e foi submetido ao britador Barmac® para uma configuração mais esférica. Para caracterizar o agregado graúdo, foi realizado ensaio de composição granulométrica conforme as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a). Os resultados podem ser visualizados nas ilustrações a seguir.

Tabela 56 – Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 4,75/12,5 mm

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
25	0,0	0,0	0,0
19	0,0	0,0	0,0
12,5	9,5	0,2	0,2
9,5	470,9	9,4	9,6
6,3	3.336,2	66,8	76,4
4,75	1.059,8	21,2	97,6
<4,75	119,25	2,4	100,0
TOTAL	4.995,65	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 21 – Características físicas do agregado graúdo: brita 4,75/12,5 mm

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	12,5 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	6,07	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,66 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	2,04 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado seco	2,00 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado com superfície seca	2,02 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Tabela 57 – Composição granulométrica do agregado graúdo: brita 9,5/25 mm

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
25	0,0	0,0	0,0
19	387,8	7,8	7,8
12,5	3.728,3	74,6	82,4
9,5	776,5	15,5	97,9
6,3	86,0	1,7	99,6
4,75	1,8	0,0	99,7
<4,75	15,9	0,3	100,0
TOTAL	4.996,2	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 22 – Características físicas do agregado graúdo: brita 9,5/25 mm

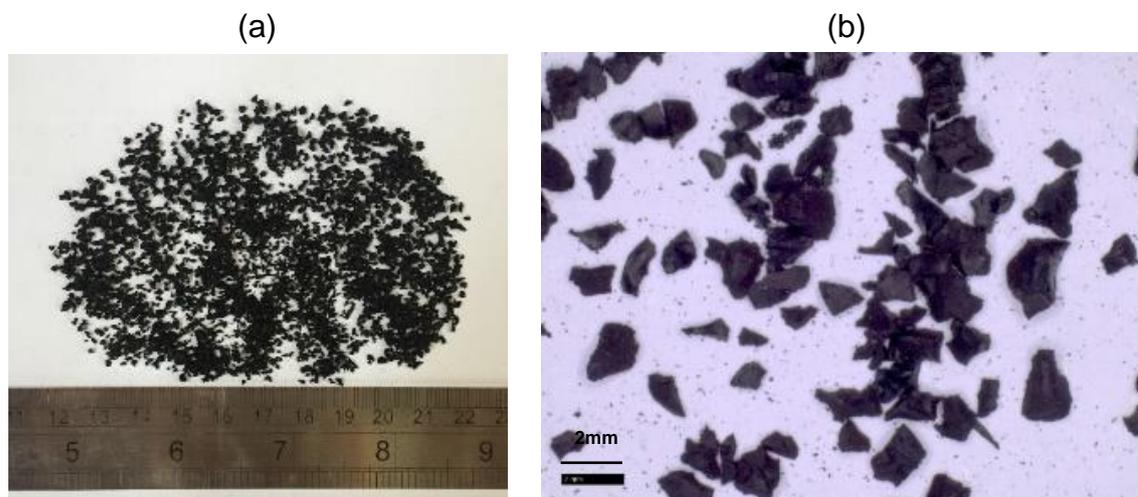
Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	25 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	7,05	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	1,64 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica aparente	3,14 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado seco	3,08 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)
Massa específica do agregado com superfície seca	3,10 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009c)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.1.4 Agregado reciclado de borracha

O material fornecido pela recicladora possui faixas granulométricas de 0,7 a 2 mm e a sua caracterização ocorreu da mesma forma descrita no item 4.1.1.4. A Figura 20a apresenta uma visão geral do resíduo, enquanto que a Figura 20b mostra o formato angular dos grãos. A imagem da Figura 20b foi capturada com um microscópio digital marca Zeiss modelo Smartzoom 5, no itt Fuse, na UNISINOS.

Figura 20 – Amostra do agregado reciclado de borracha da etapa final: (a) máquina fotográfica comum e (b) microscópio digital



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Tabela 58 apresenta informações sobre a distribuição granulométrica do material; já o Quadro 23 exhibe demais características físicas.

Tabela 58 – Composição granulométrica do ARB

Abertura de peneiras (mm)	Massa retida (g)	% Média retida	% Média retida acumulada
4,75	0,0	0,0	0,0
2,36	0,0	0,0	0,0
1,18	97,6	49,0	49,0
0,60	92,8	46,6	95,5
0,30	8,9	4,5	100,0
0,15	0,0	0,0	100,0
Fundo	0,0	0,0	100,0
TOTAL	199,3	100,0	100,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 23 – Características físicas do ARB

Ensaio realizado	Resultado	Norma para ensaio
Diâmetro máximo característico	2,36 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	3,44	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária	0,54 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006a)
Massa específica	1,20 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em comparação com o agregado reciclado de borracha utilizado na etapa preliminar, a massa unitária e a massa específica seguem com os mesmos valores. No entanto, houve uma pequena variação no módulo de finura em razão de uma

variação na composição granulométrica. Na etapa preliminar, o ARB se encontrava, em sua maior parte, entre as peneiras 2,36 e 1,18 mm; já o ARB utilizado na etapa final se encontrou entre as peneiras 1,18 e 0,60 mm.

Essa variação é esperada, tendo em vista que o material é reciclado em um processo de trituração mecânica e sem precisão acurada. Mesmo assim, a faixa granulométrica encontrada é compatível com a especificação do fornecedor, que classifica o resíduo de borracha entre 0,7 a 2 mm.

5.1.5 Fibra de aço reciclada

As fibras de aço recicladas (Figura 21) foram classificadas pelo mesmo procedimento descrito em 4.1.1.5. A imagem da Figura 21b foi capturada com um microscópio digital marca Zeiss modelo Smartzoom 5, no itt Fuse, na UNISINOS.

Figura 21 – Amostra da fibra de aço reciclada da etapa final: (a) máquina fotográfica comum e (b) microscópio digital

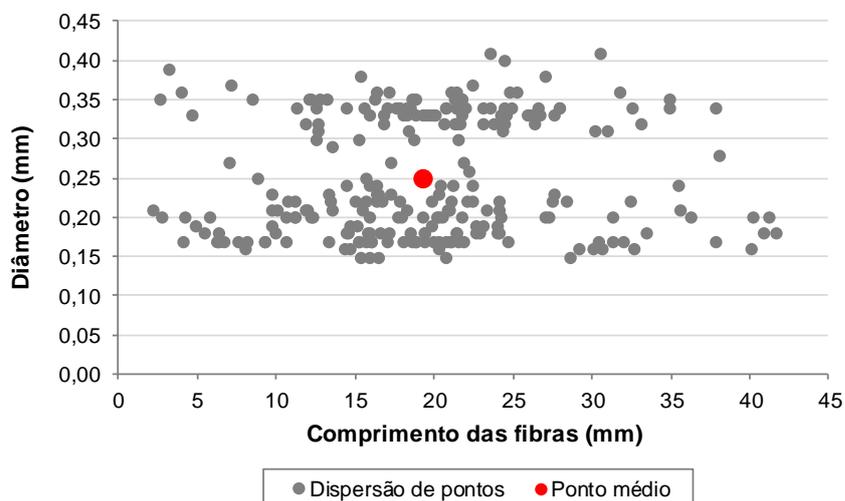


Fonte: Acervo da autora (2020).

As fibras recicladas utilizadas na etapa final do estudo possuem diâmetro médio de 0,25 mm e comprimento médio de 19,26 mm. O lote empregado na etapa preliminar possuía diâmetro médio de 0,21 mm e comprimento médio de 31,50 mm. Como é um material reciclado e oriundo da trituração mecânica de pneus, observou-se variação no comprimento médio das fibras entre os dois lotes empregados. Caso a fibra reciclada venha a ser comercializada em larga escala, é necessário aprimorar a

padronização do comprimento. O Gráfico 19 mostra a dispersão do diâmetro e do comprimento das fibras recicladas empregadas na etapa final.

Gráfico 19 – Dispersão das características das fibras de aço recicladas utilizadas na etapa final



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

5.1.6 Aditivo superplastificante e água

O aditivo empregado foi o MC-PowerFlow 4000[®] da MC-Bauchemie, um superplastificante sintético de alto desempenho baseado na tecnologia de polímeros, sendo utilizado um percentual fixo de 0,36% sobre a massa do cimento em todos os concretos confeccionados. Encontra-se no estado líquido, cor marrom e possui densidade de 1,12 g/cm³.

A água utilizada na moldagem das amostras foi a do abastecimento da rede pública através da Companhia Riograndense de Saneamento de Sapucaia do Sul/RS. A relação água/cimento foi fixada em 0,51 em todas as misturas.

5.1.7 Análise térmica da borracha e da fibra metálica

A análise térmica da borracha e da fibra metálica compreendeu os ensaios de termogravimetria (TGA), termogravimetria derivada (DTGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), todos realizados no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais na UNISINOS. Foram utilizados, aproximadamente, 25 mg de cada resíduo, empregando equipamento Perkin Elmer[®] *Simultaneous Thermal Analyzer*

modelo STA 8000. A precisão do equipamento é de 0,0001% e em massa 0,001mg, e os ensaios foram feitos em atmosfera inerte (nitrogênio).

A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C/min, sendo que a temperatura máxima atingida foi de 1.020 °C para a borracha e 820 °C para a fibra metálica. A temperatura máxima alcançada para o ensaio da fibra metálica foi inferior ao da borracha, uma vez que, com temperaturas mais elevadas, a fibra de aço poderia derreter e fundir sobre o cadinho durante o ensaio, danificando o equipamento.

O Gráfico 20 apresenta o resultado dos ensaios TGA e DTGA para a borracha reciclada de pneu. A perda de massa ocorrida em até 200 °C pode ser atribuída à volatilização de plastificantes, óleos e aditivos com baixo ponto de ebulição presentes na composição da borracha (MAIA *et al.*, 2015). Observa-se um pico mais intenso em 381,09 °C, com perda de massa de 60,74%, o que pode ser atribuído à presença da borracha natural (NR), que apresenta uma temperatura de degradação em cerca de 365 °C. (DUTRA *et al.*, 2004; MENEZES, 2005).

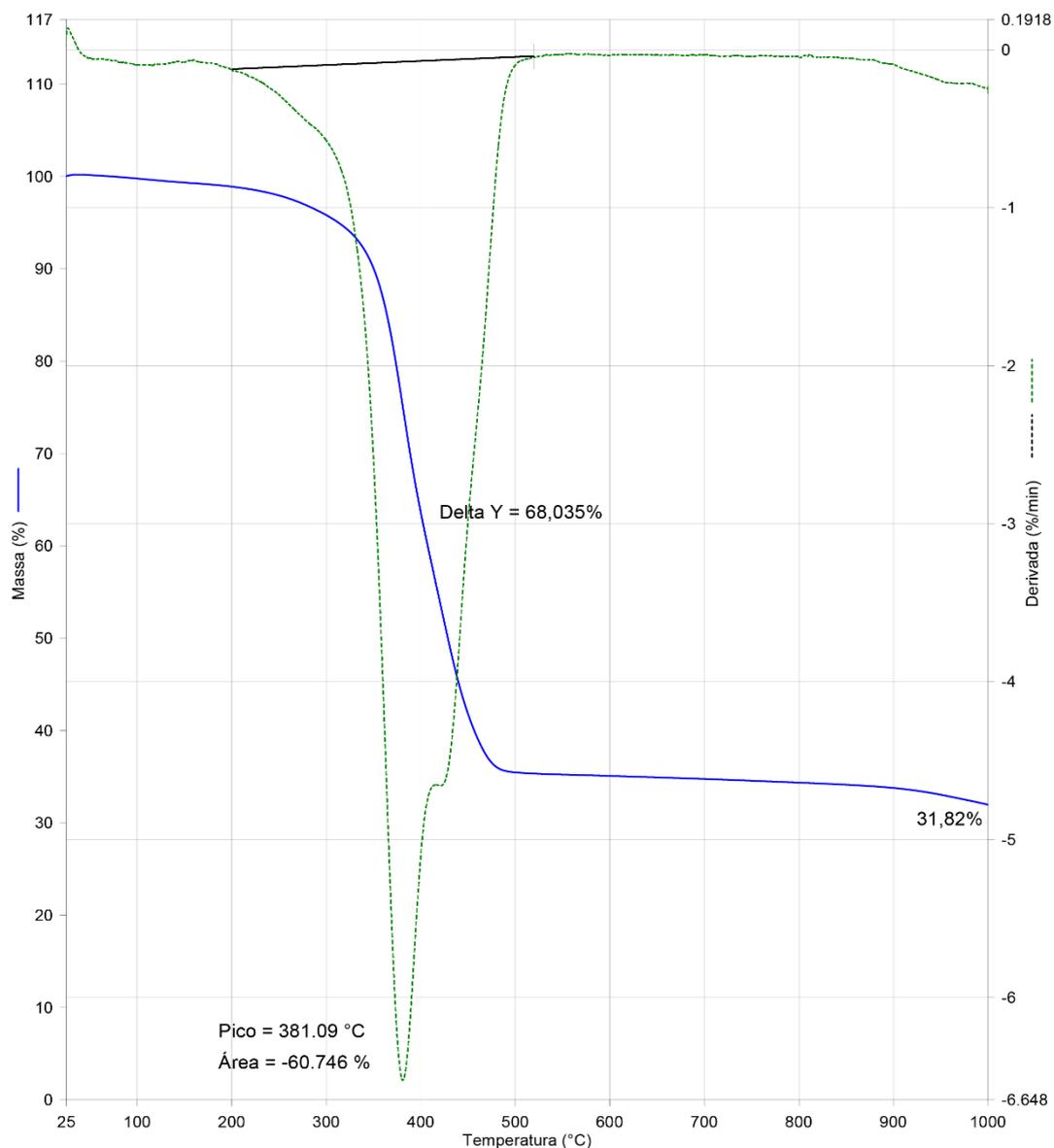
O segundo evento que aconteceu entre 400 °C e 450 °C, com perda de massa em cerca de 7,29%, é atribuído à degradação do elastômero SBR, o qual apresenta uma temperatura de degradação em torno de 430 °C. (DUTRA *et al.*, 2004; MENEZES, 2005). Conforme descrito em 2.1.1, o SBR é o elastômero mais utilizado na composição dos pneumáticos.

A decomposição em um pico principal e outro em menor escala ocorre pois o pneu é composto por diversos tipos de borrachas e não por um elastômero puro. O residual de 31,82% majoritariamente corresponde ao negro de fumo e demais aditivos também presentes na composição da borracha de pneu.

O gráfico de DTGA indica que o comportamento da curva derivada da decomposição da borracha ocorre numa faixa de temperatura entre 200 e 500 °C.

A análise térmica fornecida pelo Gráfico 20, TGA e DTGA, é compatível com outros estudos similares aplicados em borracha de pneu (GUJEL *et al.*, 2008; SCURACCHIO; WAKI; BRETAS, 2006) e em borracha vulcanizada (DALL'ANTONIA *et al.*, 2009).

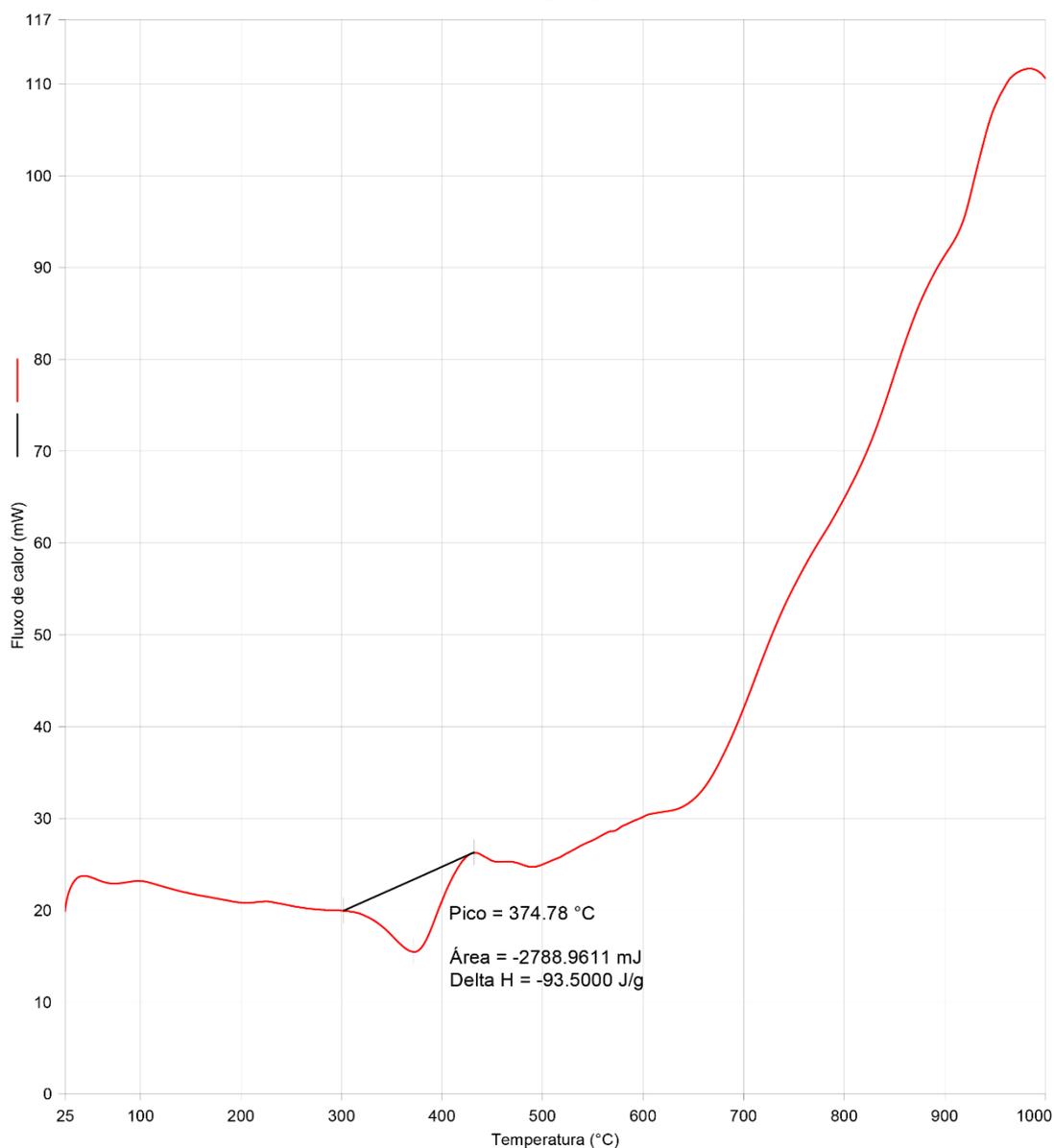
Gráfico 20 – Ensaio TGA e DTGA para o agregado reciclado de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

De forma similar, no ensaio de DSC da borracha (Gráfico 21), foi possível verificar que o pico de liberação de calor ocorreu aos 374,78 °C em concordância com o ensaio de TGA. Também se observou o aumento do fluxo de calor com o aumento da temperatura, caracterizando a degradação da borracha de pneu como uma reação exotérmica, como esperado.

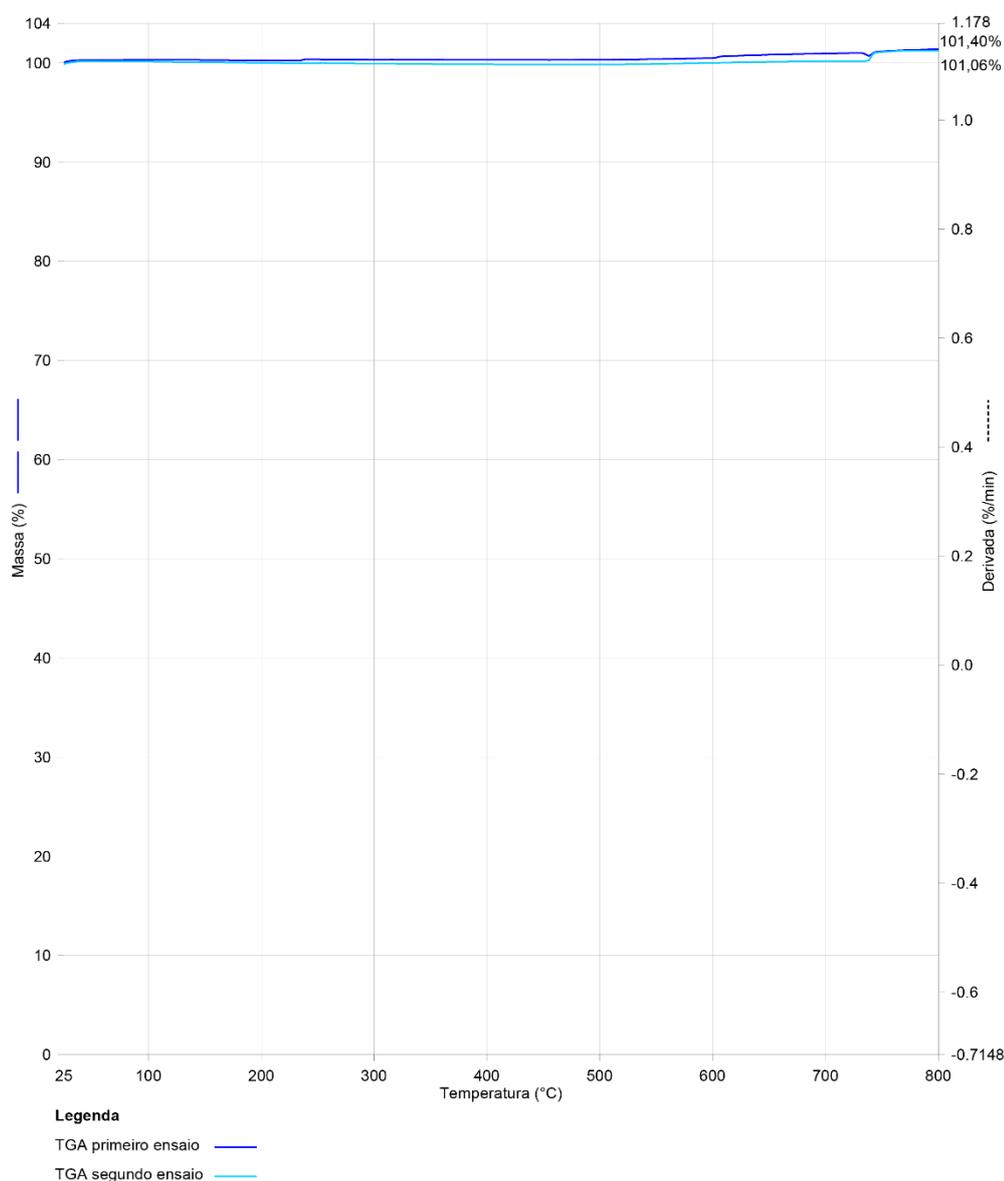
Gráfico 21 – Ensaio DSC para o agregado reciclado de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Gráfico 22 apresenta o resultado do ensaio TGA para a fibra metálica reciclada de pneu inservível, sendo que foram ensaiadas duas amostras do mesmo lote de material. Tendo em vista o baixo percentual de perda de massa encontrado, o ensaio foi repetido duas vezes como forma de assegurar um resultado fiel. Os resultados de DTGA e DSC de ambos os ensaios estão descritos no Apêndice A.

Gráfico 22 – Ensaio TGA para a fibra metálica reciclada



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Os ensaios de TGA apresentaram aos 800 °C ganho total de massa de 1,04% e 1,06%, os quais são percentuais muito pequenos em relação à massa total da amostra. O ganho de massa aferido pode ser proveniente da flutuação da balança interna do equipamento, que é extremamente sensível, ou da interferência do ambiente durante o ensaio. Não faz parte do escopo desta pesquisa avaliar qualitativamente esse aumento de massa.

A análise térmica da fibra metálica reciclada foi realizada em atmosfera inerte, sem a presença de oxigênio, logo o aumento de massa não é proveniente do processo

de oxidação. Além disso, sabe-se que até 800 °C, temperatura máxima atingida durante o ensaio, as fibras metálicas não são degradadas.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Esta seção abrange a caracterização e a moldagem das amostras, bem como a avaliação mecânica e física das misturas realizadas.

5.2.1 Características e moldagem das amostras

A denominação das amostras confeccionadas seguiu a nomenclatura explicitada no Quadro 24.

Quadro 24 – Descrição da nomenclatura utilizada

Nomenclatura	Descrição	Data da moldagem
REF	Referência 0% de adição de resíduos	06/05/2019
BOR5%	Placa de concreto com 5% de substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha	07/05/2019
BOR10%	Placa de concreto com 10% de substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha	08/05/2019
FIB0,5%	Placa de concreto com inserção de 0,5% de fibra de aço	09/05/2019
FIB1,5%	Placa de concreto com inserção de 1,5% de fibra de aço	10/05/2019

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O Quadro 25 apresenta as dimensões e a quantidade das amostras confeccionadas em cada moldagem, sendo que foi realizada uma única betonada para cada traço em volume igual a 1,10 m³ de concreto. O número de amostras por betonada foi dimensionado para não ultrapassar a capacidade máxima do misturador, mantendo a qualidade e a homogeneidade da mistura.

Quadro 25 – Descrição das amostras de concreto produzidas

Item	Quantidade	Dimensões	Ensaio
Placas de vedação	2 unidades	comprimento: 313 cm largura: 147 cm espessura: 10 cm	Resistência ao fogo NBR 10636 (ABNT, 1989)
Placas	5 unidades	comprimento: 46 cm largura: 15 cm espessura: 3 cm	Reação ao fogo NBR 9442 (ABNT, 1988a)

Item	Quantidade	Dimensões	Ensaio
Placas	7 unidades	comprimento: 7,6 cm largura: 7,6 cm espessura: 2,5 cm	Reação ao fogo ASTM E 662 (ASTM, 2018)
Corpos de prova cilíndricos	9 unidades	diâmetro: 10 cm altura: 20 cm	Resistência à compressão NBR 5739 (ABNT, 2018)
Corpos de prova cilíndricos	7 unidades	diâmetro: 10 cm altura: 20 cm	Módulo de elasticidade NBR 8522 (ABNT, 2017b)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Conforme descrito em 5.3.1.1, os exemplares empregados no ensaio de incombustibilidade foram moldados com os mesmos materiais e traço utilizados na etapa preliminar do programa experimental desta pesquisa.

Foram concretadas duas placas de vedação iguais para cada traço, e não um elemento único, para amparar o transporte, da fábrica onde foram produzidas até a UNISINOS, e para facilitar o manuseio das amostras e a montagem do ensaio dentro do laboratório. Ainda, como este estudo se trata de uma pesquisa aplicada, adotaram-se dimensões de fabricação utilizadas pela indústria de pré-fabricados.

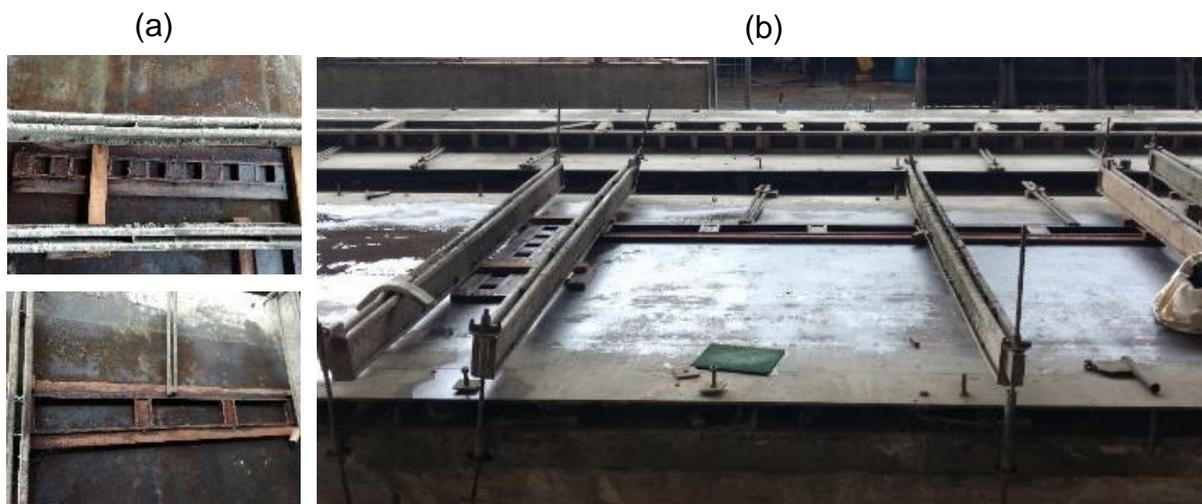
As formas para as placas foram confeccionadas pela equipe da Construtora Premold, utilizando chapa de compensado plastificado, caibros e ripas em madeira (Figuras 22 e 23). Os elementos em madeiras foram fixados com auxílio de vigas e de ganchos metálicos na própria pista de concretagem. Antes da concretagem, as formas foram limpas e receberam aplicação de desmoldante.

Figura 22 – Formas de madeira das placas de vedação: (a) vista lateral e (b) frontal



Fonte: Acervo da autora (2020).

Figura 23 – Formas de madeira das (a) placas menores e (b) na pista de concretagem



Fonte: Acervo da autora (2020).

As placas de vedação foram armadas com uma malha de aço reforçada para concreto diâmetro de 4,2 mm e abertura 15x15 cm, posicionadas no centro das placas. A malha foi amarrada em diversos pontos e foi utilizado espaçador tipo pino para que não ocorresse o deslocamento durante a moldagem (Figura 24). As demais placas menores e corpos de prova de concreto não foram armados.

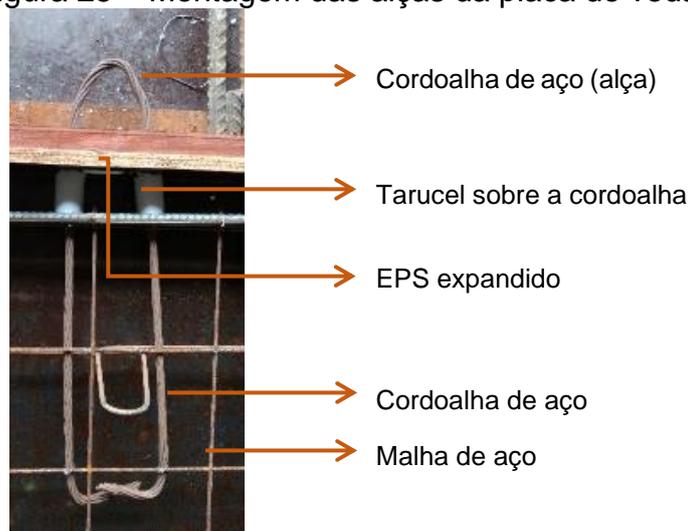
Figura 24 – Armadura de uma placa de vedação



Fonte: Acervo da autora (2020).

O local das alças foi reforçado com duas barras de diâmetro 12,5 mm com 50 cm de comprimento. A alça foi executada com cordoalha 7 fios e 9,52 mm de diâmetro, com comprimento total de 50 cm, sendo 12 cm aparentes e o restante embutido na forma. O recorte na forma de madeira por onde a alça foi posicionada foi preenchido com EPS expandido e as cordoalhas envolvidas com tarucel para evitar a saída de concreto da forma (Figura 25). Cada placa de vedação tem duas alças.

Figura 25 – Montagem das alças da placa de vedação



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O traço-base adotado foi fornecido pela empresa tendo em vista composição de insumos já praticada e testada com os materiais disponíveis na fábrica. A quantidade de água adicionada ao concreto foi corrigida no dia de cada concretagem em razão da umidade existente nos agregados miúdos. A Tabela 59 indica as proporções utilizadas nas moldagens.

Tabela 59 – Proporção dos insumos para confecção dos concretos

Insumo (kg/m ³)	Traços					
	Base	REF	BOR5%	BOR10%	FIB0,5%	FIB1,5%
Cimento	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0	330,0
Areia média	564,0	596,1	564,7	539,6	606,3	588,3
Areia fina	244,0	272,3	267,9	262,5	270,4	269,1
Brita 4,75/12,5 mm	329,0	329,0	329,0	329,0	329,0	329,0
Brita 9,5/25 mm	767,0	767,0	767,0	767,0	767,0	767,0
Água	167,0	107,0	114,2	116,5	98,3	117,6
Aditivo (litro/m ³)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Borracha	-	-	9,9	19,9	-	-
Fibra de aço	-	-	-	-	39,2	117,7
Umidade areia média	-	5,7%	5,4%	6,3%	7,5%	4,3%
Umidade areia fina	-	11,6%	9,8%	7,6%	10,8%	10,3%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

O ciclo de moldagens foi dividido em cinco etapas, sendo que cada tipo de concreto foi moldado em um dia diferente devido ao tempo necessário de desmontagem e de remontagem das formas na pista de concretagem. Foi utilizado

um conjunto de formas de madeira. Após cada procedimento de mistura, foi efetuado ensaio de abatimento do tronco de cone de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A etapa de produção das placas e dos corpos de prova cilíndricos foi realizada em central dosadora automatizada da fábrica. A central dosadora é composta por silos individuais fixos de estocagem dos agregados miúdos e graúdos (Figura 26a), com balança incorporada e acionada por um painel de controle integrado (Figura 26b). Os silos possuem comporta individual com acionamento por cilindro pneumático.

Figura 26 – Central dosadora: (a) silos individuais e (b) painel de controle



Fonte: Acervo da autora (2020).

Os agregados foram depositados em uma esteira transportadora de materiais que descarrega os agregados em um carrinho metálico (Figura 27a). Por sua vez, o carrinho metálico é elevado por sistema de engrenagens até o misturador de eixo vertical tipo planetário (Figura 27b). A dosagem da água e do cimento são automatizados em silo e mangueira em separado, sendo adicionados diretamente ao misturador. O aditivo é medido e inserido manualmente no misturador pelo operador.

Figura 27 – Central dosadora: (a) transporte de agregados e (b) misturador



Fonte: Acervo da autora (2020).

A inserção do agregado de borracha reciclada foi feita manualmente direto no misturador, sendo que a quantidade prevista para cada traço (BOR5% e BOR10%) já estava previamente pesada e ensacada. A dispersão do ARB na mistura ocorreu facilmente.

A inserção da fibra metálica reciclada também foi manual, sendo feita em camadas intercaladas durante a pesagem dos materiais secos, no carrinho metálico de transporte de agregados e não no misturador (Figura 27a). Esse cuidado foi tomado pela probabilidade de formação de grumos e pela elevada quantidade de fibra a ser inserida, principalmente no traço FIB1,5% que previa 129,60 kg do material.

Como a fibra metálica reciclada não possui formato e comprimento padrão, a fibra se mostrou embolada dentro dos sacos onde estava pesada e armazenada, sendo registrada grande dificuldade de separação da fibra metálica reciclada antes mesmo de ser mesclada no carrinho metálico. Foram necessárias, aproximadamente, 2 horas e 8 pessoas para desmembrar e polvilhar a fibra a ser utilizada no traço FIB1,5% (Figura 28).

Figura 28 – Polvilhamento da fibra metálica antes da moldagem do traço FIB1,5%



Fonte: Acervo da autora (2020).

Apesar dos cuidados tomados para o processo de desmembramento da fibra antes da mescla com os agregados, observou-se a formação de grumos no concreto fresco (Figura 29). Conforme discutido em 3.3.1, as aglomerações de fibras metálicas no concreto são prejudiciais, pois não promovem uma mistura homogênea e favorecem pontos fracos e porosos no local onde cada grumo se forma.

Figura 29 – Formação de grumos de fibra metálica reciclada no concreto



Fonte: Acervo da autora (2020).

Pilakoutas, Neocleous e Tlemat (2004) corroboram que um dos maiores problemas em misturar as fibras de aço recicladas no concreto fresco é a tendência das fibras de se aglomerarem devido às suas propriedades geométricas irregulares.

Conforme tratado em 5.1.5, caso a fibra metálica reciclada venha a ser comercializada em larga escala, é necessário aprimorar a padronização do comprimento e do formato da fibra. Essa qualificação nas características físicas da fibra já auxiliará no espalhamento homogêneo do material no concreto.

Depois de misturado e homogeneizado, o concreto foi despejado em uma caçamba móvel suspensa, transportado por ponte rolante até a pista de concretagem e lançado nas formas de madeira (Figura 30).

Figura 30 – Concreto fresco: (a) transporte e (b) lançamento



Fonte: Acervo da autora (2020).

O adensamento do concreto das placas foi executado com um vibrador de imersão de agulha, com diâmetro externo da agulha vibrante de 45 mm. Já os corpos de prova cilíndricos foram adensados com a haste de adensamento, de acordo com a

NBR NM 67 (ABNT, 1998). A moldagem das placas e dos corpos de prova cilíndricos atenderam às instruções da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Os corpos de prova cilíndricos foram cobertos com sacos plásticos cerca de duas horas após a moldagem, sendo desformados em 24 horas, conforme indicações da NBR 5738 (ABNT, 2016). A cura final até o momento dos ensaios foi realizada em câmara úmida, de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006b). A desmoldagem dos corpos de prova foi realizada na fábrica e as amostras foram transportadas no mesmo turno para a câmara úmida do Laboratório de Segurança Estrutural do itt Performance, na UNISINOS.

Após a concretagem de cada placa, quando a superfície dos moldes apresentou rigidez mínima suficiente, aproximadamente duas horas após a concretagem, as amostras tiveram a superfície umedecida com água e foram cobertas com lonas plásticas até o terceiro dia.

As formas laterais das placas foram removidas em 24 horas, no entanto os moldes permaneceram imóveis na pista de concretagem durante três dias, até que atingissem a resistência desejada para movimentação, visando o armazenamento (Figura 31a). Após serem removidas da pista de concretagem, as placas foram posicionadas de forma inclinada em cavaletes (Figura 31b), em espaço coberto, mas sem controle de umidade e de temperatura. As placas ficaram submetidas às condições ambientais internas da fábrica, similarmente às peças confeccionadas comercialmente em dias corriqueiros de produção.

Figura 31 – Placas de vedação (a) com as formas laterais removidas (b) armazenadas dentro da fábrica



Fonte: Acervo da autora (2020).

As placas de vedação ficaram armazenadas na Construtora Premold até a idade de 90 dias, sendo transportadas, após este período, até o Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na UNISINOS.

5.2.2 Caracterização das propriedades mecânicas dos concretos

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados na mesma betonada que as placas para que a caracterização mecânica desses moldes fosse do mesmo concreto utilizado para moldar as placas. A Tabela 60 indica o plano de caracterização mecânica dos concretos, indicando o número de corpos de prova cilíndricos para cada ensaio. As amostras têm 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Duas unidades extras de cada traço foram mantidas para eventuais necessidades, tais como a substituição de amostras danificadas ou de dados espúrios.

Tabela 60 – Plano de caracterização mecânica dos concretos

Ensaio	Data de ensaio e respectivo número de amostras				Norma para ensaio
	3 dias	7 dias	28 dias	~ 115 dias*	
Resistência à compressão	2	2	2	2	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Módulo de elasticidade	-	-	3	3	NBR 8522 (ABNT, 2017b)

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

*Datas dos ensaios de resistência ao fogo constam na Tabela 61.

5.2.3 Caracterização física

Para a caracterização física, foi realizada uma inspeção por tomografia 3D em pequenas amostras cilíndricas com diâmetro de 25 mm e altura de 30 mm. O equipamento é da marca Nikon® modelo XT V 160 e utiliza tecnologia de análise de raios X com detectores eletrônicos em vez de filmes radiológicos, com a apreciação da imagem em tempo real. O programa utilizado para a aquisição de imagens foi o VGSTUDIO MAX® versão 2.2.5, sendo o ensaio e a análise de imagens realizados no itt Fuse, na UNISINOS.

As amostras cilíndricas foram extraídas com serra copo diamantada da posição central das placas extras com dimensões de 15 cm de largura, 46 cm de comprimento e 3 cm de altura (Figura 32). O aparato de entrada da amostra no equipamento foi o

fator limitador para as dimensões dos corpos de prova, que poderiam alcançar diagonal máxima de 45 mm.

Figura 32 – Exemplo de extração de amostras para tomografia 3D



Fonte: Acervo da autora (2020).

A tomografia 3D permitiu verificar a dispersão das partículas de borracha e das fibras metálicas dentro da matriz cimentícia, bem como mensurar a quantidade de vazios em cada corpo de prova.

5.3 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

O comportamento dos concretos elaborados com a utilização de borracha reciclada e de fibras metálicas recicladas de pneus inservíveis em relação às altas temperaturas foi analisado pela reação ao fogo e pela resistência ao fogo.

5.3.1 Reação ao fogo

5.3.1.1 Ensaio de incombustibilidade

A verificação da combustibilidade de materiais e produtos homogêneos foi realizada de acordo com a norma ISO 1182 (ISO, 2010), bem como de seus componentes, quando submetidos a uma temperatura normativamente definida de 750 °C. Verificou-se, nessas condições de exposição, a absorção e a liberação de calor, a ignição, a sustentação de chamas e a perda de massa do material.

Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na UNISINOS. O equipamento utilizado foi fabricado pela empresa GREFORTEC® modelo 03664FE.

A NBR 16626 (ABNT, 2017a) classifica como incombustíveis aqueles materiais que apresentem desenvolvimento de calor muito limitado, não causando variação de mais de 30 °C entre a temperatura máxima e a temperatura final do forno, combustão sem chama ou com chamejamento durante tempo inferior a 10 segundos e perda limitada de massa com variação inferior a 50%.

Para o teste, utilizou-se um forno cilíndrico com 150 mm de altura, diâmetro interno de 75 mm e espessura de parede de 10 mm, aquecido internamente por resistências elétricas e envolto externamente por material isolante (Figura 33a). As amostras cilíndricas (Figura 33b) foram inseridas dentro do forno, acopladas em um suporte e monitoradas continuamente, por termopares no interior do forno, no centro e na superfície da amostra.

Figura 33 – Ensaio de incombustibilidade: (a) aparato de ensaio e (b) amostras



Fonte: Acervo da autora (2020).

A norma ISO 1182 (ISO, 2010) prescreve a avaliação de cinco amostras por tipo de material, com formato cilíndrico, diâmetro na faixa de 42 a 45 mm e altura de 50 ± 3 mm.

As amostras foram secas em uma estufa ventilada com temperatura de 60 ± 5 °C por um período mínimo de 24 horas. Após serem secas em estufa ventilada, foram colocadas em um dessecador, permanecendo neste recipiente até a data de realização dos ensaios.

Cabe ressaltar que os exemplares empregados no ensaio de incombustibilidade foram moldados com os mesmos materiais e traço utilizados na etapa preliminar do programa experimental desta pesquisa, conforme Simonetti *et al.* (2019).

5.3.1.2 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante

O índice de propagação superficial de chama em materiais de construção pelo método do painel radiante, exceto revestimentos de piso, foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na NBR 9442 (ABNT, 1988a), sendo realizado no Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na UNISINOS. O forno utilizado foi fabricado pela empresa GREFORTEC® modelo 05518PR.

Para cada tipo de concreto, foram testados quatro corpos de prova idênticos com dimensões de 150 mm de largura, 460 mm de comprimento e 25 mm de altura. Antes do ensaio, foram mantidos em estufa com ventilação forçada a 60 ± 3 °C por 24 horas e, em seguida, condicionados na sala de ensaio até o equilíbrio em temperatura de 23 ± 3 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$.

Para a execução do ensaio, as amostras (Figura 34a) foram inseridas em um suporte metálico e colocadas em frente a um painel radiante poroso (Figura 34b), com 300 mm de largura e 460 mm de comprimento, alimentado por gás e ar. O suporte e o corpo de prova foram posicionados em frente ao painel radiante com uma inclinação de 60° de modo a submeter o corpo de prova a um fluxo radiante padronizado. Uma chama piloto com comprimento entre 51 mm e 76 mm foi aplicada na extremidade superior do corpo de prova.

Figura 34 – Determinação do índice de propagação superficial de chama: (a) amostras e (b) aparato de ensaio



Fonte: Acervo da autora (2020).

O ambiente de ensaio teve temperatura e umidade relativa controladas, sendo registradas as informações antes do início do ensaio, juntamente com a estabilização

do aquecimento do painel durante 30 minutos, após ajustado para a temperatura de $670\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ e assim permanecendo por mais 30 minutos.

Durante o ensaio, foi anotado o tempo em que a frente da chama passava pelas marcas feitas a cada 76 mm nas linhas correspondentes na superfície das amostras. Também foram registrados outros fenômenos, como a ocorrência de picos de luminosidade, gotejamentos de partículas em chama, liberação de fumaça e quaisquer outros acontecimentos relevantes. O ambiente do ensaio é livre de correntes de ar, possuindo apenas exaustão com fluxo de ar entre 300 a 400 L/min.

O encerramento do ensaio ocorreu quando a temperatura máxima dos termopares da chaminé não variou mais do que $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos últimos 5 minutos ou quando a frente da chama atingiu todas as marcações do suporte padrão ou após um período de ensaio de 15 minutos, o que ocorresse primeiro.

O índice de propagação de chama é descrito pela Equação 3, obtido no ensaio por meio do produto entre o fator propagação de chama (P_c) e o fator de evolução de calor desenvolvido pelo material (Q).

$$I_p = P_c \cdot Q \quad (3)$$

Onde:

I_p = índice de propagação superficial de chama;

P_c = fator de propagação de chama;

Q = fator de evolução de calor.

O fator de propagação de chama é descrito pela Equação 4 e o fator de evolução de calor é descrito pela Equação 5.

$$P_c = 1 + \frac{1}{t_1 - t_0} + \frac{1}{t_2 - t_1} + \frac{1}{t_3 - t_2} + \frac{1}{t_4 - t_3} + \frac{1}{t_5 - t_4} \quad (4)$$

Onde:

P_c = fator de propagação de chama;

t_0 = zero;

t_1, t_2, t_3, t_4 e t_5 = tempo decorrido desde o início do ensaio até o momento em que a frente de chama atinge a primeira, segunda, terceira, quarta e quinta marcas do corpo de prova.

$$Q = C \cdot \frac{T}{\beta} \quad (5)$$

Onde:

Q = fator de evolução do calor;

β = constante do aparelho determinada na calibração igual a 41,24;

T = máxima diferença de temperatura entre a curva temperatura-tempo do corpo de prova ensaiado e a curva similar do corpo de prova de cimento-amianto utilizado na calibração.

Os dados resultantes de ensaios realizados conforme a NBR 9442 (ABNT, 1988a) devem ser agrupados em classes, de acordo com o índice de propagação superficial de chama, conforme exposto no Quadro 26. Quanto maior o índice, maior a velocidade com que a chama percorre e se propaga sobre a superfície do material nas condições de ensaio.

Quadro 26 – Classificação do ensaio de índice de propagação superficial de chama

Classe	Índice de propagação superficial de chama
A	0 a 25
B	26 a 75
C	76 a 150
D	151 a 400
E	acima de 400

Fonte: Adaptado de NBR 9442 (ABNT, 1988a).

A NBR 16626 (ABNT, 2017a) requer a definição de um atributo em relação à capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas, sendo que o material ensaiado em conformidade com a NBR 9442 (ABNT, 1988a) recebe a sua classificação de acordo com o Quadro 27.

Quadro 27 – Classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas

Classe	Descrição
d ₀	Se não ocorrerem gotejamento em chama e nem o desprendimento de partículas em chama
d ₁	Se não ocorrerem gotejamento em chama e nem o desprendimento de partículas em chama com duração superior a 10 segundos
d ₂	Se as condições anteriores não forem atendidas

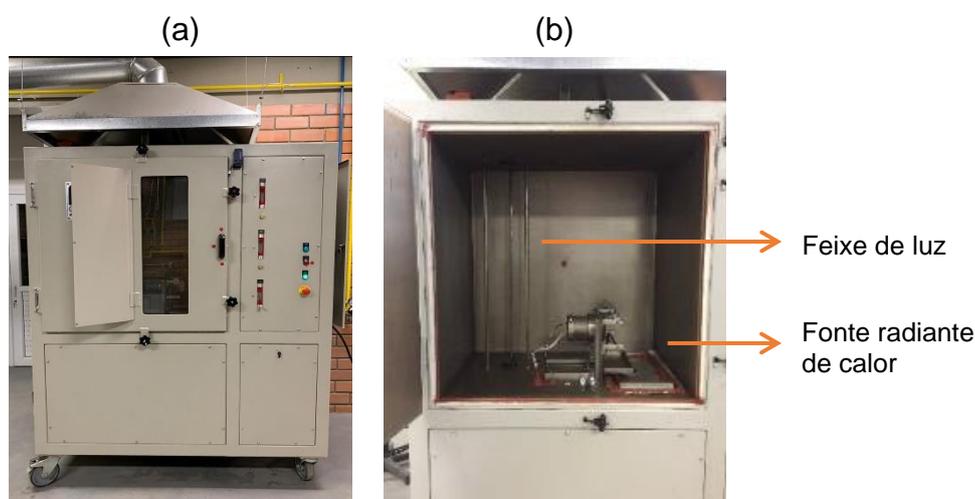
Fonte: Adaptado de NBR 16626 (ABNT, 2017a).

5.3.1.3 Ensaio de densidade óptica específica de fumaça

O ensaio de densidade óptica específica de fumaça foi realizado de acordo com a norma ASTM E 662 (ASTM, 2018) e tem como objetivo determinar a densidade óptica específica de fumaça gerada por materiais sólidos quando expostos a uma fonte de calor ($93 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$) e a uma chama de um queimador padrão pelo período máximo de 20 minutos. Esse índice é aferido pela atenuação de um feixe de luz pela fumaça em decorrência da liberação e desprendimento de partículas sólidas ou líquidas em suspensão.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na UNISINOS. O forno utilizado foi fabricado pela empresa GREFORTEC® modelo 05567CF (Figura 35).

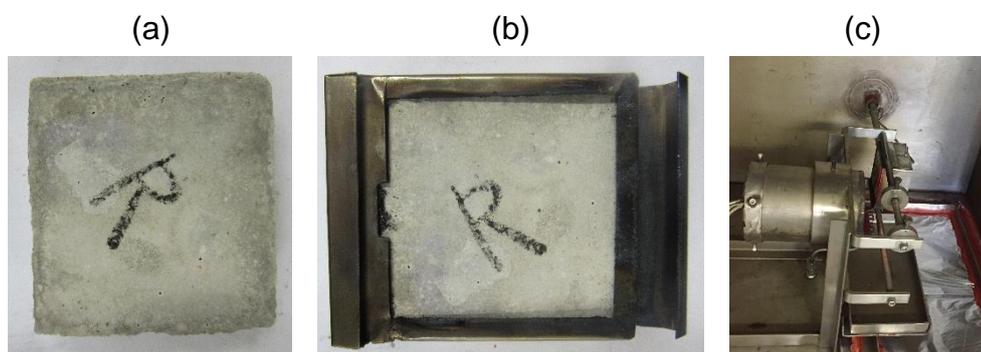
Figura 35 – Ensaio de densidade óptica específica de fumaça: (a) equipamento e (b) câmara interna de ensaio



Fonte: Acervo da autora (2020).

Os corpos de prova medindo 76 mm de largura, 76 mm de comprimento e 25 mm de altura foram testados na posição vertical; para cada tipo de concreto, foram realizados três ensaios com aplicação de chama piloto, visando garantir a condição de combustão com chama, e outros três ensaios sem aplicação de chama, com a proposição de garantir a condição de decomposição pirolítica. A Figura 36 ilustra um corpo de prova.

Figura 36 – Ensaio de densidade óptica específica de fumaça: (a) corpo de prova, (b) aparato de fixação e (c) posicionado na câmara de ensaio



Fonte: Acervo da autora (2020).

Antes do ensaio, os corpos de prova foram mantidos em estufa com ventilação forçada a 60 ± 3 °C por 24 horas e, em seguida, condicionados na sala de ensaio até o equilíbrio em temperatura de 23 ± 3 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$.

A câmara de ensaio utiliza gás propano com 99,5% de pureza na pressão de 50kPa, temperatura de superfície interna da parede em 35 ± 2 °C. A fonte de calor radiante é aplicada em frente à superfície da amostra com o auxílio de gabaritos espaçadores. O ponto de aplicação da chama ocorre na parte inferior do corpo de prova.

Um sistema fotométrico com um caminho de luz vertical é usado para medir a transmissão de luz variável à medida que a fumaça se acumula. As medições da transmitância da luz são usadas para calcular a densidade óptica específica da fumaça gerada durante o tempo para atingir o valor máximo. A escala fotométrica usada para medir a fumaça por esse método de teste é semelhante à da escala de densidade óptica da visão humana.

Os resultados são expressos em termos de densidade óptica específica (D_s), derivada de fatores geométricos e da porcentagem de transmitância da luz, medida em cada instante do ensaio (Equação 6).

$$D_s = \frac{V}{AL \left[\log_{10} \left(\frac{100}{T} \right) + F \right]} \quad (6)$$

Onde:

D_s = densidade óptica específica (sem unidade);

V = volume da câmara fechada (cm³);

A = área exposta do corpo de prova (cm²);

L = comprimento do caminho de luz através da fumaça (cm);

T = porcentagem de transmitância da luz;

F = função da densidade óptica do filtro utilizado.

A densidade óptica específica máxima corrigida ($D_{m \text{ corr}}$) é obtida em função de fuligens acumuladas na lente do feixe de luz da câmara após a evacuação da fumaça, de acordo com a Equação 7. O valor de $D_{m \text{ corr}}$ se trata de um desconto em D_s em função da transmitância luminosa obtida após o término de cada ensaio e é o valor utilizado na classificação dos materiais.

$$D_{m \text{ corr}} = D_m - D_c \quad (7)$$

Onde:

D_m = densidade óptica específica máxima (sem unidade);

D_c = densidade óptica específica calculada com a máxima transmitância alcançada durante a exaustão, após o término do ensaio.

5.3.2 Resistência ao fogo

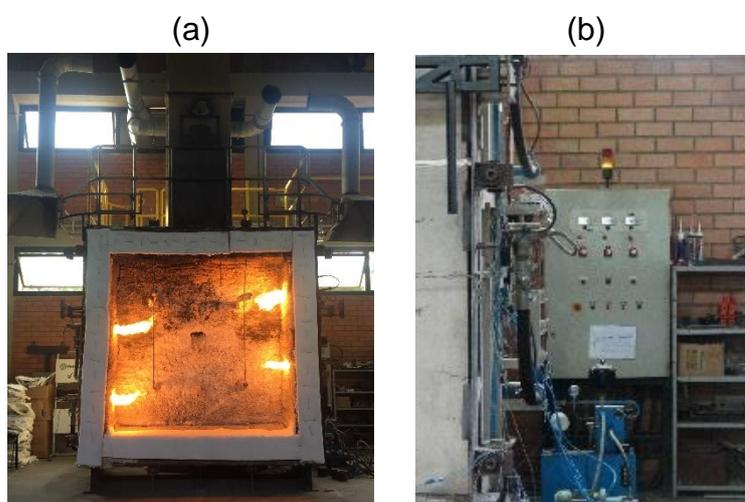
A determinação da resistência ao fogo de paredes e divisórias sem função estrutural é descrita pela NBR 10636 (ABNT, 1989) e é baseada no tempo que o material se mantém íntegro quanto aos critérios estabelecidos pela referida norma, quando submetido às condições padronizadas de aquecimento e de pressão.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Segurança Contra Incêndio do itt Performance, na UNISINOS. O forno utilizado foi fabricado pela empresa

GREFORTEC®, modelo GFT 03276 FG, com resolução 0,01 °C e capacidade térmica de 1.200 °C.

O forno é vertical (Figura 37), de estrutura rígida, com potência total de aquecimento de 654.000 kcal/h, com aquecimento realizado por meio de quatro queimadores internos alimentados a gás, com controle automático dos diferenciais de pressão, chaminé para regulagem da vazão dos gases de aquecimento, controle de temperatura digital e comando por intermédio de painel elétrico.

Figura 37 – Detalhe do forno vertical: (a) queimadores acesos e (b) quadro de comando

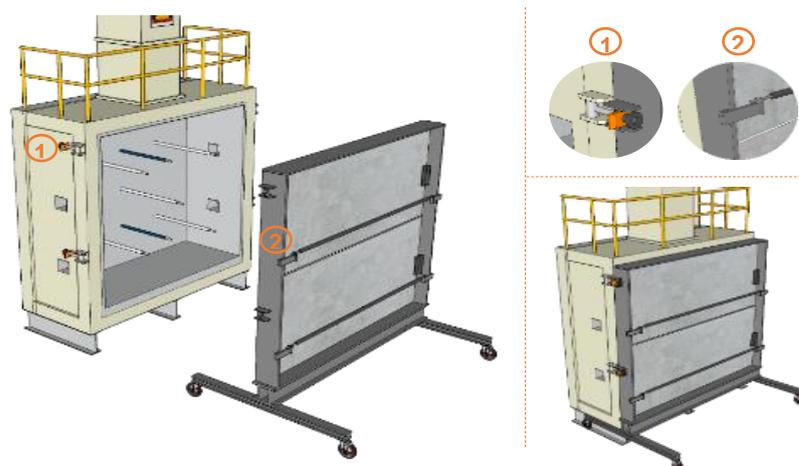


Fonte: Acervo da autora (2020).

O interior do forno é revestido com manta de fibra cerâmica em todo o perímetro, evitando perdas de calor e propiciando a circulação homogênea de fluxo de calor, alcançando melhor aproveitamento térmico.

A superfície exposta do forno vertical para ensaio de resistência ao fogo possui dimensões de 250 cm de comprimento por 250 cm de altura, sendo que as placas concretadas atendem com folga essa área. A sobreposição vertical das duas placas permite encaixe no pórtico metálico para ensaio de resistência ao fogo, com dimensões de 315 cm comprimento, 300 cm de altura e 25 cm de largura. A Figura 38 indica o acoplamento do pórtico metálico com as placas de vedação no forno vertical.

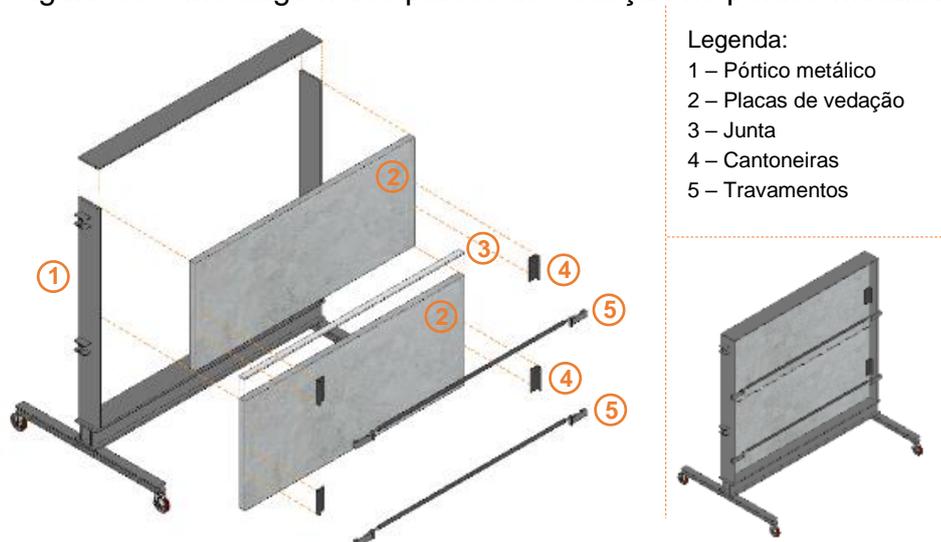
Figura 38 – Acoplamento do pórtico metálico no forno vertical



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Figura 39 ilustra as placas de vedação montadas e fixadas no pórtico metálico. Foram soldadas cantoneiras metálicas em “L” com dimensões de 7 cm de comprimento, 5 cm de largura e chapa espessura de 0,95 cm no pórtico metálico para garantir a fixação das placas durante o ensaio de resistência ao fogo. O sistema ensaiado não estava sob carregamento estático ou dinâmico.

Figura 39 – Montagem das placas de vedação no pórtico metálico



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A junta entre as placas tinha 1 cm de altura, 10 cm de largura e 3,13 m de comprimento e foi preenchida com uma tira de fibra cerâmica de 5,2 cm de altura, 8 cm de largura e 3,13 m de comprimento antes de a placa superior se apoiar sobre a

inferior. Após a união das placas, foi aplicado selante corta-fogo em ambas as faces das placas (Figura 40). A fibra cerâmica empregada é na forma de manta, marca *Morgan Advanced Materials*[®], linha *Thermal Ceramics*, produto *Superwool*[®] *Blanket*. O selante é de base acrílica marca Hilti[®], referência CP606, que permite a selagem de juntas rígidas ou com movimentação restrita, próprio para a construção civil e superfícies de concreto.

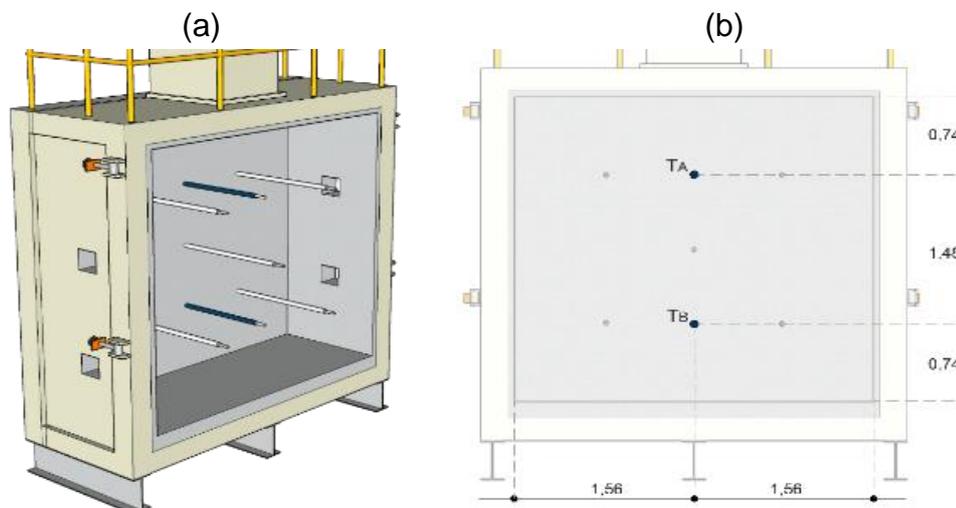
Figura 40 – Junta preenchida com (a) fibra cerâmica e (b) selante corta-fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

O aumento de temperatura no interior do forno transcorre de acordo com a curva de aquecimento estabelecida na NBR 10636 (ABNT, 1989), submetendo a amostra ao incêndio padrão da ISO 834-1 (1999). A evolução de temperatura é continuamente monitorada durante o ensaio pelo controle digital da temperatura em dois pontos (Figura 41), sendo que dois termopares tipo K instalados dentro do forno permitem a análise da temperatura interna. Caso ocorra desvio da evolução da temperatura interna do forno além dos limites fixados pela NBR 10636 (ABNT, 1989), uma correção automática da intensidade da chama produzida pelos queimadores é realizada.

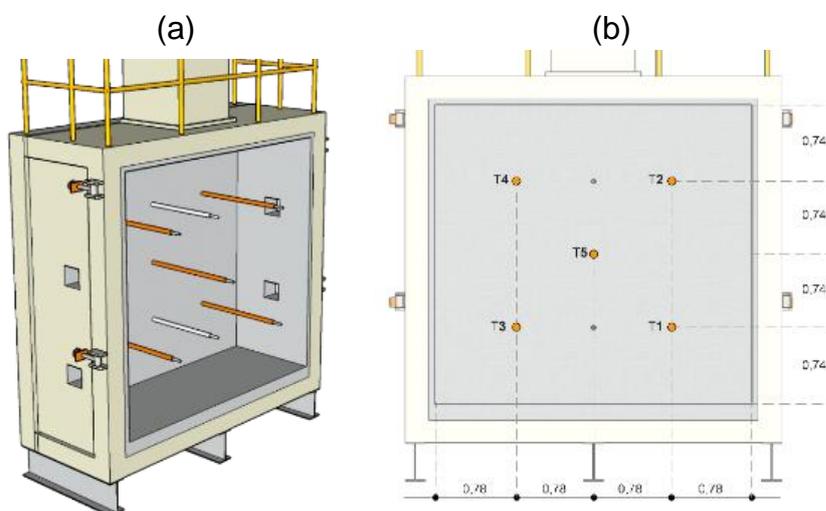
Figura 41 – Termopares internos do forno: (a) ilustração e (b) alinhamentos com unidade em metros



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Seguindo as prescrições da NBR 10636 (ABNT, 1989), a temperatura da face interna da amostra deve ser a média aritmética das temperaturas medidas por termopares arranjados simetricamente dentro do forno, em número igual a cinco, sendo um termopar para cada 1,5 m² de superfície exposta do corpo de prova. As temperaturas são medidas com precisão de $\pm 1,5\%$, sendo continuamente registradas durante o ensaio. A Figura 42 descreve a posição dos termopares da face exposta, e o Quadro 28 indica o tipo e a posição de cada um.

Figura 42 – Termopares internos da face exposta: (a) ilustração e (b) alinhamentos com unidade em metros



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 28 – Termopares internos do forno e da face exposta da amostra

Número	Tipo	Posição	Função
A	K	Zona superior	Temperatura interna do forno
B	K	Zona inferior	Temperatura interna do forno
1	K	Centro do quadrante superior direito	Temperatura da face interna da amostra
2	K	Centro do quadrante inferior direito	Temperatura da face interna da amostra
3	K	Centro geométrico	Temperatura da face interna da amostra
4	K	Centro do quadrante superior esquerdo	Temperatura da face interna da amostra
5	K	Centro do quadrante inferior esquerdo	Temperatura da face interna da amostra

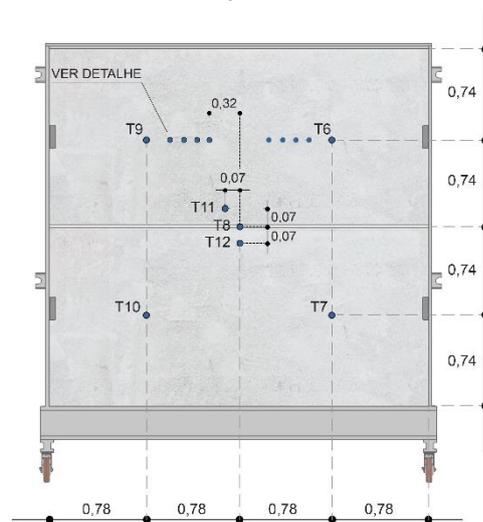
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A temperatura média da face não exposta deve ser medida, no mínimo, em cinco pontos arranjados da seguinte maneira: um localizado aproximadamente no centro geométrico da face do corpo de prova e os demais dos postos aproximadamente nos centros de cada uma das áreas resultantes da divisão da superfície em quatro partes iguais.

Os pontos de medida considerados no cálculo de temperatura média não devem coincidir com juntas, por isso foram utilizados termopares adicionais na região central para a placa inferior e para a placa superior. Na placa inferior, o termopar foi deslocado do centro geométrico em função do ensaio de estabilidade, a esfera atingiria diretamente o termopar ao ser projetada frente à placa. Pontos adicionais para leitura de temperatura foram inseridos no interior da seção da placa superior para que se pudesse analisar o gradiente de temperatura no núcleo da amostra.

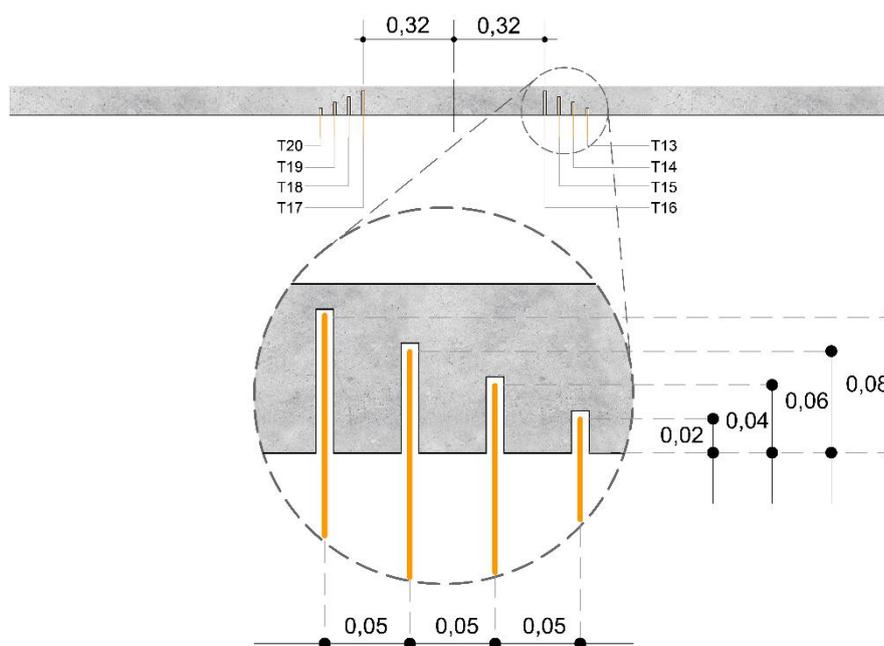
A posição dos termopares na face não exposta é descrita em Figura 43, vista frontal, e Figura 44, em corte. Já no Quadro 29, detalham-se os termopares da face não exposta.

Figura 43 – Termopares da face não exposta: vista frontal com unidade em metros



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 44 – Termopares da face não exposta: em corte com unidade em metros



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 29 – Termopares da face não exposta da amostra

Número	Tipo	Posição	Função
6	T	Centro do quadrante superior direito	Temperatura da face externa da amostra
7	T	Centro do quadrante inferior direito	Temperatura da face externa da amostra
8	T	Centro geométrico junta	Temperatura da face externa da amostra
9	T	Centro do quadrante superior esquerdo	Temperatura da face externa da amostra

Número	Tipo	Posição	Função
10	T	Centro do quadrante inferior esquerdo	Temperatura da face externa da amostra
11	T	Centro geométrico placa superior	Temperatura da face externa da amostra
12	T	Centro geométrico placa inferior	Temperatura da face externa da amostra
13 e 17	K	2 cm da face não exposta	Temperatura interior da seção da amostra
14 e 18	K	4 cm da face não exposta	Temperatura interior da seção da amostra
15 e 19	K	6 cm da face não exposta	Temperatura interior da seção da amostra
16 e 20	K	8 cm da face não exposta	Temperatura interior da seção da amostra

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O método de ensaio prescrito pela NBR 10636 (ABNT, 1989) determina as características de resistência ao fogo a serem verificadas durante o ensaio: isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade estrutural.

Segundo os preceitos da NBR 10636 (ABNT, 1989), considera-se o corpo de prova satisfatório como isolante térmico enquanto não houver, na face não exposta, aumento de temperatura média superior a 140 °C e, em qualquer termopar da mesma face, aumento superior a 180 °C a partir da temperatura ambiente.

A análise da estanqueidade do elemento estrutural submetido a altas temperaturas é verificada por meio de um chumaço de algodão colocado a uma distância entre 2 cm e 3 cm das trincas, aberturas ou da região de maior temperatura, determinada com auxílio de câmera termográfica. O chumaço foi mantido em posição durante pelo menos 10 segundos (Figura 45), sendo anotados o instante e a posição em que ocorrer a inflamação. Essa verificação foi realizada a cada uma hora de ensaio, ou na deflagração de alguma fissura visualmente significativa, com passagem de fumaça através da abertura, por exemplo.

Figura 45 – Teste de estanqueidade: (a) execução e (b) algodão

(a)

(b)



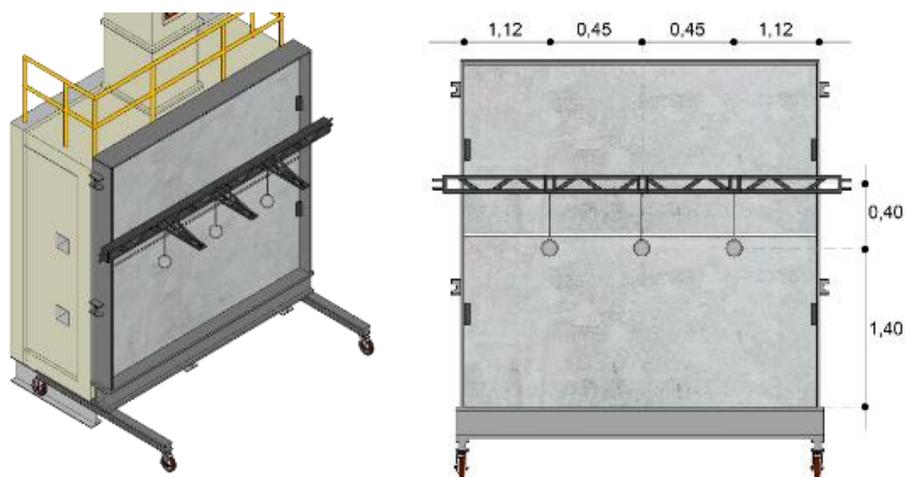
Fonte: Acervo da autora (2020).

O teste de estabilidade consiste em submeter a superfície não exposta ao fogo do corpo de prova ao impacto de uma esfera de aço em movimento pendular, com massa entre 15 kg e 25 kg, de forma a se obter, no choque, uma energia correspondente a 20 joules. Os impactos devem ser realizados em três pontos distintos da parede ou divisória, alinhados horizontalmente (Figuras 46 e 47).

Figura 46 – Teste de estabilidade: (a) ilustração e (b) cotas em metros

(a)

(b)



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 47 – Execução do teste de estabilidade



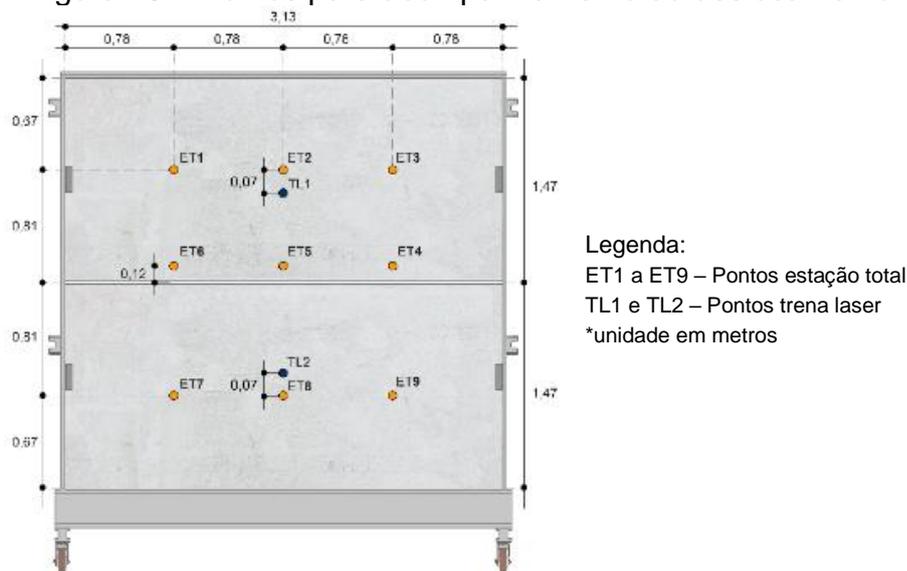
Fonte: Acervo da autora (2020).

A NBR 10636 (ABNT, 1989) orienta que a estabilidade deve ser verificada 3 minutos antes do tempo preestabelecido para o término do ensaio pela aplicação do teste de choque mecânico. Além desse período indicado pela norma, a estabilidade foi aferida a cada hora, junto com a estanqueidade.

Ainda sobre a avaliação da estabilidade, foi acompanhada a deformação das placas com medidas sucessivas de deslocamento ao longo de todo o ensaio. Essa análise complementar se torna importante para avaliar a integridade do elemento quando submetido a altas temperaturas, observando se ele produzirá deformação excessiva a ponto de colapsar ou comprometer a segurança dos usuários.

O deslocamento das placas foi medido em onze pontos, todos medidos externamente ao forno. Nove pontos lidos a cada 5 minutos até o final do ensaio, utilizando uma estação total marca Leica Flexline modelo TS-06 Plus, com precisão angular de 17,78 cm (7") e precisão linear de 2mm + 2ppm. Em dois pontos centrais, foi utilizada uma trena a laser, marca Bosch, modelo GLM 20 Professional, no eixo geométrico da placa superior e da placa inferior, com leituras feitas em 0, 5, 10, 15 e 20 minutos, e após a cada 10 minutos transcorridos até o final do ensaio. A Figura 48 representa os pontos lidos para acompanhamento do deslocamento.

Figura 48 – Pontos para acompanhamento do deslocamento



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Cabe ressaltar que os pontos aferidos pela estação total não estão exatamente no eixo geométrico horizontal das placas para que não coincidisse com termopares da instrumentação.

No transcorrer do ensaio, foram observadas e anotadas todas as mudanças ou eventos, mesmo que não fossem relativas aos critérios da resistência ao fogo, que pudessem causar riscos no ambiente de um edifício.

A execução de todos os ensaios foi filmada com câmara termográfica, acompanhando o desenvolvimento do calor externo da amostra ao transcorrer do tempo. Foram obtidas imagens com uso da câmera termográfica em 0, 5, 10, 15 e 20 minutos, e após cada 10 minutos transcorridos até o final do ensaio. A câmera termográfica é da marca FLIR, modelo A300.

O ensaio de resistência ao fogo foi realizado apenas em tempo superior a 90 dias de cura com o intuito de alcançar o menor teor possível de umidade, com base na pesquisa de Moreira (2017) e discussão em 3.1.3.

Em concordância com a NBR 10636 (ABNT, 1989), foram determinados a categoria e o grau de resistência ao fogo. Em relação à categoria de resistência ao fogo, a referida norma descreve como para-chamas aquela amostra que atende apenas à estanqueidade e à estabilidade, e como corta-fogo aquela amostra que atende a todas as exigências. Já os graus de resistência ao fogo são expressos pelo tempo de ensaio durante o qual as amostras satisfazem aos critérios de resistência

correspondentes à sua categoria. Os graus de resistência ao fogo são: 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 e 360 minutos.

5.3.3 Análise química microestrutural

A análise química microestrutural consistiu na avaliação de material pulverulento das placas após exposição em alta temperatura, pós-ensaio de resistência ao fogo, por meio das técnicas experimentais de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e de difratometria de raios X (DRX).

A técnica de análise de FRX utilizou espectrômetro de fluorescência de raios X WDS, equipado com tubo de raios X de Rh, marca Rigaku® modelo RIX 2000. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geoquímica no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Os resultados de FRX foram obtidos por análise quantitativa com curva de calibração a partir de padrões de rocha da Geostandards. A metodologia empregada na análise foi a GRP2 e o padrão analisado foi o JG1A. O preparo da amostra se deu pelo método da pastilha prensada. A presença de voláteis foi avaliada por meio de técnicas gravimétricas.

A difratometria foi realizada no Laboratório de Difratometria de Raios X no Instituto de Geociências da UFRGS. O equipamento utilizado foi o difratômetro marca Siemens®, modelo Bruker D-5000. Essa técnica origina gráficos, chamados difratogramas, que possibilitam a identificação dos cristais presentes nas amostras a partir de picos típicos de cada composto, corroborados por um banco de dados científicos. (STUTZMAN; FENG; BULLARD, 2016). O programa utilizado para a identificação das fases foi o *HighScore Plus* da Malvern Panalytical®.

O material em pó coletado para análise de DRX e FRX foi extraído das placas de vedação superiores (Figura 49) de todos os concretos no mesmo alinhamento vertical dos termopares T13 a T20, porém 4 e 6 cm acima da sua linha horizontal para não coincidir com os furos já realizados para a fixação dos termopares (Figura 44). Também foi extraído material em pó de uma placa de concreto referência em temperatura ambiente para fins de comparação.

Figura 49 – Marcação para extração de pó para análises DRX e FRX



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A extração do pó foi realizada nas profundidades de 2, 4, 6 e 8 cm, sendo feitos dois furos em cada profundidade para que a quantidade de pó extraída fosse suficiente para as análises químicas. Em BOR10%, devido à diminuição da seção da placa por causa do deslocamento, foi possível extrair pó em 2, 4 e 5 cm de profundidade.

A coleta do pó foi feita com furadeira profissional marca Bosch®; a profundidade a ser atingida foi delimitada por fita crepe na própria broca e a coleta foi realizada em sacos plásticos individuais e, posteriormente, selados com fita adesiva para evitar a contaminação (Figura 50). O material em pó foi triturado finamente em almofariz e pistilo de ágata.

Figura 50 – Extração de pó para análises DRX e FRX



Fonte: Acervo da autora (2020).

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A apresentação e a discussão dos resultados encontram-se organizadas seguindo a mesma disposição dos métodos descritos no quinto capítulo, etapa final do programa experimental. A seguir, são mostrados os resultados intercalando-os com discussão quantitativa e qualitativa e articulação com a bibliografia.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesta etapa final, os resultados dos ensaios de caracterização mecânica foram submetidos a testes estatísticos para verificação do grau de significância do efeito das variáveis nas propriedades estudadas, da mesma forma que a metodologia descrita em 4.2.

6.1.1 Ensaio de abatimento de tronco de cone

O Quadro 30 apresenta dados das moldagens, como as condições climáticas e o ensaio de abatimento de tronco de cone para cada concretagem realizada. Cabe salientar que as condições de umidade e de temperatura são fatores que não são passíveis de controle em campo, no entanto simulam condições reais de fabricação em uma indústria de pré-moldado.

Quadro 30 – Caracterização das moldagens

Traço	Abatimento (mm)	Temp. (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Condições climáticas
REF	135	23,7	91,7	Chuva
BOR5%	115	20,8	69,0	Nublado, encoberto, sem chuva
BOR10%	110	17,9	86,0	Nublado, encoberto, sem chuva
FIB0,5%	120	19,7	86,0	Nublado, encoberto, sem chuva
FIB1,5%	50	20,9	97,0	Chuva

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em relação ao abatimento de tronco de cone, a inserção do resíduo de pneu inservível (tanto da borracha quanto da fibra metálica) ocasionou a diminuição da trabalhabilidade das misturas quando comparadas ao concreto convencional. Esse

resultado já era esperado, pois reprisa o comportamento da trabalhabilidade dos concretos elaborados na etapa preliminar em 4.2.1.1 e 4.2.2.1 e conforme já discutido nos subcapítulos 3.1 e 3.3.

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone não foram submetidos à análise quantitativa analítica, tendo em vista que foi coletado um único valor dessa propriedade para cada mistura. Desta forma, foi feita apenas a classificação conforme a NBR 7212 (ABNT, 2012).

De acordo com a NBR 7212 (ABNT, 2012), os concretos referência, BOR5%, BOR10% e FIB0,5% se enquadram na classe de consistência S100, enquanto o concreto FIB1,5% integra a classe S50.

Cabe salientar que a redução do abatimento constatada nos traços com agregado reciclado de borracha e FIB0,5% não impediu ou causou prejuízo significativo para a moldagem das amostras. Já em FIB1,5%, devido à formação de grumos no concreto fresco conforme demonstrado na Figura 29, houve dificuldade de moldagem dos corpos de prova cilíndricos e das placas de vedação.

Na etapa preliminar, FIB1,5% apresentou 100% de redução do abatimento de tronco de cone, e na etapa final, foi registrada redução de 63%. Em relação ao quesito de trabalhabilidade, o teor de inserção de 1,5% parece ser o limite considerando mistura e moldagem ideais do concreto com a inserção da fibra metálica reciclada.

6.1.2 Resistência à compressão

Os resultados obtidos para resistência à compressão podem ser observados na Tabela 61, com os valores de resistência potencial e resistência média. As idades de ensaio foram 3, 7, 28 e cerca de 112 dias, o que corresponde à data do ensaio de resistência ao fogo.

Tabela 61 – Valores obtidos de resistência à compressão

(continua)

Traço	Idade (dias)	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
REF	3	33,2	32,7	0,71
	7	38,5	36,7	2,55
	28	43,2	42,7	0,78
	112	46,3	45,0	1,91

Tabela 61 – Valores obtidos de resistência à compressão

(conclusão)

Traço	Idade (dias)	Resistência potencial (MPa)	Resistência média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
BOR5%	3	32,5	32,0	0,71
	7	37,3	36,1	1,77
	28	39,7	38,6	1,63
	112	57,2	55,6	2,33
BOR10%	3	29,2	25,4	5,44
	7	38,6	38,5	0,14
	28	49,0	46,3	3,82
	113	45,6	43,9	2,47
FIB0,5%	3	33,4	31,0	3,46
	7	30,1	28,8	1,84
	28	47,1	45,5	2,26
	117	46,0	45,5	0,78
FIB1,5%	3	27,3	25,3	2,83
	7	34,5	33,4	1,63
	28	34,2	33,9	0,42
	119	42,9	39,1	5,37

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

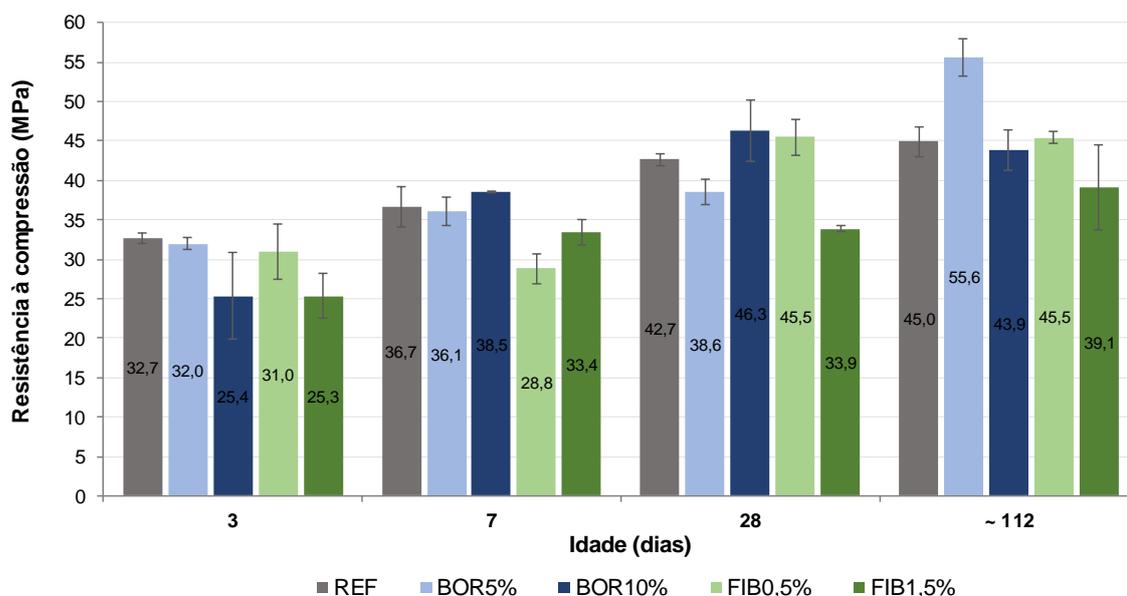
As misturas BOR5% e FIB1,5% apresentaram, respectivamente, resistência à compressão 8% e 21% inferiores em relação ao referência, aos 28 dias. Já se esperava que a mistura FIB1,5% não apresentasse valores superiores de resistência à compressão devido aos grumos de fibras observados durante a moldagem, relatados em 5.2.1. Para BOR5%, apesar do percentual de redução de 8% ser um valor aproximado de dados obtidos por outros pesquisadores, conforme validado na Tabela 61, aos 112 dias esse traço apresenta resistência à compressão superior ao referência.

Já BOR10% e FIB0,5% apresentaram, respectivamente, resistência à compressão 13% e 9% superiores em relação ao referência, aos 28 dias. De acordo com Bentur e Mindess (2007), concretos com fibra de aço em percentuais de inserção de até 2% podem ocasionar aumento da resistência à compressão de 0% a 25%. Conforme confrontado com os resultados preliminares e com a Tabela 61, não era esperado aumento de resistência à compressão para BOR10%. Resultado semelhante já foi encontrado por Santos *et al.* (2017), sendo que 8% de substituição de areia por ARB ocasionou acréscimo de 7% na resistência à compressão.

O Gráfico 23 ilustra a evolução da resistência à compressão conforme as idades de ensaio. É possível observar certa variabilidade dos dados ao longo do

tempo, como a mistura BOR5% que inicia aos 3 e 7 dias com valores de resistência à compressão similares ao referência, porém apresenta, aos 112 dias, o valor mais elevado.

Gráfico 23 – Evolução da resistência à compressão: misturas da etapa final



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O FIB0,5% demonstrou, aos 7 dias, valor de resistência à compressão menor que o referência, diferente das demais idades, o que pode ser atribuído a alguma incorreção no processo de retífica ou de moldagem do corpo de prova.

Outro fator que pode ter trazido variabilidade aos traços concretados é a correção diária da quantidade de água, tendo em vista o período chuvoso durante as concretagens e a umidade presente nos agregados miúdos, conforme descrito no Quadro 30.

Para avaliar a resistência à compressão das misturas elaboradas na etapa final, com idade de ensaio aos 28 dias, foi realizada análise de variância e os resultados estão apresentados na Tabela 62. Com nível de confiança de 95% e com relação à resistência à compressão, é possível constatar que há diferença significativa apenas entre os percentuais testados.

Tabela 62 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das misturas da etapa final

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Material	2	18,883	9,442	0,225
Percentuais	2	194,622	97,311	0,004
Resíduos	5	23,130	4,626	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 63), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para complementar os resultados da análise de variância.

Tabela 63 – Agrupamento de resultados de resistência à compressão das misturas da etapa final conforme teste de Tukey

Percentual	Material	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
1,5%	F	33,900	27,799	40,001	1
5%	B	38,550	32,449	44,651	1 e 2
0%	REF	42,650	36,549	48,751	2
0,5%	F	45,500	39,999	51,601	2
10%	B	46,300	40,199	52,401	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Legenda: (B) concreto com agregado reciclado de borracha; (F) concreto com fibra metálica reciclada; (REF) concreto referência.

O teste de Tukey indicou que as misturas REF, FIB0,5% e BOR10% estão contidas no grupo 2 e possuem valores de resistência à compressão superiores ao grupo 1, em particular FIB1,5%. A mistura BOR5% está contida nos dois grupos, apresentando similaridade estatística em seus dados com ambos agrupamentos.

Essa análise corrobora a avaliação realizada com base na evolução da resistência à compressão ao longo das idades de ensaio (Gráfico 23), em que FIB1,5% apresenta os resultados mais baixos.

6.1.3 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos para módulo de elasticidade podem ser observados na Tabela 64, sendo apresentados os valores médios. Infelizmente, não foi possível realizar o ensaio de módulo de elasticidade junto com a resistência à compressão devido ao fato de o equipamento de ensaio estar em manutenção. Dessa forma, os

ensaios de módulos de elasticidade foram realizados quando o equipamento estava apto para uso.

Tabela 64 – Valores médios obtidos de módulo de elasticidade

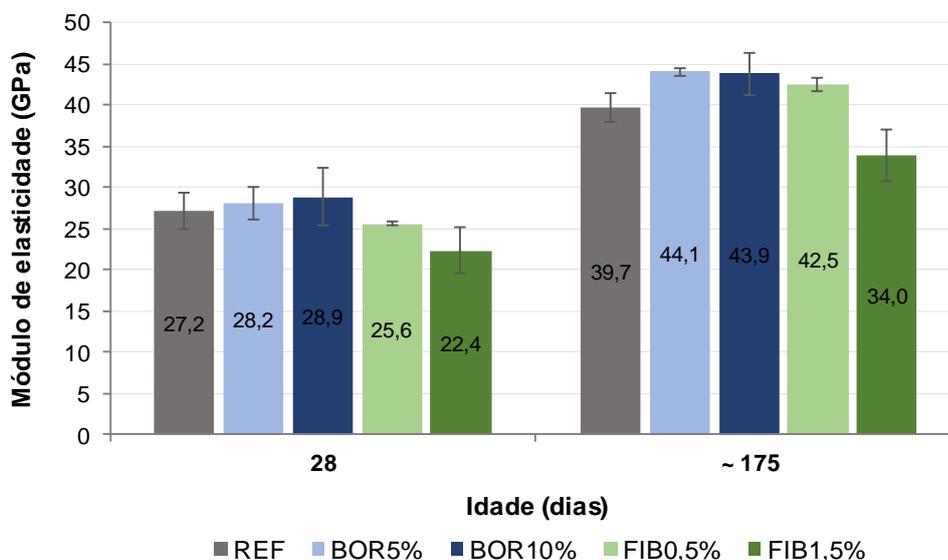
Traço	Idade (dias)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)
REF	28	27,2	2,14
	175	39,7	1,71
BOR5%	28	28,2	1,95
	174	44,1	0,46
BOR10%	28	28,9	3,56
	175	43,9	2,59
FIB0,5%	28	25,6	0,16
	175	42,5	0,85
FIB1,5%	28	22,4	2,79
	175	34,0	3,20

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os ensaios de resistência ao fogo e de resistência à compressão foram realizados quando as misturas de concreto tinham cerca de 112 dias de idade, enquanto o módulo de elasticidade foi realizado com cerca de 175 dias de idade. Não se considera essa lacuna prejudicial, tendo em vista o avançado estágio de cura dos corpos de prova já no ensaio de resistência ao fogo.

O Gráfico 24 ilustra a evolução do módulo de elasticidade conforme as duas idades de ensaio. Aos 175 dias, as misturas BOR5%, BOR10% e FIB0,5% apresentaram 11%, 11% e 7% de aumento, respectivamente, em relação ao concreto referência.

Gráfico 24 – Evolução do módulo de elasticidade: misturas da etapa final



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O aumento do módulo de elasticidade incide no acréscimo da máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente. (NEVILLE, 2016). Essa é uma característica benéfica ao concreto em relação à resistência ao fogo, devido à deformação que o material sofre quando exposto à alta temperatura.

Conforme explanado em 3.2.2.4, os resultados de módulo de elasticidade seguem a mesma tendência dos resultados de resistência à compressão, uma vez que são duas propriedades relacionadas. O traço FIB1,5% apresentou o menor valor de resistência à compressão e de módulo de elasticidade. Já BOR5% apresentou, em idade avançada, o maior valor de resistência à compressão e de módulo de elasticidade.

Para avaliar o módulo de elasticidade das misturas elaboradas na etapa final, com idade de ensaio aos 28 dias, foi realizada análise de variância e os resultados estão apresentados na Tabela 65. Com nível de confiança de 95% e com relação ao módulo de elasticidade, é possível constatar que há diferença significativa apenas entre os materiais reciclados empregados.

Tabela 65 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade das misturas da etapa final

Variável	Graus de liberdade (gl)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrado médio (MQ)	p-valor
Material	2	63,472	31,736	0,025
Percentuais	2	16,904	8,452	0,277
Resíduos	10	57,741	5,774	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com o teste de Tukey (Tabela 66), foi possível realizar o agrupamento dos resultados homogêneos considerando cada variável, o que serviu para complementar os resultados da análise de variância.

Tabela 66 – Agrupamento de resultados de módulo de elasticidade das misturas da etapa final conforme teste de Tukey

Material	Média ajustada	Intervalo inferior de confiança	Intervalo superior de confiança	Grupo
F	24,000	21,195	26,806	1
REF	27,208	23,240	31,176	1 e 2
B	28,521	25,716	31,327	2

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Legenda: (B) concreto com agregado reciclado de borracha; (F) concreto com fibra metálica reciclada; (REF) concreto referência.

O teste de Tukey indicou que as misturas com fibra metálica (grupo 1) e com borracha (grupo 2) estão em grupos opostos, evidenciando a diferenciação entre os materiais em relação ao módulo de elasticidade. O concreto referência está contido nos dois grupos, apresentando similaridade estatística em seus dados com ambos os grupos. A ferramenta estatística não registrou a diferença observada entre FIB0,5% e FIB1,5%.

Após a avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos BOR5% e BOR10% e da constatação de que não houve prejuízo para essas propriedades mecânicas, percebe-se que poderiam ser confeccionados traços com maior teor de substituição de areia fina por agregado reciclado de borracha. A avaliação no estado fresco também corrobora esse viés, uma vez que a redução da trabalhabilidade não prejudicou o processo de moldagem das amostras.

Para o concreto com fibra metálica reciclada, a avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade indicam a possibilidade de um percentual

superior a 0,5% de inserção de fibra. No entanto, a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas aferidas indicaram que o teor de 1,5% de inserção parece ser o limite.

6.1.4 Caracterização física

A Tabela 67 apresenta a análise do espaço ocupado por vazios nas amostras contendo resíduos de pneus inservíveis e do espaço ocupado por fibras metálicas recicladas em FIB0,5% e FIB1,5%. Ressalta-se que a avaliação do volume de vazios não foi realizada para o concreto referência. A visualização e a análise dos dados utilizaram voxels como monitores volumétricos, sendo que a capacidade de processamento do *software* VGSTUDIO MAX[®] versão 2.2.5 é de 8 voxels ao infinito.

Tabela 67 – Avaliação do volume ocupado por vazios e por fibras metálicas

Classe	Percentual da amostra ocupado por vazios	Percentual da amostra ocupado por fibras metálicas recicladas
BOR5%	3,25%	-
BOR10%	3,86%	-
FIB0,5%	1,87%	0,07%
FIB1,5%	1,44%	0,69%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

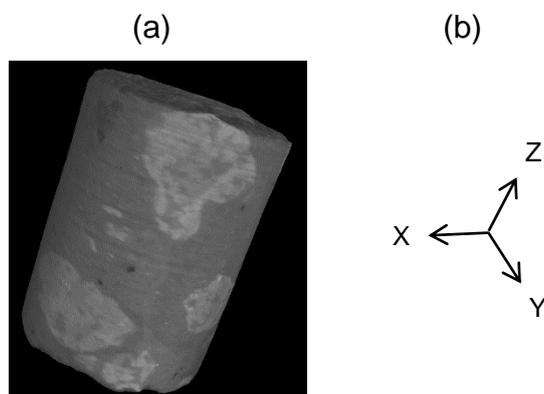
Cabe salientar que o *software* VGSTUDIO MAX[®] apresentou dificuldade para diferenciar partículas pequenas de borrachas e espaços vazios, muitas vezes contabilizando ambos com o mesmo voxel. Mas como esse comportamento ocorreu em ambas as amostras com borracha, os resultados obtidos seguem válidos para efeito de comparação.

Ao analisar a Tabela 67, é possível notar que o percentual de vazios aumentou com o acréscimo do teor de borracha reciclada, o que já era esperado, pois conforme já discutido em 3.2.1, ocorre o aumento do teor de ar incorporado na mistura. As amostras com borracha apresentam maiores índices de vazios do que as amostras com fibra, uma vez que o teor de ar aumenta com a redução das dimensões das partículas. (ALBUQUERQUE, 2009).

Entre a Figura 51 e a Figura 54, observam-se imagens tridimensionais das amostras BOR5% e BOR10%, com a indicação dos eixos cartesianos e imagens bidimensionais das seções internas e centrais das amostras. Nestas imagens, as

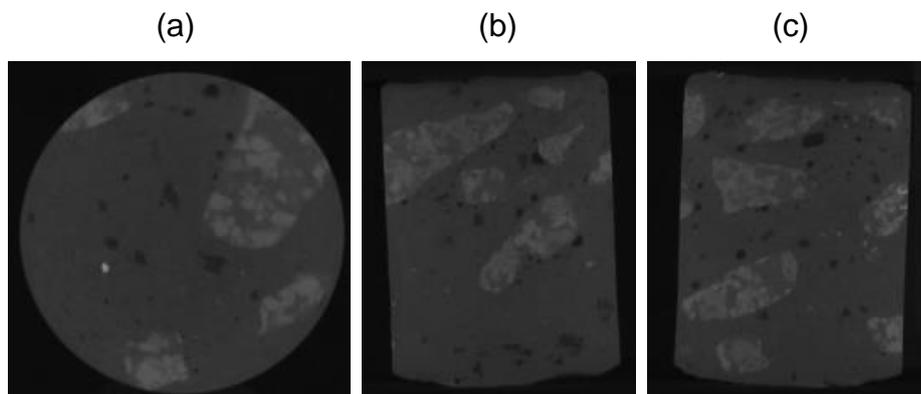
manchas maiores, cinzas-claras, representam o agregado graúdo, já as manchas pretas menores representam as partículas de borracha.

Figura 51 – Imagens de BOR5%: (a) amostra em 3D e (b) eixos



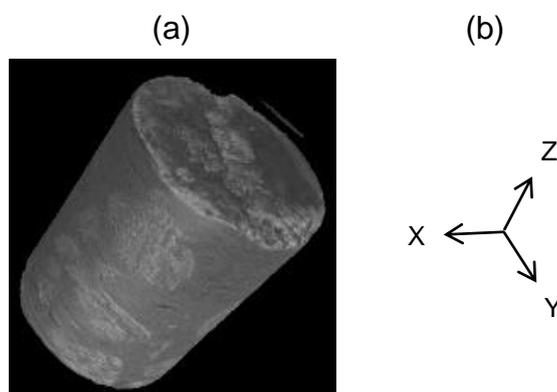
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 52 – Imagens de BOR5% conforme eixos (a) XY, (b) ZX e (c) ZY



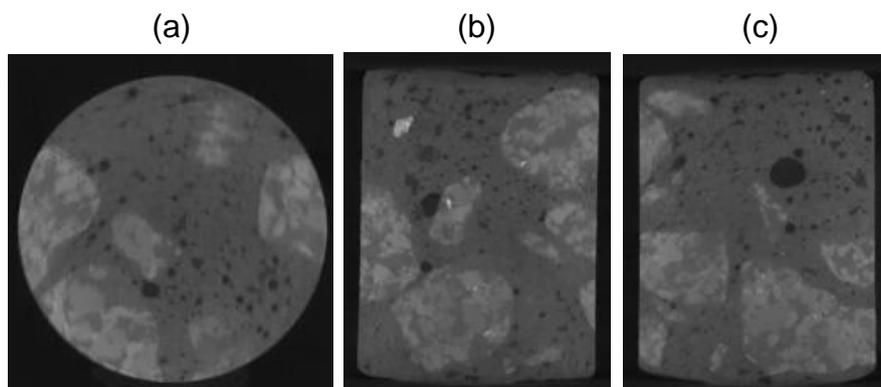
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 53 – Imagens de BOR10%: (a) amostra em 3D e (b) eixos



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 54 – Imagens BOR10% conforme eixos (a) XY, (b) ZX e (c) ZY

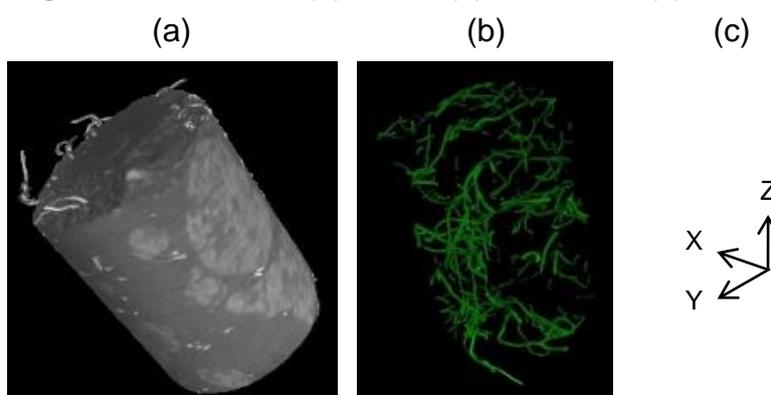


Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As Figuras 52 e 54 evidenciaram a distribuição interna do agregado reciclado de borracha, mostrando que as partículas de borracha não possuíam tamanho padrão e não estavam dispersas de forma totalmente homogênea. No entanto, não houve evidência de acúmulo acentuado de borracha reciclada na parte superior ou inferior da amostra.

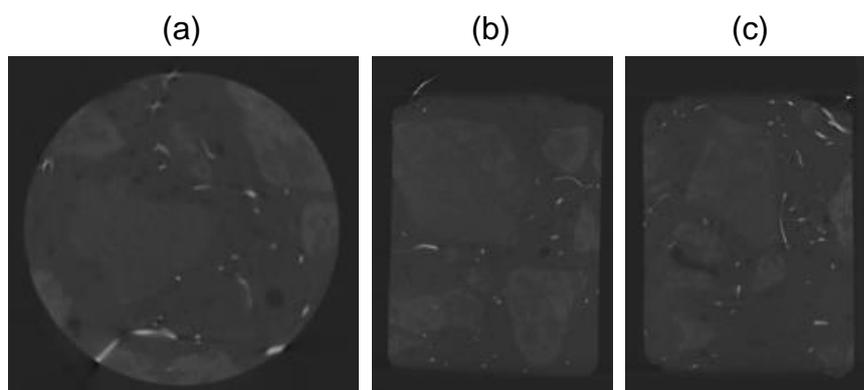
Entre as Figuras 55 a 58, observam-se imagens tridimensionais das amostras FIB0,5% e FIB1,5%, imagens 3D da dispersão das fibras metálicas em cada amostra, indicação dos eixos cartesianos e imagens bidimensionais das seções internas e centrais das amostras.

Figura 55 – Imagens de FIB0,5%: (a) eixos, (b) amostra e (c) fibras metálicas em 3D



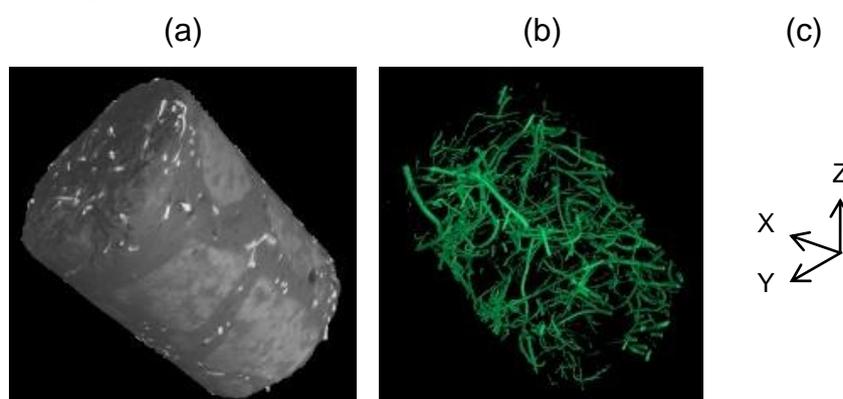
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 56 – Imagens FIB0% conforme eixos: (a) XY, (b) ZX e (c) ZY



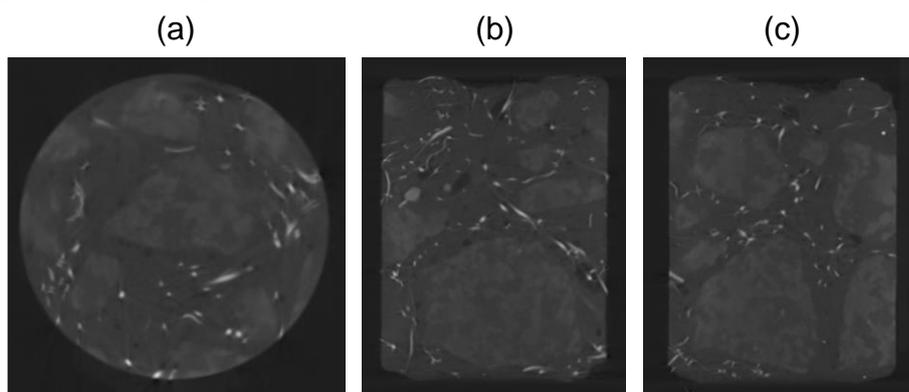
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 57 – Imagens de FIB1,5%: (a) eixos, (b) amostra e (c) fibras metálicas em 3D



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 58 – Imagens FIB1,5% conforme eixos: (a) XY, (b) ZX e (c) ZY



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As Figuras 55b e 58b mostraram a dispersão interna da fibra metálica, reforçando que as fibras não possuíam tamanho padrão e não estavam dispersas de forma totalmente homogênea. No entanto, não houve evidência de acúmulo acentuado de fibra metálicas na parte superior ou inferior da amostra. Para FIB1,5%,

já foram descritos, em 5.2.1, a dificuldade de moldagem e os grumos de fibras formados no concreto fresco.

Cabe recordar que as amostras para o tomógrafo são muito pequenas, mas foram extraídas de placas com maiores dimensões justamente para tentar reproduzir a dispersão mais próxima de uma peça maior.

6.2 COMPORTAMENTO DO CONCRETO SUBMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS

6.2.1 Reação ao fogo

6.2.1.1 Ensaio de incombustibilidade

Os resultados do ensaio de incombustibilidade para o concreto referência são apresentados na Tabela 68.

Tabela 68 – Ensaio de incombustibilidade: REF

Amostra	Variação de temperatura (°C)			Perda de massa (%)	Tempo de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
1	10,0	64,0	11,0	3,92	0,0
2	4,5	80,5	17,5	3,36	0,0
3	5,1	85,9	10,9	3,46	0,0
4	7,4	76,6	4,6	3,22	0,0
5	10,3	78,7	15,7	3,76	0,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Segundo as indicações da NBR 16626 (ABNT, 2017a), o concreto referência é classificado como incombustível já que não foi constatada perda de massa superior a 50%, nem variação na temperatura do forno maior que 30°C e nem chamejamento com duração superior a 10 segundos.

Os resultados do ensaio de incombustibilidade para os concretos com a utilização de borracha são descritos nas Tabelas 69 e 70.

Tabela 69 – Ensaio de incombustibilidade: BOR5%

Amostra	Variação de temperatura (°C)			Perda de massa (%)	Tempo de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
1	17,2	132,8	550,2	4,31	36,5
2	6,2	82,8	12,8	4,88	45,3
3	6,4	112,6	32,6	4,40	33,9
4	7,7	82,3	24,3	4,88	53,4
5	8,9	81,1	19,1	4,99	41,8

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 70 – Ensaio de incombustibilidade: BOR10%

Amostra	Variação de temperatura (°C)			Perda de massa (%)	Tempo de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
1	15,2	78,8	21,8	6,00	162,9
2	33,0	118,0	61,0	4,59	49,9
3	8,0	120,0	38,0	4,37	58,7
4	13,5	129,5	29,5	4,06	67,1
5	10,0	128,0	27,0	4,79	89,6

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os traços BOR5% e BOR10% foram classificados como combustíveis devido à ocorrência de chamejamento, conforme indicado na Figura 59. Não foi constatada perda de massa superior a 50% nem variação na temperatura do forno maior que 30°C, exceto na amostra 2 de BOR10%. Conforme a NBR 16626 (ABNT, 2017a) pondera, a presença de componentes externos combustíveis podem comprometer a característica de incombustibilidade.

Figura 59 – Evidência de chamejamento: BOR10%



Fonte: Acervo da autora (2020).

Os concretos com a inserção de fibra metálica, apresentados nas Tabelas 71 e 72, também foram classificados como combustíveis devido à ocorrência de chamejamento. Não foi constatada perda de massa superior a 50% nem variação na temperatura do forno maior que 30°C.

Tabela 71 – Ensaio de incombustibilidade: FIB0,5%

Amostra	Variação de temperatura (°C)			Perda de massa (%)	Tempo de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
1	7,3	72,7	14,7	2,63	1,8
2	8,8	85,2	25,2	2,68	0,0
3	4,2	76,8	17,8	2,50	30,3
4	7,7	80,3	9,3	2,40	34,7
5	8,1	85,9	5,9	2,56	0,9

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 72 – Ensaio de incombustibilidade: FIB1,5%

Amostra	Variação de temperatura (°C)			Perda de massa (%)	Tempo de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
1	12,5	102,5	33,5	2,58	0,0
2	6,6	82,4	13,4	2,12	0,9
3	8,3	86,7	12,7	2,15	89,4
4	8,8	92,2	14,2	2,09	28,6
5	7,0	82,0	11,0	2,17	0,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Tabela 73 apresenta os resultados médios das cinco amostras do ensaio de incombustibilidade para cada um dos concretos testados em relação às variações de temperatura, perda de massa e tempo de ignição.

Tabela 73 – Resultados médios do ensaio de incombustibilidade

Amostra	Variação média de temperatura (°C)			Perda média de massa (%)	Tempo média de ignição (s)
	Forno	Centro da amostra	Superfície da amostra		
REF	7,5	77,1	11,9	3,55	0,00
BOR5%	9,3	98,3	22,2	4,69	42,18
BOR10%	15,9	114,9	35,5	4,76	85,64
FIB0,5%	7,2	80,2	14,6	2,55	16,93
FIB1,5%	8,6	89,2	17,0	2,22	39,63

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As amostras BOR5% e BOR10% apresentam chamejamento durante tempo superior a 10 segundos em todas as amostras de concreto com borracha reciclada, independentemente do teor de substituição deste material. O traço BOR10% apresentou variação média da temperatura do forno e tempo médio de ignição superior em comparação à BOR5%. Esses resultados estão relacionados e coerentes de modo que, ao aumentar a quantidade de borracha reciclada nas amostras, também aumentou a liberação de calor durante a ignição.

A temperatura de ensaio de incombustibilidade é de 750 °C, sendo que o principal pico de degradação da borracha ocorre em 381,09 °C, conforme analisado em 5.1.7 por meio da análise térmica da borracha reciclada. Desta forma, o tempo de chamejamento pode ser explicado pela ignição da borracha e pela permanência da chama até a combustão completa de sua estrutura. Esse fenômeno incide no aumento da temperatura média da superfície e do centro da amostra em BOR5% e BOR10% em relação às demais misturas.

Ao realizar ensaio de taxas de liberação de calor e de fumaça visível, de acordo com a ASTM E 1354 (ASTM, 2017), em concretos com substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha em percentuais de 5, 10 e 15%, Correia *et al.* (2012) também evidenciaram a ignição na maior parte das amostras testadas.

A evidência de chamejamento em FIB0,5% e FIB1,5% ocorreu com tempo superior a 10 segundos em parte das amostras, sendo observado apenas no entorno na fibra de modo que, após a combustão da superfície, a chama extinguiu-se e a fibra permaneceu intacta. Os registros médios de tempo de ignição para os concretos com fibra metálica reciclada são inferiores aos dos concretos com ARB.

O chamejamento registrado pode ser atribuído à presença de materiais combustíveis na superfície da fibra, como tecido de *nylon* ou resina remanescente, já que as fibras de aço utilizadas são provenientes de reciclagem. A análise térmica da fibra metálica reciclada em 5.1.7 corrobora essa percepção.

A perda de massa média em amostras de concreto com ARB foi superior à perda de massa média em amostras de concreto com fibra metálica reciclada. Esse comportamento é atribuído ao fato de que o agregado reciclado de borracha que está na superfície das amostras se degrada completamente ao ser exposto a 750 °C, temperatura do ensaio.

Durante o ensaio de incombustibilidade, a variação da temperatura do forno ocorre pelo mecanismo de transferência de calor, no qual, após a inclusão de um

material com temperatura ambiente em um forno a 750°C, ocorrem os mecanismos de radiação e de convecção com maior rapidez. A capacidade do material de absorver calor influencia no tempo para que este mecanismo seja concluído, ou seja, à medida que a temperatura do material se aproxima da constância, a transferência de calor ocorre com menor intensidade até que todos os corpos atinjam a mesma temperatura.

Para o ensaio em questão, essa alteração da temperatura é calculada pela variação da temperatura máxima do forno, observada geralmente nos minutos iniciais de ensaio, subtraída pela temperatura final do forno. Portanto, como nos ensaios foram observadas variações menores do que 30 °C, todos os corpos de prova se apresentaram próximos da constância de temperatura e, com isso, o material não influenciaria significativamente, em relação a esse parâmetro, no aumento das proporções de um incêndio.

A Figura 60 apresenta um exemplo de amostra antes e depois do ensaio de incombustibilidade. De forma geral, as amostras não apresentam avarias significativas em sua superfície, nem bolhas ou perda de partículas. Apresentaram diferença na tonalidade de cor entre a amostra antes (cinza) e após o ensaio (cinza esbranquiçada), característica comum de concretos contendo agregados siliciosos e expostos entre 600 e 900 °C. (HAGER, 2013).

Figura 60 – Amostras BOR10% (a) antes e (b) após o ensaio
(a) (b)



Fonte: Acervo da autora (2020).

6.2.1.2 Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante

Os resultados por amostra do ensaio para determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante são apresentados nas Tabelas 74 a 76.

Tabela 74 – Propagação do ensaio de painel radiante: REF

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)			
	1	2	3	4
76	0	0	0	0
152	0	0	0	0
228	0	0	0	0
304	0	0	0	0
380	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 75 – Propagação do ensaio de painel radiante: BOR

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)							
	BOR5%				BOR10%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
76	0	0	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 76 – Propagação do ensaio de painel radiante: FIB

Propagação da chama (mm)	Tempo por amostra (s)							
	FIB0,5%				FIB1,5%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
76	0	0	0	0	0	0	0	0
152	0	0	0	0	0	0	0	0
228	0	0	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0	0	0
380	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os dados coletados mostram que não houve propagação de chama entre as linhas marcadas em cada amostra. A Tabela 77 apresenta o índice de propagação superficial de chama para os concretos ensaiados calculado de acordo com a Equação 3.

Tabela 77 – Índice de propagação superficial de chama

Amostra	Fator de propagação da chama (Pc)	Fator de evolução do calor (Q)	Índice de propagação superficial de chama (Ip)	Classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas
REF	1	0	0	d ₀
BOR5%	1	0	0	d ₀
BOR10%	1	0	0	d ₀
FIB0,5%	1	0,23	0,23	d ₀
FIB1,5%	1	0	0	d ₀

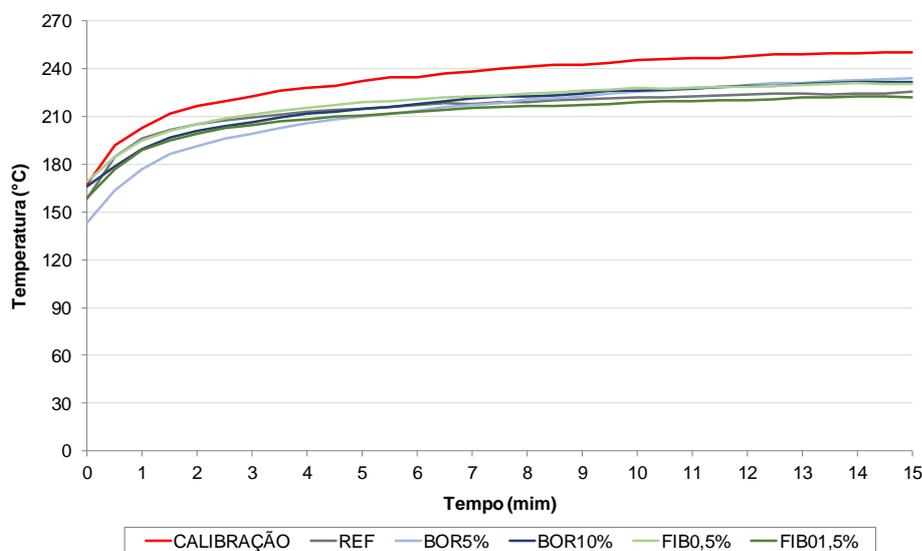
Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao analisar a Tabela 77, observa-se que o fator de propagação de chama (Pc) é igual a 1 para todas as amostras, uma vez que o tempo de propagação da chama também é nulo, conforme apresentado entre as Tabelas 74 a 76. Ao aplicar a Equação 4, como os tempos decorridos são nulos, o valor resultante é igual a 1.

O fator de evolução do calor é baseado na variação de temperatura durante o ensaio, principalmente entre a máxima diferença entre a curva temperatura *versus* tempo do corpo de prova e da amostra padrão utilizada na calibração, conforme descrito na Equação 5. Os valores das temperaturas das amostras ensaiadas se situaram abaixo da curva do ensaio de calibração, não ocorrendo diferença de temperatura significativa durante o procedimento. Desta forma, o fator de evolução de temperatura apresenta valor nulo.

A única exceção acerca do fator de evolução do calor foi para a amostra FIB0,5%, que apresentou cerca de 1,7 °C acima da curva de calibração nos primeiros 30 segundos de ensaio. Essa diferença não é significativa para evidenciar potencial negativo do material na reação ao fogo. O Gráfico 25 apresenta as curvas de temperatura média durante o tempo de ensaio para a calibração e para cada amostra.

Gráfico 25 – Curvas de temperatura média ao longo do ensaio para a calibração e para as amostras



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Por fim, obtêm-se, para os índices de propagação superficial de chama, valores nulos ou próximos de zero, indicando que os concretos ensaiados não contribuem para a propagação de chama na superfície desses materiais. Para o concreto convencional, esse resultado já era esperado. Para os concretos com uso de agregado reciclado de borracha ou de fibra de aço reciclada, esse resultado é positivo, mesmo que tenham sido classificados como combustíveis em 6.2.1.1.

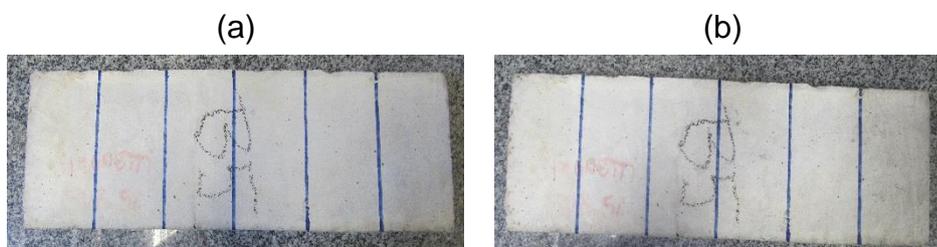
Quanto à classificação do ensaio de índice de propagação superficial de chama, conforme exposto no Quadro 26, todos os materiais são classificados como classe A. Nota-se que os índices de propagação obtidos estão muito abaixo do limite da classe A, que é igual a 25.

Durante a execução do ensaio, não foram verificados: a ignição dos exemplares da amostra, chama transitória, liberação de resíduos provenientes da queima ou exalação de fumaça ou gases. Os exemplares não apresentaram a formação de bolhas. Assim, de acordo com a classificação da capacidade de gotejar ou desprender partículas em chamas descrita no Quadro 27, conforme a NBR 16626 (ABNT, 2017a), a classe dos concretos ensaiados é d_0 .

A Figura 61 apresenta um exemplo de amostra antes e depois do ensaio de determinação do índice de propagação superficial de chama. De forma geral, as amostras não apresentam avarias significativas em sua superfície, nem bolhas, nem

perda de partículas ou perda de massa. Apresentam coloração levemente escurecida em uma das extremidades, local que esteve em contato com a chama piloto.

Figura 61 – Amostras BOR5%: (a) antes e (b) após o ensaio



Fonte: Acervo da autora (2020).

6.2.1.3 Ensaio de densidade óptica específica de fumaça

Os resultados do ensaio de densidade óptica específica de fumaça por amostra para os concretos ensaiados são apresentados na Tabela 78. Para cada amostra ensaiada, foi apresentado o valor máximo de densidade de fumaça, bem como a média para cada grupo de amostras. O resultado REF – amostra 4 e FIB0,5% – amostra 3 foram desconsiderados por causa de problema na aquisição dos dados durante a realização do ensaio.

Tabela 78 – Densidade óptica específica de fumaça: resultados por amostra

Amostra	D_s – sem chama				D_s – com chama			
	1	2	3	Média	4	5	6	Média
REF	5,17	5,32	5,81	5,43	-	6,85	6,50	6,67
BOR5%	6,33	5,88	5,70	5,97	8,78	8,82	8,70	8,77
BOR10%	2,79	2,99	2,30	2,69	4,52	6,64	9,15	6,77
FIB0,5%	1,66	1,95	-	1,80	0,93	0,75	0,50	0,73
FIB1,5%	2,29	2,67	2,97	2,65	5,50	3,84	3,67	4,34

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Os resultados globais referentes à densidade óptica específica máxima de fumaça para cada tipo de concreto ensaiado estão dispostos na Tabela 79, bem como tempo para atingir D_m e em qual situação de ensaio se obteve o valor máximo. Durante a execução dos ensaios, não houve a incidência de fumaça ou desprendimento de partículas nas amostras ensaiadas, e a transmitância do feixe de luz se manteve sempre alta.

Tabela 79 – Densidade óptica específica máxima de fumaça: resultados globais

Amostra	Densidade óptica específica máxima (D_m)	Tempo para atingir D_m	Situação de ensaio
REF	6,85	20 minutos	com chama
BOR5%	8,82	20 minutos	com chama
BOR10%	9,15	20 minutos	com chama
FIB0,5%	1,95	20 minutos	sem chama
FIB1,5%	5,50	20 minutos	com chama

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao analisar a Tabela 79, observa-se que os valores de densidade óptica específica de fumaça obtidos são considerados baixos, principalmente quando comparados ao $D_{m\text{ corr}}$ igual a 450 utilizado como balizador pela NBR 16626 (ABNT, 2017a) na classificação de produtos de construção quanto à reação ao fogo.

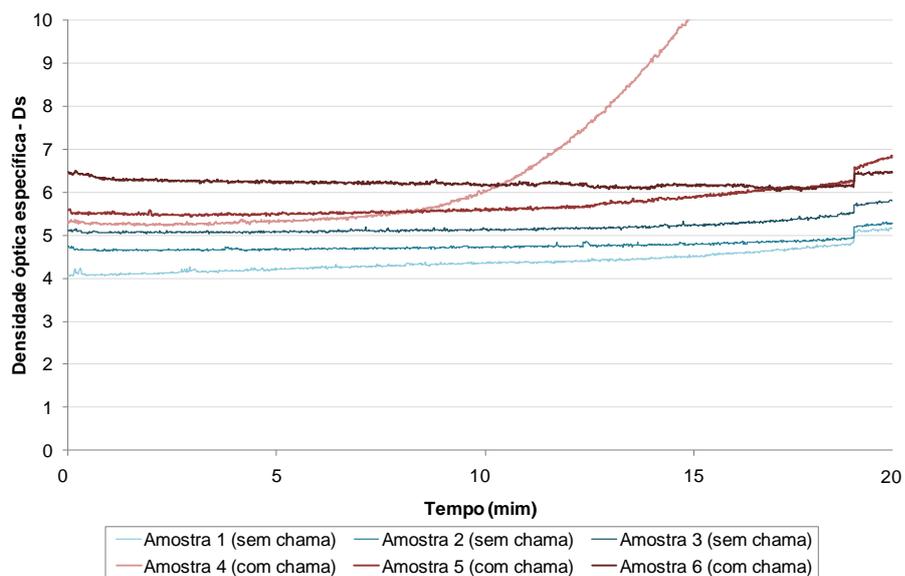
Antes da implementação da NBR 16626 (ABNT, 2017a), Mitidieri e Loshimoto (1998) propuseram uma classificação de materiais e componentes construtivos em relação à reação ao fogo em que a densidade óptica específica máxima limitada ao valor de 300 seria atribuída a um material aprovado e com bom desempenho, reforçando a magnitude baixa dos resultados de D_m obtidos nesta pesquisa.

Uma ressalva a ser feita é em relação à temperatura desse ensaio, em que as amostras foram expostas a uma fonte de calor de 93 ± 3 °C e uma pequena chama pontual de um queimador padrão. Sabe-se que, nessa temperatura, nem o concreto nem o agregado reciclado de borracha e nem a fibra metálica reciclada sofrem alterações significativas, conforme já exposto em 3.1.2 e 5.1.7.

Como não houve a ocorrência de fumaça, foram reportados os valores de densidade óptica específica máxima de fumaça (D_m) sem a correção ($D_{m\text{ corr}}$), pois são os resultados mais consistentes, já que não houve incidência de fumaça na câmara para que seja feita a correção durante a exaustão. A norma ASTM E 662 (ASTM, 2018) permite a adoção de D_m como resultado principal quando são mais consistentes que os dados corrigidos ($D_{m\text{ corr}}$).

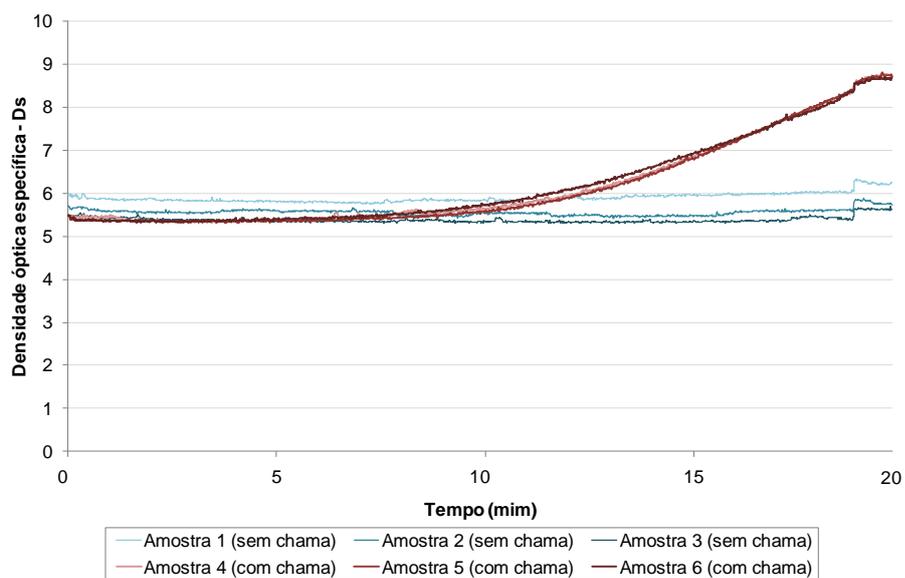
Entre os Gráficos 26 e 29, mostra-se a curva de desempenho de densidade óptica específica de fumaça (D_s) ao longo do tempo para cada amostra. Cabe ressaltar que a amostra 4 de REF foi descartada devido a um comportamento anômalo e discrepante entre as demais amostras, por provável falha na aquisição dos dados durante a realização do ensaio (Gráfico 26).

Gráfico 26 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: REF



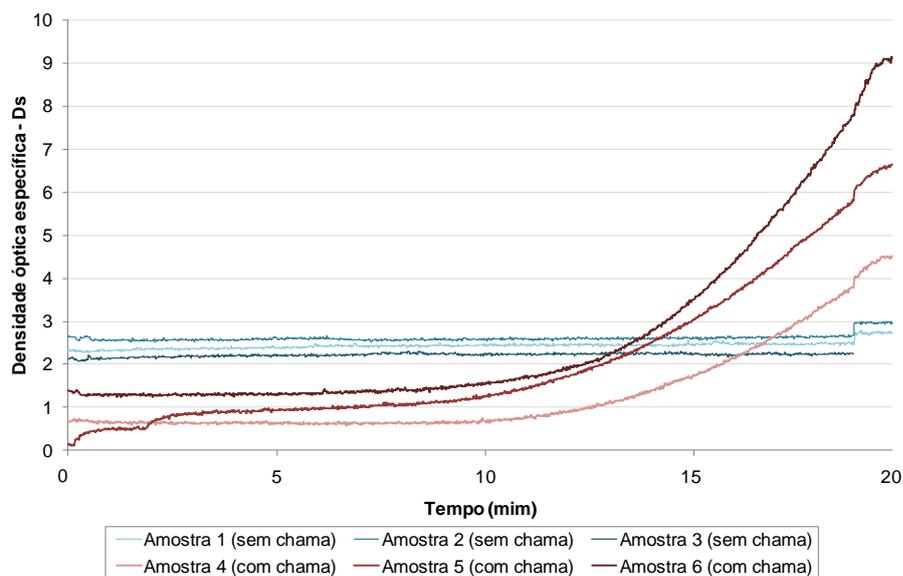
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 27 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: BOR5%



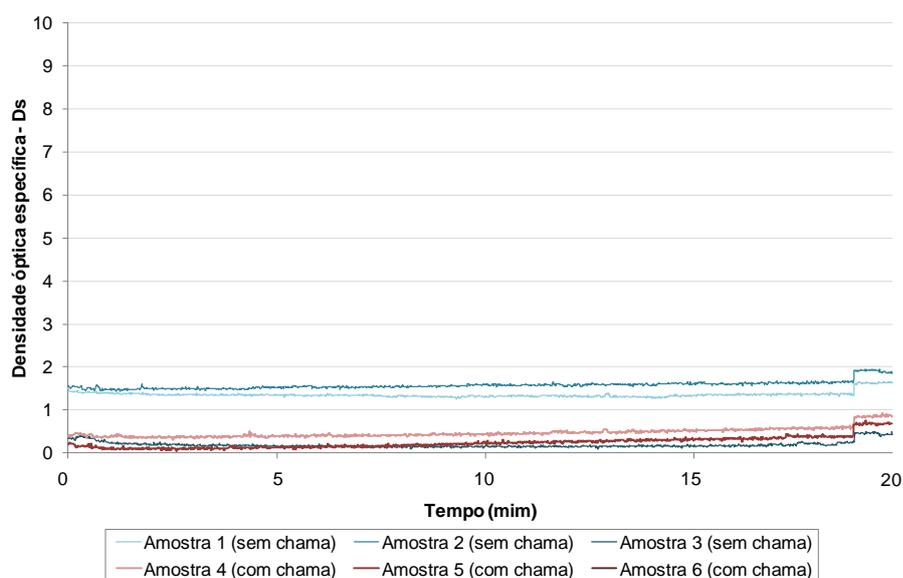
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 28 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: BOR10%



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

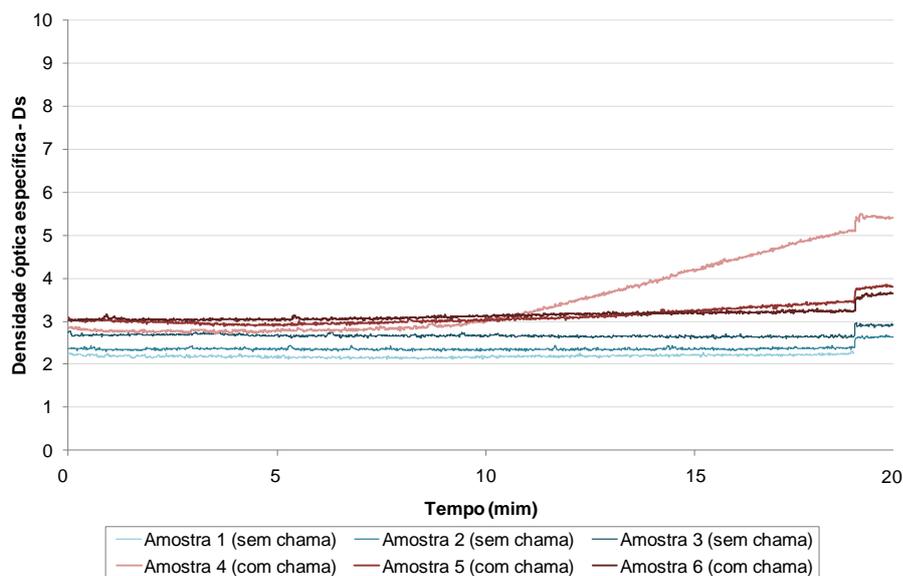
Gráfico 29 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: FIB0,5%



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Salienta-se que a amostra 3 de FIB0,5% foi descartada devido a um comportamento anômalo e discrepante entre as demais amostras do ensaio com chama (Gráfico 29), por provável falha na aquisição dos dados durante a realização do ensaio. O concreto FIB0,5% foi o único elemento em que as amostras com chama produziram menores valores de D_s em relação às amostras sem chama. O Gráfico 30 apresenta a curva de desempenho de densidade óptica específica de fumaça (D_s) ao longo do tempo para amostra FIB1,5%.

Gráfico 30 – Densidade óptica específica de fumaça ao longo do tempo: FIB1,5%



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

As amostras BOR5% e BOR10% submetidas à combustão com chama apresentam curva acentuada em relação às amostras sem submissão de chama. Esse comportamento pode ser explicado pela combustão parcial de partículas de borracha na superfície dos corpos de prova. Esse desempenho não foi observado nos demais concretos testados (REF, FIB0,5% e FIB1,5%), os quais apresentaram comportamento de D_s praticamente constantes em relação ao tempo. A Tabela 80 corrobora as curvas graficadas mostrando em 0, 5, 10, 15 e 20 minutos os valores médios de D_s .

Tabela 80 – Densidade óptica específica média de fumaça em tempos determinados

Amostra	Tempo (minutos)									
	D _s - sem chama					D _s - com chama				
	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20
REF	4,64	4,66	4,73	4,84	5,41	6,02	5,87	5,90	6,03	6,63
BOR5%	5,72	5,58	5,57	5,59	5,87	5,47	5,39	5,63	6,84	8,71
BOR10%	2,36	2,39	2,42	2,46	2,63	0,74	0,95	1,15	2,67	6,75
FIB0,5%	1,13	1,00	1,01	1,03	1,31	0,26	0,22	0,30	0,39	0,53
FIB1,5%	2,45	2,39	2,40	2,40	2,60	2,99	2,92	3,04	3,54	4,29

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

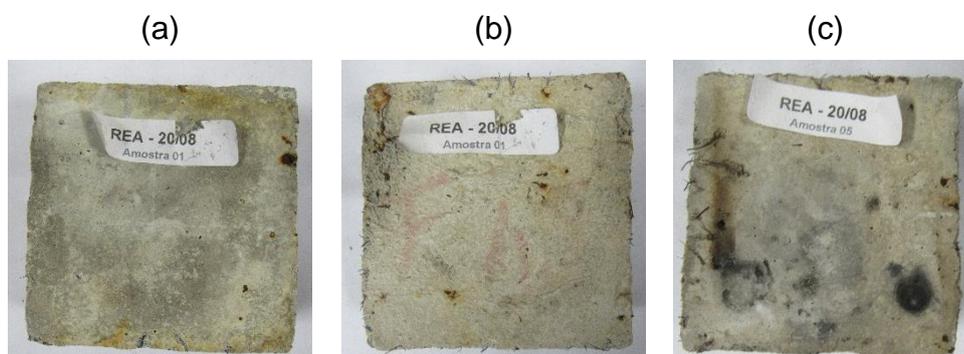
O conceito de densidade óptica específica está atrelado a dois parâmetros que são: estimar o potencial de produção da fumaça de determinado material e estimar a densidade fotométrica quando a fumaça se expande em diferentes salas ou partes do

edifício. A indicação subjetiva de densidade de fumaça é relacionada com a distância que uma pessoa pode enxergar através desta fumaça e essa é a principal característica para definir o risco de uma dada quantidade de fumaça. (SEITO, 2008).

Dessa forma, aliando as ponderações descritas por Seito (2008) aos baixos valores obtidos de densidade óptica específica máxima de fumaça, a alta transmitância registrada e a não geração de fumaça durante a execução dos ensaios, observou-se que os concretos testados não contribuem com a produção de fumaça e a diminuição da visibilidade em caso de incêndio quando analisados isoladamente.

A Figura 62 apresenta um exemplo de amostra antes e depois do ensaio de densidade óptica específica. De forma geral, as amostras não apresentam avarias significativas em sua superfície, nem bolhas, nem perda de partículas ou perda de massa. As amostras que foram submetidas à combustão com chama apresentam coloração levemente escurecida em uma das extremidades, local que esteve em contato com a chama piloto.

Figura 62 – Amostras FIB1,5%: (a) antes, (b) após o ensaio sem chama (c) e após ensaio com chama



Fonte: Acervo da autora (2020).

6.2.1.4 Classificação dos compósitos em relação à reação ao fogo

O Quadro 31 apresenta o resumo dos resultados de reação ao fogo de cada tipo de material ensaiado, bem como a classificação final conforme a NBR 16626 (ABNT, 2017a).

Quadro 31 – Classificação quanto à reação ao fogo dos concretos ensaiados

Amostra	Método de ensaio			Classificação conforme a NBR 16626 (ABNT, 2017a)
	ISO 1182 (ISO, 2010)	NBR 9442 (ABNT, 1988a)	ASTM E 662 (ASTM, 2018)	
REF	incombustível	classe A $I_p = 0$	$D_m = 6,85$	I incombustível
BOR5%	combustível	classe A $I_p = 0$	$D_m = 8,82$	II-A combustível $I_p \leq 25$ $D_m \leq 450$
BOR10%	combustível	classe A $I_p = 0$	$D_m = 9,15$	
FIB0,5%	combustível	classe A $I_p = 0,23$	$D_m = 1,95$	
FIB1,5%	combustível	classe A $I_p = 0$	$D_m = 5,50$	

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Legenda: (I_p) índice de propagação superficial de chama; (D_m) densidade óptica específica máxima.

O concreto referência obteve a classificação I, pois é incombustível, possui índice nulo de propagação de chamas e não evidencia a produção de fumaça. Esse resultado era esperado e está em concordância com o descrito por outros pesquisadores. (COSTA; BRITZ, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Já os concretos com a utilização de resíduos foram designados para a classe II-A por serem considerados combustíveis, mas com índice nulo de propagação de chamas e sem evidência de produção de fumaça.

De acordo com Instrução Técnica Nº 10 (CBPMSP, 2018b), em consonância com a legislação aplicada pelo Corpo de Bombeiros do Rio Grande do Sul, o controle de materiais de acabamento e de revestimento deve ser exigido em razão da ocupação da edificação e em função da posição dos materiais. O Quadro 32 estabelece de forma simplificada as classes permitidas de materiais em função do tipo de ocupação de uma edificação.

Quadro 32 – Classe dos materiais a serem utilizados considerando o grupo/divisão da ocupação/uso em função da finalidade do material

Grupo ou divisão	Classe conforme a finalidade do material para acabamento e revestimento		
	Parede e divisória	Teto e forro	Fachada
Habitação coletiva e condomínios residenciais	I II-A III-A IV-A	I II-A III-A	I a II-B

Grupo ou divisão	Classe conforme a finalidade do material para acabamento e revestimento		
	Parede e divisória	Teto e forro	Fachada
Serviço de hospedagem, profissional, educacional, automotivo, de saúde, indústria, depósito, comércio com baixa carga de incêndio e alguns locais de reunião de público.	I II-A III-A	I II-A	I a II-B
Comércio com média e alta carga de incêndio, <i>shoppings centers</i> , eventos temporários, indústria, depósito, comércio de explosivos e central de comunicação e energia.	I II-A	I II-A	I a II-B

Fonte: Adaptado do Anexo B da Instrução Técnica Nº 10 (CBPMSP, 2018b) e do Anexo A da Norma Técnica Nº 1 (CBPMSP, 2014).

No Quadro 32, observa-se que o concreto referência – classe I e os concretos com a inserção de resíduos de pneu inservível – classe II-A estariam aptos a serem utilizados em qualquer grupo ou divisão de edificação, salvo notas específicas da legislação mencionada. A classificação dos concretos com a inserção de resíduos de pneus inservíveis como materiais combustíveis não exclui a possibilidade de serem utilizados na construção civil.

Segundo Mitidieri e Loshimoto (1998), o controle das características de reação ao fogo dos materiais incorporados aos elementos construtivos no processo produtivo do edifício está associado à limitação do crescimento do incêndio, à limitação da propagação do incêndio, à evacuação segura do edifício e à preocupação contra a propagação do incêndio entre edifícios.

A reação ao fogo dos materiais empregados em uma edificação, interna e exteriormente, é um fator condicionante na velocidade com que um foco de incêndio pode evoluir do ambiente de origem do incêndio para os outros segmentos da edificação, e no tempo de abandono seguro da população antes que o incêndio atinja a fase generalizada. (COUTINHO; CORRÊA, 2016).

A substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha e a inserção de fibras metálicas recicladas de pneus inservíveis, quando inseridos em concreto, não incidem em propagação de chama e em produção fumaça quando esses concretos são submetidos a ensaios de reação ao fogo. Conforme descrito por pesquisadores da área (COUTINHO; CORRÊA, 2016; MITIDIERI; LOSHIMOTO,

1998), essas são características desejáveis de um material da construção civil exposto a altas temperaturas.

6.2.2 Resistência ao fogo

6.2.2.1 Aspectos gerais

A Tabela 81 apresenta as datas, idades e condições climáticas durante os ensaios. Devido à complexidade da preparação para o ensaio, não foi possível ensaiar as amostras com a mesma idade, mesmo assim as idades de ensaio são muito próximas e a diferença pode ser tida como irrelevante levando em conta o número de dias de cura.

Tabela 81 – Condições climáticas durante os ensaios de resistência ao fogo

Traço	Data	Idade da amostra (dias)	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)
REF	26/08/2019	112	18,1	65,9
BOR5%	27/08/2019	112	23,3	60,9
BOR10%	29/08/2019	113	27,8	56,8
FIB0,5%	03/09/2019	117	20,1	52,8
FIB1,5%	06/09/2019	119	19,1	66,7

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

As anotações de ocorrências transcorridas durante cada um dos ensaios são descritas nos Quadros 33, 34 e 35.

Quadro 33 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: REF

Tempo (min)	Ocorrência
0	Início do programa térmico
8	Presença de fumaça na parte inferior
9	Umidade sendo expelida na parte inferior
11	Umidade sendo expelida nas duas placas
15	Muita umidade em ambas as placas
19	Presença de fumaça no lado direito Fissura no centro da placa inferior
21	Acúmulo de água no piso em frente às placas
57	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
58	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
64	Superfície das placas em processo de secagem
117	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos

Tempo (min)	Ocorrência
118	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
177	Estalo na amostra
177	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
178	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
179	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
197	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
237	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
238	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
240	Fim do programa térmico

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 34 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: BOR5% e BOR10%

BOR5%		BOR10%	
Tempo (min)	Ocorrência	Tempo (min)	Ocorrência
0	Início do programa térmico	0	Início do programa térmico
8	Presença de umidade na placa inferior	6	Estalo na amostra Presença de muita fumaça escura ao redor do forno
8	Fissura na placa inferior	7	Deslocamento interno Sequência de estalos na amostra
9	Estalo na amostra	8	Ocorrência de vários estalos na amostra
10	Presença de umidade na placa superior Forte odor de borracha queimada	9	Grande quantidade de fumaça ocasionado pela queima da borracha
12	Estalo na amostra	12	Perda de água da amostra Ocorrência de vários estalos na amostra
14	Presença de fumaça escura entre as placas	14	Presença de água na superfície da amostra
18	Termopar 8 se desprende	18	Estalo forte na amostra
19	Múltiplas fissuras em ambas as placas	21	Deslocamento do bloco interno
22	Termopar 12 se desprende	23	Estalo forte na amostra Estouro na estrutura
23	Muita umidade em ambas as placas	32	Estalo forte na amostra
34	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	42	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
37	Odor de borracha queimada se intensifica	57	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
50	Superfície das placas em processo de secagem	59	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
57	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	60	Superfície das placas em processo de secagem

BOR5%		BOR10%	
Tempo (min)	Ocorrência	Tempo (min)	Ocorrência
58	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	86	Termopares 6, 7 e 9 se desprenderam
117	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	103	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
118	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	104	Sequência de estalos na amostra
120	Presença de muita fumaça escura ao redor do forno	117	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
177	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	118	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
178	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	179	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
237	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	180	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
238	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	200	Realização de teste de estanqueidade, com inflamação no algodão
240	Fim do programa térmico	200	Fim do programa térmico

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 35 – Desenvolvimento do ensaio de resistência ao fogo: FIB0,5% e FIB1,5%

FIB0,5%		FIB1,5%	
Tempo (min)	Ocorrência	Tempo (min)	Ocorrência
0	Início do programa térmico	0	Início do programa térmico
10	Presença de umidade Fissura na placa inferior	12	Presença de umidade na placa inferior
14	Estalo na amostra	16	Presença de fissura na amostra Presença de umidade na amostra
19	Estalo na amostra	20	Presença de fumaça na amostra
20	Presença de fumaça na placa inferior	30	Acúmulo de água no piso em frente às placas
35	Estalo na amostra Acúmulo de água no piso em frente às placas	56	Superfície das placas em processo de secagem
57	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	57	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
57	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	58	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
117	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	85	Superfície das placas quase seca
118	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	117	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos

FIB0,5%		FIB1,5%	
Tempo (min)	Ocorrência	Tempo (min)	Ocorrência
177	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	118	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
178	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	177	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
160	Superfície das placas quase seca	178	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
229	Estalo na amostra	237	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos
237	Realização de teste de integridade estrutural, sem danos	238	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação
238	Realização de teste de estanqueidade, sem inflamação	240	Fim do programa térmico
240	Fim do programa térmico		

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O comportamento das amostras BOR5% e BOR10% durante o ensaio de resistência ao fogo não se mostrou similar às demais placas ensaiadas, demonstrando ocorrência excessiva de fumaça escura, intenso odor de borracha queimada, fortes e sucessivos estalos e deslocamento do concreto.

A Figura 63 indica as amostras REF, BOR5% e BOR10% aos 150 minutos de ensaio de resistência ao fogo para análise comparativa da quantidade de fumaça liberada. O íterim de 150 minutos foi eleito de forma aleatória para exemplificação.

Figura 63 – Amostras REF, BOR5% e BOR10% aos 150 min de ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

É visualmente possível notar que houve maior incidência de fumaça nas amostras BOR5% e BOR10% do que em REF. Ainda, é possível notar que houve maior incidência de fumaça em BOR10% do que BOR5%, correlacionado ao aumento da quantidade de agregado de borracha empregado. A mesma observação quanto à liberação de fumaça escura conforme o aumento do teor de borracha empregado também foi detectada por outros autores. (ARF; ABDULLAH; ABDULKADIR, 2017).

A Figura 64 mostra a superfície exposta ao fogo de REF, BOR5% e BOR10% após o ensaio de resistência ao fogo. Em comparação com a Figura 63, observam-se pontos de deslocamento de concreto em BOR5% e se percebe comprometimento de mais de 50% da área exposta em BOR10%, inclusive evidenciando a armadura.

Figura 64 – Superfície exposta REF, BOR5% e BOR10% após ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

Ao se compararem a área exposta ao fogo e a área deslocada, na amostra BOR5% se obteve 3% de deslocamento e na amostra BOR10% se obteve 68% de deslocamento. Essa análise comparativa foi realizada utilizando o *software* AutoCAD® da Autodesk®. Observa-se que o percentual de 10% de substituição de borracha ocasionou deslocamento 23 vezes maior que o percentual de 5%.

A Figura 65 mostra a superfície não exposta ao fogo das amostras BOR5% e BOR10% após o ensaio de resistência ao fogo. Em BOR10%, observam-se fissuras na face não exposta ao fogo, nitidamente em maior quantidade e espessura que as demais amostras ensaiadas.

Figura 65 – Superfície não exposta: REF, BOR5% e BOR10% após ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

A formação intensa de fissuras é compatível com o deslocamento observado, bem como a perda de seção das placas devido ao deslocamento. A Figura 66 ilustra a perda de seção média de 50 mm da amostra BOR10% após ensaio de resistência ao fogo, bem como apresenta uma foto ampliada da superfície da amostra com a armadura exposta.

Figura 66 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: (a) perda de seção média e (b) foto ampliada da superfície da amostra



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Figura 67 exemplifica o tamanho e a espessura média dos fragmentos de concreto retirados de dentro do forno vertical após deslocamento em BOR10% durante ensaio de resistência ao fogo.

Figura 67 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: fragmentos de concreto



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Figura 68 mostra a situação do forno após o ensaio logo depois da remoção da amostra ensaiada, repleto de pedaços de concreto desprendidos, o que não se observou nas demais amostras testadas.

Figura 68 – BOR10% após ensaio de resistência ao fogo: vista interna do forno vertical



Fonte: Acervo da autora (2020).

Os estalos fortes e sucessivos escutados e anotados no Quadro 34 são decorrentes do deslocamento da face exposta ao fogo durante o ensaio, quando os fragmentos se chocavam nas paredes do forno vertical.

A maior concentração de estalos se deu até 32 minutos de ensaio, momento em que a temperatura média interna da amostra dada pelos termopares T14 e T19 era de 116,83 °C. Essas anotações são compatíveis com as previsões de Khoury *et al.* (2007) e Ali *et al.* (2004) em 3.1.4, que também registraram deslocamento explosivo durante os primeiros 45 minutos de ensaio de resistência ao fogo.

O Quadro 34 registrou sequência de estalos aos 104 minutos, momento em que a temperatura média interna da amostra dada pelos termopares T14 e T19 era de 524,25 °C.

O deslocamento observado em BOR5% ocorreu em menor grau, e em BOR10% em grau severo e de forma explosiva. (DOHERTY *et al.*, 2012; KHOURY *et al.*, 2007). Em BOR10%, o deslocamento expôs a armadura, desagregando grandes porções de concreto além da região do cobrimento da armadura e diminuindo a sua capacidade estrutural pela redução da seção transversal. Conforme a Figura 66, houve regiões em que a redução da seção atingiu 50% da espessura inicial da placa de vedação.

Neville (2016) indica que, quando a armadura fica exposta, a ação da alta temperatura é acelerada, já que a armadura conduz calor. Esse fato pode ter intensificado o deslocamento na região onde a seção foi reduzida e a armadura ficou aparente.

Alguns autores citam o uso de fibra de polipropileno para atenuação do efeito do deslocamento, segundo discutido em 3.1.4. Kitchen (2001) explica que a 160 °C as fibras de polipropileno começam a derreter e em 360 °C as fibras se degradam. O material residual ocupa aproximadamente 5% do espaço vazio deixado pela fibra. Os gases emitidos são queimados pelo fogo ou dissipados na atmosfera, e os vazios que permanecem criam rotas que deixam o vapor de água escapar.

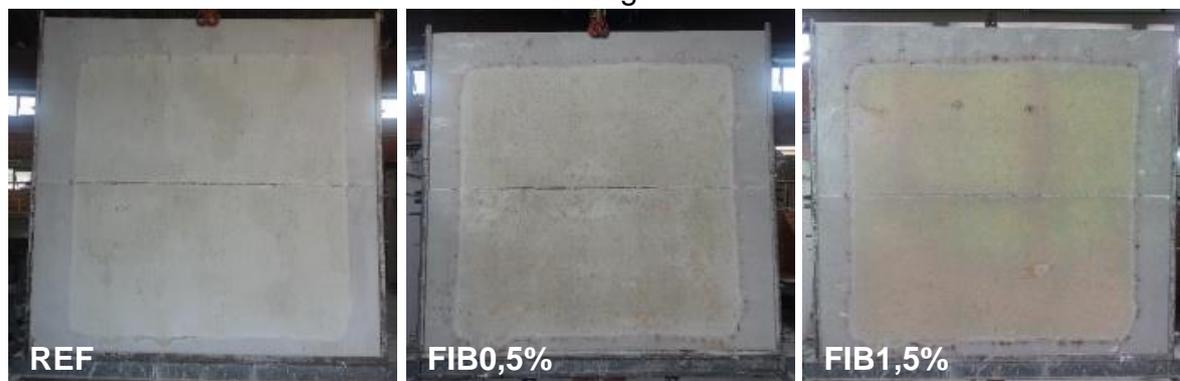
Na seção 5.1.7, foi analisado que o comportamento da degradação da borracha por meio de TGA, DTGA e DSC. O agregado de borracha reciclado, ao ser exposto em temperatura crescente, indicou um pico intenso em 381,09 °C de grande perda de massa (60,74%). Isso significa que a deterioração do material ocorre de forma brusca, saindo do estado sólido ao estado de vapor, diferentemente da degradação gradual da fibra de polipropileno.

Ainda, o material residual da borracha é cerca de 30%, sendo que o da fibra de polipropileno é de apenas 5%. A deterioração da borracha exposta à alta temperatura é exotérmica, com liberação de energia, o que contribui para o aumento de tensão interna do concreto e a microfissuração. Dessa forma, destaca-se que o comportamento benéfico da fibra de polipropileno ao concreto, em alta temperatura, não pode ser replicado pelo agregado reciclado de borracha.

O comportamento das amostras FIB0,5% e FIB1,5%, durante o ensaio de resistência ao fogo, mostrou-se muito similar ao da REF, sem a ocorrência excessiva

de fumaça, vapor ou estalos. A análise da face exposta ao fogo dessas amostras, após ensaio, não apresentou sinais de deslocamento do concreto (Figura 69).

Figura 69 – Superfície exposta REF, FIB0,5% e FIB1,5% após ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

Na Figura 69, observa-se a diferença de coloração entre a parte central das amostras, a qual foi exposta ao fogo, e o perímetro externo das placas resguardado pela beirada do forno forrado com material isolante. Conforme mencionado em 5.3.2, a abertura de exposição ao fogo do forno possui 2,5 x 2,5 m, enquanto a montagem das placas obteve dimensões totais de 3,0 x 3,15 m.

A alteração na cor do concreto quando aquecido é uma alteração física que ocorre com este material. Hager (2013) esclarece que, quando aquecido entre 300 °C e 600 °C, o concreto contendo agregados siliciosos ficará vermelho; entre 600 °C e 900 °C, ficará cinza esbranquiçado e entre 900 °C e 1.000 °C, estará presente uma cor amarela. A autora explica que a mudança de cor do concreto aquecido resulta principalmente da remoção gradual da água e da desidratação da pasta de cimento, bem como da oxidação de minerais constituintes dos agregados.

Nas placas com fibras de aço, a superfície exposta das amostras ficou marcada na região em que a fibra reciclada estava acumulada na superfície, onde grumos de fibra se formaram durante a moldagem (seção 5.2.1). A degradação de resíduos aderidos na fibra de aço unida ao fato de o material metálico ser um excelente condutor de calor elevaram localmente a temperatura nos pontos de formação de ouriços (Figura 70).

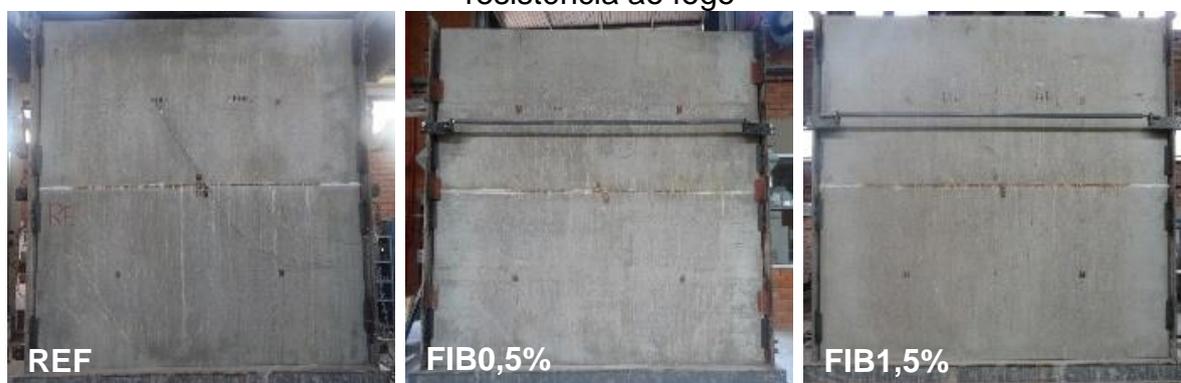
Figura 70 – Detalhe da superfície exposta FIB0,5% após ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

A análise da face não exposta ao fogo dessas amostras, após ensaio, não apresentou sinais de deslocamento do concreto ou outras avarias, conforme demonstra a Figura 71.

Figura 71 – Superfície não exposta REF, FIB0,5% e FIB1,5% após ensaio de resistência ao fogo



Fonte: Acervo da autora (2020).

Em relação ao selante corta-fogo utilizado para preenchimento da junta entre as placas, observa-se que se deteriorou de forma similar em todas as amostras, conforme representado na Figura 72. A degradação física do selante na face exposta ao fogo é maior que na face não exposta, como já era esperado, uma vez que a face da amostra voltada para a parte interna do forno está sujeita às maiores temperaturas.

Figura 72 – Detalhe do selante do REF após ensaio de resistência ao fogo: (a) na superfície não exposta e (b) exposta



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Tabela 82 apresenta a temperatura dos termopares 6 a 10, de todas as amostras, aos 120 minutos de ensaio. O termopar 8 é o instrumento de medição que estava fixado na junta, e os termopares 6, 7, 9 e 10 sobre a superfície não exposta da amostra.

Tabela 82 – Temperatura nos termopares 6 a 10 aos 120 minutos

Amostra	Temperatura em termopar (°C)				
	6	7	8	9	10
REF	162,10	142,50	162,20	147,20	168,00
BOR5%	189,90	192,00	-	161,40	183,60
BOR10%	-	-	157,00	-	173,40
FIB0,5%	206,10	213,10	213,70	181,90	194,50
FIB1,5%	141,90	152,40	181,30	131,70	145,90

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

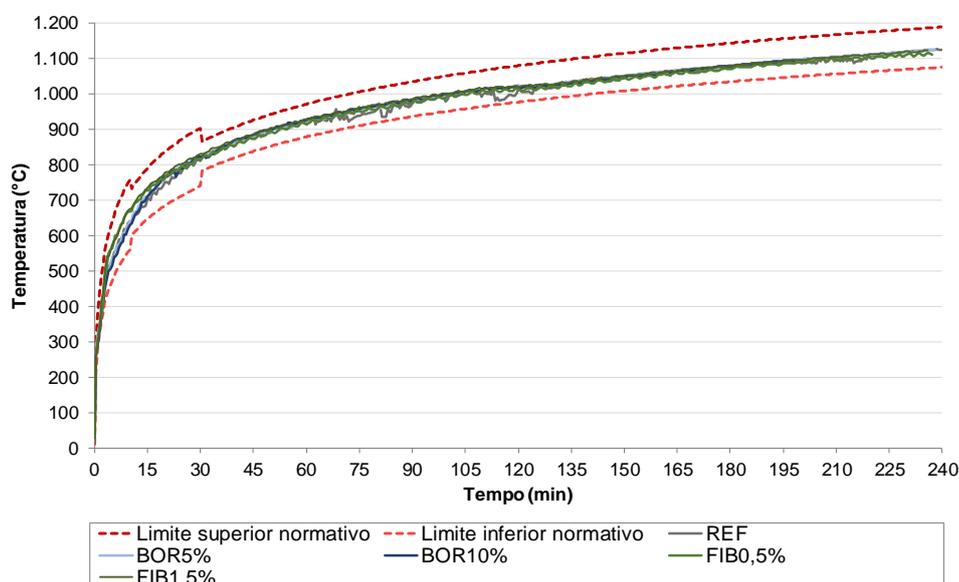
Cabe ressaltar que o termopar 8 de BOR5% se despreendeu da superfície da amostra logo no início do ensaio, aos 18 minutos. Os termopares 6, 7 e 9 de BOR10% se desprenderam da superfície da amostra aos 86 minutos de ensaio. Por isso, não há dados registrados na Tabela 82 para esses pontos de leitura.

Ao observar a Tabela 82, nota-se que as leituras do termopar 8 são compatíveis com as temperaturas apontadas pelos demais termopares da face não exposta, sem discrepâncias. Assim, verifica-se a eficácia da fibra cerâmica e do selante corta-fogo em conjunto, atuando como preenchimento da junta entre as duas placas de uma mesma amostra.

6.2.2.2 Avaliação do isolamento térmico

A temperatura interna do forno foi medida em dois pontos, TA e TB, conforme a Figura 41, sendo que os registros médios de temperatura de todas as amostras ficaram dentro do limite inferior e superior descrito pela NBR 10636 (ABNT, 1989), transcorrendo de acordo com a curva de aquecimento estabelecida na referência normativa. O Gráfico 31 exemplifica o registro de curva média de temperatura interna do forno ao longo do tempo para todas as amostras ensaiadas.

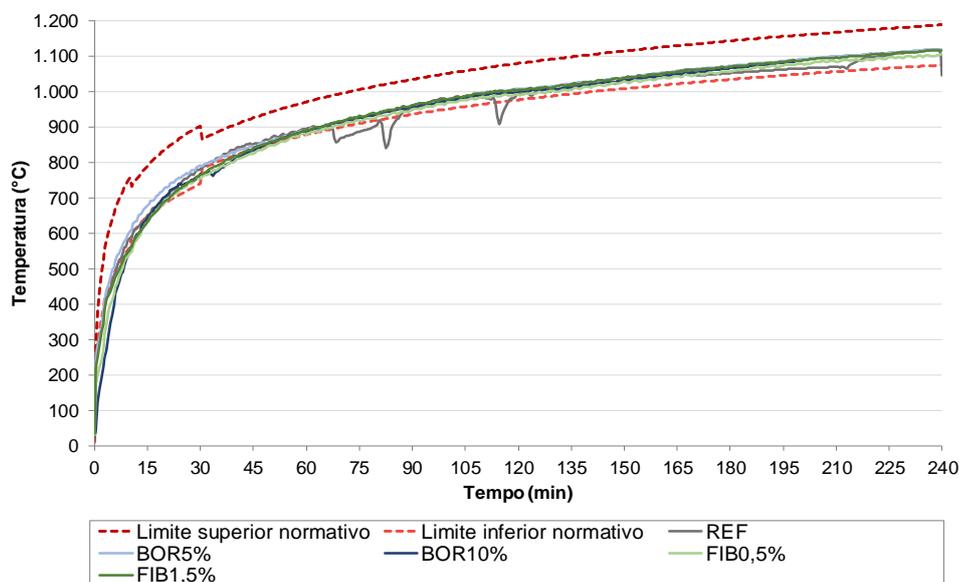
Gráfico 31 – Curva média de temperatura interna do forno para todas as amostras (TA e TB)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A temperatura interna da face exposta ao fogo foi medida em cinco pontos, T1 a T5 conforme a Figura 42, sendo que os registros médios de temperatura ao longo do tempo, de todas as amostras, podem ser observados no Gráfico 32.

Gráfico 32 – Curva média de temperatura na face exposta ao fogo para todas as amostras (T1 a T5)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Ao observar os gráficos da temperatura da face exposta ao fogo, pode-se notar que todas as amostras apresentam o desenvolvimento similar das curvas médias de temperatura interna do forno (Gráfico 32), no entanto tendendo ao limite inferior normativo. Até 30 minutos de ensaio, ocorre a maior taxa de aumento de temperatura por minuto, sendo que até o término do programa, a temperatura segue crescente, porém com uma taxa de aumento reduzida. No REF, aos 69, 83 e 115 minutos, observou-se certa variação na média de leituras ultrapassando o limite inferior normativo.

A Tabela 83 indica as leituras de temperatura de cada termopar da face exposta ao fogo ao final do ensaio. O termopar T1, durante o ensaio de BOR10%, apresentou defeito e interrompeu as leituras de temperatura a partir de 32 minutos de duração. A última coluna da tabela apresenta as médias das leituras no final do ensaio, mostrando que não há discrepâncias entre os valores atingidos por cada amostra. Apenas ressalta-se que BOR10% encerrou as leituras aos 200 minutos.

Tabela 83 – Termopares da face exposta ao fogo

(continua)

Amostra	Tempo de ensaio (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	Média (°C)
REF	240	971,8	1.097,8	1.081,9	1.066,3	1.013,7	1.046,30
BOR5%	240	1.135,6	1.105,8	1.126,9	1.102,6	1.133,0	1.120,78
BOR10%	200	-	1.063,6	1.087,9	1.070,7	1.114,0	1.084,05

Tabela 83 – Termopares da face exposta ao fogo

(conclusão)

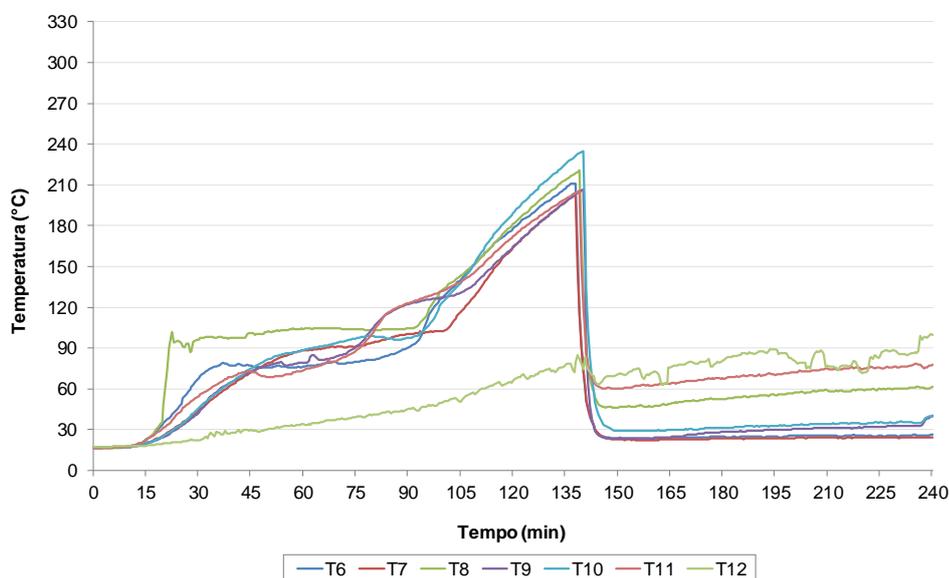
Amostra	Tempo de ensaio (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	Média (°C)
FIB0,5%	240	1.114,6	1.091,3	1.109,9	1.098,2	1.117,5	1.106,30
FIB1,5%	240	1.129,3	1.098,9	1.122,9	1.099,2	1.137,7	1.117,60

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A temperatura externa da face não exposta ao fogo foi medida em sete pontos, T6 a T12, conforme a Figura 43, sendo que os registros de temperatura de todas as amostras podem ser observados entre os Gráficos 33 e 37. Cabe ressaltar que os termopares T6 a T12 da face não exposta foram removidos da amostra em torno de 140 minutos de ensaio, após a perda de isolamento térmico, em razão da temperatura máxima que o instrumento pode registrar que é de 400 °C.

No REF (Gráfico 33), o termopar T12 apresentou falha na leitura das temperaturas, não configurando um gradiente similar a T11, talvez por fixação inadequada na superfície da amostra ou falha no sensor.

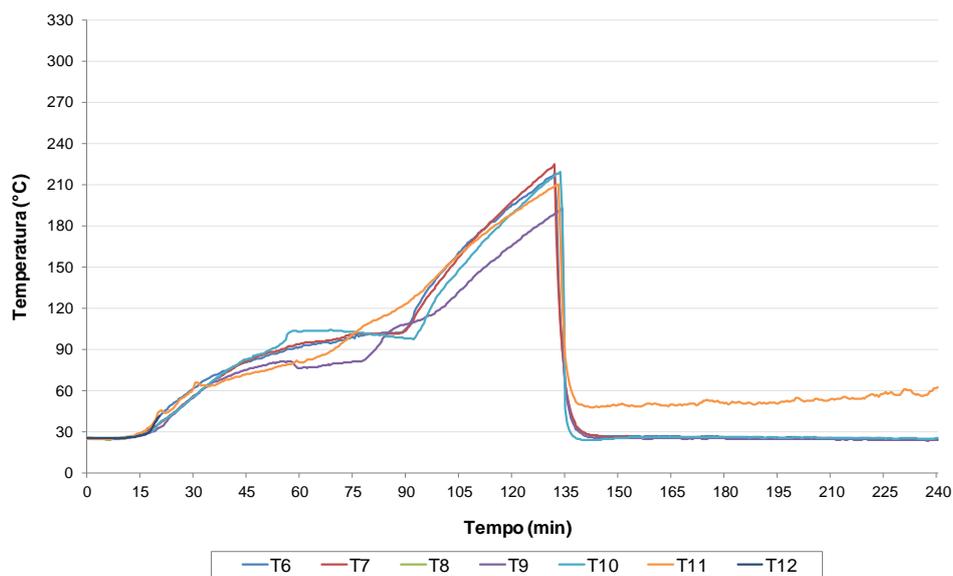
Gráfico 33 – REF: temperatura da face não exposta ao fogo



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

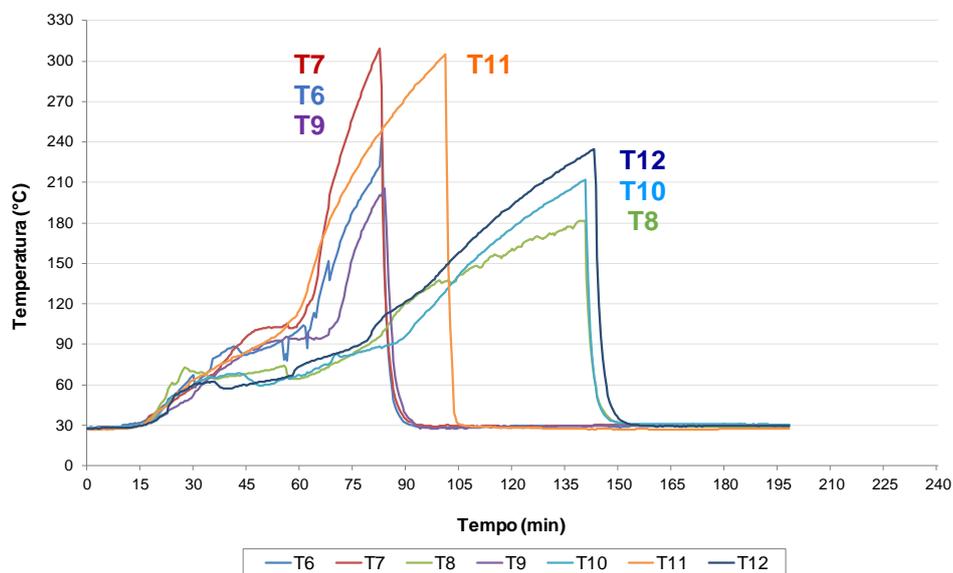
No BOR5% (Gráfico 34), o termopar T8 se desprende aos 18 minutos e o T12 aos 22 minutos, sendo que após estes instantes as leituras de temperatura não foram computadas nos gráficos.

Gráfico 34 – BOR5%: temperatura da face não exposta ao fogo



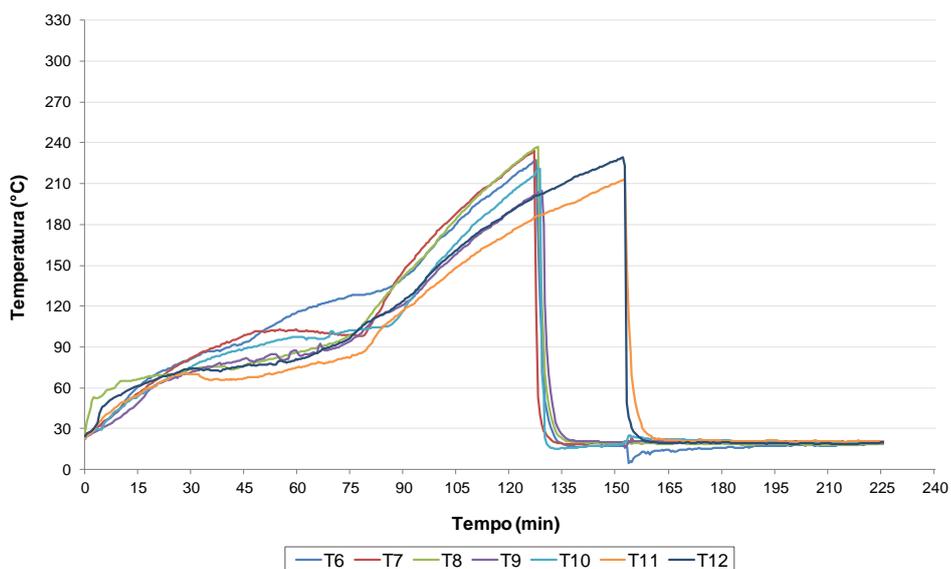
No BOR10% (Gráfico 35), os termopares T6, T7 e T9 se desprenderam aos 86 minutos, e o termopar T11, aos 102 minutos. Esses termopares estabilizaram com a temperatura ambiente após o desprendimento.

Gráfico 35 – BOR10%: temperatura da face não exposta ao fogo



No FIB0,5% (Gráfico 36), apenas T11 e T12 apresentaram picos posteriores aos demais termopares.

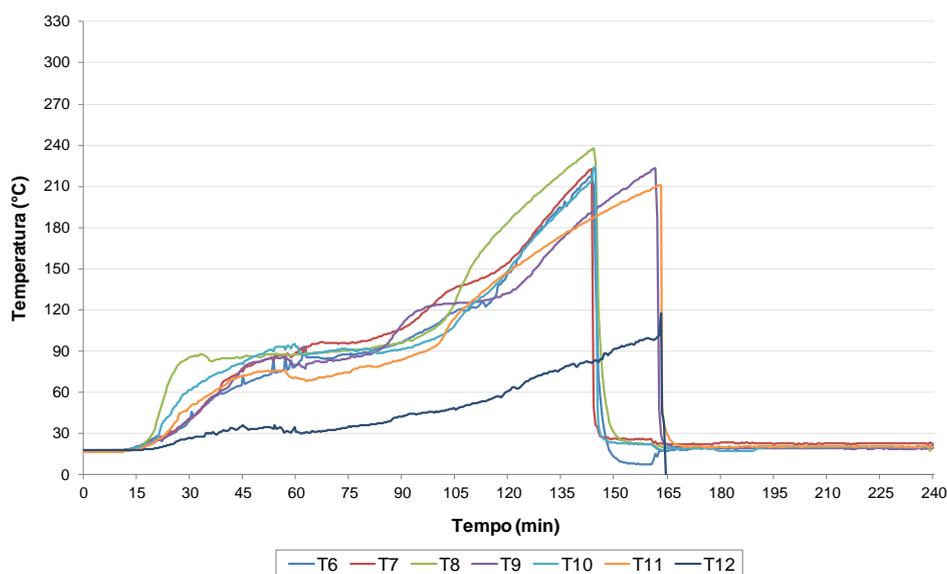
Gráfico 36 – FIB0,5%: temperatura da face não exposta ao fogo



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No FIB1,5% (Gráfico 37), o termopar T12 apresentou falha na leitura das temperaturas não configurando um gradiente similar a T11, talvez por fixação inadequada na superfície da amostra ou falha no sensor. Já o termopar T9 apresentou leituras de temperatura mais próximas a T12, diferindo do comportamento observado em FIB0,5%, em que apenas T11 e T12 apresentaram picos posteriores aos demais termopares.

Gráfico 37 – FIB1,5%: temperatura da face não exposta ao fogo



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A Tabela 84 indica as leituras de temperatura de cada termopar da face não exposta ao fogo, marco de leitura em torno de 140 minutos de ensaio, antes de realizar o desacoplamento desses termopares da amostra.

Tabela 84 – Termopares da face não exposta ao fogo

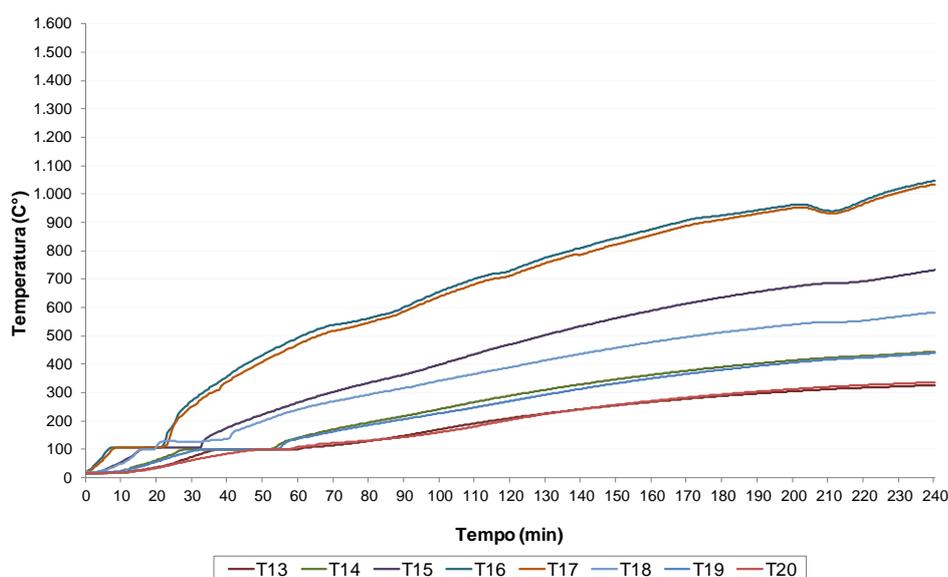
Amostra	Tempo de ensaio (min)	T6 (°C)	T7 (°C)	T8 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)	T11 (°C)	T12 (°C)
REF	138,5	164,6	150,0	219,5	203,9	232,4	204,7	85,0
BOR5%	132,0	218,2	224,9	-	189,2	217,0	209,3	-
BOR10%	140,5	-	-	181,7	-	211,7	-	230,7
FIB0,5%	127,0 – 150,0*	227,0	234,4	236,0	201,6	216,1	210,2*	227,0*
FIB1,5%	143,5 – 163,0*	217,9	222,6	236,7	191,1	213,6	211,1*	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A temperatura interna da seção foi medida em oito pontos, T13 a T20 conforme a Figura 44, sendo que os registros de temperatura de todas as amostras podem ser observados entre os Gráficos 38 a 42.

No REF (Gráfico 38), observa-se que os termopares que estavam espelhados em relação ao centro da amostra, na mesma profundidade, apresentaram curva de aumento de temperatura ao longo do tempo de forma muito similar, indicando alta confiabilidade nas leituras obtidas. Os termopares na mesma profundidade são T13-T20 2 cm, T14-T19 4 cm, T15-T18 6 cm e T16-T17 8 cm da face não exposta.

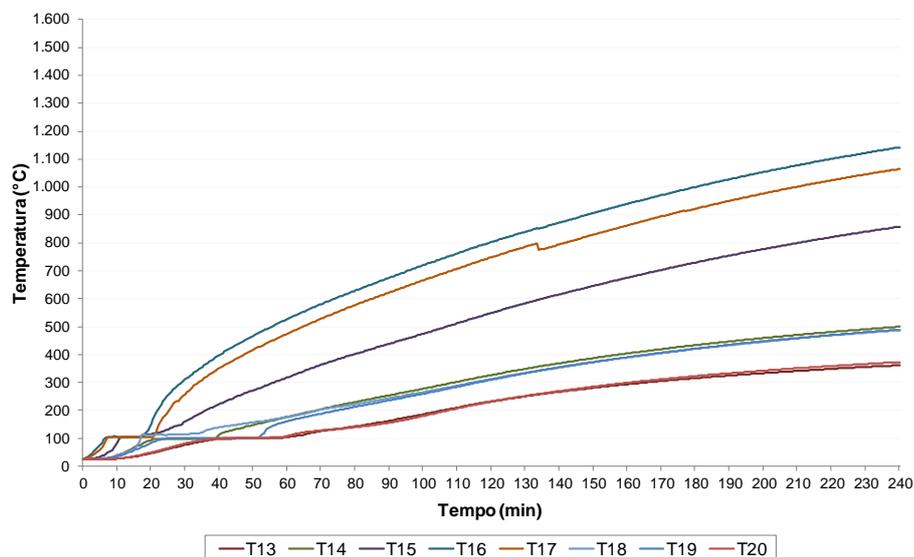
Gráfico 38 – REF: temperatura do interior da seção da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A BOR5% (Gráfico 39) demonstra curvas com o mesmo comportamento descrito para REF, em que os termopares de mesma profundidade apresentam gradientes de temperatura semelhantes.

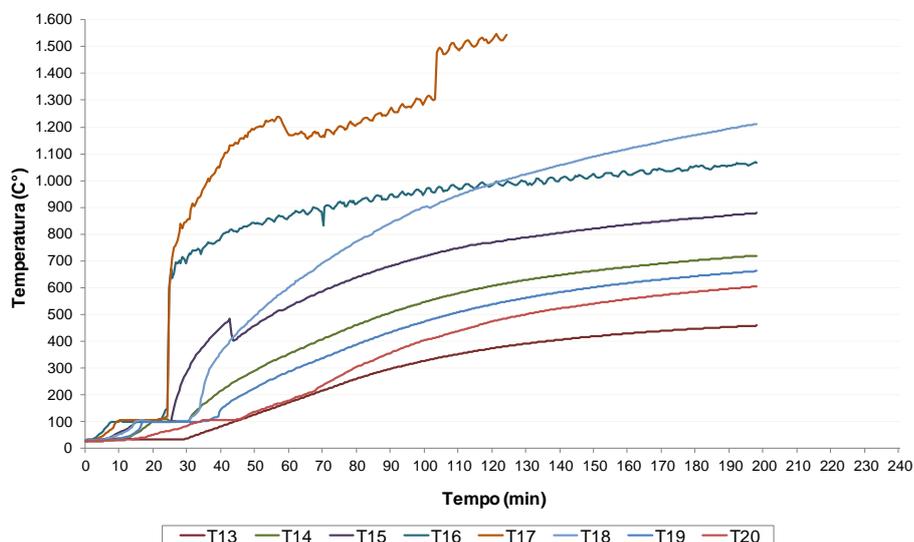
Gráfico 39 – BOR5%: temperatura do interior da seção da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

No Gráfico 40, em BOR10%, os termopares T16 e T17, que são os mais próximos da face exposta ao fogo, apresentaram um pico de aumento de temperatura aos cerca de 25 minutos de ensaio, momento de registro de diversos estalos indicando deslocamento da seção.

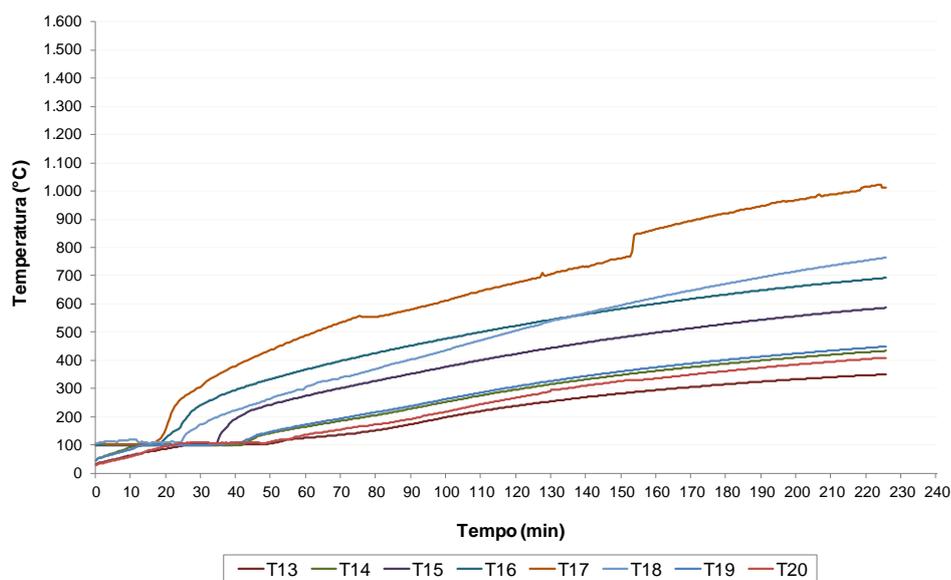
Gráfico 40 – BOR10%: temperatura do interior da seção da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

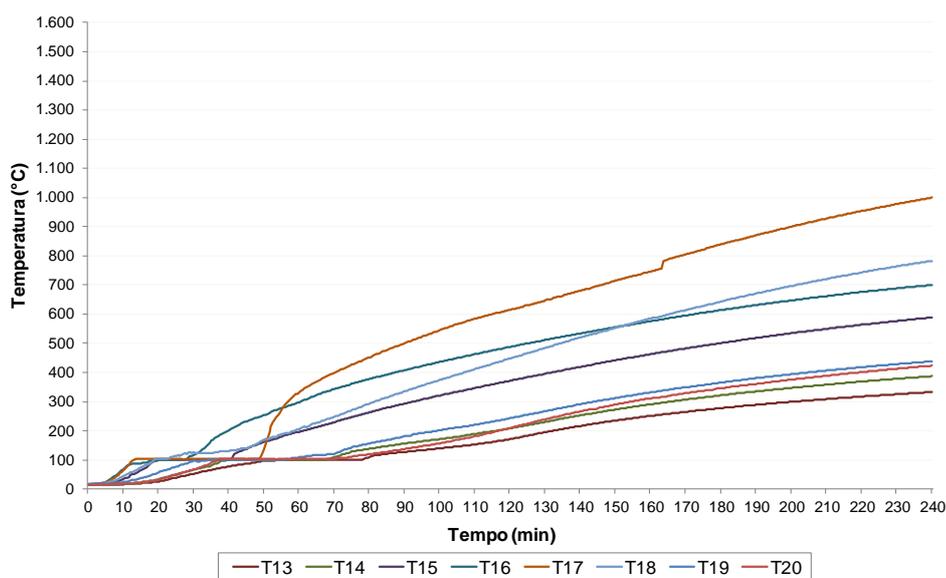
Em FIB0,5% (Gráfico 41) e FIB1,5% (Gráfico 42), o termopar T17 apresentou, nitidamente, as maiores leituras de temperatura. O desempenho das curvas de aumento de temperatura ao longo do tempo é similar em ambos os gráficos, mostrando que o comportamento das amostras com fibra metálica reciclada seguiu o mesmo comportamento.

Gráfico 41 – FIB0,5%: temperatura do interior da seção da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 42 – FIB1,5%: temperatura do interior da seção da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A Tabela 85 indica as leituras de temperatura máxima de cada termopar da seção interna da amostra ao final do ensaio. Para REF, BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5%, o ensaio foi concluído aos 240 minutos, e BOR10% aos 200 minutos.

Tabela 85 – Temperatura máxima da seção interna das amostras

Amostra	T13 (°C)	T14 (°C)	T15 (°C)	T16 (°C)	T17 (°C)	T18 (°C)	T19 (°C)	T20 (°C)
Profund.	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	8 cm	6 cm	4 cm	2 cm
REF	326,5	444,5	731,7	1.047,2	1.034,8	582,9	439,6	336,8
BOR5%	361,6	499,6	857,8	1.141,9	1.064,6	488,2	488,5	372,9
BOR10%	458,5	719,7	878,2	1.067,3	-	1.211,1	661,9	604,5
FIB0,5%	350,7	433,9	586,6	692,2	1.013,7	764,0	448,9	409,4
FIB1,5%	332,8	387,1	588,8	700,1	999,4	782,6	438,4	423,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De forma geral, os termopares 16 e 17 apresentam as maiores leituras de temperaturas, uma vez que T16 e T17 estavam apenas a 2 cm da face exposta. De forma similar, os termopares T13 e T20 apresentam as menores leituras de temperaturas uma vez que T13 e T20 estavam a 8 cm da face exposta ao fogo. Como já esperado, em BOR10%, observaram-se as maiores leituras de temperatura, uma vez que a perda de seção da amostra diminuiu a barreira de proteção contra a exposição ao fogo.

Em relação à perda de isolamento térmico, a Tabela 86 resume as informações acerca das placas ensaiadas. As amostras BOR5% e BOR10% perderam o isolamento térmico, sendo que um termopar individualmente apresentou aumento de temperatura superior a 180 °C, além da temperatura ambiente. Já as amostras REF, FIB0,5% e FIB1,5% perderam isolamento térmico devido ao aumento de temperatura média ser superior a 140 °C, além da temperatura ambiente.

Tabela 86 – Perda de isolamento térmico das amostras

Amostra	Perda de isolamento	Tempo de ensaio (min)	Temperatura aferida (°C)	Temperatura limite (°C)
REF	temperatura média	114,0	159,6	158,1
BOR5%	termopar 7	122,5	204,0	203,3
BOR10%	termopar 7	69,5	211,3	207,8
FIB0,5%	temperatura média	99,5	161,7	160,1
FIB1,5%	temperatura média	122,5	160,5	159,1

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Analisando a Tabela 86, observa-se que a amostra BOR10% perdeu isolamento térmico com apenas 69,5 minutos de ensaio, sendo que as demais amostras de concreto com inserção de resíduo alcançaram, no mínimo, 90 minutos de ensaio.

A perda de isolamento na temperatura média é um indicativo favorável para os concretos referência e com fibra metálica reciclada, pois a transferência de calor e a temperatura se mantiveram homogêneas em todos os quadrantes da amostra.

Os concretos BOR5% e BOR10% obtiveram a perda de isolamento por meio de um mesmo termopar, número 7, indicando que a região de maior aquecimento do sistema montado com as placas foi o quadrante inferior direito para ambas as amostras. A Tabela 87 indica a leitura de temperatura dos termopares 6, 7, 9 e 10 da face não exposta para BOR5% e BOR10% durante a perda de isolamento térmico. O número 8 não consta na tabela por ser o termopar de leitura exatamente sobre a junta.

Tabela 87 – Leitura dos termopares da face não exposta para BOR5% e BOR10% durante a perda de isolamento térmico

Amostra	Tempo de ensaio (min)	T6 (°C)	T7 (°C)	T9 (°C)	T10 (°C)	Temperatura média (°C)
BOR5%	122,5	199,8	204,0	171,5	195,2	192,6
BOR5%	69,5	95,5	97,3	79,7	103,8	94,0
BOR10%	69,5	148,5	211,3	103,6	80,9	136,1

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao analisar a última coluna da Tabela 87, observa-se que BOR5%, aos 122,5 minutos de ensaio, apresentava em T7 temperatura 6% maior que a média, enquanto que, aos 69,5 minutos de ensaio, B10% apresentava em T7 uma temperatura 55% maior que a média. Essa diferença acentuada em BOR10% pode ter ocorrido devido ao deslocamento e à perda de seção da amostra no quadrante inferior direito, conforme descrição em detalhes na próxima subseção.

A média de temperatura de BOR10%, aos 69,5 minutos e sem considerar o T7, é igual a 111,0 °C, que seria compatível com a média de temperatura de BOR5% neste mesmo instante, 94,0 °C. Essa comparação reforça o comportamento diferenciado e pontual de T7 em BOR10%, tendo em vista que BOR5% também obteve elevação da temperatura em T7, mas somente aos 122,5 minutos.

6.2.2.3 Avaliação da estanqueidade

A estanqueidade foi aferida em todas as amostras com aproximação de um chumaço de algodão diante da placa de concreto a cada uma hora de ensaio de resistência ao fogo. Nas amostras REF, BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5%, não houve inflamação generalizada do chumaço de algodão em nenhuma aferição, sendo que esses concretos terminaram o ensaio de resistência ao fogo aos 240 minutos sem prejuízo da estanqueidade.

As placas de vedação REF, BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5% apresentaram microfissuras no desenvolver do ensaio, porém estas não foram suficientes para proporcionar a passagem de gases inflamáveis para a face oposta à face de exposição ao fogo.

Em BOR10%, a estanqueidade foi comprometida aos 200 minutos de ensaio de resistência ao fogo, quando o chumaço de algodão foi inflamado ao ser aproximado de uma fissura incandescente, conforme ilustra a Figura 73.

Figura 73 – Perda de estanqueidade de BOR10%



Fonte: Acervo da autora (2020).

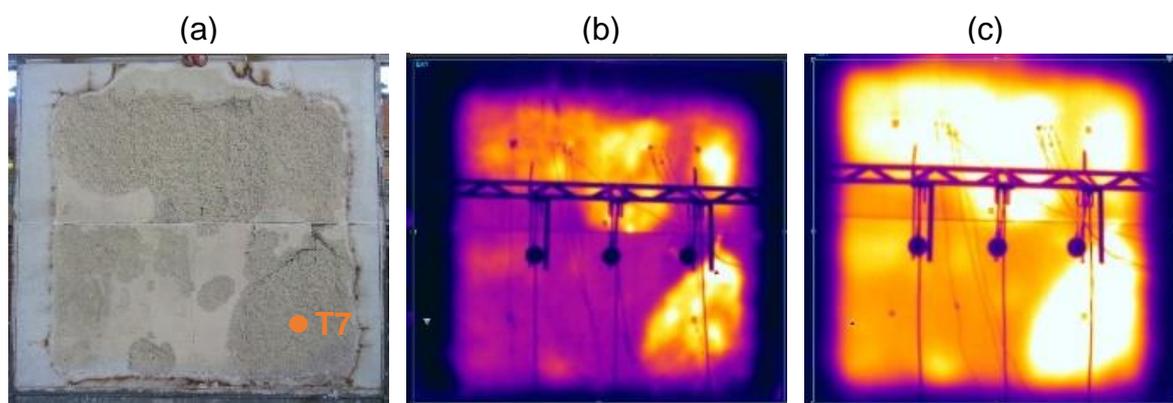
Em BOR10%, a perda de estanqueidade aos 200 minutos e a perda de isolamento térmico aos 69,5 minutos estão relacionados com o deslocamento e com a diminuição de seção da amostra que ocorreu durante o teste de resistência ao fogo. A diminuição da espessura das placas de concreto diminuiu a camada isolante e protetiva que o sistema deveria proporcionar.

Quando ocorre a perda da estanqueidade, o ambiente adjacente àquele em que o incêndio se deflagra não está sendo preservado, possibilitando o fomento do

incêndio por causa da passagem de chamas e de fumaça, possibilitando inflamação generalizada do ambiente por gases quentes.

A Figura 74 mostra as imagens da câmera termográfica aos 70 minutos e aos 200 minutos de ensaio para BOR10%. Em relação à escala de temperatura, quanto mais clara a coloração, maior a temperatura na região. As imagens indicam que o quadrante inferior direito apresentava a maior temperatura, o que é compatível com o deslocamento observado e com as leituras do termopar 7. A foto de BOR10% pós-ensaio foi incluída na Figura 74 (invertida horizontalmente) para enriquecer o comparativo das imagens termográficas com o deslocamento registrado.

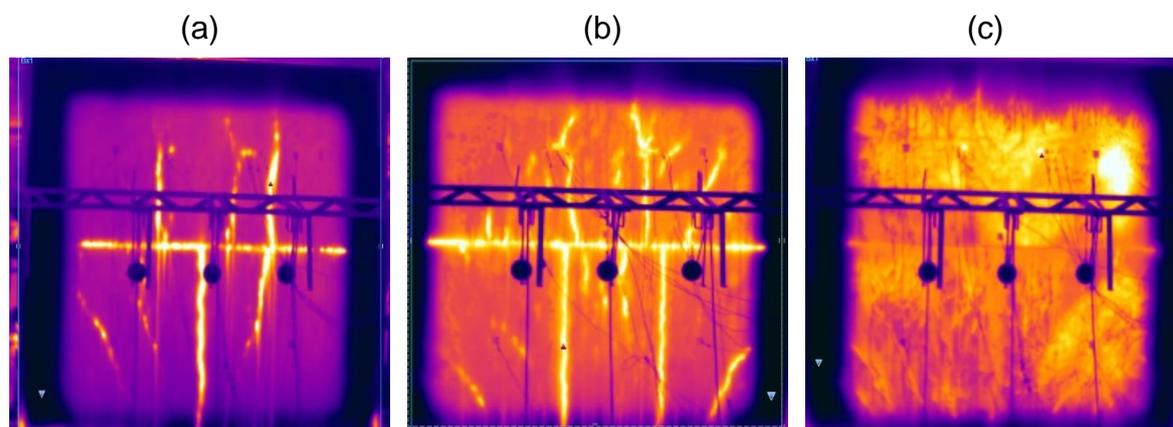
Figura 74 – BOR10%: (a) pós-ensaio de resistência ao fogo e (b) imagem da câmera termográfica aos 70 min e (c) 200 min



Fonte: Acervo da autora (2020).

A Figura 75 mostra BOR10% por meio de imagens da câmera termográfica, em tempos iniciais do ensaio indicando visivelmente a formação e presença de fissuras tanto na placa superior quanto no quadrante inferior direito.

Figura 75 – Imagem da câmera termográfica para BOR10% aos (a) 20 min, (b) 30 min e (c) 45 min



Fonte: Acervo da autora (2020).

Na placa de concreto inferior, no quadrante direito onde se situava T7, pode ter ocorrido acúmulo de partículas de borracha durante a concretagem, fato que poderia ter desencadeado o deslocamento explosivo originado por tensões internas devido à decomposição do resíduo. A caracterização física verificada por meio de tomografia, conforme analisada em 6.1.4, não apontou dispersão totalmente homogênea.

A armadura de todas as placas era constituída de uma malha de aço, ou seja, não havia concentração de barras de armadura nesse quadrante. Ainda, conforme exemplificado nos Gráficos 31 e 32, a temperatura interna do forno e da face exposta ao fogo evoluíram de forma homogênea, não manifestando calor pontual do sistema de aquecimento naquela região.

A seção 6.2.2.4 apresenta a estabilidade das amostras e indica que o ponto de maior deslocamento de todas as amostras ocorreu na placa superior, observação que reflete o deslocamento superior observado em BOR10%.

Acerca do fenômeno de deslocamento ocorrido em BOR10%, não foi possível repetir o experimento com as mesmas placas, pois o ensaio de resistência ao fogo é destrutivo. Ainda, não havia placas sobressalentes. A confecção de novas placas não garantiria o uso dos mesmos insumos empregados, bem como seria onerosa e despenderia tempo adicional para a logística.

6.2.2.4 Avaliação da estabilidade

A estabilidade estrutural foi verificada em todas as amostras com aplicação de choque mecânico a cada uma hora de ensaio de resistência ao fogo, não sendo verificadas deformações excessivas ou qualquer tipo de comprometimento quando submetidas ao impacto das esferas metálicas. Não houve colapso ou perda da estabilidade das amostras durante o ensaio. Assim, todas as amostras podem ser consideradas estáveis nesse quesito.

A avaliação da estabilidade também foi realizada pelo acompanhamento de medições da deformação em onze pontos distribuídos conforme a Figura 48, utilizando uma trena a *laser*, com dois pontos, e uma estação total, com nove pontos.

A Tabela 88 evidencia o deslocamento lateral máximo sofrido pelas placas durante o ensaio, obtido das medições com a trena a *laser*. No geral, é possível observar que as placas superiores (TL1) registraram maiores deslocamentos do que as placas inferiores (TL2).

Tabela 88 – Medições de deslocamento apuradas com a trena a *laser*

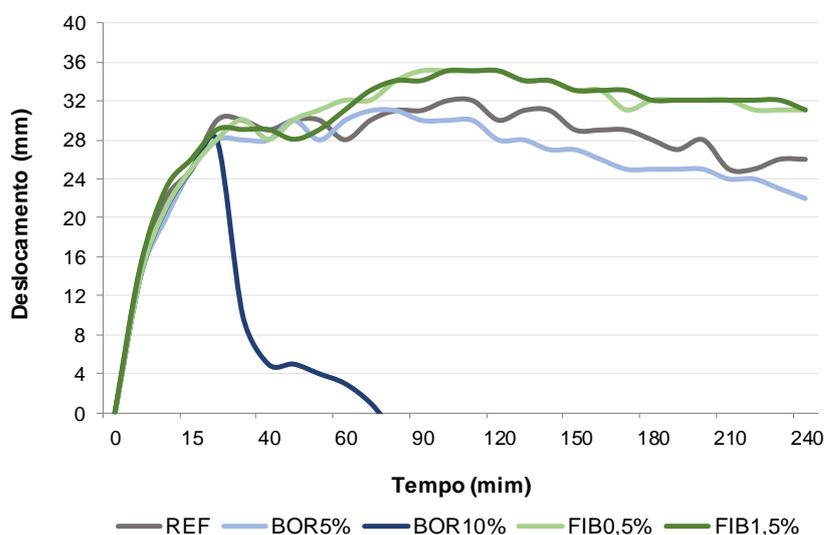
Amostra	Placa superior - TL1		Placa inferior - TL2	
	Deslocamento máximo (mm)	Tempo (min)	Deslocamento máximo (mm)	Tempo (min)
REF	32,0	100	26,0	80
BOR5%	31,0	70	27,0	90
BOR10%	28,0	20	18,0	20
FIB0,5%	35,0	90	28,0	90
FIB1,5%	35,0	100	28,0	110

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Outra anotação importante é que o tempo de ensaio em que os valores máximos foram registrados são iguais ou muito similares para ambas as placas de um mesmo sistema. Essa observação reflete que o sistema demonstrou comportamento uniforme, mesmo sendo duas placas distintas sobrepostas com junta selada.

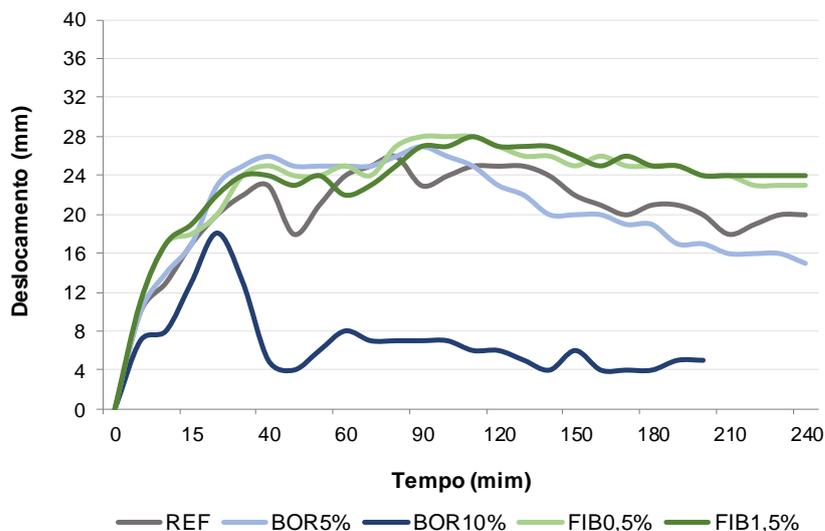
Os Gráfico 43 e 44 apresentam as medições de deslocamento da trena a *laser* ao longo do tempo de ensaio para as leituras em TL1 e TL2, respectivamente.

Gráfico 43 – Medições de deslocamento em TL1 ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 44 – Medições de deslocamento em TL2 ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em ambos os gráficos, o comportamento de BOR10% é anômalo e diferente das demais curvas e amostras em razão da ocorrência de deslocamento e de perda de seção, já discutidos. A alteração no comportamento do deslocamento de BOR10% inicia em aproximadamente 30 minutos de ensaio, compatível com as informações do Quadro 34 em que estouros e estalos de grande magnitude foram registrados.

Os Gráficos 43 e 44 indicam que a curva de deslocamento das amostras REF, BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5% é íngreme e crescente até aproximadamente 90 minutos, variando de 0 a 35 mm neste intervalo. Após esse tempo, as leituras se mantêm dentro de uma faixa de valores com variação significativamente menor do que os primeiros 90 minutos de ensaio. Aos 35 minutos, a temperatura dentro do forno vertical já era superior a 800 °C, sendo concluída a variação volumétrica da massa da amostra, motivada pela variação da porosidade e da perda de água, conforme abordado em 3.1.2.

Bolina (2016) e Moreira (2017), ao ensaiarem elementos de concreto em escala real em relação à resistência ao fogo, também usaram a trena a *laser* como artifício para medição de deslocamento e obtiveram gráficos de deformação através do tempo muito similares aos verificados neste trabalho.

A Tabela 89 evidencia o deslocamento lateral máximo sofrido pelas placas durante o ensaio com as medições da estação total. Os registros de leituras foram

organizados de forma a unir os pontos espelhados e com mesmo alinhamento, facilitando o comparativo.

Tabela 89 – Medições de deslocamento da estação total

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Tempo (min)	Deslocamento máximo (mm)	Tempo (min)
ET2			ET8	
REF	32,2	94	24,7	94
BOR5%	29,8	70	25,0	95
BOR10%	27,0	20	13,1	15
FIB0,5%	35,1	140	26,7	110
FIB1,5%	33,0	110	24,9	110
Média	31,4	-	22,9	-
ET1			ET3	
REF	26,4	104	22,320	109
BOR5%	23,9	100	21,028	110
BOR10%	16,7	185	17,024	170
FIB0,5%	27,6	170	24,453	170
FIB1,5%	25,9	110	25,114	115
Média	24,1	-	21,988	-
ET4			ET6	
REF	19,9	94	22,2	109
BOR5%	19,7	130	23,1	180
BOR10%	14,0	195	14,6	190
FIB0,5%	21,3	120	23,3	140
FIB1,5%	19,7	135	21,8	150
Média	18,9	-	21,0	-
ET7			ET9	
REF	24,9	104	21,8	89
BOR5%	24,3	95	17,4	105
BOR10%	14,9	85	26,3	205
FIB0,5%	23,7	115	24,0	115
FIB1,5%	23,7	110	22,1	115
Média	22,3	-	22,3	-

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Ao analisar a Tabela 89, é possível verificar que o deslocamento máximo médio em ET2 se mostra superior ao deslocamento máximo médio em ET8, indicando que a placa superior obteve maior deformação central que a placa inferior. Esse comportamento é compatível com as leituras da trena a laser TL1 e TL2.

Nos demais registros, de forma geral, os pares de leituras apresentaram mesma ordem de grandeza de deslocamento e de registro de tempo em que ocorreu

o deslocamento máximo. Essa regularidade nos dados demonstra comportamento semelhante e coerente entre as amostras em relação ao deslocamento horizontal das placas.

A Tabela 90 apresenta um comparativo entre os deslocamentos máximos registrados pelos pontos ET2, ET8 e TL1 e TL2, que estão na mesma região central das placas. Também se observou que as leituras estão na mesma ordem de grandeza de deslocamento, mostrando coerência entre os dados coletados, tanto pela trena a *laser* quanto pela estação total.

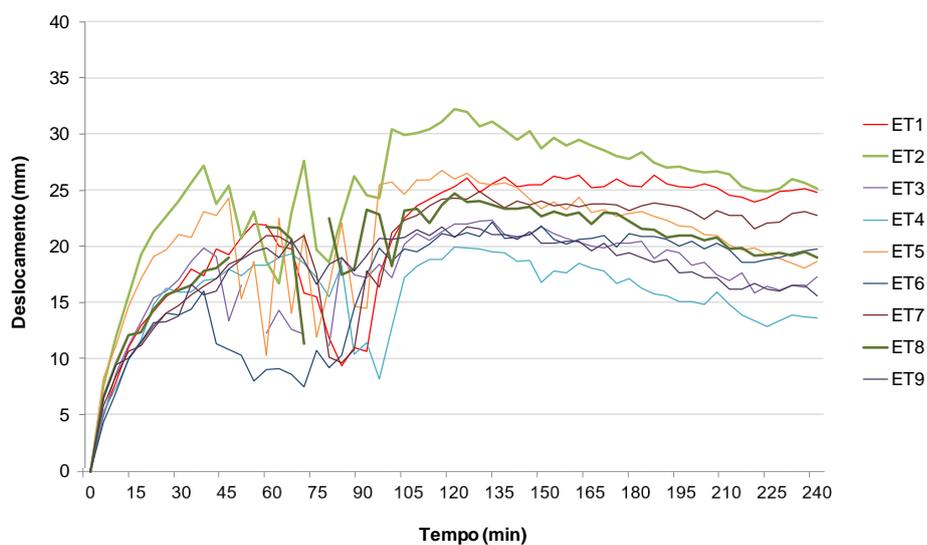
Tabela 90 – Comparativo de medições entre trena a *laser* e estação total

Amostra	Deslocamento (mm)			
	ET2	TL1	ET8	TL2
REF	32,2	32,0	24,7	26,0
BOR5%	29,8	31,0	25,0	27,0
BOR10%	27,0	28,0	13,1	18,0
FIB0,5%	35,1	35,0	26,7	28,0
FIB1,5%	33,0	35,0	24,9	28,0

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

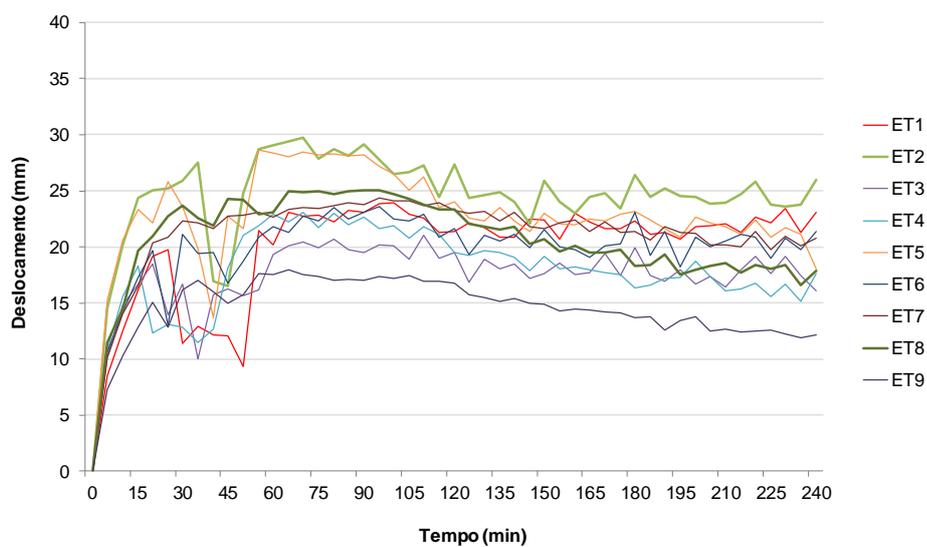
Em relação ao deslocamento ao longo do tempo registrado pela estação total, os Gráficos 45 a 49 registram o comportamento das amostras. Em REF, BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5%, observou-se uma dispersão nas leituras entre 30 e 60 minutos, quando a temperatura interna do forno atingiu entre 800 e 900 °C, conforme disposto no Gráfico 31. A alta temperatura atingida dentro do forno causou reflexo na condição estrutural das placas de concreto, segundo discutido no terceiro capítulo. O BOR10% diferiu desse padrão, antecipando a dispersão de leituras entre 10 e 40 minutos.

Gráfico 45 – Medições de deslocamento em REF ao longo do tempo (ET)



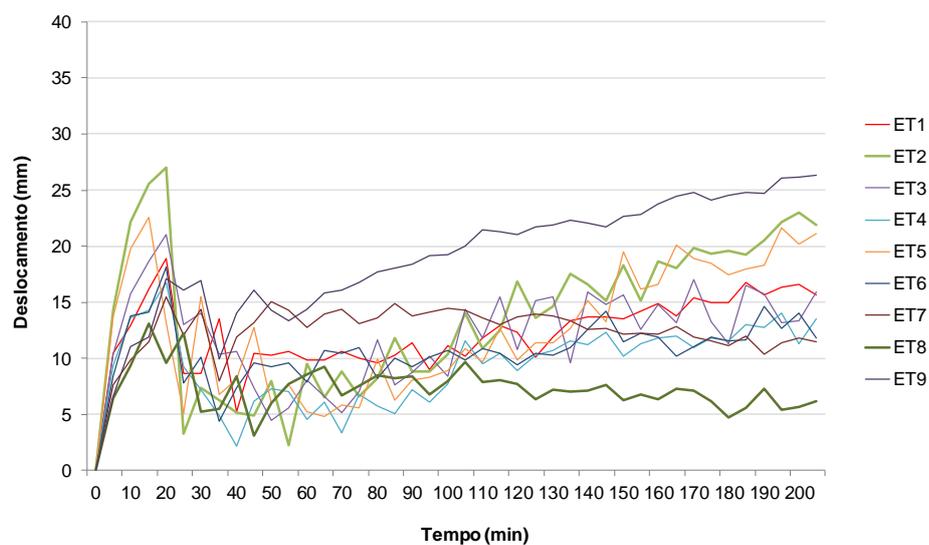
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 46 – Medições de deslocamento em BOR5% ao longo do tempo (ET)



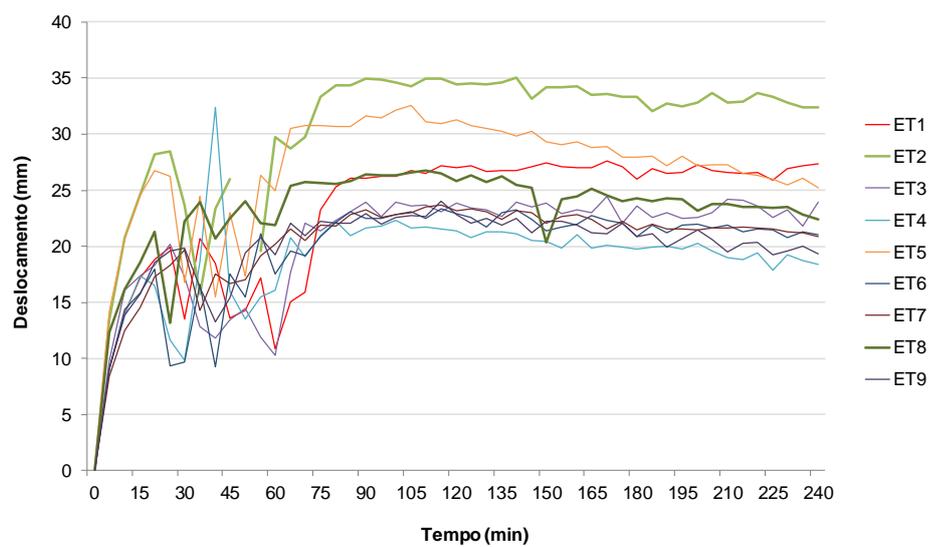
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 47 – Medições de deslocamento em BOR10% ao longo do tempo (ET)



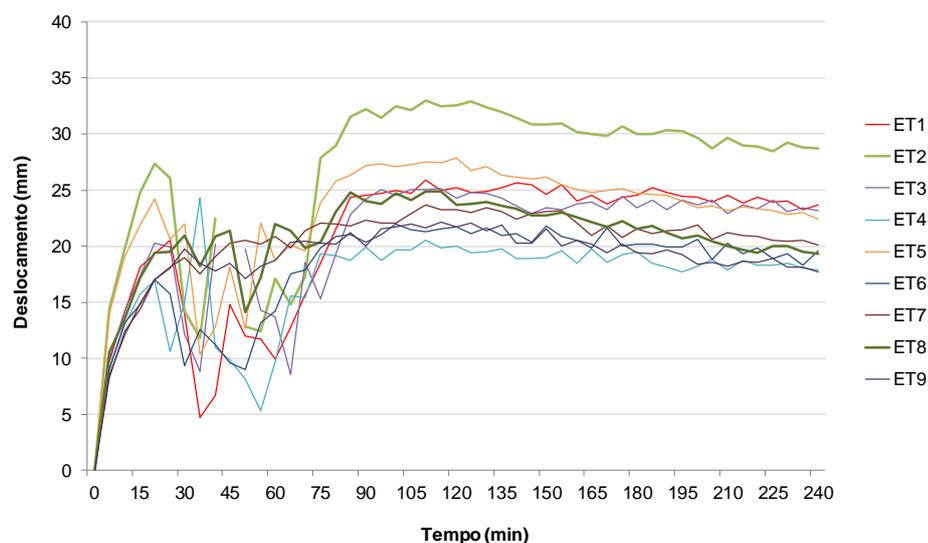
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 48 – Medições de deslocamento em FIB0,5% ao longo do tempo (ET)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

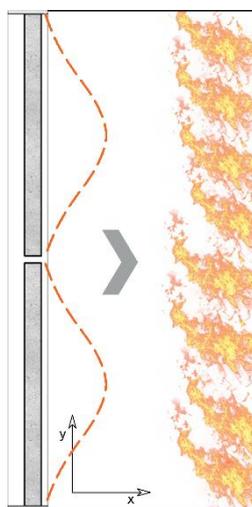
Gráfico 49 – Medições de deslocamento em FIB1,5% ao longo do tempo (ET)



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em todas as amostras, parcialmente em BOR10%, a deformação registrada através dos deslocamentos se deu no sentido de exposição ao fogo, ou seja, em direção à face interna do forno, apresentando uma curvatura conforme descreve a Figura 76. Esse mesmo comportamento foi observado por Bolina (2016) e Moreira (2017) ao estudarem elementos de concreto em escala real expostos a altas temperaturas, em que se registrou o arqueamento dos elementos em direção à superfície exposta ao fogo, originado pelo aquecimento térmico diferencial das amostras.

Figura 76 – Sentido da deformação das placas de vedação



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Assim como foi observado nas curvas de deslocamento ao longo do tempo entre os Gráficos 45 e 49, Bolina (2016) também observou esse mesmo comportamento ao registrar o deslocamento de pilares de concreto armado em relação à resistência ao fogo, que em determinado momento do ensaio as deformações começaram a reduzir. O autor explica que o centroide de massa da seção, com a continuidade do aquecimento, se deslocou no sentido da face não exposta ao calor produzindo excentricidade em relação ao baricentro do elemento. Dessa forma, foi originado momento fletor contrário ao induzido pelas deformações térmicas que provocaram a redução das deformações finais.

6.2.2.5 Classificação dos compósitos em relação à resistência ao fogo

O Quadro 36 indica a determinação da categoria e do grau de resistência ao fogo conforme quesitos prescritos na NBR 10636 (ABNT, 1989). Em relação à categoria de resistência ao fogo, as amostras foram classificadas como corta-fogo (CF) ou para-chamas (PC). Já os graus de resistência ao fogo são expressos em minutos, conforme o tempo de atendimento dos critérios de ensaio.

Quadro 36 – Classificação das amostras quanto à NBR 10636 (ABNT, 1989)

Amostra	Isolamento térmico	Estanqueidade	Estabilidade	Classificação dos sistemas
REF	114 min	240 min	Atende	CF90 - PC240
BOR5%	122,5 min	240 min	Atende	CF120 - PC240
BOR10%	69,5 min	200 min	Atende	CF60 - PC180
FIB0,5%	99,5 min	240 min	Atende	CF90 - PC240
FIB1,5%	122,5 min	240 min	Atende	CF120 - PC240

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Moreira (2017) ensaiou placas maciças pré-fabricadas de concreto convencional para avaliação da resistência ao fogo, com 10 cm de espessura, atribuindo aos seus protótipos classificações CF60 a CF120 e PC240. Bolina *et al.* (2015), ao avaliarem a resistência ao fogo de parede maciça de concreto convencional, com 10 cm de espessura, encontraram classificação CF 120 minutos. Sendo assim, nota-se que as classificações dos sistemas ensaiados neste programa experimental são compatíveis com outras pesquisas.

Conforme o Quadro 36, a amostra BOR10% obteve os menores tempos de resistência ao fogo devido ao comportamento da amostra já comentado. Identificou-

se que as amostras BOR5%, FIB0,5% e FIB1,5% apresentaram classificação igual ou superior à REF. Deve ser salientado o registro de deslocamento em menor grau em BOR5%, fato não observado nas amostras REF, FIB0,5% e FIB1,5%.

O tempo de resistência ao fogo (TRF), segundo descrito em 3.1.1, é o tempo máximo que o elemento construtivo pode manter o isolamento térmico, a estanqueidade e a estabilidade como critérios de resistência ao fogo mantendo a sua função. O TRF do REF foi igual a 90 minutos, do FIB0,5% igual a 90 minutos e do FIB1,5% equivalente a 120 minutos.

Avaliando os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) especificados na NBR 14432 (ABNT, 2001b) e na Instrução Técnica nº 8 (CBPMSP, 2018a), os concretos ensaiados atenderiam à normativa de segurança estrutural para uso em edificações residenciais de até 30 metros de altura utilizando o REF ou o FIB0,5%, e de até 80 metros de altura empregando o FIB1,5%. Outras formas de uso e de ocupação são possíveis, bem como alturas maiores de acordo com o segmento elegido.

O TRF de BOR10% foi igual a 60 minutos e, segundo a NBR 14432 (ABNT, 2001b) e a Instrução Técnica nº 8 (CBPMSP, 2018a), poderia ser empregado em edificações residenciais de até 23 metros de altura. Caso o termopar T7 não tivesse apresentado temperatura superior aos demais e seguisse a mesma evolução de temperatura dos outros termopares da face não exposta, que são compatíveis com BOR5%, poderia ser atingido isolamento térmico igual ou superior a 90 minutos, colocando a amostra BOR10% no mesmo patamar de classificação dos demais sistemas.

6.2.3 Análise química microestrutural

Em relação ao ensaio de FRX, o Quadro 37 classifica os elementos químicos em faixas de detecção, sendo que os valores apresentados estão em porcentagem de peso da amostra. Os resultados de forma completa, por composto químico e com a comparação relacionada ao padrão analisado se encontram no Apêndice B.

Os resultados de FRX indicaram marcante presença de óxidos de silício (SiO_2), de cálcio (CaO), férrico (Fe_2O_3) e de alumínio (Al_2O_3), os quais são indícios dos principais compostos do cimento. O clínquer do cimento apresenta traços de óxidos como o de magnésio (MgO), de titânio (TiO_2), de potássio (K_2O) e de sódio (Na_2O),

compostos secundários que estão presentes no Quadro 37 em menor quantidade. (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Quadro 37 – Classificação dos resultados de FRX

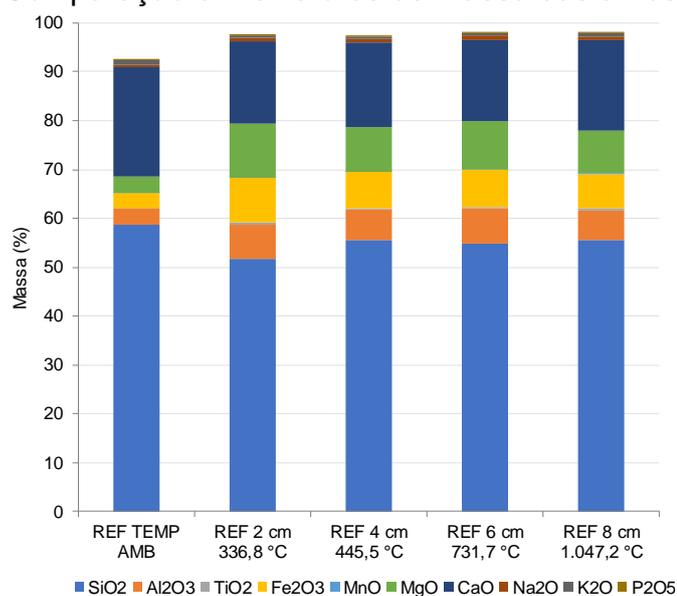
Amostra	Profundidade (cm)	Elemento químico (% em peso)		
		< 1%	1% a 25%	> 25%
REF	Temperatura ambiente	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂
REF	2, 4, 6 e 8	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂
BOR5%	2, 4, 6 e 8	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂
BOR10%	2, 4 e 5	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂
FIB0,5%	2, 4, 6 e 8	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂
FIB1,5%	2, 4, 6 e 8	TiO ₂ , MnO, Na ₂ O, K ₂ O e P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO e MgO	SiO ₂

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A presença de dióxido de silício (SiO₂) em maior proporção nas amostras também era esperada, pois esse composto é proveniente do cimento e da areia (quartzo), uma vez que as amostras são oriundas de placas de concreto e os agregados ocupam de 60 a 80% do volume desse material compósito.

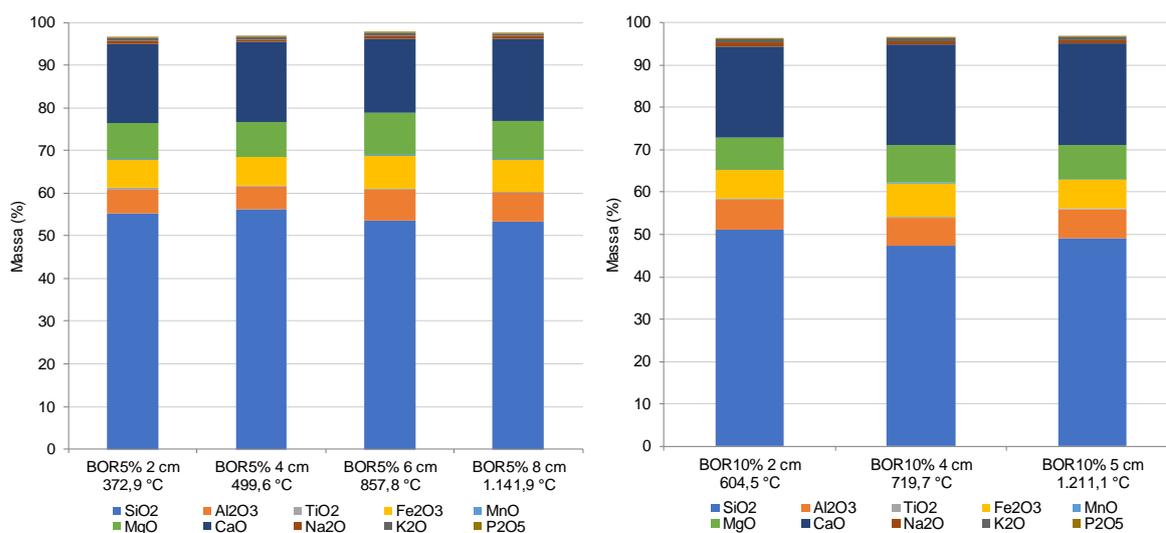
Entre os Gráficos 50 e 52, é indicado um comparativo de massa dos óxidos encontrados em cada amostra, conforme cada profundidade de extração do pó. Em REF, BOR5%, BOR10%, FIB0,5% e FIB1,5% não se observou diferença significativa na quantidade de cada óxido entre as diferentes profundidades de extração. Nas amostras expostas em alta temperatura, os compostos predominantes foram: óxidos como o de magnésio (MgO), óxido de cálcio (CaO), óxido férrico (Fe₂O₃) e óxido de alumínio (Al₂O₃).

Gráfico 50 – Comparação entre valores de massa das amostras do REF



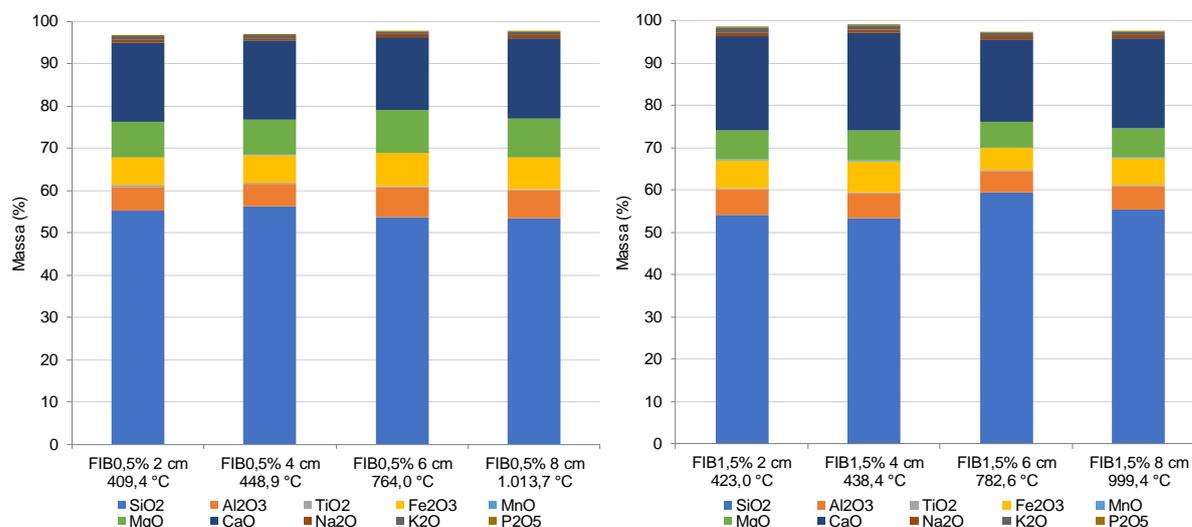
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 51 – Comparação entre valores de massa das amostras BOR5% e BOR10%



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Gráfico 52 – Comparação entre valores de massa das amostras FIB0,5% e FIB1,5%



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Observou-se alteração da quantidade em massa dos óxidos entre o REF temperatura ambiente e as demais amostras expostas ao fogo. Nota-se a diminuição dos percentuais de óxido de cálcio (CaO) e de dióxido de silício (SiO₂), e aumento do óxido férrico (Fe₂O₃), do óxido de magnésio (MgO) e do óxido de alumínio (Al₂O₃). Assim, pode-se deduzir maior concentração de C-S-H em REF temperatura ambiente devido à maior presença de óxido de cálcio (CaO) e de dióxido de silício (SiO₂). As alterações químicas são compatíveis com a literatura (Quadro 9), uma vez que o primeiro estágio de decomposição do C-S-H é em torno de 150 °C.

Em relação à apresentação dos resultados de DRX, enfatiza-se que o objetivo principal é mapear as principais alterações ocorridas no núcleo das placas de concreto na medida em que a temperatura de exposição aumenta. Desta forma, não foi feita a quantificação dos picos, que foram analisados comparativamente.

Os Quadros 38 e 39 apresentam um resumo dos resultados de DRX, nos quais é feito agrupamento das fases identificadas nos difratogramas. No Quadro 39, é indicada a profundidade da amostra, bem como a temperatura máxima alcançada naquela respectiva profundidade. A temperatura alcançada na seção interna das amostras norteia a avaliação microestrutural dos concretos, pois auxilia a identificar os estágios de decomposição da matriz cimentícia. Os difratogramas completos podem ser analisados no Apêndice C.

Quadro 38 – Fases identificadas nos difratogramas de DRX: REF temperatura ambiente

Amostra	Agrupamento de fases identificadas nos difratogramas
REF temperatura ambiente	calcita etringita hidratada gipsita hidratada portlandita quartzo

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Quadro 39 – Fases identificadas nos difratogramas de DRX: demais amostras

Amostra	Agrupamento de fases identificadas nos difratogramas			
	2 cm	4 cm	6 cm - 5 cm*	8 cm
REF	336,8 °C	439,6 °C	582,9 °C	1.034,8 °C
	anortita forsterita gismondina quartzo	anortita olivina portlandita quartzo	dolomita forsterita gismondina portlandita quartzo	anortita forsterita portlandita quartzo
BOR5%	374,8 °C	491,0 °C	490,6 °C	1.070,5 °C
	anortita forsterita portlandita quartzo	albita anortita ferrita cálcica portlandita quartzo	albita anortita ferrita cálcica portlandita quartzo	albita anortita dolomita M-S-H olivina portlandita quartzo
BOR10%	604,5 °C	661,9 °C	1.211,1 °C	-
	anortita gismondina portlandita quartzo	anortita forsterita ferrosa gismondina portlandita quartzo	anortita dolomita portlandita quartzo	-
FIB0,5%	409,4 °C	449,9 °C	764,0 °C	1.022,5 °C
	anortita portlandita quartzo	anortita portlandita quartzo	anortita katoita portlandita quartzo	anortita dolomita forsterita ferrosa gismondina portlandita quartzo
FIB1,5%	428,9 °C	444,0 °C	793,8 °C	1.015,4 °C
	anortita forsterita portlandita quartzo	anortita forsterita portlandita quartzo	anortita forsterita ferrosa portlandita quartzo	anortita portlandita quartzo

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Antes de iniciar a discussão acerca das fases identificadas nos difratogramas de DRX, é importante caracterizar os compostos químicos elencados nos Quadros 38

e 39. Dessa forma, o Quadro 40 descreve as fases observadas nos difratogramas, indicando o nome, a composição química e outras informações complementares sobre os compostos.

Quadro 40 – Descrição das fases encontradas nos difratogramas de DRX

Fase	Composição química e descrição	Fonte
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ Silicato – grupo dos feldspatos	Anthony <i>et al.</i> (2003)
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ Silicato – grupo dos feldspatos	Anthony <i>et al.</i> (2003)
Calcita	CaCO_3 Carbonato de cálcio – grupo dos carbonatos	Stutzman, Feng e Bullard (2016)
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ Carbonato de cálcio e magnésio – grupo dos carbonatos	Stutzman, Feng e Bullard (2016)
Etringita	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O} - \text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$	Lima (2005)
Ferrita	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{C}_4\text{AF}$ Sulfoaluminato de cálcio hidratado	Lima (2005)
Forsterita	Mg_2SiO_4 Silicato de magnésio - grupo neossilicato	Fasihnikoutabal <i>et al.</i> (2015)
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{CSH}_2$ Sulfato de cálcio hidratado	Stutzman, Feng e Bullard (2016)
Gismondina	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ Aluminossilicato de cálcio hidratado – grupo das zeólitas	Anthony <i>et al.</i> (2003)
Katoita	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 \cdot (\text{OH})_4 - \text{C}_3\text{ASH}_4$ Silicoaluminato de cálcio – grupo garnet	Anthony <i>et al.</i> (2003)
M-S-H	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Silicato de magnésio hidratado	Souza, Medeiros e Hoppe Filho (2018)
Olivina	$(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$ Silicato de ferro e de magnésio – grupo neossilicato	Fasihnikoutabal <i>et al.</i> (2015)
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CH}$ Hidróxido de cálcio	Stutzman, Feng e Bullard (2016)
Quartzo	SiO_2 Dióxido de silício	Anthony <i>et al.</i> (2003)

Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Em temperatura ambiente (Quadro 38), os compostos químicos apontados estão em fase hidratada, enquanto que os compostos elencados após submissão à alta temperatura não estão mais nessa condição (Quadro 39). Esse comportamento é esperado, uma vez que as amostras ensaiadas no Quadro 38 foram elevadas em, no mínimo, 336,8 °C. Conforme o Quadro 9, em cerca de 374 °C, atinge-se um ponto crítico quando não há mais água livre disponível na matriz cimentícia.

Os compostos identificados em temperatura ambiente (Quadro 38) são compatíveis com os compostos constituintes do cimento hidratado e com fase cristalina: calcita, etringita hidratada, gipsita hidratada e portlandita. Outros autores também evidenciaram, pela DRX, os mesmos compostos em pasta de cimento ou concreto em temperatura ambiente. (LIMA, 2005; PENG; HUANG, 2008).

A presença de etringita só foi registrada em temperatura ambiente (Quadro 38), não sendo apontada como uma fase após exposição ao fogo, já que esse é um dos primeiros compostos a se decompor durante o aquecimento do concreto, mesmo antes de a temperatura atingir 100 °C. Esse mesmo comportamento já foi observado por pesquisadores que realizaram microanálise térmica de materiais cimentícios. (CASTELLOTE *et al.*, 2004; FERNANDES *et al.*, 2017; HAGER, 2013).

Não é evidenciada a presença da calcita em amostras expostas a temperaturas superiores a 900 °C devido à sua decomposição na faixa de temperatura entre 700 e 900 °C. (KIM; YUN; PARK, 2013; LIM; MONDAL, 2014). Em algumas amostras descritas no Quadro 39, após exposição térmica, observou-se a presença de dolomita, um mineral que contém carbonatos anidros. Lima (2005) explica que, após a decomposição da calcita, são formados carbonatos complexos de cálcio e sílica que se tornam uma característica marcante das amostras aquecidas em temperaturas elevadas.

Os difratogramas apontaram a presença de quartzo em todas as profundidades e temperaturas, indicando a presença do agregado miúdo nos materiais analisados. Como discutido na seção 3.1.2, o quartzo se decompõe somente em temperatura superior a 1.700 °C, logo, a presença desse composto era esperada já que a temperatura máxima aferida e apontada no Quadro 39 foi de 1.211,1 °C. Esse resultado é compatível com a análise de FRX que também indicou a presença de dióxido de silício.

Em todas as amostras do Quadro 39, foi apontada a presença de portlandita remanescente, mesmo após exposição a altas temperaturas, sendo que a literatura aponta a decomposição de hidróxido de cálcio entre 400 e 600 °C (Quadro 9). Kim, Yun e Park (2013) também registraram o mesmo fenômeno ao estudarem pasta de cimento exposta a temperaturas elevadas. Em 1.000 °C, os autores observaram uma quantidade muito pequena de hidróxido de cálcio que ainda permaneceu intacta após a fusão de outros compostos.

Ao estudarem a caracterização microestrutural de materiais à base de cimento submetidos à degradação térmica, pesquisadores também observaram picos de hidróxido de cálcio após exposição em temperaturas superiores a 500 °C, provavelmente devido à recristalização durante processo de resfriamento. (CASTELLOTE *et al.*, 2004; LIM; MONDAL, 2014). A portlandita formada durante o processo de resfriamento é menos cristalina e possui temperatura de degradação inferior à original. (CASTELLOTE *et al.*, 2004; KIM; YUN; PARK, 2013; LIM; MONDAL, 2014).

Conforme discutido em 3.1.2, o C-S-H tem dois picos de decomposição, o primeiro em 150 °C e o segundo cerca de 700 °C. É notável a presença de silicatos de cálcio e de magnésio entre os picos dos difratogramas, provavelmente oriundos da transformação da fase de silicato de cálcio hidratado. Esses silicatos que se formam após exposição do concreto ao fogo apresentam composição variável e se mantêm estáveis nas análises até às temperaturas máximas, como a albita, a anortita e a gismondina.

A presença de M-S-H só foi observada em BOR5% em cerca de 1.070,5 °C, sendo que o surgimento do silicato de magnésio hidratado está associado à descalcificação do silicato de cálcio hidratado quando em contato com o sulfato de magnésio. Segundo explanado no Quadro 9, aos 900 °C já havia ocorrido a decomposição completa de C-S-H, o que justifica o surgimento de M-S-H, pois é um composto com baixa capacidade de ligação e nenhuma propriedade cimentante. (SOUZA; MEDEIROS; HOPPE FILHO, 2018).

Uma importante ressalva é a dificuldade de identificação do C-S-H por meio da técnica de DRX, pois é constituído de fases amorfas e sem picos agudos e o DRX é utilizado para apontar as frações de massa de fases cristalinas. (LIM; MONDAL, 2014; STUTZMAN; FENG; BULLARD, 2016).

De forma geral, pode-se observar que as fases descritas à temperatura ambiente e após exposição em diferentes graus de temperatura são compatíveis com a literatura, conforme apresentado anteriormente no capítulo 3, e são coerentes os estudos de outros pesquisadores, de acordo com o exposto na discussão dos resultados desta seção.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais e as principais conclusões sobre o comportamento do concreto elaborado com material reaproveitado de pneus inservíveis em elevadas temperaturas, visando demonstrar o atendimento do objetivo geral e dos objetivos específicos desta tese. Ao final do capítulo, são apresentadas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros para continuar a investigação científica nesta linha de pesquisa.

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa experimental desta tese de doutorado contemplou duas etapas: na etapa preliminar, abordou-se a caracterização física e mecânica de concretos com o material reciclado para conhecimento geral do concreto com a inserção de resíduos de pneus inservíveis. Na segunda etapa, que foi decisiva, apresentou-se o desenvolvimento dos ensaios de reação e de resistência ao fogo e obteve-se o conjunto de dados principais que visam responder o objetivo geral desta tese.

7.1.1 Concreto com agregado reciclado de borracha

Em relação à reação ao fogo, o concreto referência foi considerado como incombustível, como não propagador de chamas e sem desprendimento de fumaça. Essa constatação já era esperada conforme corroborado na literatura e discutido ao longo do capítulo de resultados. O concreto com emprego de agregado reciclado de borracha foi classificado como combustível devido à presença de chamejamento nos grânulos de borracha existentes na superfície da amostra, mas sem propagação de chamas e sem evidência de produção de fumaça.

Para os concretos com emprego de agregado reciclado de borracha, mesmo que os resultados de reação ao fogo tenham sido satisfatórios, os dados coletados no ensaio de resistência ao fogo indicaram alta incidência de fumaça preta, bem como a ocorrência de deslocamento em menor grau para BOR5% e deslocamento em maior grau e explosivo para BOR10%. O deslocamento está relacionado à deterioração do ARB, que ocorre de forma brusca, sendo essa uma característica intrínseca da borracha conforme verificado na análise térmica.

As ocorrências de fumaça e de deslocamento não foram verificadas nos ensaios de reação ao fogo em BOR5% e em BOR10% devido à baixa temperatura dos ensaios e à pequena chama piloto utilizada no ensaio de índice de propagação superficial e de densidade óptica específica de fumaça.

Nas placas de vedação contendo agregado reciclado de borracha, a avaliação da estabilidade foi atendida integralmente. O isolamento térmico foi mantido até 122,5 minutos para BOR5%, até 69,5 minutos para BOR10% e até 114 minutos para REF. A estanqueidade de REF e BOR5% foi mantida até 240 minutos, sendo que BOR10% manteve esta propriedade até 200 minutos.

Assim sendo, considerando especificamente os materiais utilizados nesta pesquisa, o emprego de agregado reciclado de borracha no concreto, em teor de 5%, pode manter e até mesmo melhorar as propriedades de placas de concreto convencional na exposição ao fogo, ressaltando-se o deslocamento em menor grau registrado.

Já o emprego de agregado reciclado de borracha em teor de 10% ocasionou a diminuição do tempo de isolamento térmico e de estanqueidade do concreto quando submetido ao ensaio de resistência ao fogo. A ocorrência de deslocamento explosivo em BOR10% e a perda de isolamento térmico pontual e no mesmo quadrante nos concretos BOR5% e BOR10% devem ser investigadas com mais afinco, de forma a otimizar as propriedades de concretos com maiores teores de agregado reciclado de borracha em relação à segurança contra incêndio.

7.1.2 Concreto com inserção de fibra de aço reciclada

Em relação à reação ao fogo, o concreto com inserção de fibra de aço reciclada foi classificado como combustível devido à presença de chamejamento das fibras aparentes e externas ao corpo de prova de concreto, mas sem propagação de chamas e sem evidência de produção de fumaça. O chamejamento das fibras metálicas não se repetiu nem causou interferência nos demais ensaios de reação ao fogo, nem no ensaio de resistência ao fogo.

Quanto ao desempenho de resistência ao fogo, a avaliação da estabilidade e da estanqueidade demonstrou que FIB0,5% e FIB1,5% possuem igual comportamento ao elemento referência. No que concerne ao isolamento térmico, o tempo em que esse parâmetro foi integralmente atendido foi 99,5 minutos para

FIB0,5%, 114 minutos para REF e 122,5 minutos para FIB1,5%. Ou seja, o comportamento em relação ao isolamento térmico do referencial e dos concretos com a fibra metálica é muito similar.

Com base nos resultados da análise térmica da fibra metálica reciclada, da reação e da resistência ao fogo das placas de concreto FIB0,5% e FIB1,5%, e considerando especificamente os materiais e as dosagens desenvolvidas nesta pesquisa, constata-se que a inserção da fibra metálica reciclada oriunda de pneus inservíveis pode manter e até mesmo melhorar as propriedades de placas de concreto convencional exposto à ação de elevadas temperaturas.

7.1.3 Resíduos de pneus inservíveis

No que diz respeito aos resíduos de pneus inservíveis, fibra metálica reciclada e agregado reciclado de borracha, o reaproveitamento desses materiais no concreto pode trazer benefícios para a construção civil e para o meio ambiente. Além disso, é uma alternativa nobre de disposição que motiva o ganho ambiental e o desenvolvimento sustentável.

No entanto, é necessário aprimorar a padronização da faixa granulométrica do agregado reciclado de borracha. Caso a finalidade de utilização seja a substituição pelo agregado miúdo, os limites da distribuição granulométrica do agregado reciclado de borracha devem atender às prescrições da NBR NM 7211 (ABNT, 2009a).

Quanto à fibra metálica reciclada, o fator de forma deve ser regularizado, buscando uniformizar o comprimento desse elemento. Padronizar o formato da fibra metálica reciclada também irá auxiliar na dispersão do resíduo durante a mistura do concreto.

Essa qualificação nas características físicas desses materiais, fibra metálica reciclada e agregado reciclado de borracha, irá gerar maior confiabilidade para pressupor o comportamento nos estados fresco e endurecido do concreto.

7.2 CONCLUSÕES

Considera-se que o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa foram atendidos e, com base nos resultados obtidos e nas considerações finais, tem-se as seguintes conclusões:

Etapa preliminar:

- I. Após a análise estatística, constatou-se que os percentuais elegidos inicialmente de 5%, 7,5% e 10% para a substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha e 0,5%, 1,0% e 1,5% para a inserção de fibra metálica no concreto se mostraram intervalos pequenos e pouco significativos estatisticamente. Por esse motivo, na segunda etapa, foram adotados percentuais com maior intervalo.

Reação ao fogo – NBR 16626 (ABNT, 2017a):

- II. O concreto convencional foi classificado como classe I, incombustível.
- III. O concreto com emprego de agregado reciclado de borracha e o concreto com inserção de fibra de aço reciclada foram classificados como classe II-A, combustíveis, sem evidência de propagação de chamas e de desprendimento de fumaça.

Resistência ao fogo – NBR 10636 (ABNT, 1989):

- IV. O concreto BOR10% é classificado como CF60 – PC180; REF e FIB0,5% são classificados como CF90 – PC240. Já BOR5% e FIB1,5% são classificados como CF120 – PC240.
- V. O emprego de agregado reciclado de borracha em teor de 5% manteve as propriedades de estanqueidade e de estabilidade, apresentando duração superior quanto ao isolamento térmico. Ressalva-se o deslocamento em menor grau registrado.
- VI. O emprego de agregado reciclado de borracha em teor de 10% ocasionou a diminuição do tempo de isolamento térmico e de estanqueidade do concreto quando submetido ao ensaio de resistência ao fogo, ocorrência que deve ser investigada.

- VII. A inserção de fibra de aço reciclada manteve, e até mesmo incrementou, as características de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico de placas de vedação de concreto quando submetidas a altas temperaturas.

Alterações químicas microestruturais – ensaios FRX e DRX:

- VIII. A utilização de agregado reciclado de borracha, ou de fibra metálica reciclada, não causou alteração ou prejuízo nas fases analisadas, sendo observadas características típicas de matrizes cimentícias tanto na temperatura ambiente quanto após exposição a diferentes graus de temperatura.

É necessário enfatizar a importância do estudo do comportamento de elementos de concreto armado exposto a altas temperaturas, buscando preencher as lacunas técnicas e científicas acerca dessa temática. A contribuição para a segurança contra incêndio vai além da proteção patrimonial quando se entende a seriedade dos danos ocorridos num sinistro, buscando a preservação da vida dos usuários e das equipes de resgate.

Vale a pena ressaltar, todavia, mesmo que este trabalho seja compatível com a literatura existente e esteja baseado em dados experimentais coletados em ensaios controlados, os resultados e as tendências de comportamento não devem ser tratados como genéricos, uma vez que foram utilizados materiais e métodos específicos. Para ratificar e complementar os objetivos aqui alcançados, deve-se prosseguir com a expansão de estudos nesta linha de pesquisa.

7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as limitações físicas e financeiras, a gama de variáveis existentes e a definição de prazos estipulados, tornou-se inviável explorar todas as possibilidades interessantes de pesquisa. Trabalhos adicionais podem ajudar a aprofundar, confirmar ou estender o conhecimento gerado na presente tese.

Desta forma, apontam-se sugestões para trabalhos futuros consideradas importantes para que se possa prosseguir no estudo de desenvolvimento da inserção do resíduo de pneus inseríveis no concreto, bem como da proteção contra incêndio de estruturas confeccionadas com esse tipo de concreto:

- a) otimizar o teor de substituição de agregado miúdo por agregado reciclado de borracha de forma a minimizar a ocorrência de deslocamento em concretos submetidos a elevadas temperaturas;
- b) compatibilizar uma dosagem híbrida de concreto com a inserção do agregado reciclado de borracha e da fibra metálica reciclada simultaneamente;
- c) validar o desempenho do concreto com adição de fibra metálica reciclada comparando-o com a inserção de fibra metálica industrializada com fator de forma similar;
- d) corroborar o comportamento na exposição a altas temperaturas avaliando a reação e a resistência ao fogo do concreto com adição de fibra metálica reciclada em relação ao concreto com a inserção de fibra metálica industrializada com fator de forma similar;
- e) analisar possível atenuação da fissuração em nível microestrutural após exposição ao fogo das matrizes cimentícias compostas por fibra metálica reciclada de pneus inservíveis;
- f) buscar uma forma de remoção dos resíduos aderidos nas fibras metálicas recicladas que ocasionam o chamejamento durante o aquecimento desses elementos, promovendo o concreto com a inserção da fibra metálica à categoria de incombustível;
- g) aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida para avaliar o desempenho ambiental de concretos com inserção do agregado reciclado de borracha e da fibra metálica reciclada.

REFERÊNCIAS

- AKASAKI, J. L. *et al.* Avaliação da resistência à flexão do concreto com borracha de pneu com relação ao concreto convencional. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 45., 2003. **Anais** [...]. Vitória: Instituto Brasileiro do Concreto, 2003.
- AKASAKI, J. L.; VITA, M. O. Estudo das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de resíduo de borracha pneumática. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 50., 2008. **Anais** [...]. Salvador: Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.
- AKASH, S. A. S.; SAMBOWO, K. A. Compressive strength and modulus of elasticity of steel fiber reinforced concrete under different temperature conditions. **Journal Teknik Sipil**, v. 2, n. 1, p. 1-8, 2014.
- ALBANO, C. *et al.* Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. **Composite Structures**, v. 71, n. 3-4, p. 439-446, dez. 2005.
- ALBUQUERQUE, A. C. *et al.* Adição de borracha de pneu ao concreto convencional e compactado com rolo. ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2006. **Anais** [...]. São Paulo: Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2006.
- ALBUQUERQUE, A. C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- ALI, F. *et al.* Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns. **Fire Safety Journal**, v. 39, n. 6, p. 433-445, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **State of the art report on fiber reinforced concrete (ACI 544.1R-96)**: ACI Committee 544. Farmington Hills: ACI, 2002.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete (ACI 544.3R-08)**: ACI Committee 544. Farmington Hills: ACI, 2008.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 211.3R-02**: Guide for selecting proportions for no-slump concrete: ACI Committee 211. Farmington Hills: ACI, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 1354**: Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter. West Conshohocken: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E 662:** Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMORIM, L. G. M.; BARBOSA, A. H. Análise comparativa do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras metálicas e sintéticas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

ANTHONY, J. W. *et al.* **Handbook of Mineralogy**. Chantilly: Mineralogical Society of America, 2003. Disponível em: <http://www.handbookofmineralogy.org/>. Acesso em: 26 mar. 2020.

ARF, M.; ABDULLAH, W.; ABDULKADIR, M. R. Post-fire mechanical properties of concrete made with recycled tire rubber as fine aggregate replacement. **Sulaimani Journal for Engineering Sciences**, v. 4, n. 5, p. 74-85, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9454:** Piso cerâmico - Determinação da resistência ao impacto - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9442:** Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1988a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio (cancelada). Rio de Janeiro: ABNT, 1988b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10636:** Paredes divisórias sem função estrutural: Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13860:** Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67:** Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5628:** Componentes construtivos estruturais: Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14432:** Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 27:** Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9479:** Argamassa e concreto: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2006b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142:** Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15200:** Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575:** Edificações habitacionais: Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16626:** Classificação da reação ao fogo de produtos de construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8522:** Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8802:** Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DO NEGRO DE FUMO (AINF). **Guia do Utilizador do Negro de Fumo.** 2016. Disponível em: <http://www.carbon-black.org/images/docs/2016-ICBA-Carbon-Black-Users-Guide-Brazilian-Portuguese.pdf>. Acesso em: 29 fev. 2020.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Relatório de produção e vendas 2016.** São Paulo: ANIP, 2016. Disponível em: <http://www.anip.com.br/arquivos/producao-vendas.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2020.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **ANIP em números:** dados gerais e publicações. São Paulo: ANIP, 2020. Disponível em: <http://www.anip.org.br/anip-em-numeros/publicacoes/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

BALAHA, M. M.; BADAWY, A. A. M.; HASHISH, M. Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, v. 14, n. 6, p. 427-435, 2007.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (BNDES). **Relato setorial 06/1998:** pneus. Brasília: BNDES, 1998. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Galerias/Convivencia/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/Relatos_Setoriais/index.html?start=2. Acesso em: 30 dez. 2017.

BATISTA, A. J. A. **Avaliação das propriedades do concreto com incorporação de fibra de aço proveniente da reciclagem de pneu inservível.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Curso de Engenharia Civil, São Leopoldo, 2018.

BAUER, A. L. **Avaliação das propriedades do concreto com inserção de resíduos oriundos de borracha de pneu inservível**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Curso de Engenharia Civil, São Leopoldo, 2018.

BELGO MINEIRA BEKAERT. **Linha automotiva**: reforço de pneu. 2020. Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/>. Acesso em: 29 fev. 2020.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. 2. ed. Oxfordshire: Taylor & Francis Group, 2007.

BEZERRA, A. C. S. **Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

BLUMENTHAL, M. H. Tire. *In*: LUND, H. F. (ed.). **The McGraw-Hill recycling handbook**. 2. ed. New York: The McGraw, 1993. p. 1-62.

BOLINA, C. C. *et al.* Calçadas ecológicas e inclusivas utilizando resíduos de pneus inservíveis. **Revista Científica Linkania Master**, v. 1, n. 6, p. 60-80, 2013.

BOLINA, F. L. *et al.* Avaliação da resistência ao fogo de paredes maciças de concreto armado. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 4, p. 291-305, 2015.

BOLINA, F. L. **Avaliação experimental da influência dos requisitos de durabilidade na segurança contra incêndio de protótipos de pilares pré-fabricados de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, 3 ago. 2010.

BRAZ, M. C. A.; NASCIMENTO, F. B. C. Concreto reforçado com fibras de aço. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 3, n. 1, p. 43-56, 2015.

BRIDGESTONE. **Basic knowledge of tires + Functions and performances**. 2020. Disponível em: https://www.bridgestone.com/products/basic_knowledge/structure/. Acesso em: 28 fev. 2020.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 13311**: Non-destructive testing of concrete – Methods of Test - Part 1: Ultrasonic pulse velocity. New Delhi: Bureau Of Indian Standards, 1992.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; DE ANGELIS NETO, G. Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 3, p. 1-12, nov. 2015.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988.

CARLO, U. A segurança contra incêndio no mundo. *In*: SEITO, A. I. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto, 2008. p. 1-7.

CASTELLOTE, M. *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1633-1644, 2004.

CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas: revisão. **Cerâmica**, v. 57, n. 341, p. 22-31, 2011.

CAVICHILLO, M. A.; HECKLER, K. I. L.; CAMPOS, H. C. Análise da incorporação de borracha de pneu em concreto como substituição parcial do agregado miúdo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Insitituto Brasileiro do Concreto, 2017.

CHEN, B.; LIU, J. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 1065-1069, 2004.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014.

CHRIST, R. **Proposição de um método de dosagem para concretos de ultra alto desempenho (UHPC)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R. SFRC bending behaviour at high temperatures: An experimental investigation. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES, 6., 2007. **Anais [...]**. Milano: Politecnico de Milano, 2007.

COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; FELICETTI, R. Mechanical properties of steel fibre reinforced concrete exposed at high temperatures. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 475-491, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2019**: Relatório gerencial. 20. ed. Brasília: CNT; SEST; SENAT, 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 258 de 26 de agosto de 1999. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, p. 39, 2 dez. 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 416 de 30 de setembro de 2009. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, p. 64-65, 1 out. 2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 301 de 21 de março de 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, p. 120-121, 21 mar. 2003.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBPMSP). **Norma Técnica nº 1**: Procedimentos administrativos – Anexo A1. São Paulo: CBPMSP, 2014.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBPMSP). **Instrução Técnica nº 8**: Segurança estrutural contra incêndio. São Paulo: CBPMSP, 2018a.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBPMSP). **Instrução Técnica nº 10**: Controle de materiais de acabamento e de revestimento. São Paulo: CBPMSP, 2018b.

CORREIA, J. R. *et al.* Fire reaction properties of concrete made with recycled rubber aggregate. **Fire and Materials**, v. 36, p. 139-152, 2012.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; BRITZ, C. A. Ações do fogo nas estruturas de concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto**: ciência e tecnologia. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. p. 1029-1068.

COUTINHO, B. A.; CORRÊA, A. R. A interpretação do Controle de Materiais de Acabamentos e de Revestimento no processo de segurança contra incêndio e pânico. **E&S Engineering and Science**, v. 5, n. 2, p. 26-41, 2016.

DALL'ANTONIA, A. C. *et al.* Caracterização mecânica e térmica da borracha natural formulada e vulcanizada dos clones: GT 1, IAN 873, PB 235 e RRIM 600. **Polímeros**, v. 19, p. 63-71, 2009.

DENOËL, J. **Fire safety and concrete structures**. Brussels: Federation of Belgian Cement Industry, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA (DNIT). **DNIT 064**: Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

DIAS, M. R. **Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo da via-seca**: execução de um teste experimental urbano em Porto Alegre/RS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DOHERTY, P. *et al.* Explosive spalling of concrete columns with steel and polypropylene fibres subjected to severe fire. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 3, n. 1, p. 95-104, 2012.

DUTRA, R. C. L. *et al.* Determinação do teor de NR/SBR em misturas: associação de dados DTG e FT-IR. **Polímeros**, v. 14, n. 5, p. 334-348, dez. 2004.

EHRENBRING, H. Z. **Comportamento de concretos reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

EUROREC: ENVIRONMENTAL SOLUTIONS FOR WASTE RECYCLING. **Steel tire wire**. 2018. Disponível em: <http://www.europeanrecycle.com/it/steelwire/steel-tire-wire/>. Acesso em: 22 maio. 2018.

FASIHNIKOUTALAB, M. H. *et al.* New insights into potential capacity of olivine in ground improvement. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 20, n. 8, p. 2137-2148, 2015.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2011.

FERNANDES, B. *et al.* Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais** v. 10, n. 4, p. 838-850, 2017.

FERREIRA, U. C. *et al.* Estudo da viabilidade mecânica da substituição parcial do agregado miúdo natural pela borracha de pneu moído para produção de matrizes de cimento Portland. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno (CFP). **Téchne**, v. 10, n. 66, p. 48-51, 2002.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil USP, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 50. 2008. **Anais** [...]. Salvador: Insituto Brasileiro do Concreto, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability analysis of steel fiber reinforced concrete using slump and Ve-Be test. **Materials Research**, v. 18, n. 6, p. 1284-1290, 2015.

FIGUEIREDO, F. P. *et al.* Effects of recycled steel and polymer fibres on explosive fire spalling of concrete. **Fire Technology**, v. 55, n. 5, p. 1495-1516, 2019.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação da resistência à compressão, impacto e absorção de água em blocos para pavimentos intertravados com concreto acrescido de resíduos de pneus. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2009. **Anais** [...]. Curitiba: Insituto Brasileiro do Concreto, 2009.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Materiais) – Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

G1. **Incêndio em depósito destrói cerca de 100 toneladas de borracha em MG**. 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2011/06/incendio-em-deposit-o-destrui-cerca-de-100-toneladas-de-borracha-em-mg.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impactos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GIACOBBE, S. **Estudo do comportamento físico-mecânico do concreto de cimento Portland com adição de borracha de pneus**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GIACOBBE, S.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto de cimento Portland com borracha de pneus**. São Paulo: EPUSP, 2008.

GIL, A. M. **Contribuição ao estudo de dosagem de concretos autoadensáveis reforçados com fibras metálicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

GOBBI, A. J. D. **Reaproveitamento de pneus inservíveis como fonte de energia e matéria-prima**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, A. M. V. **Chips de pneus: substituto de brita calcária em aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

GOREMINKINS, V. *et al.* Experimental investigation on SFRC behaviour under elevated temperature. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 8, n. 3, p. 287-299, set. 2017.

GRAEFF, A. *et al.* Análise da longa-duração de concretos reforçados com fibras de aço recicladas de pneus inservíveis para aplicação em pavimentos de concreto. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 53., 2011. **Anais [...]**. Florianópolis: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011.

GRAEFF, A. G. **Long-term performance of recycled steel fibre reinforced concrete for pavement applications**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Civil and Structural Engineering, Centre for Cement and Concrete, University of Sheffield, Sheffield, 2011.

GRIPPI, S. **Lixo: reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

GRISON, E. C. **Borrachas e seus aditivos: componentes, influências e segredos**. Porto Alegre: Suliani Letra e Vida, 2010.

GUARNIERI, P. **Logística Reversa: em busca do equilíbrio econômico e ambiental**. Joinville: Clube de Autores, 2017.

GUEDON, P. Design, dimensioning and execution of precast steel fibre reinforced concrete arch segments. **Tunnels et Espace Souterrain**, v. 238, p. 312-324, jun. 2013.

GUJEL, A. A. *et al.* Incorporação de pó de pneu em uma formulação para banda de rodagem de pneu de motocicleta. **Polímeros**, v. 18, n. 4, p. 320-325, 2008.

GUL, M.; BASHIR, A.; NAQASH, J. A. Study of modulus of elasticity of steel fiber reinforced concrete. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, v. 3, n. 4, p. 304-309, 2014.

GUNEYISI, E. *et al.* Experimental investigation on durability performance of rubberized concrete. **Advances in Concrete Construction**, v. 2, n. 3, p. 193-207, nov. 2014.

GUO, S. *et al.* Evaluation of properties and performance of rubber-modified concrete for recycling of waste scrap tire. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 681-689, abr. 2017.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 562-574, dez. 2014.

GURSEL, A.; AKCA, E.; SEN, N. A review on devulcanization of waste tire rubber. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, v. 6, n. 1, p. 154-160, out. 2018.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, v. 61, n. 1, p. 1-10, 2013.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BARLUENGA, G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 109-117, 2004.

HONÓRIO, N. A.; OLIVEIRA, R. L. Frequência de larvas e pupas de *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* em armadilhas, Brasil. **Revista Saúde Pública**, v. 35, n. 4, p. 385-391, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS (IBAMA). Instrução Normativa nº 8 de 15 de maio de 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, p. 68, 15 maio 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Instrução Normativa nº 1 de 18 de março de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, seção 1, p. 53-54, 19 mar. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE (INMETRO). Portaria nº 5. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 17-20, 19 jan. 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE (INMETRO). **Portaria nº 554, de 29 de outubro de 2015**. Brasília: INMETRO, 2015. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002331.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834-1**: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements. Genebra: ISO, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1182**: Reaction to fire tests for products - Non-combustibility test. Genebra: ISO, 2010.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). **SF4 – Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete.**

Japan: JSCE, 1984.

KALIFA, P.; MENNETEAU, É.; QUENARD, D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 12, p. 1915-1927, 2001.

KHOURY, G. A. *et al.* **Bulletin 38: Fire design of concrete structures: materials, structures and modelling** Fédération internationale du béton (FIB): fib Bulletins. Lausanne: The International Federation for Structural Concrete, 2007.

KIM, K. Y.; YUN, T. S.; PARK, K. P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. **Cement and Concrete Research**, v. 50, p. 34-40, 2013.

KITCHEN, A. Polypropylene fibres reduce explosive spalling in fire. **Concrete**, London, v. 35, n. 4, p. 40-41, 2001.

KOBAYASHI, A. G.; PIMENTEL, L. L.; ELISABETE, A. E. P. G. Avaliação da viabilidade técnica de concretos contendo borracha aplicados à sinalização rodoviária. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 52., 1999. **Anais [...]**. Fortaleza: Insituto Brasileiro do Concreto, 1999.

KODUR, V. Properties of concrete at elevated temperatures. **ISRN Civil Engineering**, v. 2014, p. 1-15, 2014.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus: coleta e reciclagem de pneus.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Centro de Aperfeiçoamento Tecnológico, São Paulo, 2004.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Logística reversa dos pneus usados no Brasil. **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 49-58, 2013.

LAU, A.; ANSON, M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1698-1707, 2006.

LENTH, R. *et al.* **Emmeans**: Estimated Marginal Means, aka Least-squares Means. 2019. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/>. Acesso em: 18 dez. 2019.

LI, G. *et al.* Waste tire fiber modified concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 35, n. 4, p. 305-312, jan. 2004.

LIM, S.; MONDAL, P. Micro and nano-scale characterization to study the thermal degradation of cement-based materials. **Materials Characterization**, v. 92, p. 15-25, jun. 2014.

LIMA, R. C. A. *et al.* O concreto de alto desempenho em temperaturas elevadas. *In*: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003. **Anais [...]**. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2003. p. 1-12.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

LIMA, R. C. A. *et al.* Efeito de altas temperaturas no concreto. *In*: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2., 2004. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

LOPES, R. E. *et al.* Estudo de dosagens para obter concretos com resíduos de borracha de pneus. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47., 2005. **Anais [...]**. Recife: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

LORENZI, L. S. **Análise crítica e proposições de avanço nas metodologias de ensaios experimentais de desempenho à luz da ABNT NBR 15575 (2013) para edificações habitacionais de interesse social Térreas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MACEDO, D. C. B.; TUBINO, R. M. C. Comportamento térmico e acústico de placas pré-moldadas com borracha de pneu. *In*: ENCONTRO REGIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005. **Anais [...]**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2005. p. 1-13.

MAIA, Y. F. *et al.* Estudo da estabilidade térmica de pneumáticos através da TG, DTG e DSC. *In*: ENCONTRO REGIONAL DE QUÍMICA, 5., 2015; ENCONTRO NACIONAL DE QUÍMICA, 4., 2015. **Anais [...]**. São Paulo: Edgard Blücher, nov. 2015.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

MARIE, I. Zones of weakness of rubberized concrete behavior using the UPV. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 217-222, mar. 2016.

MARQUES, A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MARQUES, A. C. *et al.* Influence of the surface treatment of tire rubber residues added in mortars. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 1, n. 2, p. 113-120, 2008.

MARQUES, A. C.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. Análise da resistência mecânica à compressão de concretos incorporados com resíduos de pneus submetidos à elevada temperatura. **Tópos**, v. 6, n. 1, p. 82-97, 2012.

MARQUES, A. C.; NIRSCHL, G. C.; AKASAKI, J. L. Propriedades mecânicas do concreto adicionado com borracha de pneus. **HOLOS Environment**, v. 6, n. 1, p. 31-41, 2006.

MARQUES, A. F. M. **Comportamento ao fogo de betão com agregados reciclados de borracha**. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MAZZUCCO, G.; XOTTA, G. Fire spalling prevention via polypropylene fibres: a meso- and macroscale approach. **Modelling and Simulation in Engineering**, v. 2016, p. 1-11, 2016.

MEHERIER, M. S. **Investigation of mechanical and durability properties of cement mortar and concrete with varying replacement levels of crumb rubber as fine aggregate**. Thesis (Degree of Master of Applied Science) – University of British Columbia, Kelowna, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, C. H. A. S. *et al.* Influência da temperatura no desempenho de concretos reforçados com fibras curtas de aço. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 1., 2002. **Anais [...]**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2002. p. 229-235. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbecimat/2002/arqs_pdf/pdf_100/tc101-088.pdf. Acesso em: 26 jun. 2020.

MENEGUINI, E. C. A. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

MENEZES, V. J. **Avaliação das emissões oriundas da degradação térmica de pneus**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MITIDIERI, M. L.; LOSHIMOTO, E. **Proposta de classificação de materiais e componentes construtivos com relação ao comportamento frente ao fogo: Reação ao fogo**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MOREIRA, M. A. B. **Estudo da influência do teor de umidade na resistência ao fogo de placas maciças pré-fabricadas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2017.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis: o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 167-184, 2008.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. A review of the fresh and hardened properties and applications for plain and self-compacting rubberised concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2043-2051, nov. 2010.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Guide for the design and construction of fiber-reinforced concrete structures (CNR-DT 204/2006)**. Roma: Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOOR, N. B. M. **Physical performance and durability evaluation of rubberized concrete**. Thesis (Doctorate in Engineering) – Kyushu University. Department of Civil and Structural Engineering, Graduate School of Engineering, Fukuoka, 2014.

NOVÁK, J.; KOHOUTKOVA, A. Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature. **Fire Safety Journal**, v. 95, p. 66-76, jan. 2018.

NOVÁK, J.; KOHOUTKOVÁ, A. Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 246, n. 1, p. 1-7, 2017.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 1, jan./mar., p. 97-113, 2007.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando à durabilidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016.

PARANÁ. **Desperdício zero**: pneus. Curitiba: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2005. Disponível em: http://www.meioambiente.pr.gov.br/arquivos/File/cors/kit_res_8_pneus.pdf. Acesso em: 30 dez. 2017.

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEHLKEN, A.; ESSADIQI, E. **Scrap tire recycling in Canada**. Hamilton: CANMET Materials Technology Laboratory, 2005.

PENG, G. F.; HUANG, Z. S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 593-599, abr. 2008.

PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; TLEMAT, H. Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability**, v. 157, n. 3, p. 131-138, 2004.

PINHEIRO, I. C. *et al.* Estudo comportamental de concreto de cimento Portland produzido com resíduos de pneu. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

PORTAL O DIA. **SEMAM faz encaminhamento de pneus inservíveis de aterro**. 2016. Disponível em: <http://www.portalodia.com/municipios/picos/>. Acesso em: 5 out. 2017.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

QUINTERO, E. C. H. **Construção e implantação de recifes artificiais em comunidades pesqueiras, usando pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

R CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing**. 2019. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 18 dez. 2019.

RECICLANIP. **Destinados**. 2020a. Disponível em: <http://www.reciclanip.org.br/destinados/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

RECICLANIP. **Pontos de coleta e formas de destinação**. 2020b. Disponível em: <http://www.reciclanip.org.br/pontos-de-coleta/o-que-sao/>. Acesso em: 20 jun. 2020.

REIS, L. C.; DUARTE, M. C. R.; SILVA, A. J. P. Análise do concreto adicionado com raspas de pneus. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 52., 2010. **Anais** [...]. Fortaleza: Instituto Brasileiro do Concreto, 2010.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX, SYSTÈMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES (RILEM). **RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability**. Europe: RILEM, 1999.

RODGERS, B.; WADDELL, W. Tire Engineering. *In: MARK, J. E.; ERMAN, B.; EIRICH, F. R. (eds.). Science and Technology of Rubber*. San Diego: Elsevier, 2005. p. 619-622.

RODRIGUEZ, A. L.; LÓPEZ, D. A. R.; VAZ, M. J. Reaproveitamento do resíduo de borracha para fabricação de placas pré-moldadas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, 17., 2006. **Anais** [...]. São Paulo: UNESP, 2006. p. 4023-4031.

SANTOS, A. C. **Avaliação do comportamento do concreto com adição de borracha obtida a partir da reciclagem de pneus com aplicação em placas pré-moldadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.

SANTOS, G. R. F. *et al.* Análise de concreto com adição de resíduo de borracha de pneu. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SCHIMELFENIG, B. *et al.* Estudo da utilização de agregado reciclado de borracha de pneus como substituição da areia natural em concretos convencionais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais** [...]. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SCURACCHIO, C. H.; WAKI, D. A.; BRETAS, R. E. S. Caracterização térmica e reológica de borracha de pneu desvulcanizada por microondas. **Polímeros**, v. 16, n. 1, p. 46-52, 2006.

SECRETARIAT BASEL CONVENTION. **Technical guidelines on hazardous wastes: identification and management of used tires**. Geneva: Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal, Basel Convention Series n° 99/008, 1999.

SEGRE, N. C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. *In: SEITO, A. I. et al. A segurança contra incêndio no Brasil*. São Paulo: Projeto, 2008. p. 35-54.

SHANKAR, K. G.; RAO, G. V. R. Variation of sorptivity in diverse grades of concrete proportioned with fly ash, woodhusk ash and rice husk ash. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, n. 12, p. 1626-1633, 2017.

SHULMAN, V. L. **Tyre recycling**. Bruxelas: European Tyre Recycling Association, 2004.

SIEIRA, A. C. C. F. *et al.* Comportamento de um muro de pneus para estabilização de encostas. **Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia**, v. 91, n. 1, p. 39-55, 2001.

SILVA, A. T. **Estudo da desvulcanização ultrassônica da borracha de pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Minas, Metalúrgia e de Materiais) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SILVA, F. M. *et al.* Comparação das características do concreto de alto desempenho com adição de fibras de borracha de pneus e fibras de aço. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017a.

SILVA, S. K. M. *et al.* Estudo de concretos produzidos com substituição de agregado miúdo natural por agregado de borracha vulcanizada, proveniente da recapagem de pneus. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017b.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

SIMONETTI, C. *et al.* Residual mechanical properties of concretes made with steel fiber taken from waste tires after exposure to high temperatures. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS - ENVIRONMENT AND LOADING*, 9., 2019. **Anais [...]**. Disponível em: <https://app.eventelis.com/consec/proceedings/5ca6e03e5ca4f0d406ac88b3>. Acesso em: 26 jun. 2020.

SINDICATO DAS EMPRESAS DE REVENDA E PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS DE REFORMA DE PNEUS E SIMILARES (SINDIPNEUS). **Manual TWI**: Informações técnicas sobre pneus. Belo Horizonte: SINDIPNEUS, 2012. Disponível em: http://sindi.pneus.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2013/04/manual_TWI_20121.pdf. Acesso em: 29 fev. 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS CÂMARAS DE AR E CAMELBACK (SINPEC). **Fabricação do pneu**. São Paulo: SINPEC, 2020. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/fabricacao/>. Acesso em: 29 fev. 2020.

SMRKIĆ, M. F.; DAMJANOVIĆ, D.; BARIČEVIĆ, A. Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading. **Graevinar: Časopis Hrvatskog Saveza Graevinskih Inženjera**, v. 69, n. 10, p. 893-905, 2017.

SOUSA, F. S. *et al.* Análise da morfologia de fratura do concreto com resíduos de pneus inservíveis. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO*, 59., 2017. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto Brasileiro do Concreto, 2017.

SOUZA, A. N. **Muro de contenção utilizando pneus: análise e alguns comparativos de custos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J. Evaluation of the SR Portland cement against sodium and magnesium sulfate attack: a physical and comparative analysis of mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1053-1075, out. 2018.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

STUTZMAN, P. E.; FENG, P.; BULLARD, J. W. Phase analysis of Portland cement by combined quantitative X-ray powder diffraction and scanning electron microscopy. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 121, p. 47-107, 2016.

SUGAPRIYA, P.; RAMKRISHNAN, R. Crumb rubber recycling in enhancing damping properties of concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 310, p. 1-10, fev. 2018.

SUKONTASUKKUL, P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1084-1092, 2009.

TASCA, M. *et al.* Estudo da viabilidade de adição de fibras de aço no concreto exposto ao ambiente marítimo: análise da melhoria das propriedades de resistência. *In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA*, 4., 2010. **Anais [...]**. Rio Grande: FURG, 2010. p. 1-13.

TLEMAT, H. **Steel fibres from waste tyres to concrete: testing, modelling and design**. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Civil and Structural Engineering, Centre for Cement and Concrete, University of Sheffield, Sheffield, 2004.

TOPÇU, I. B. The properties of rubberized concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 304-310, 1995.

TORNELLI, A. F. A importância da reforma de pneus no combate à dengue. **Pneus&Cia**, v. 8, n. 51, p. 12-16, 2016.

TOUTANJI, H. A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, n. 2, p. 135-139, 1996.

TRIGO, A. P. M. **Estudo de lajes com adição de resíduo de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; RIBEIRO, D. V. Durabilidade do concreto submetido a situações extremas: resistência a ciclos de gelo e degelo e à ação do fogo. *In*: RIBEIRO, D. V. (ed.). **Corrosão e degradação em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e técnicas de análise e intervenção. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2018. p. 191-241.

VAN CHANH, N. Steel fiber reinforced concrete. **JSCE-VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering**, n. 1, p. 108-116, 2005.

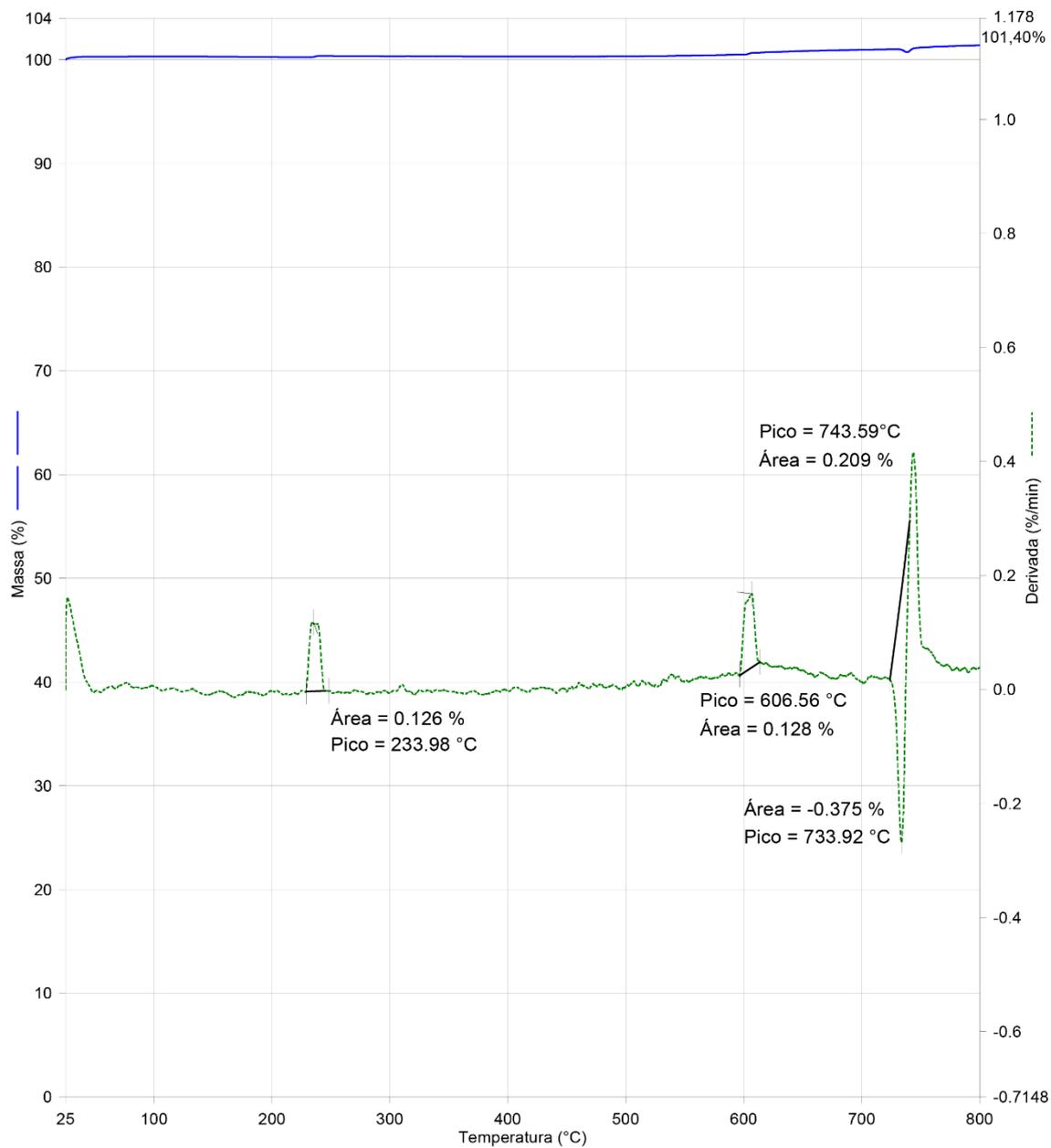
VELASCO, R. V. **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço**: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

YESILATA, B.; BULUT, H.; TURGUT, P. Experimental study on thermal behavior of a building structure using rubberized. **Energy and Buildings**, v. 43, p. 393-399, 2011.

YOUSSF, O. *et al.* An experimental investigation of crumb rubber concrete confined by fibre reinforced polymer tubes. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 522-532, 2014.

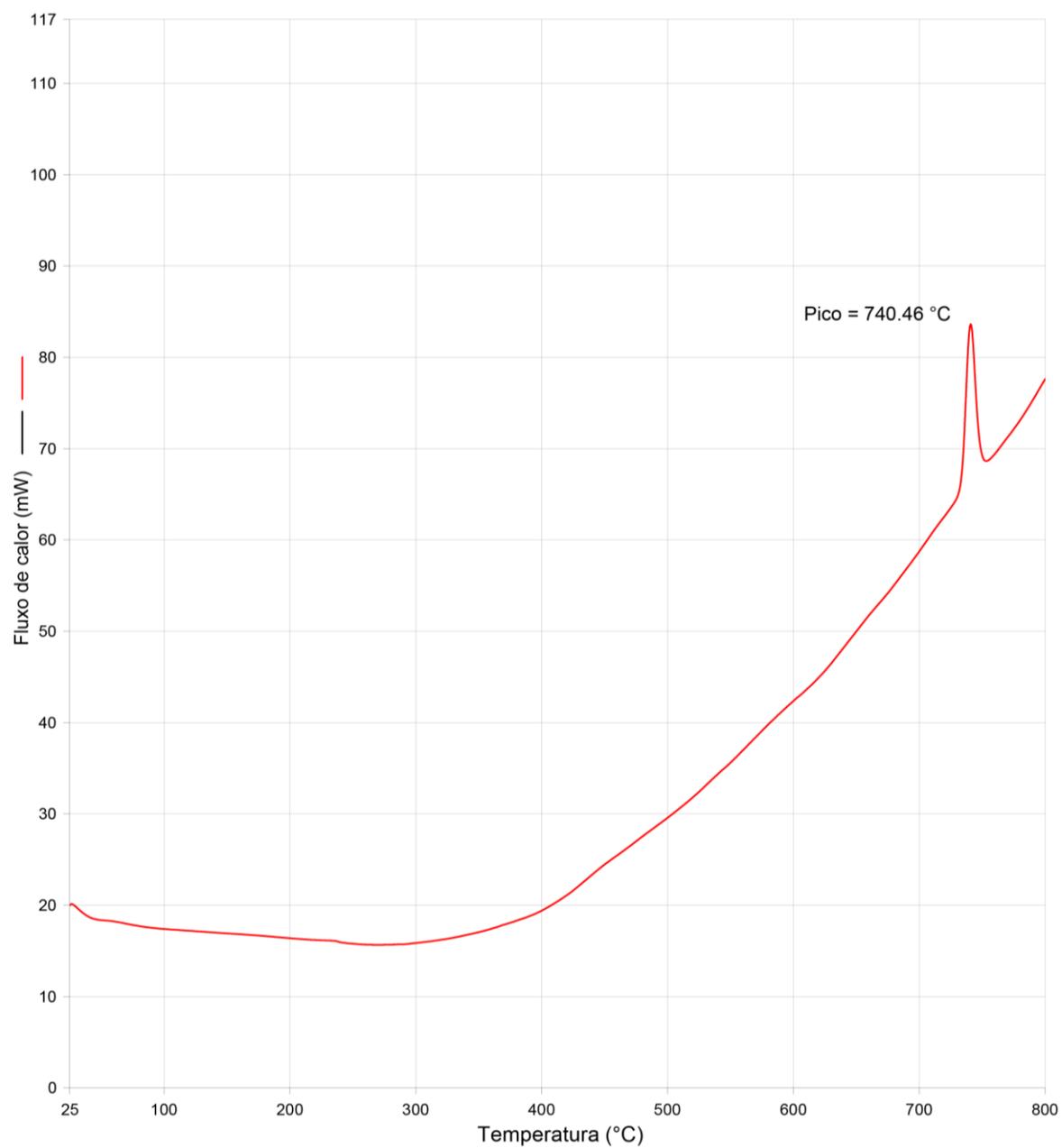
APÊNDICE A – ANÁLISE TÉRMICA DA FIBRA METÁLICA RECICLADA

Primeiro ensaio – TGA e DTGA



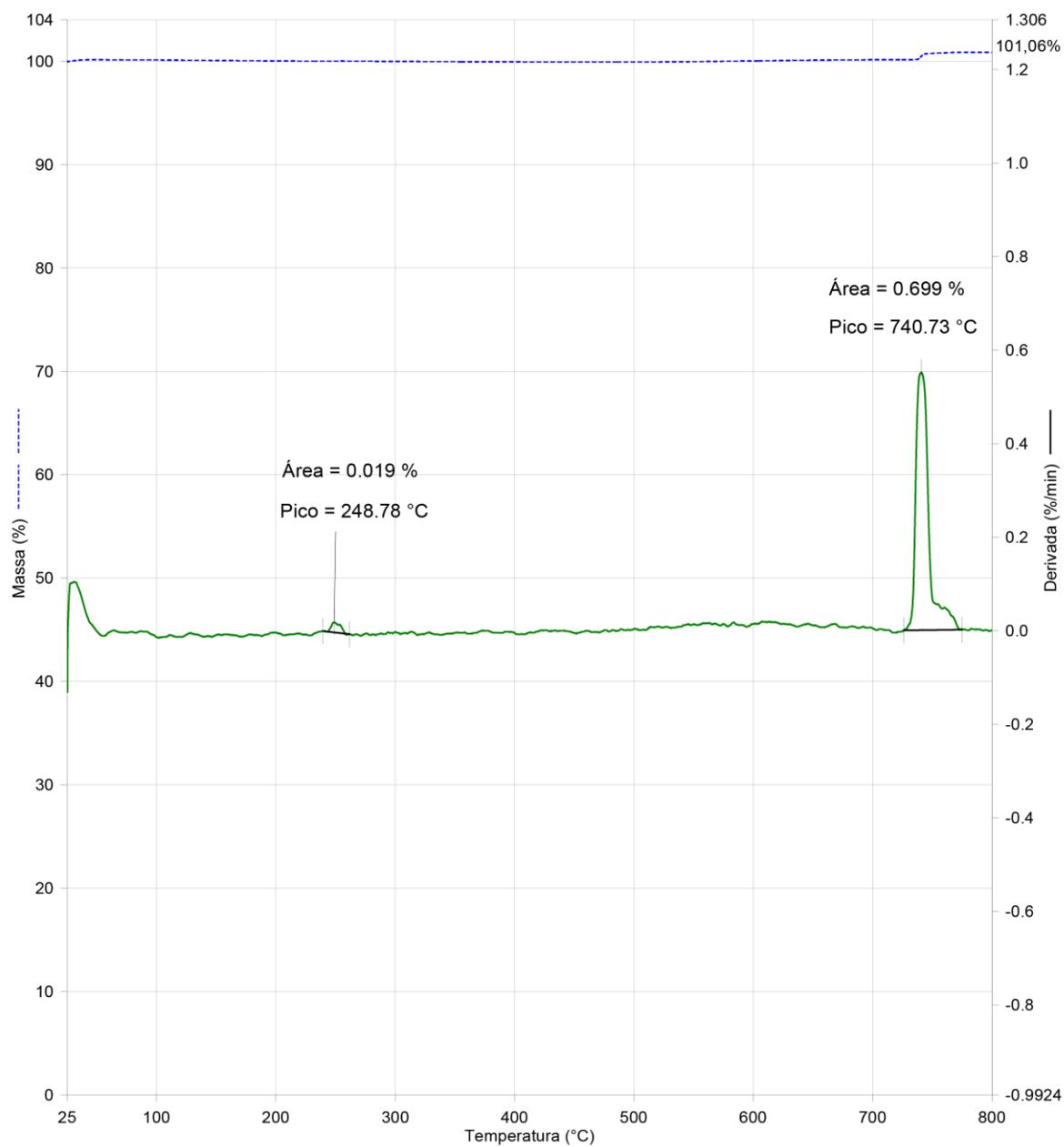
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Primeiro ensaio – DSC



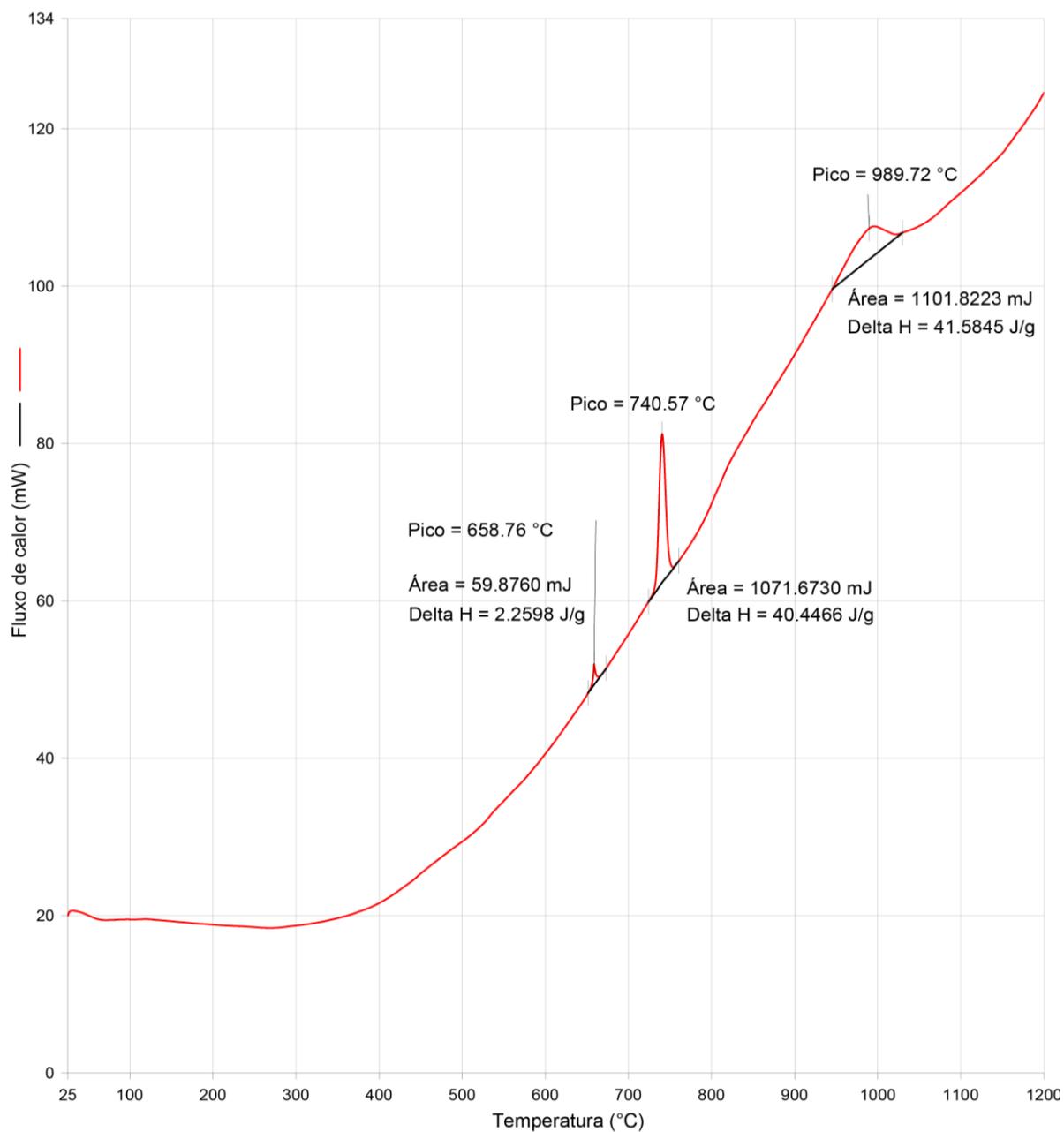
Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Segundo ensaio – TGA e DTGA



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Segundo ensaio – DSC



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

APÊNDICE B – RESULTADOS DE FRX

* Padrão de Granito JG1A tabelado pelo Geostandards.

Amostra	Profundidade	SiO₂	Al₂O₃	TiO₂	Fe₂O₃	MnO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	P₂O₅	LOI	Total
JG1A* tabelado	-	72,19	14,22	0,25	2,05	0,06	0,69	2,13	3,41	4,01	0,08	0,59	99,68
JG1A lido GRP2	-	72,54	15,41	0,33	2,34	0,07	1,24	2,67	3,48	4,49	0,1	0,59	103,26
REF TEMP AMB	-	58,65	3,32	0,2	2,93	0,05	3,41	22,41	0,51	0,87	0,05	7,6	100,00
REF	2 cm	51,81	6,97	0,38	9,09	0,14	11,03	16,73	0,78	0,57	0,06	2,45	100,01
REF	4 cm	55,52	6,33	0,31	7,32	0,11	8,99	17,32	0,73	0,62	0,05	2,69	99,99
REF	6 cm	54,81	7,2	0,35	7,61	0,12	9,85	16,64	0,8	0,58	0,06	1,98	100,00
REF	8 cm	55,48	6,16	0,32	7,13	0,11	8,87	18,45	0,71	0,67	0,06	2,04	100,00
BOR5%	2 cm	55,19	5,72	0,32	6,61	0,1	8,43	18,63	0,69	0,7	0,05	3,56	100,00
BOR5%	4 cm	56,2	5,36	0,32	6,57	0,1	8,2	18,64	0,66	0,69	0,06	3,21	100,01
BOR5%	6 cm	53,68	7,09	0,32	7,76	0,11	10,03	17,2	0,8	0,57	0,05	2,38	99,99
BOR5%	8 cm	53,45	6,63	0,32	7,43	0,11	9,06	19,11	0,76	0,66	0,06	2,41	100,00
BOR10%	2 cm	51,1	7,18	0,31	6,73	0,1	7,56	21,56	0,89	0,78	0,07	3,73	100,01
BOR10%	4 cm	47,37	6,54	0,33	7,83	0,12	8,93	23,77	0,76	0,72	0,08	3,57	100,02
BOR10%	5 cm	49,03	6,82	0,33	6,87	0,1	7,89	24,11	0,79	0,69	0,08	3,3	100,01
FIB0,5%	2 cm	55,6	6,37	0,28	6,02	0,09	7,18	19,12	0,79	0,79	0,05	3,7	99,99
FIB0,5%	4 cm	57,36	6,46	0,31	6,62	0,1	7,85	17,02	0,8	0,73	0,06	2,7	100,01
FIB0,5%	6 cm	52,97	7,81	0,36	8,81	0,13	10,76	15,67	0,59	0,88	0,05	1,97	100,00
FIB0,5%	8 cm	52,08	7,85	0,38	9,3	0,14	11,64	14,43	0,88	0,59	0,06	2,67	100,02
FIB1,5%	2 cm	54,12	5,97	0,3	6,71	0,09	6,94	22,26	0,8	1,12	0,06	1,63	100,00
FIB1,5%	4 cm	53,24	5,94	0,36	7,3	0,11	7,21	22,96	0,81	0,97	0,07	1,03	100,00
FIB1,5%	6 cm	59,44	4,97	0,26	5,37	0,08	5,98	19,52	0,68	0,89	0,05	2,75	99,99
FIB1,5%	8 cm	55,44	5,44	0,32	6,39	0,09	6,9	21,28	0,69	0,84	0,06	2,55	100,00

