

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Estudo da influência das propriedades relacionadas à
superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos
para pisos**

Cristina Vitorino da Silva

Orientadora: Denise C. C. Dal Molin

Porto Alegre
2015

Cristina Vitorino da Silva

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES
RELACIONADAS À SUPERFÍCIE E À MATRIZ NA RESISTÊNCIA
À ABRASÃO DE CONCRETOS PARA PISOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em
Engenharia

Porto Alegre

2015

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Cristina Vitorino

Estudo da influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos / Cristina Vitorino Silva. -- 2015.

242 f.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. pisos de concreto. 2. desgaste superficial. 3. resistência à abrasão. 4. camada superficial. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient. II. Título.

CRISTINA VITORINO DA SILVA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES
RELACIONADAS À SUPERFÍCIE E À MATRIZ NA RESISTÊNCIA
À ABRASÃO DE CONCRETOS PARA PISOS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, na área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2015

Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Dr. Carlos Torres Formoso
PhD, University of Salford
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Marques Filho (UFPR)
Dr. pela UFRGS

Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade (PUC)
Dr. pela UFRGS

Prof. a. Dra. Angela Borges Masuero (UFRGS)
Dra. pela UFRGS

Aos meus pais, Hélio e Nedi, que sempre me proporcionaram apoio e as condições necessárias para a realização deste objetivo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Hélio e Nedi, pelo amor, educação, dedicação e esforços inacreditáveis que me conduziram e conduzirão a todas minhas conquistas, e pelos quais serei eternamente grata. Obrigada por tudo.

Aos meus irmãos, Cristiano e Vanessa, pela amizade, dignidade e respeito que sempre tivemos um pelo outro.

Ao Alexandre, por todo o amor, dedicação, compreensão, companheirismo e amizade, e por tornar meus dias mais felizes.

Um agradecimento especial à minha orientadora, professora Denise Dal Molin, pela orientação, conhecimento transmitido, experiência e sabedoria para transpor todos os obstáculos.

Aos professores do Norie, Ângela B. Masuero, Carlos T. Formoso, Luis C. Bonin, Miguel A. Sattler e Ana Paula Kirchheim, pelos conhecimentos transmitidos e por estarem sempre dispostos a ajudar.

Aos laboratoristas Airton, Gilmar e Demétrius pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao IMC da UCS, em especial à professora Janete Zorzi e à engenheira química Kátia de Oliveira, pelo apoio na realização dos experimentos.

Ao LdSM da UFRGS, pela disponibilidade e auxílio prestados para a realização desta pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica, Felipe, Gustavo e Elias pelo auxílio durante as moldagens e execução dos experimentos. Aos demais alunos de iniciação científica, os quais sempre buscaram auxiliar nas atividades de laboratório.

Aos amigos e colegas de turma do Norie pela amizade, competência e alegria com que cada um trabalha, tornando nosso dever muito mais gratificante.

Agradeço ao CNPQ pelo apoio financeiro à pesquisa.

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste objetivo. Muito Obrigada!

“O único homem que está isento de erros,
é aquele que não arrisca acertar.”

Albert Einstein

RESUMO

SILVA, C. V. **Estudo da influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos**. 2015. Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O desgaste superficial por abrasão é uma manifestação patológica que decorre do atrito entre partículas secas e a superfície do material, causando uma perda progressiva das camadas mais externas da estrutura. Entender esse mecanismo de deterioração e ainda os parâmetros que influenciam a sua ocorrência são preocupações válidas, visto que ele compromete a durabilidade e a funcionalidade de estruturas, tais como pisos de concreto. Além disso, a correção desta manifestação patológica exige gastos elevados com reparo ou substituição do concreto e, dessa maneira, a necessidade de maiores estudos buscando ações mais efetivas na prática é justificada. Neste particular, estudou-se a influência das propriedades relacionadas à matriz e à superfície na resistência à abrasão dos compósitos. Para tanto, alguns fatores que influenciam na qualidade dos concretos empregados em pisos, como o tipo de cimento (CP IV; CP V-ARI), a relação água/aglomerante (0,40; 0,60), o teor de substituição de sílica ativa (0%; 10%) e o tipo de cura (submersa; caixa aquecida) foram avaliados. Os ensaios adotados para estudar a influência das propriedades de massa no mecanismo de desgaste foram os de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e exsudação. Já os ensaios para verificar a influência das propriedades de superfície na magnitude desse mecanismo foram os de dureza superficial, resistência à abrasão, porosimetria por intrusão de mercúrio, microdureza por indentação, análises em microscópio estereoscópico e a digitalização tridimensional à laser. Os resultados encontrados mostraram uma influência estatística significativa do tipo de cimento sobre todas as propriedades avaliadas, sendo que o cimento de alta resistência inicial apresentou melhor desempenho em comparação ao cimento pozolânico, considerando uma mesma idade de análise (63 dias). Além disso, verificou-se uma influência estatística significativa da relação a/agl no comportamento dos concretos, onde a relação a/agl 0,6 aumentou os índices de desgaste das amostras em relação as de referência (a/agl 0,4), conforme esperado. Quanto ao tipo de cura, os compósitos curados de forma submersa apresentaram os melhores resultados frente ao desgaste superficial comparando-se àqueles mantidos na cura em caixa aquecida. Finalmente, analisando o teor de substituição de sílica ativa, observou-se que a substituição de 10 % sobre a massa de cimento proporcionou acréscimos estatisticamente significativos na resistência à abrasão das amostras com menor relação a/agl; somando-se a isto, a presença da sílica minimizou o efeito da cura em caixa aquecida na camada superficial das amostras de concreto submetidas ao desgaste. Concluindo, a resistência à abrasão dos concretos mostrou ter uma importante relação não somente com as suas propriedades de massa, mas também com a qualidade da sua camada superficial, uma vez que apresentou forte correlação com as características de superfície avaliadas, como a dureza superficial, a microdureza e a porosimetria ao mercúrio. Além disso, salienta-se que o ensaio de dureza superficial por esclerometria poderia ser adotado como parâmetro para determinação direta da resistência ao desgaste e sugere-se que a exsudação dos pisos de concreto venha a ser o fator principal no controle da qualidade da camada superficial da placa de concreto.

Palavras-chave: pisos de concreto, desgaste superficial, resistência à abrasão; camada superficial.

ABSTRACT

SILVA, C. V. **Study on the influence of properties related to the surface and matrix in the abrasion resistance of concrete floors.** 2015. Thesis (Engineering Ph.D.) – Civil Engineering Post Graduated Program, UFRGS, Porto Alegre.

Surface abrasion wear is a pathological manifestation triggered by friction between dried particles and the surface of the material, provoking a progressive loss of the outermost layers. The comprehension of this mechanism of deterioration and also the parameters that influence its occurrence are valid concerns, since it compromises the durability and functionality of structures such as concrete floors. In addition, repair this pathological manifestation or replace the damage concrete require high expenditure. Thus, the necessity of further studies seeking for practical effective actions is justified. In this particular, the aim of this work was to study the influence of properties related to the matrix and the surface of composites on abrasion resistance. For this purpose, some factors that influence the quality of the concrete used in floors, including the cement type (CP IV; CP V-ARI), the water / binder ratio (0.40, 0.60), the replacement content of silica fume (0%, 10%) and the conditions of cure (submerged; heat box) were evaluated. The assays employed in order to study the influence of mass properties on the wear mechanism were the compressive strength, flexural tensile strength and bleeding. As regards to the influence of surface properties on the magnitude of this mechanism, it was verified by testing the surface hardness, abrasion resistance, porosimetry by mercury intrusion, microhardness by indentation, analysis in stereoscopic microscope and three-dimensional laser scanning. The obtained data demonstrated a statistically significant influence of cement type on all assessed properties, with the high early strength cement presenting a better performance as compared to pozzolan cement, considering a similar age of analysis (63 days). Furthermore, there was a statistically significant influence of water / binder ratio on concrete behavior, where the water / binder ratio of 0.6 increased the wear rates of the samples in comparison to the reference (water / binder 0.4), as expected. Regarding to the conditions of cure, the submerged composites showed better results against surface wear as compared to those kept in the heat box. Finally, it was observed that the replacement content of silica fume of 10% on the cement mass provided statistically significant increases in abrasion resistance of samples with lower water / binder ratio. In addition, the presence of silica minimized the effects of curing in a heat box on the surface layer of concrete samples that were submitted to wear. In conclusion, the abrasion resistance of concretes demonstrated an important relationship not only with the mass properties of these structures but also with the quality of their surface layer, since a strong correlation with the evaluated surface features was observed, including surface hardness, microhardness and porosimetry by mercury intrusion. Moreover, it is emphasized that the surface hardness assay by rebound hammer may be used as a parameter for direct determination of wear resistance and it is suggested that bleeding of concrete floors might be the main factor for controlling the surface layer quality of the concrete slab.

Keywords: concrete floors, surface wear, abrasion resistance; surface layer.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE EQUAÇÕES	22
LISTA DE SIGLAS.....	23
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	24
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA.....	28
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	33
1.3 QUESTÃO DE PESQUISA	35
1.4 OBJETIVOS.....	35
1.4.1 Objetivo Principal.....	35
1.4.2 Objetivos Secundários.....	35
1.5 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	36
1.6 ORIGINALIDADE.....	38
1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA	38
2 DESGASTE SUPERFICIAL DE MATERIAIS.....	40
2.1 DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO	42
2.1.1 Definições	42
2.1.2 Mecanismos Envolvidos.....	43
2.1.3 Consequências do Desgaste Abrasivo	43
2.2 DESGASTE SUPERFICIAL EM CONCRETOS.....	44
2.2.1 Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos	47
2.2.2 Fatores que Intervém no Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos.....	49
2.2.2.1 Relação água/cimento.....	50

2.2.2.2	Consumo de Cimento.....	52
2.2.2.3	Agregados	53
2.2.2.4	Fibras e Adições Minerais	56
2.2.2.5	Exsudação	62
2.2.2.6	Tratamento Superficial	64
2.2.2.7	Cura	66
2.2.3	Métodos para Avaliação do Desgaste Abrasivo	71
2.2.3.1	ABNT NBR 12042	72
2.2.3.2	Cientec	72
2.2.3.3	Abrasão Los Angeles – NBR NM 51	72
2.2.3.4	ASTM C 779	73
3	ESTUDO PRELIMINAR.....	74
3.1	OBJETIVO	75
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL - FASE 1	75
3.2.1	Materiais Utilizados	76
3.2.1.1	Cimento	76
3.2.1.2	Agregado Miúdo	77
3.2.1.3	Agregado Graúdo	78
3.2.1.4	Sílica Ativa	79
3.2.1.5	Água	79
3.2.1.6	Aditivo	79
3.2.2	Dosagem Experimental	79
3.2.3	Quantidade de Material Empregada na Produção dos Concretos	80
3.2.4	Descrição dos Ensaios	80
3.2.4.1	Resistência à Compressão	80
3.2.4.2	Exsudação	80
3.2.4.3	Resistência à Abrasão.....	81
3.2.4.4	Dureza Superficial por Esclerometria.....	82
3.3	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
3.3.1	Resistência à Compressão Uniaxial.....	83
3.3.2	Exsudação.....	84
3.3.3	Dureza Superficial por Esclerometria.....	84
3.3.3.1	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	85
3.3.4	Resistência à Abrasão.....	87
3.3.4.1	Efeito do Tipo de Acabamento Superficial	88
3.3.4.2	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	89

3.4	CONCLUSÕES	92
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL - FASE 2.....	94
4.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	95
4.1.1	Variáveis de Resposta.....	95
4.1.1.1	Propriedades da matriz:	96
4.1.1.2	Propriedades de superfície:	96
4.1.2	Fatores Controláveis	97
4.2	MATERIAIS UTILIZADOS	101
4.2.1	Cimento	101
4.2.2	Agregados	103
4.2.2.1	Agregado Miúdo	103
4.2.2.2	Agregado Graúdo	103
4.2.2.3	Composição granulométrica entre os agregados graúdos	104
4.2.3	Sílica Ativa.....	105
4.2.4	Água	107
4.2.5	Aditivo.....	107
4.3	DOSAGEM EXPERIMENTAL.....	107
4.3.1	Produção dos Concretos	108
4.3.2	Moldagem dos Concretos	109
4.4	MÉTODOS DE ENSAIO	110
4.4.1	Resistência à Compressão Uniaxial.....	110
4.4.2	Resistência à Tração na Flexão.....	111
4.4.3	Exsudação.....	111
4.4.4	Resistência à Abrasão.....	112
4.4.5	Dureza Superficial por Esclerometria.....	113
4.4.6	Análise em Microscópio Estereoscópico	115
4.4.7	Digitalização Tridimensional a Laser.....	115
4.4.8	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	116
4.4.9	Microdureza da Superfície	119
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	123
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	123
5.1.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	124
5.1.2	Efeito da Relação a/agl	126
5.1.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	126

5.1.4	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e a Relação a/agl	128
5.1.5	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa.....	128
5.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	130
5.2.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	131
5.2.2	Efeito da Relação a/agl	133
5.2.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	133
5.2.4	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Substituição de Sílica Ativa ..	134
5.2.5	Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	135
5.2.6	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa.....	137
5.3	DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA	138
5.3.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	139
5.3.2	Efeito da Relação a/agl	141
5.3.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	141
5.3.4	Efeito do Tipo de Cura.....	142
5.3.5	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e a Relação a/agl	144
5.3.6	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Tipo de Cura.....	145
5.3.7	Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Tipo de Cura	147
5.3.8	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Tipo de Cura	149
5.3.9	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Tipo de Cura.....	150
5.4	EXSUDAÇÃO.....	151
5.5	RESISTÊNCIA À ABRASÃO	153
5.5.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	155
5.5.2	Efeito da Relação a/agl	157
5.5.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa	158
5.5.4	Efeito do Tipo de Cura.....	159
5.5.5	Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	160
5.5.6	Efeito da Interação entre o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Tipo de Cura	161
5.5.7	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Tipo de Cura	163
5.6	POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO	164
5.7	MICRODUREZA SUPERFICIAL	171
5.7.1	Influência da Relação a/agl	173
5.7.2	Influência da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	174
5.7.3	Influência da Relação a/agl e da Posição de Indentação na Amostra.....	175

5.8	DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL À LASER	177
5.9	CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO COM AS DEMAIS PROPRIEDADES ANALISADAS.....	182
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
6.1	CONCLUSÕES	193
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	201
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	203

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa	37
Figura 2: causas físicas da deterioração do concreto (adaptado de MEHTA; GERWICK, 1982 apud MEHTA; MONTEIRO, 2014).....	45
Figura 3: desgaste superficial em superfície de concreto (a) erosão (b) cavitação. Fonte: http://www.dcc.ufpr.br/wiki/images/0/01/TC031_Durabilidade.pdf (acesso em 20/08/2013).....	46
Figura 4: processo de perda de material por abrasão em superfície de concreto: (a) concreto novo, (b) desprendimento do material nos primeiros pontos com geração de poeira, (c) perda de pasta superficial e desprendimento dos grãos de areia mais finos e (d) formação de cratera – fim da vida útil do piso (adaptado de OLIVEIRA; LULA, 2006) .	49
Figura 5: resistência à abrasão de concretos: (a) influência da relação a/c; (b) influência do tipo de agregado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2014)	52
Figura 6: representação esquemática da exsudação em concreto recém-lançado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2014)	57
Figura 7: amostra laboratorial mostrando endurecedor superficial incorporado ao substrato de concreto (adaptado de GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008)	65
Figura 8: superfícies de concreto tratadas com endurecedores superficiais líquidos: (a) endurecedores à base de silicatos e (b) endurecedores à base de flúor-silicatos (OLIVEIRA; LULA, 2006)	66
Figura 9: influência das condições de cura e dos métodos de acabamento na resistência à abrasão das superfícies de concreto (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009).....	69
Figura 10: influência da porosidade na resistência ao desgaste por abrasão de concretos (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009).....	70
Figura 11: influência das condições de cura e da sua duração na resistência à abrasão de concretos, onde E1: 27 dias de imersão em água a 20 °C; E2: 6 dias de imersão em água a 20 °C, seguidos de 21 dias a 55 % UR e 20 °C; E3: 3 dias de imersão em água a 20 °C, seguidos de 24 dias a 55 % UR e 20 °C; E4: 27 dias a 55 % UR e 20 °C (adaptado de DHIR; HEWLETT; CHAN, 1991)	71
Figura 12: programa experimental - estudo preliminar	76
Figura 13: cilindro inclinado para coleta de água	81
Figura 14: coleta de água exsudada	81
Figura 15: registro das leituras após pesagem de água exsudada.....	81
Figura 16: desempenadeira metálica	82

Figura 17: acabamento superficial do concreto.....	82
Figura 18: amostra para o ensaio de resistência à abrasão.....	82
Figura 19: ensaio de resistência à abrasão.....	82
Figura 20: corpo-de-prova para o ensaio de esclerometria.....	83
Figura 21: ensaio esclerométrico.....	83
Figura 22: quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto.....	84
Figura 23: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto.....	85
Figura 24: tendência de comportamento para o tipo de acabamento superficial na dureza superficial do concreto.....	86
Figura 25: tendência de comportamento para o efeito da interação entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na dureza superficial do concreto.....	87
Figura 26: efeito isolado do tipo de acabamento superficial na resistência à abrasão do concreto.....	88
Figura 27: digitalização gráfica da superfície: amostra de concreto sem sílica ativa e sem acabamento.....	89
Figura 28: digitalização gráfica da superfície: amostra de concreto sem sílica ativa e com acabamento (“B”).....	89
Figura 29: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto.....	90
Figura 30: tendência de comportamento para o efeito da interação entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à abrasão do concreto.....	91
Figura 31: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto.....	91
Figura 32: programa experimental da pesquisa.....	95
Figura 33: montagem caixa aquecida.....	99
Figura 34: caixa aquecida em funcionamento.....	99
Figura 35: percentual de agregados graúdos (zona 4,75/12,5) na composição em função do volume de vazios.....	105
Figura 36: fôrma cilíndrica de 100 x 200 mm.....	110
Figura 37: fôrma prismática de 100 x 100 x 350 mm.....	110
Figura 38: cilindro metálico de 250 mm de diâmetro e 280 mm de altura.....	110
Figura 39: fôrma prismática de 250 x 350 x 100 mm.....	110
Figura 40: metodologia para obtenção das amostras para os ensaios de superfície.....	113

Figura 41: CP para o ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042	113
Figura 42: CP após ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042.....	113
Figura 43: equipamento para ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042.....	113
Figura 44: corpo de prova para o ensaio de esclerometria	114
Figura 45: ensaio esclerométrico	114
Figura 46: Digitalização Tridimensional à Laser das amostras de concreto	116
Figura 47: fragmentos de argamassa para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos.....	118
Figura 48: representação da curva carga-descarga da técnica de indentação instrumentada (adaptado de ZORZI; PEROTTONI, 2013).....	119
Figura 49: amostras destinadas ao ensaio de microdureza por indentação	121
Figura 50: Microdurômetro com ponteira Berkovich empregado na técnica de indentação instrumentada	121
Figura 51: posições de indentação nas amostras de concreto.....	122
Figura 52: micrografias de indentações em superfície de amostras de concreto com cimento CP V-ARI submetidas a cura submersa: (a) a/agl 0,4 - 10 % sa (b) a/agl 0,6 - 10 % sa	122
Figura 53: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto	125
Figura 54: efeito da relação a/agl na resistência à compressão uniaxial do concreto	126
Figura 55: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à compressão uniaxial do concreto	127
Figura 56: efeito da interação entre o tipo de cimento (T _{cim}) e a relação a/agl na resistência à compressão uniaxial do concreto	128
Figura 57: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (T _{sa}) na resistência à compressão uniaxial do concreto.....	129
Figura 58: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à tração na flexão do concreto	132
Figura 59: efeito isolado da relação a/agl na resistência à tração na flexão do concreto ...	133
Figura 60: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto.....	134
Figura 61: efeito da interação entre o tipo de cimento (T _{cim}) e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto	135
Figura 62: efeito da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (T _{sa}) na resistência à tração na flexão do concreto	136
Figura 63: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (T _{sa}) na resistência à tração na flexão do concreto.....	137

Figura 64: efeito isolado do tipo de cimento na dureza superficial do concreto.....	140
Figura 65: efeito isolado da relação a/agl na dureza superficial do concreto.....	141
Figura 66: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto	142
Figura 67: efeito isolado do tipo de cura na dureza superficial do concreto	143
Figura 68: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP V- ARI, relação a/agl 0,4 e 0 % de sílica ativa. Ampliação de 70 x: (a) submersa; (b) caixa aquecida	144
Figura 69: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e a relação a/agl na dureza superficial do concreto	145
Figura 70: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e o tipo de cura na dureza superficial do concreto	146
Figura 71: efeito da interação entre a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial do concreto	147
Figura 72: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP IV, relação a/agl 0,6 e 0 % de substituição de sílica ativa: (a) submersa; (b) caixa aquecida	148
Figura 73: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial do concreto.....	149
Figura 74: efeito da interação entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura na dureza superficial do concreto	150
Figura 75: quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto.....	152
Figura 76: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros	156
Figura 77: efeito isolado da relação a/agl na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros	157
Figura 78: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros	158
Figura 79: efeito isolado do tipo de cura na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros	159
Figura 80: efeito da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros.....	160
Figura 81: Efeito da interação entre o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura na resistência à abrasão do concreto - 1000 metros.....	161

Figura 82: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP V-ARI e 10 % de substituição de sílica ativa: (a) relação a/agl 0,4 - submersa; (b) relação a/agl 0,4 - caixa aquecida; (c) relação a/agl 0,6 - submersa; (d) relação a/agl 0,6 - caixa aquecida	162
Figura 83: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura na resistência à abrasão do concreto - 1000 metros	163
Figura 84: superfícies desgastadas de amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico, onde: (2A) a/agl 0,4 - 10 % sa; (3A) a/agl 0,6 - 0 % sa; (4A) a/agl 0,6 - 10 % sa.....	164
Figura 85: volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros para os concretos: (a) a/agl 0,4 - 0 % sa; (b) a/agl 0,4 - 10 % sa; (c) a/agl 0,6 - 0 % sa; (d) a/agl 0,6 - 10 % sa.	165
Figura 86: volume de mercúrio intrudido em função do diâmetro dos poros para os concretos: (a) a/agl 0,4 - 0 % sa; (b) a/agl 0,4 - 10 % sa; (c) a/agl 0,6 - 0 % sa; (d) a/agl 0,6 - 10 % sa.....	166
Figura 87: análises de porosimetria para amostras de concretos produzidos com cimento pozolânico e de alta resistência inicial (a) volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros; (b) distribuição do volume de mercúrio intrudido em função do diâmetro dos poros.....	170
Figura 88: resultados médios de microdureza superficial para as amostras de concreto com cimento CP V-ARI	172
Figura 89: efeito isolado da relação a/agl na microdureza superficial do concreto	173
Figura 90: efeito da interação entre o a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa na microdureza superficial do concreto	174
Figura 91: efeito da interação entre a relação a/agl e a posição de indentação na microdureza superficial do concreto	175
Figura 92: efeito isolado do tipo de cimento na microdureza superficial dos concretos.....	177
Figura 93: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,4: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida	178
Figura 94: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,6: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida	179

Figura 95: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida	180
Figura 96: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida	181
Figura 97: correlação entre a resistência à abrasão e à compressão do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl.....	183
Figura 98: correlação entre a resistência à abrasão e à compressão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de substituição de sílica ativa	184
Figura 99: correlação entre a resistência à abrasão e à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl	185
Figura 100: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl	186
Figura 101: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa	187
Figura 102: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e da cura	188
Figura 103: correlação entre a resistência à abrasão e a exsudação do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl.....	189
Figura 104: correlação entre a resistência à abrasão e o volume de mercúrio intrudido acumulado do concreto	190
Figura 105: correlação entre a resistência à abrasão e o volume de mercúrio intrudido acumulado do concreto: (a) cura submersa; (b) caixa aquecida.....	191
Figura 106: correlação entre a resistência à abrasão e a microdureza do concreto	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: classificação dos pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004).....	30
Tabela 2: teores de cimento recomendados para pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004).....	53
Tabela 3: caracterização química do cimento	76
Tabela 4: caracterização física do cimento	77
Tabela 5: caracterização mecânica do cimento	77
Tabela 6: caracterização do agregado miúdo	78
Tabela 7: caracterização do agregado graúdo	78
Tabela 8: caracterização física da sílica ativa	79
Tabela 9: caracterização físico-química do aditivo segundo o seu fabricante	79
Tabela 10: dosagem experimental	80
Tabela 11: traços dos concretos avaliados neste estudo	80
Tabela 12: resultados de resistência à compressão uniaxial.....	83
Tabela 13: análise de variância (ANOVA) – dureza superficial por esclerometria	85
Tabela 14: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão	87
Tabela 15: ciclagem de exposição dos concretos na caixa aquecida.....	99
Tabela 16: matriz experimental.....	100
Tabela 17: composição dos cimentos empregados na pesquisa	101
Tabela 18: caracterização mecânica dos cimentos empregados na pesquisa, segundo o fabricante	101
Tabela 19: caracterização física dos cimentos empregados na pesquisa	102
Tabela 20: caracterização química dos cimentos empregados na pesquisa	102
Tabela 21: caracterização agregado miúdo - areia média.....	103
Tabela 22: caracterização agregado graúdo contido na zona granulométrica 4,75/12,5 - brita 0.....	104
Tabela 23: caracterização agregado graúdo contido na zona granulométrica 9,5/25 - brita 1	104
Tabela 24: composição granulométrica entre agregados graúdos - resultados do ensaio de massa específica aparente	105
Tabela 25: caracterização física da sílica ativa	106
Tabela 26: caracterização química da sílica ativa	106
Tabela 27: Caracterização físico-química do aditivo empregado	107
Tabela 28: Dosagem experimental - CP IV	108
Tabela 29: Dosagem experimental - CP V-ARI	108

Tabela 30: Parâmetros dos traços empregados.....	108
Tabela 31: Traços dos concretos avaliados na pesquisa	109
Tabela 32: resultados para o ensaio de resistência à compressão uniaxial	123
Tabela 33: análise de variância (ANOVA) - resistência à compressão uniaxial.....	124
Tabela 34: resultados para ensaio de resistência à tração na flexão	130
Tabela 35: análise de variância (ANOVA) - resistência à tração na flexão.....	131
Tabela 36: resultados para o ensaio de dureza superficial por esclerometria	138
Tabela 37: análise de variância (ANOVA) - dureza superficial por esclerometria.....	139
Tabela 38: exsudação de concretos com diferentes materiais e proporcionamentos	151
Tabela 39: resultados para o ensaio de resistência à abrasão pelo Método da NBR 12042	153
Tabela 40: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão - 500 metros	154
Tabela 41: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão - 1000 metros	155
Tabela 42: diâmetro médio de poros.....	167
Tabela 43: % de volume intrudido em poros de diâmetro menor de 0,05 μm e acima de 0,05 μm	168
Tabela 44: diâmetro crítico de poro.....	169
Tabela 45: comparativo dos resultados de porosimetria entre amostras de concreto - CP IV x CP V-ARI	170
Tabela 46: resultados médios de microdureza por indentação	171
Tabela 47: análise de variância (ANOVA) - microdureza superficial por indentação	173
Tabela 48: comparativo entre os resultados de microdureza superficial para os concretos - CP IV x CP V-ARI	176
Tabela 49: análise de variância (ANOVA) - microdureza superficial - CP IV x CP V-ARI ...	176
Tabela 50: digitalização tridimensional à laser - índices de desgaste	178
Tabela 51: resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta frente aos fatores controláveis analisados isoladamente.....	182
Tabela 52: relação dos resultados médios de resistência à compressão uniaxial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl.....	183
Tabela 53: relação dos resultados médios de resistência à compressão uniaxial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa	184
Tabela 54: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl.....	185
Tabela 55: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl.....	186

Tabela 56: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica	186
Tabela 57: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da cura	187
Tabela 58: relação dos resultados médios da exsudação com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl	188
Tabela 59: relação dos resultados de porosimetria com os índices de desgaste medidos.	190
Tabela 60: relação dos resultados médios da microdureza com os índices de desgaste medidos	191

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	111
Equação 2	111
Equação 3	114
Equação 4	115
Equação 5	117
Equação 6	119
Equação 7	120
Equação 8	120

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

ANAPRE: Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho

ASTM: American Society for Testing and Materials

IMC: Instituto de Materiais Cerâmicos

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LdSM: Laboratório de Design e Seleção de Materiais

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NM: Asociación Mercosur de Normalización

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RS: Rio Grande do Sul

UCS: Universidade de Caxias do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

α : teor de argamassa

γ : grau de hidratação do concreto

μ : micro (10^{-6})

μm : micrometro (10^{-6} metros)

$^{\circ}\text{C}$: grau Celsius

%: porcentagem ou percentagem

(1:m): quantidade de cimento:agregado, em massa

Al_2O_3 : óxido de alumínio

a/c: relação água/cimento

a/agl: relação água/aglomerante

$\text{Ca}(\text{OH})_2$: hidróxido de cálcio ou cal hidratada

Cag: Consumo de água (l/m^3)

CaO: óxido de cálcio

CAR: concreto de alta resistência

cm: centímetro

cm^2/g : centímetro quadrado/grama

cm^3/g : centímetro cúbico/grama

CP II: cimento Portland composto

CP IV: cimento Portland pozolânico

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

CP V-ARI RS: cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos

CP's: corpos de prova

cps: centipoises

C_3A : aluminato tricálcico

C_4AF : ferro aluminato tetracálcico

C_2S : silicato dicálcico

C_3S : silicato tricálcico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

CV: coeficiente de variação (%)

fck: resistência característica à compressão (MPa)

fctm,k: resistência característica média à tração na flexão (MPa)

Fe_2O_3 : óxido de ferro (III) (óxido férrico)

g: grama

g/cm^3 : grama/centímetro cúbico

g/m^3 : grama/metro cúbico

H: teor de umidade (%)

h:min: hora:minuto

h: hora

I_v/C : razão índice de vazios/volume de cimento

kg: kilograma

kg/m^2 : kilograma/metro quadrado

kg/m^3 : kilograma/metro cúbico

K_2O : óxido de potássio

l/m^3 : litro/metro cúbico

mbar: milibar

milhões de fibras/kg: milhões de fibras/kilograma

MgO: óxido de magnésio

MnO: óxido de manganês

GPa: Giga Pascal

MPa: Mega Pascal

min: minuto

m: metro

mm: milímetro

mN: milinewton

m^2/kg : metro quadrado/kilograma

N: Newton

Na_2O : óxido de sódio

pH: potencial hidrogeniônico

P_2O_5 : pentóxido de difósforo

Psi: libra força por polegada quadrada

R^2 : coeficiente de determinação

rpm: rotações por minuto

SiO_2 : óxido de silício ou dióxido de (mono)silício ou anidrido silícico

SO_3 : óxido de enxofre VI ou trióxido de (mono)enxofre ou anidrido sulfúrico

SrO : óxido de estrôncio

s: segundo

sup/vol: relação superfície de exposição/volume da peça

Tcim: tipo de cimento

Tcura: tipo de cura

TiO_2 : dióxido de titânio

Tsa: teor de substituição de sílica ativa (%)

UR: umidade relativa

1 INTRODUÇÃO

Por ser o concreto um material altamente empregado pela indústria da construção civil, é de suma importância realizar novas pesquisas científicas no intuito de buscar diretrizes seguras para o seu emprego e aproveitamento com qualidade. Como consequência da elevada versatilidade, o concreto pode enfrentar diferentes condições de utilização, sendo estas responsáveis pela necessidade de mudanças relacionadas à composição e proporcionamento dos materiais que o compõem. Cabe salientar que a dosagem inadequada dos constituintes de um concreto frente aos mecanismos de degradação pode ocasionar o aparecimento de manifestações patológicas, prejudicando a durabilidade e reduzindo a vida útil das estruturas.

Em elementos como pisos de concreto algumas propriedades devem ser consideradas, como a dureza superficial e a resistência mecânica. Tais propriedades acabam muitas vezes comprometidas, principalmente, em decorrência de problemas vinculados ao projeto, à execução e à dosagem do concreto destas estruturas. Em virtude do exposto, podem ocorrer manifestações indesejáveis, dentre as principais encontra-se o desgaste superficial.

O desgaste superficial constitui uma das principais causas de degradação do concreto, podendo trazer danos e alterar o desempenho da estrutura ao longo do tempo. Normalmente são altos os custos para reparar ou substituir este concreto afetado (LAWRENCE, 2004). Logo, qualquer meio através do qual a vida útil das estruturas de concreto possa ser prolongada torna-se de grande interesse para o mercado da construção. Dentro deste contexto, medidas para minimizar o desgaste do material podem resultar significativas reduções nos gastos com manutenção destas estruturas.

Segundo o manual americano ACI 302.1R (ACI, 2004), direcionado para pisos de concreto, raramente uma determinada manifestação patológica está relacionada a uma única causa. Em geral, uma combinação de fatores é responsável pela ocorrência de uma dada imperfeição. Além disso, a influência de qualquer causa que leve ao desenvolvimento de uma falha ou imperfeição irá variar de acordo com as práticas envolvidas, com as propriedades dos materiais utilizados, com a temperatura e outras condições meteorológicas

presentes durante a execução da estrutura. Os resultados satisfatórios só serão atingidos se todos os parâmetros mencionados forem cuidadosamente controlados.

De forma geral, uma baixa resistência ao desgaste de um piso de concreto deve-se principalmente à baixa resistência mecânica, em particular da camada superficial. Uma resistência inadequada pode resultar de um excesso da água de mistura, da utilização de concreto com alta relação água/cimento (a/c), do elevado abatimento (o qual pode levar à segregação dos materiais constituintes e promover exsudação excessiva), do acabamento prematuro, das condições impróprias de cura, entre outros (ACI 302.1R, 2004).

Sendo assim, verifica-se que a presença de desgaste superficial em pisos de concreto pode estar atrelada a diversos fatores, como as propriedades dos materiais empregados e a composição do traço de concreto. No entanto, cabe ressaltar que as técnicas construtivas utilizadas podem auxiliar no aparecimento de tal manifestação patológica.

Além disso, é possível constatar que o desgaste superficial por abrasão é uma manifestação patológica muito freqüente em pisos de concreto se comparada àquelas ocasionadas problemas estruturais, podendo comprometer seu valor funcional ou estético. Ainda assim, muitos profissionais continuam mostrando uma maior preocupação com o cálculo da espessura da placa de concreto destas estruturas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Desta forma, esta pesquisa pretende estudar o desgaste superficial por abrasão, possibilitando um maior entendimento do fenômeno, a fim de buscar uma redução desta manifestação patológica em pisos.

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

De acordo com Viecili (2004) e Chodounsky e Viecili (2007), o piso de concreto é um elemento comum às construções, podendo ser uma estrutura simples ou muito complexa, com as seguintes finalidades básicas:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo carregamento;
- b) proporcionar perfeito rolamento, quanto ao conforto e segurança das cargas móveis, possuindo textura superficial adequada à futura utilização;
- c) resistir aos esforços mecânicos (flexão, compressão, impacto e abrasão) e a ataques químicos ou biológicos (ácidos, bases, sulfatos, bactérias, entre outros).

Segundo o Comitê 302 do ACI, em seu manual 302.1R-04 (ACI, 2004), os pisos de concreto são classificados em nove categorias, de acordo com a sua utilização, tipo de tráfego, aspecto estético desejado, e tipo de tratamento e acabamento superficial requeridos. Estes estão apresentados na tabela 1, sendo considerados dois processos executivos, camada única (monolítico) ou dupla.

Tabela 1: classificação dos pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004)

Classe	Tipo de tráfego previsto	Uso	Considerações especiais	Técnicas de acabamento
1. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de pedestres.	Prédios comerciais, oficinas, igrejas, múltiplas residências;	Acabamento uniforme, uso de agregados anti-derrapantes em áreas específicas, cura.	Normal, com pá metálica, anti-derrapante onde necessário.
		Uso decorativo.	Agregado mineral colorido, pigmento colorido ou agregado exposto, estampado ou decorativo, layout de juntas artísticas, cura.	Como requerido.
2. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície revestida - tráfego de pedestres.	Prédios comerciais, igrejas, múltiplas residências; uso com o capa/revestimento de piso.	Placa plana e nivelada compatível com aplicação do revestimento, cura. Disposição de juntas segundo o revestimento aplicado.	Leve acabamento com pá metálica.
3. Pisos de camada dupla	Superfície exposta ou revestida - tráfego de pedestres.	Capa (não) aderida sobre a placa base para construções comerciais ou não industriais (determinado pelo tipo de construção ou cronograma).	Placa base - uniforme, plana, cura. Capa não aderida - isolamento sobre placa base, espessura mínima 75 mm reforçada, cura. Capa aderida - tamanho adequado do agregado, espessura mínima 19 mm, cura.	Placa base - acabamento sobre face não aderida (limpeza, superfície texturada sobre face aderida). Capa - superfície exposta (acabamento normal com pá metálica); superfície revestida (leve acabamento com pá metálica).
4. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta ou coberta - tráfego de pedestres e/ou veículos leves.	Institucional ou comercial.	Placa plana e nivelada compatível com aplicação do revestimento, agregados anti-derrapantes em áreas específicas, cura. Disposição de juntas segundo o revestimento aplicado.	Normal, com pá metálica.
5. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais (rodas pneumáticas, levemente rígidas).	Pisos industriais para produção, processamento, estocagem.	Boa uniformidade de sub-base, disposição de juntas, resistência à abrasão, cura.	Intenso acabamento com pá metálica.
6. Pisos de camada única (Monolítico)	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais pesados (rodas rígidas, com intenso carregamento sobre rodas).	Pisos industriais sujeitos a tráfego pesado: podendo ser sujeitos a impactos.	Boa uniformidade de sub-base, disposição de juntas, transferência de carga, resistência à abrasão, cura.	Endurecedor superficial à base de agregados minerais ou metálicos; acabamento intenso com pá metálica.
7. Pisos de camada dupla	Superfície exposta - tráfego de veículos industriais pesados (rodas rígidas, com intenso carregamento sobre rodas).	Camada dupla de piso aderido sujeito a tráfego pesado e impacto.	Placa base - sub-base uniforme, reforço, paginação de juntas, superfície nivelada, cura. Capa não aderida - composto mineral ou metálico com granulometria contínua. Espessura mínima 19 mm. Endurecedor de superfície à base de agregado mineral ou metálico aplicado para superfície plana de alta resistência, cura.	Limpeza, leve textura da superfície de placa base para subsequente aderência da capa. Desempeno especial da superfície da base (opcional). Acabamento com pá metálica.
8. Pisos de camada dupla.	Idem às classes 4, 5 e 6.	Capa (não) aderida - pisos novos ou velhos ou onde sistema a construtivo ou prazos exigir.	Isolamento sobre placa base, espessura mínima 100 mm, resistência à abrasão, cura.	Idem às classes 4, 5 e 6.
9. Pisos de camada única (Monolítico) ou Capa	Superfície exposta (extremamente plana ou com padrões de planicidade críticos). Veículos transportadores de materiais especiais ou tolerâncias específicas para robótica.	Corredores estreitos, armazéns (cargas elevadas), estúdios de televisão, ringues de gelo, ginásios. Orientações de projeto (Norma ACI 360R).	Especificações da qualidade do concreto variadas. Endurecedores não podem ser usados sem aplicações especiais e grandes cuidados de instalação aplicadas. FF 50 e FL 25 (pisos superplanos). Cura.	Seguir rigidamente as técnicas de acabamento indicadas na seção 8.9.

Além das prescrições propostas pelo Comitê 302 do ACI, apresentadas na tabela 1, cabe salientar que a resistência ao impacto também deve ser considerada. Atualmente, não existem critérios padronizados de avaliação da resistência ao desgaste de um piso de concreto. Segundo o Comitê 302 do ACI, a resistência ao desgaste está diretamente relacionada com o proporcionamento da mistura de concreto, com a resistência à compressão, com os tipos de agregados, com o acabamento, com a cura e com as técnicas de execução empregadas.

Propriedades como dureza, resistência química, resistência ao impacto e resistência à abrasão são os principais atributos dos pisos de concreto, independente da classificação existente (FARNY, 2001). Segundo o ACI 302.1R (ACI, 2004), a qualidade de um piso de concreto está diretamente associada à existência de uma superfície de elevada dureza e durabilidade, plana e relativamente livre de fissuras, que esteja em conformidade com um nível de referência, e que possua uma textura superficial adequada à futura utilização do piso.

Esta superfície deve ainda garantir a facilidade de limpeza, o escoamento de líquidos, a movimentação de cargas e o deslocamento de equipamentos (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Para Viecili (2004), o desempenho satisfatório desta camada superficial é determinado pela dosagem dos materiais, pela qualidade da concretagem e pela correta execução das juntas. Segundo o autor, o início e a duração das operações de concretagem, em especial a fase de acabamento e a execução das juntas, são considerados críticos. A falha em um destes processos executivos pode contribuir para o desenvolvimento de características indesejáveis na superfície como fissuras, baixa resistência à abrasão, escamação, assim como aumentar o potencial de deformações geométricas como o empenamento da placa de concreto. Ainda, a variabilidade que existe nas etapas de execução, e que pode interferir no desempenho da superfície do piso de concreto, é difícil de ser determinada, pois depende de inúmeros fatores, como o tipo e consumo de cimento empregado, a temperatura e a umidade ambiente, a quantidade de água da mistura, o uso de aditivos químicos, entre outros.

Segundo Tarr e Farny (2008) e o manual da ACI 302.1R (ACI, 2004), as manifestações patológicas mais frequentes em pisos de concreto são:

- a) fissuração – manifestação patológica ocasionada por restrições, tanto internas quanto externas, durante as mudanças volumétricas do material. Podem ser provocadas por uma combinação de fenômenos como a retração por secagem, retração plástica, contração térmica, empenamento da

estrutura e/ou aplicação de cargas. A fissuração decorrente do fenômeno da retração apresenta forte influência da dosagem dos materiais constituintes do concreto e de problemas relativos ao projeto, como por exemplo, a falta ou ineficiência de juntas;

- b) desgaste superficial por abrasão – caracteriza-se pela formação de material pulverulento na superfície do concreto, ou pela perda de massa do material cimentício. Este tipo de manifestação patológica é afetada diretamente pelas características dos materiais constituintes do traço de concreto e o seu proporcionamento, pelas etapas de execução e pelos procedimentos de cura;
- c) empenamento – caracterizado pela distorção das bordas das placas de concreto, provocado pela presença de um gradiente de umidade e por variações de temperatura entre as faces superior e inferior da estrutura;
- d) borrachudo – manifestação patológica caracterizada pelo enrijecimento prematuro da superfície do concreto, gerando grandes deformações na superfície da estrutura;
- e) delaminação – manifestação associada ao selamento prematuro da superfície, realizado anteriormente à exsudação e à saída de ar do concreto;
- f) esborcinamento das juntas – caracterizado como uma imperfeição superficial, decorrente da quebra das bordas das juntas devido a diferentes fatores, como a expansão do concreto, a não aderência entre duas camadas de pisos e incêndios;
- g) descoloração – decorrente da modificação da coloração da placa de concreto em função da presença de aditivos com cloreto de cálcio, dos álcalis do concreto, do processo de cura inadequado ou inapropriado, e das variações na relação a/c da superfície do concreto e mudanças no traço do concreto.

Uma das causas mais comuns relacionada à ocorrência de manifestações patológicas em pisos de concreto é a realização do processo de cura deste tipo de estrutura de forma inadequada ou insuficiente. A ausência ou ineficiência de tal procedimento executivo, em desacordo com as necessidades requeridas relacionadas à presença de vento e ao nível de temperatura, podem comprometer a vida útil esperada de um piso de concreto (ACI 302.1R, 2004).

Fazendo-se uma avaliação das diferentes causas de deterioração presentes neste tipo de estrutura, optou-se em estudar o desgaste superficial por abrasão. Tal escolha baseou-se

na preocupação dos profissionais envolvidos com o projeto e à grande presença desta manifestação indesejável de superfície em pisos de concreto após as etapas de execução.

Além disso, cabe salientar que uma grande parcela dos pisos de concreto, ao serem executados, não recebe nenhum tipo de revestimento como forma de acabamento, sendo então, a resistência à abrasão do concreto um dos parâmetros mais importantes para garantir uma adequada vida útil e uma baixa manutenção a essas estruturas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Para os mesmos autores, o desgaste acentuado da superfície do piso pode trazer inúmeros problemas aos usuários, desde um simples desconforto estético até grandes transtornos com relação à redução da funcionalidade da estrutura.

Assim sendo, este estudo busca a possibilidade de uma redução dessa manifestação patológica associada ao desgaste superficial nas estruturas de concreto, visando melhorar o comportamento do material e aumentar a sua capacidade de resistir à perda de massa devido ao desgaste gerado pela abrasão.

Dentro deste contexto, a principal motivação desta pesquisa veio do interesse em analisar a influência dos parâmetros que intervêm no desgaste superficial por abrasão em concretos proporcionados para pisos. Paralelamente, pretende-se constatar a existência de possíveis relações dos parâmetros estudados na ocorrência do referido mecanismo. Para esta avaliação serão estudados alguns materiais e seus proporcionamentos, bem como a influência do procedimento de cura.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Os pisos de concreto apresentam um recente desenvolvimento no Brasil, que teve início na década de 90 (VIECILI, 2004). Além disso, o crescente avanço da economia tem demandado soluções cada vez mais inovadoras no mercado de pisos. Entretanto, na maior parte das vezes, a evolução do conhecimento nesse mercado produtivo não acompanha o surgimento dessas novas soluções (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

A falta de especialização nesta área resulta em projetos que avaliam na maioria das vezes apenas questões estruturais dos pisos, deixando de contemplar outros aspectos fundamentais e determinantes do desempenho destas estruturas, como a verificação das condições de execução e dos materiais, as características do concreto e a especificação de tratamentos superficiais adequados. A grande parte das manifestações patológicas que ocorrem em pisos de concreto se concentra, basicamente, na preparação, execução e nos

materiais, sendo mais raros os problemas estruturais (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Ainda, segundo Mehta e Monteiro (2014), a escolha dos materiais apropriados conjuntamente à dosagem são, sem dúvida, aspectos de extrema relevância para a produção de um concreto que atenda às especificações requeridas de resistência e durabilidade na estrutura.

Diversos materiais, como adições minerais, fibras sintéticas ou metálicas e aditivos, fazem parte dos traços atualmente empregados em pisos de concreto, fazendo com que haja a necessidade dos profissionais que atuam no setor estarem familiarizados com as conseqüências destes materiais no desempenho do concreto e do piso como um todo (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

De acordo com a Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho, em 2008, dos 35 milhões de m² de pisos e pavimentos de concreto produzidos, em torno de 22,5 milhões de m² apresentaram alguma manifestação patológica vinculada a falhas, tanto no projeto dos pisos como na execução destes. Portanto, aproximadamente 65% dos pisos e pavimentos de concreto produzidos no ano de 2008 apresentaram algum tipo de manifestação patológica, causando prejuízo às respectivas estruturas (SENISSE, 2010).

Portanto, pelo recente desenvolvimento do mercado de pisos de concreto, pela necessidade de novos conhecimentos científicos referente à influência das propriedades e proporcionamento dos materiais e pela grande incidência de manifestações patológicas nessas estruturas, como o desgaste superficial decorrente da abrasão, pode-se concluir que ainda existe a necessidade de maiores estudos científicos nessa área.

Em suma, a escolha do tema desta pesquisa de doutorado busca dar continuidade ao trabalho de mestrado realizado nesta Universidade, o qual teve como objetivo principal avaliar a influência dos parâmetros constituintes do traço do concreto no desgaste superficial por abrasão. Paralelamente, pretendeu-se constatar a existência de possíveis relações dos parâmetros estudados na ocorrência desta manifestação. Os parâmetros abordados envolveram o consumo de água, o teor de adição de sílica ativa (em substituição à massa de cimento), o teor de adição de microfibras de polipropileno e o tipo de cimento.

Desta forma, esta pesquisa pretende prosseguir na busca pelo aprimoramento do conhecimento científico relacionado ao mecanismo da abrasão em concretos proporcionados para pisos. Para tanto, serão avaliadas a macro e a microestrutura do material frente ao mecanismo de desgaste. Salienta-se que será analisada a influência da microestrutura superficial dos compósitos, uma vez que a maior parte dos estudos acerca do desgaste por abrasão está focada no comportamento da matriz cimentícia; logo, julgou-se

importante levantar algumas propriedades de superfície, buscando verificar a influência da qualidade dessa camada na ocorrência do referido fenômeno. Conjuntamente, busca-se observar a influência dos materiais que constituem o traço do concreto destes elementos nesta manifestação patológica. Esta última abordagem terá como objetivo principal evitar que a definição dos parâmetros de dosagem continue sendo baseada, simplesmente, em conhecimentos práticos e empíricos.

Dentro deste contexto, buscando verificar a influência das propriedades de superfície e da matriz na magnitude do desgaste por abrasão, foram definidos alguns parâmetros do traço do concreto, os quais englobaram a relação a/agl (0,40; 0,60), o teor de adição de sílica ativa, em substituição à massa de cimento (0 %; 10%), o tipo de cura (submersa; caixa aquecida) e o tipo de cimento (CPIV; CP V-ARI).

1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

Com base no exposto, foi possível verificar uma lacuna de conhecimento científico e técnico, apresentada como segue: Qual a influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos com diferentes materiais e proporcionamentos?

1.4 OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo foram divididos em objetivo principal e objetivos secundários.

1.4.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta pesquisa busca avaliar a influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos com diferentes materiais e proporcionamentos.

1.4.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa são:

- a) analisar a influência do tipo de cimento, da relação água/aglomerante e do teor de substituição de sílica ativa na exsudação e nas propriedades mecânicas de concretos empregados em pisos;

- b) analisar a influência do tipo de cimento, da relação água/aglomerante, do teor de substituição de sílica ativa e do tipo de cura na dureza superficial e na resistência à abrasão de concretos empregados em pisos;
- c) analisar a influência do tipo de cimento, da relação água/aglomerante, do teor de substituição de sílica ativa e do tipo de cura na microestrutura (microdureza por indentação, porosimetria por intrusão de mercúrio, digitalização tridimensional e análise em microscópio estereoscópico) da camada superficial dos concretos empregados em pisos;
- d) verificar a existência de correlações entre os resultados dos ensaios mecânicos, de dureza superficial e de exsudação com os resultados dos ensaios de resistência à abrasão dos concretos;
- e) verificar a existência de correlações entre os resultados dos ensaios microestruturais de superfície com os resultados dos ensaios de resistência à abrasão dos concretos.

1.5 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Através da realização de um delineamento do estudo é possível esquematizar um modelo conceitual e operativo, o qual proporciona a execução de uma análise comparativa entre a visão teórica e os resultados obtidos na realidade (GIL, 2008).

O delineamento da pesquisa está demonstrado, esquematicamente, em ordem cronológica, na figura 1. A pesquisa foi desenvolvida em três grandes etapas: a revisão bibliográfica, que acompanha todo o decorrer da pesquisa, a realização do programa experimental e a análise estatística dos resultados.



Figura 1: delineamento da pesquisa

De acordo com a figura 1, a etapa referente ao programa experimental envolve as atividades relacionadas ao planejamento experimental e à execução dos experimentos, descritas nos itens 4.1 e 4.4, respectivamente. Segundo Ribeiro e Ten Caten (2003), o planejamento experimental permite maior eficiência na obtenção de informações em um experimento. Possibilita também obter um maior número de informações a um menor custo e tempo, assegurando maior confiabilidade nos resultados obtidos.

Concluída a definição do planejamento e da matriz experimental foi realizada a segunda fase do programa experimental, a etapa de execução dos experimentos. Os ensaios de resistência à compressão (item 4.4.1), resistência à tração na flexão (item 4.4.2), exsudação (item 4.4.3), resistência à abrasão (item 4.4.4) e dureza superficial (item 4.4.5) foram realizados conforme as prescrições das respectivas Normas Brasileiras pertinentes. Para estudo da microestrutura da superfície foram realizadas análises em amostras de concreto através de microscópio estereoscópico (item 4.4.6), da digitalização tridimensional à laser (item 4.4.7), da porosimetria por intrusão de mercúrio (item 4.4.8) e da microdureza superficial em microindentador (item 4.4.9).

Com o término da etapa do programa experimental, e através dos ensaios realizados, foi efetuada a segunda grande etapa da pesquisa, a análise dos resultados obtidos. Esta segunda fase da pesquisa teve por objetivo realizar a interpretação dos dados finais de

forma coerente e precisa, buscando auxiliar no entendimento do fenômeno proposto para o estudo (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001; CERVO; BERVIAN, 2002).

1.6 ORIGINALIDADE

Em âmbito nacional e internacional, foram encontrados diversos estudos relacionados ao desgaste superficial por abrasão em concretos com foco, principalmente, na influência dos materiais e das propriedades mecânicas ou da matriz, como o de Naik, Singh e Ramme (2002), Atiş (2003), Vecili (2004), Yazici e İnan (2006), Siddique, Prince e Kamali (2007), Siddique e Khatib (2009), Ugur, Demirdag e Yavuz (2010), Li, Ke e Zhou (2011), Zoran et al. (2012), Rashad (2013), Saikia e Brito (2014), entre outros. Contudo, poucos foram os estudos identificados com a abordagem na análise das propriedades de superfície ou da superfície no entendimento do mecanismo de resistência à abrasão do material, podendo citar as pesquisas de Momber (2000) e Zoran et al. (2012).

Neste sentido, nota-se que os estudos sobre a influência das propriedades de superfície são incipientes. Desta forma, a pesquisa apresentada nesta tese propôs-se a investigar a influência das propriedades relacionadas à superfície e à matriz na resistência à abrasão de concretos para pisos com diferentes materiais e proporcionamentos. Assim, não só auxiliando para o aumento da durabilidade das estruturas, mas também indo ao encontro do desenvolvimento de pesquisas científicas nessa área do conhecimento.

1.7 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está estruturada em quatro capítulos. O primeiro capítulo – “INTRODUÇÃO” – objetiva introduzir o assunto a ser tratado, destacando a relevância do tema e ressaltando a necessidade de estudos relacionados a esta área de conhecimento. Os objetivos principal e secundários, as hipóteses, o delineamento da pesquisa e a estrutura do trabalho foram abordados neste capítulo.

No capítulo dois – “DESGASTE SUPERFICIAL DE MATERIAIS” – é realizada uma revisão de literatura, a qual relata os assuntos de interesse a esta pesquisa, como alguns conceitos, os tipos de desgaste existentes, em especial o desgaste por abrasão em concreto, e os fatores influentes no desenvolvimento desta manifestação patológica.

No capítulo três – “ESTUDO PRELIMINAR” – são apresentados resultados preliminares obtidos de estudos prévios, conjuntamente com as análises estatísticas, realizadas através da análise de variância (ANOVA), e suas discussões.

No capítulo quatro – “PROGRAMA EXPERIMENTAL” – contempla o planejamento experimental empregado nesta tese, a caracterização dos materiais necessários à realização da pesquisa e os métodos de ensaios que foram empregados.

No capítulo cinco – “ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS” – são apresentados os resultados obtidos nos experimentos executados, conjuntamente com as análises estatísticas, realizadas através da análise de variância (ANOVA), e suas discussões.

No capítulo seis – “CONSIDERAÇÕES FINAIS” – estão apresentadas as conclusões obtidas por meio da realização desta pesquisa e algumas sugestões para pesquisas futuras.

2 DESGASTE SUPERFICIAL DE MATERIAIS

O desgaste superficial consiste em um processo de deterioração dos materiais ao longo do tempo. Tal deterioração está diretamente relacionada com a vida útil, onde o início do processo ou um nível mais avançado de desgaste denota claramente, conforme o tipo de emprego, o término desta vida útil. Sendo assim, o desgaste superficial constitui em um dos aspectos da durabilidade dos materiais.

Esse mecanismo de deterioração promove a remoção progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a uma ação mecânica provinda do contato e movimento relativo contra um agente sólido, líquido ou gasoso (IBÁÑEZ, 1998; VIECILI, 2004). A definição do fenômeno do desgaste superficial abrange alguns aspectos, os quais estão listados como seguem (SCHACKELFORD, 1999):

- a) envolve a remoção de material;
- b) consiste em um processo mecânico;
- c) apresenta caráter progressivo;
- d) exige movimento relativo entre materiais ou superfícies.

Para Abitante (2004), o caráter progressivo do desgaste deixa evidente a importância do tempo no processo de deterioração e possibilita compreender que, além do desgaste ser uma propriedade que depende das condições de agressividade do meio, sofre alterações sucessivas, as quais não são necessariamente lineares.

Quando se fala de desgaste superficial, sabe-se que diversos são os mecanismos através dos quais esse fenômeno se manifesta. Estes mecanismos buscam descrever as condições nas quais ocorre a perda de massa ou de material que caracterizam a ocorrência dessa manifestação patológica. Segundo Ibáñez (1998), o desgaste pode ocorrer através de quatro mecanismos básicos, os quais podem atuar de forma isolada ou conjuntamente, sendo estes conhecidos como desgaste adesivo, abrasão, fadiga e reação triboquímica.

Khruschov (1974) menciona os mesmos mecanismos nomeando, no entanto, o último como desgaste mecânico-corrosivo. A autora denomina desgaste corrosivo quando o

deslizamento entre superfícies se dá em meio corrosivo e a deterioração química se soma aos efeitos físicos do desgaste. De acordo com Abitante (2004), existem alguns autores, tais como Groover (1996)¹, que abordam os mesmos quatro mecanismos, entretanto incluem o desgaste por difusão ao invés de fadiga.

A seguir é feita uma breve descrição dos quatro mecanismos abordados anteriormente e que são considerados os principais geradores da ocorrência do fenômeno do desgaste superficial em materiais:

- a) adesão: decorrente da proximidade entre duas superfícies com asperezas adjacentes através de forças interatômicas de curto alcance. Estas asperezas, ao deslizarem umas em relação às outras, provocam o desprendimento de partículas. Este fato pode ser explicado em função da ligação entre as superfícies ser, muitas vezes, mais forte do que a ligação existente com o material de base (TIER, 1998; SCHACKELFORD, 1999; ABITANTE, 2004);
- b) fadiga (ou desgaste por difusão): fenômeno decorrente da ação de cargas cíclicas que provocam a formação de trincas superficiais ou sub-superficiais com a conseqüente extração de material (SCHACKELFORD, 1999, ABITANTE, 2004);
- c) químico ou reação triboquímica (ou desgaste mecânico-corrosivo): Schackelford (1999) denomina desgaste corrosivo quando o deslizamento entre superfícies acontece em meio corrosivo e em conjunto aos efeitos físicos do desgaste tem-se as ações de deterioração química. Ibáñez (1998) denomina reação triboquímica quando ocorre a formação de produtos resultantes de reações químicas entre elementos que constituem o sistema abrasivo;
- d) abrasão: mecanismo de desgaste que ocorre em função do movimento relativo entre materiais com durezas diferentes. Segundo Abitante (2004), alguns autores mencionam a participação das irregularidades existentes nas superfícies dos materiais no desenvolvimento do processo abrasivo. Este mecanismo de desgaste está abordado com maior profundidade no item 2.1, onde são explicitadas as definições existentes, bem como os mecanismos envolvidos e os seus efeitos.

41

¹ GROOVER, M. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 1061p. New Jersey, 1996.

Alguns autores fazem a inclusão de mais dois mecanismos, denominados erosão e cavitação, totalizando seis mecanismos. A erosão é o mecanismo que ocorre através do transporte de partículas pontiagudas por um fluido, as quais em contato com uma superfície provocam um desgaste muito semelhante à abrasão. Já a cavitação é o desgaste decorrente da ruptura de bolhas superficiais presentes (NEVILLE, 1997; TIER, 1998; SCHACKELFORD, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2006). Além destes mecanismos, Bergmann, Madruga e Silveira (1994a) discorrem a respeito do desgaste por impacto, o qual ocorre por meio de choques sucessivos ao longo do tempo, conduzindo à fratura do material.

Importante destacar que um único tipo de mecanismo de desgaste raramente ocorre na prática, o que se observa é a sobreposição de mecanismos (BERGMANN; MADRUGA; SILVEIRA, 1994(b); MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.1 DESGASTE SUPERFICIAL POR ABRASÃO

A abrasão consiste em um dos mecanismos através do qual ocorre o desgaste de materiais, conforme descrito anteriormente neste capítulo. Os itens a seguir apresentam com maior profundidade as definições propostas, os mecanismos envolvidos no processo abrasivo e, ainda, os seus efeitos.

2.1.1 Definições

Groover (1996), citado por Abitante (2004), descreve a abrasão como um processo de perda de massa do material ocasionado por inúmeras asperezas duras pertencentes a uma superfície ao entrar em contato e movimento relativo com a outra. Tais asperezas podem ser resultantes da rugosidade da superfície do material mais duro ou das próprias partículas já extraídas. De acordo com Larsen-Basse (1990), o processo abrasivo da superfície de um material pode ocorrer, também, pela presença de partículas duras, as quais, ao movimentarem-se sobre esta superfície, acabam gerando cortes, desencadeando o fenômeno.

Observa-se que o conceito de movimento relativo entre duas superfícies, sendo uma de maior dureza que a outra, pode ser encontrado em quase todas as definições, inclusive na definição proposta por Schackelford (1999). Este autor faz considerações com relação às irregularidades existentes na superfície dos materiais e que, microscopicamente, as superfícies não são lisas e as asperezas estabelecem o contato mais externo.

2.1.2 Mecanismos Envolvidos

A fundamentação teórica para o encaminhamento do problema de desgaste tem como definição inicial o mecanismo de falha, ou seja, a forma como o material rompe sob tensão (ABITANTE, 2004). Para uma grande parte dos trabalhos analisados, o mecanismo da abrasão pode se manifestar por meio de riscos e cortes (SCHACKELFORD, 1999; IBÁÑEZ, 1998). Estes riscos e cortes provocam a concentração de tensões na superfície do material, ocasionando o aparecimento de trincas (DIAS; QUINTEIRO; BOSCHI, 2000).

Já Feijão et al. (1996) mencionam três mecanismos envolvidos na remoção ou perda de material pela abrasão: microlascamento, microcorte e microsulcamento.

O microlascamento é o arrancamento de material superficial decorrente da formação e aglutinação de trincas na superfície. Estas trincas resultam da ação de tensões cuja magnitude supera a tensão de ruptura do material. Microcorte ocorre em função de tensões de cisalhamento que se localizam a frente da partícula abrasiva, as quais causam a remoção de material através da formação de microcavacos. Microsulcamento não implica em perda significativa de massa, uma vez que apenas provoca o deslocamento do material extraído (ABITANTE, 2004).

O mecanismo preferencial de ocorrência do processo abrasivo depende das características do material, as quais estão atreladas à tenacidade, ao módulo de elasticidade e à dureza, e também do nível de tensões a que o corpo está submetido, sendo este estabelecido pela força normal e pela velocidade de translação das partículas abrasivas (FEIJÃO et al., 1996). Deve-se destacar que o microlascamento é considerado o principal mecanismo de deterioração para materiais frágeis, onde a tensão mínima necessária para a nucleação de trincas corresponde à tenacidade do material (FEIJÃO et al., 1996; DIAS; QUINTEIRO; BOSCHI, 2000). Esta abordagem permite que a abrasão em materiais frágeis seja interpretada através da Mecânica da Fratura.

2.1.3 Consequências do Desgaste Abrasivo

A abrasão é uma forma de deterioração dos materiais, que ocasiona o comprometimento da superfície. Este mecanismo de deterioração pode se manifestar de duas formas: como a mudança de aspecto do material, a qual representa conotação estética importante, e como remoção de material superficial. Estes dois enfoques são dependentes, uma vez que a alteração no aspecto é decorrente de uma alteração superficial, atribuída à perda de matéria (ABITANTE, 2004).

Por estar o fenômeno da abrasão presente em diversas áreas do conhecimento, percebe-se que os seus efeitos englobam, muitas vezes, questões de segurança e grandes investimentos como, por exemplo, ao tratar de aeronaves, componentes de motores, concreto para barragens e para pisos industriais, moinhos, entre outros. Sob esse ponto de vista, pode-se dizer que o enfoque tradicional, ou aquele relacionado à perda de massa ou de material superficial, é o mais adequado.

Efetivamente, ao representar a deterioração do material, o desgaste diminui sua resistência aos esforços atuantes, aproximando tal material de uma possibilidade de falha (ABITANTE, 2004).

2.2 DESGASTE SUPERFICIAL EM CONCRETOS

Em trabalho publicado por Mehta e Gerwick (1982)² apud Mehta e Monteiro (2014), os autores classificaram as causas físicas da deterioração do concreto em duas categorias: primeiro o desgaste superficial ou perda de massa, devido à abrasão, erosão e cavitação; e segundo a fissuração, devido a causas internas à massa de concreto, como pressões de cristalização de sais nos poros, e externas, como gradientes normais de temperatura e umidade, carregamentos estruturais e exposição ao congelamento ou fogo (figura 2). Da mesma forma, os autores classificam as causas químicas da deterioração do concreto em hidrólise causada por água pura, trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento, além de reações causadoras de produtos expansíveis, como a reação de expansão por sulfatos, a reação álcali-agregado e reações de corrosão das armaduras.

Deve-se enfatizar que, na prática, as causas físicas e químicas de deterioração em estruturas de concreto frequentemente se sobrepõem. Ocorridos os desgastes físicos, como a abrasão, há um aumento da exposição da superfície de concreto a agentes agressivos, tais como a chuva ácida, e como consequência o ataque pelos compostos químicos presentes nesta são favorecidos. Ocorridos os desgastes químicos como, por exemplo, a lixiviação, o concreto se torna mais poroso, facilitando o processo de abrasão, e assim de forma sucessiva. Estes fatos fazem com que ambos os processos de deterioração, físico ou químico, resultem em um ciclo de difícil dissociação ou estabilização (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

44

² MEHTA, P. K.; GERWICK, Jr, B. C. **Concrete Int.** v. 4, n. 10, pp. 45-51, 1982.

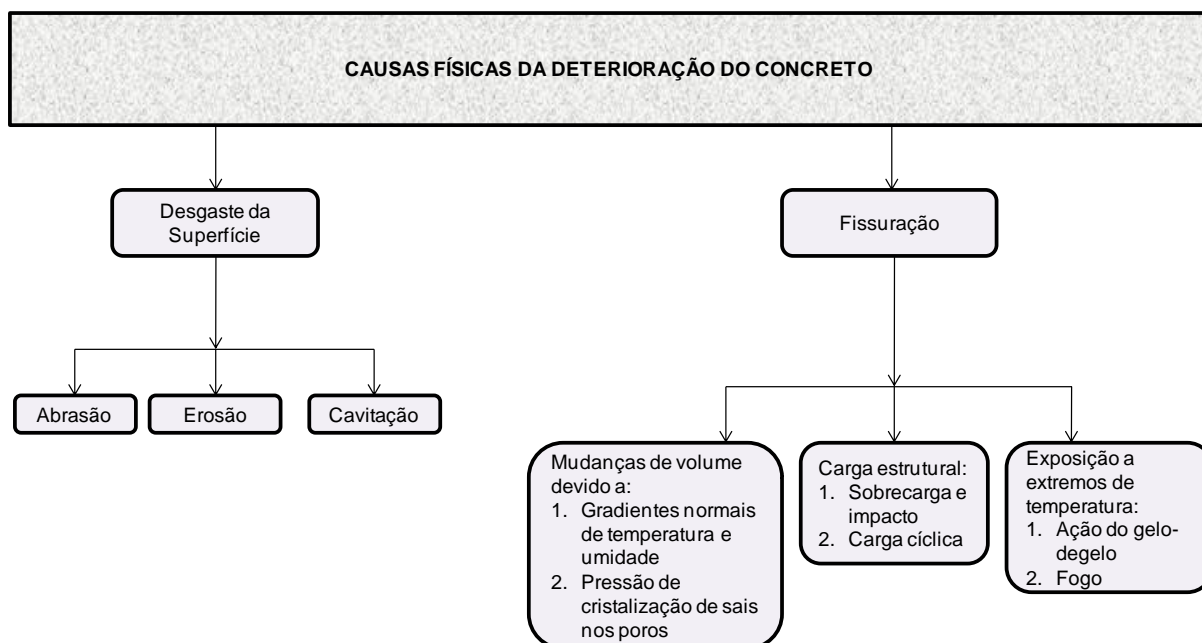


Figura 2: causas físicas da deterioração do concreto (adaptado de MEHTA; GERWICK, 1982 apud MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Quando se trata particularmente de desgaste em concretos, os mecanismos que são relatados com maior frequência na bibliografia como os responsáveis pela ocorrência de tal fenômeno são: abrasão, erosão e cavitação (NEVILLE, 1997; VIECILI, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2014). O desgaste por abrasão refere-se à perda de massa pelo atrito seco, normalmente encontrado em pavimentos e pisos de concreto. Já a desagregação por erosão ocorre pelo impacto/fricção de partículas sólidas em suspensão, e a cavitação pela ruptura de bolhas de vapor formadas em fluxos de água com velocidade elevada, ambos os mecanismos atingindo preferencialmente revestimentos de canais, vertedouros e tubulações de concreto para o transporte de água ou esgoto (figura 3).

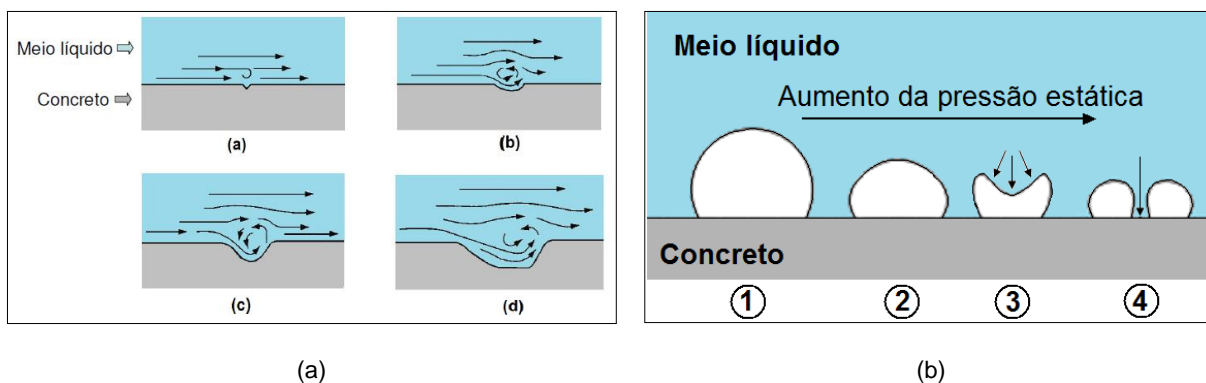


Figura 3: desgaste superficial em superfície de concreto (a) erosão (b) cavitação. Fonte: http://www.dcc.ufpr.br/wiki/images/0/01/TC031_Durabilidade.pdf (acesso em 20/08/2013)

Para Meng e Ludema (1995), existe na bibliografia significativa variação quanto ao significado dos termos relativos ao desgaste. Este fato é considerado como uma das causas que muitas vezes impede um maior avanço no estudo deste assunto, pois dificulta a utilização de conhecimentos já existentes devido à falta de unidade na definição dos conceitos.

Uma vez que o desgaste pode ocorrer simultaneamente através de vários mecanismos, a complexidade acaba aumentando e gerando certa confusão entre os trabalhos desenvolvidos. Um exemplo deste fato é que, apesar dos termos abrasão/erosão diferirem pelo tipo de meio no qual ocorre o desgaste, meio seco ou suspensão em água, tanto na literatura mundial quanto em trabalhos publicados, como por exemplo, por Kormann (2002), Yazici e İnan (2006) e Liu (2007) e, inclusive na norma ASTM C1138/97, o desgaste que danifica superfícies hidráulicas de concreto é tratado como erosão por abrasão ou, simplesmente, abrasão. Assim sendo, esta definição difere daquela sugerida por Neville (1997) e Mehta e Monteiro (2014), expostas anteriormente.

Diversas estratégias são conhecidas para melhorar a resistência do concreto ao desgaste, tais como o aumento na resistência à compressão e à tração (NAIK; SINGH; RAMME, 2002; YAZICI; İNAN, 2006). Além disso, o aumento do teor de agregado graúdo, a adição de polímeros e o reforço com fibras também podem contribuir de forma significativa para um aumento desta resistência (LIU, 2007).

Para alguns autores, além destes parâmetros abordados, a resistência do concreto ao desgaste pode ser influenciada por outras variáveis, tais como o tipo e as propriedades dos agregados, o acabamento da superfície, os tipos de endurecedores ou coberturas e as condições de cura (ATIŞ, 2002; SIDDIQUE, 2003; LI; ZHANG; OU, 2006; GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008; ÇAVDAR; YETGIN, 2010; SIDDIQUE; KAPOOR; KADRI;

BENNACER, 2012). Siddique (2003) inclui, ainda, o consumo de cimento, a relação a/c, a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado.

Segundo Sebök e Stráněl (2004), para concretos convencionais a resistência ao desgaste dos agregados tem importância substancial na resistência ao desgaste dos compostos cimentícios. Estes mesmos autores mencionam que a granulometria dos agregados, principalmente o tamanho máximo do grão, tem um papel extremamente importante. Almeida (2000) refere-se ao agregado graúdo como o componente do concreto convencional que protege a argamassa, a qual geralmente é menos resistente ao desgaste.

Yazici e İnan (2006) e Kumar e Sharma (2014) mencionam que os concretos de alta resistência (CAR), com baixa relação a/c, são menos dependentes do tipo de agregado, pois o uso de uma baixa relação a/c fornece um concreto denso e resistente ao desgaste. Esta elevada resistência pode ser obtida através da redução da porosidade e das microfissuras no concreto, principalmente na interface entre a pasta de cimento e agregados, a chamada zona de transição. Isto pode ser atingido usando-se superplastificantes e materiais suplementares, tais como a adição de cinza volante, sílica ativa, metacaulim, escória granulada de alto forno e/ou pozolanas naturais (SHANNAG, 2000; YAZICI; İNAN, 2006).

Neste trabalho, a abrasão será destacada como deterioração principal, devido ao aparente consenso na bibliografia de que este tipo de mecanismo de desgaste é um dos maiores causadores da perda de material ou perda de massa em concretos, além de ser uma manifestação patológica constatada em muitas estruturas como pisos de concreto, fato citado por diversos autores em trabalhos publicados (ROPKE, 1982; BRANDÃO, 1998; LIMA, 2000; SEBÖK; STRÁNĚL, 2004; YAZICI; İNAN, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; ROCHER, 2007; TARR; FARNY, 2008; FONSECA, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Este mecanismo de desgaste do concreto será tratado com maior enfoque no item 2.2.1.

2.2.1 Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos

O desgaste por abrasão de uma superfície de concreto é provocado pelo tráfego de pessoas e de veículos, bem como por impacto ou atrito causado pelo arraste de partículas ou objetos soltos (NAIK, SINGH; HOSSAIN, 1995; BRANDÃO, 1998; ALMEIDA, 2000; YAZICI; İNAN, 2006; ROCHER, 2007; ÇAVDAR; YETGIN, 2010). De acordo com alguns autores, a resistência do concreto à abrasão é definida como a capacidade de sua camada superficial resistir ao desgaste por atrito, arranhamento ou percussão (NEVILLE, 1997; BRANDÃO, 1998).

O fenômeno do desgaste superficial por abrasão em concretos ocorre de forma progressiva, sendo que inicialmente a resistência à abrasão do material está relacionada com a qualidade da camada superficial. Com o desgaste desta camada, os agregados miúdos e graúdos são expostos, e com a permanência da sollicitação por abrasão, o processo de desgaste continuará ocorrendo. Nesta etapa mais avançada, a resistência à abrasão passa a depender da dureza dos agregados e da aderência entre a pasta de cimento e estes agregados (ACI 201.2R, 2008; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

De forma geral, o mecanismo de deterioração superficial começa através do desprendimento dos componentes do concreto de menor resistência mecânica e de menor capacidade de aderência. Trata-se, principalmente, do desprendimento do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) que encontra-se na pasta de cimento hidratada numa proporção elevada (em torno de 25 % da massa da pasta), principalmente na forma de cristais precipitados (Portlandita). O Ca(OH)_2 , embora considerado benéfico quanto à proteção das armaduras contra a corrosão no concreto, ao mesmo tempo constitui-se em um composto extremamente instável do ponto de vista químico e mecânico. Logo, esse composto químico é responsável por uma importante parcela do mecanismo de desgaste por abrasão, o que é ainda mais grave quando a cura do concreto é deficiente ou inexistente; ou ainda, quando utiliza-se concretos com alta relação a/c (OLIVEIRA; LULA, 2006).

Independentemente da origem do problema, o desprendimento do Ca(OH)_2 ocorre na etapa inicial no processo de perda de material. Desta forma, a pasta passa a ficar mais suscetível ao desgaste, fato que está intimamente associado a maior porosidade e fissuras pré-existentes na superfície, os quais causam uma distribuição desuniforme dos esforços mecânicos gerados pela ação abrasiva. Na continuidade deste processo, ocorre a perda de massa do material, com ruptura e desprendimento de outros componentes da pasta e dos agregados miúdos (areia e outros finos), formando-se pequenas crateras na superfície do concreto (OLIVEIRA; LULA, 2006). A figura 4 apresenta, de forma ilustrativa, o processo evolutivo do desgaste ocorrido pela abrasão em superfície de concreto.

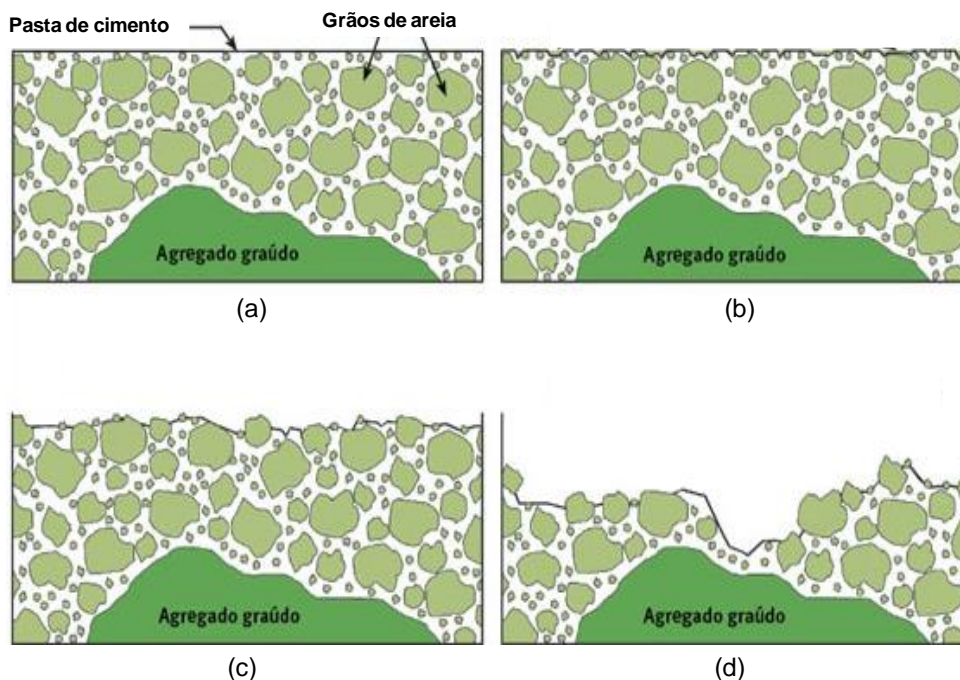


Figura 4: processo de perda de material por abrasão em superfície de concreto: (a) concreto novo, (b) desprendimento do material nos primeiros pontos com geração de poeira, (c) perda de pasta superficial e desprendimento dos grãos de areia mais finos e (d) formação de cratera – fim da vida útil do piso (adaptado de OLIVEIRA; LULA, 2006)

Em geral, a pasta endurecida tem baixa resistência à abrasão (SIDDIQUE; PRINCE; KAMALI, 2007). Por isso, para se ter concretos mais resistentes a esta deterioração, é desejável que tal material apresente elevada dureza superficial e baixa porosidade, e que na sua composição contenha agregados de alta dureza (NAIK; SINGH; RAMME, 2002; YAZICI; İNAN, 2006; SIDDIQUE; PRINCE; KAMALI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014; KUMAR; SHARMA; 2014).

Inúmeros são os fatores que intervêm no desenvolvimento da resistência à abrasão em concretos, sendo muitos destes já citados neste capítulo. Contudo, mesmo os melhores concretos raramente podem suportar abrasão durante períodos prolongados.

2.2.2 Fatores que Intervêm no Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos

A seguir serão explicitados alguns fatores ou parâmetros considerados como preponderantes no desenvolvimento do fenômeno abrasivo, bem como estudos realizados que mencionam a real influência de tais parâmetros no desgaste decorrente da abrasão em concretos.

2.2.2.1 Relação água/cimento

A relação a/c é um dos principais fatores a ser considerado para o aumento da resistência à abrasão dos pisos de concreto. A redução da relação a/c implica no aumento da resistência do concreto. Em geral, isto leva a um aumento de custo para o projeto (VIECILI, 2004), a não ser que parte do cimento seja substituída por adições minerais de menor custo, tal como a cinza volante (STACK et al., 2011).

Enquanto algumas medidas para redução da demanda de água das misturas são efetivas, a incorporação de endurecedores cimentícios e um acabamento rígido densificam e reduzem a relação a/c das camadas superficiais dos concretos. Somando-se a isto, sucessivos acabamentos podem densificar tal camada de forma mais efetiva, expelindo ar e água dos vazios próximos à superfície, reduzindo assim a relação a/c e aumentando a resistência à abrasão dos concretos (TARR; FARNY, 2008).

No entanto, Mehta e Monteiro (2014) citam que, para evitar a formação de uma superfície de menor resistência (camada de partículas finas removida da pasta de cimento e agregados), recomenda-se atrasar as operações de desempenho até que o concreto tenha perdido a água de exsudação superficial.

Em estudo realizado por Siddique e Khatib (2009), os autores declaram que existe uma forte correlação entre a resistência à abrasão do concreto e cada uma das propriedades mecânicas investigadas, a saber, a resistência à compressão, à tração, à flexão e o módulo de elasticidade. Para os autores, um aumento na resistência e no módulo de elasticidade geralmente leva a um aumento da resistência à abrasão do material.

Existem duas abordagens relacionadas à resistência à compressão e à resistência à abrasão dos concretos. A primeira determina que a resistência à compressão é o fator mais importante que governa a resistência à abrasão dos materiais cimentícios (NAIK, SINGH; HOSSAIN, 1995). Essa abordagem indica ainda que a resistência à perda de material ou de massa é realçada com o aumento da resistência à compressão destes materiais (ATIŞ, 2002; ATIŞ; 2003). Gjorv, Baerland e Ronning (1990)³ e Naik, Singh e Hossain (1994)⁴, citados por Li, Zhang e Ou (2006), indicam que a relação entre a resistência à compressão e a resistência à abrasão para os concretos avaliados foi linear. No entanto, estudos realizados por Atiş (2002) e Li, Zhang e Ou (2006) assinalam que tal relação para os

50

³ GJORV, O. E., BAERLAND, T., RONNING, H.R., Abrasion resistance of high-strength concrete pavements. **Concrete Int.** p. 45-48, jan. 1990.

⁴ NAIK, T.R., SINGH, S.S., HOSSAIN, M.M. Abrasion resistance of concrete as influenced by inclusion of fly ash. **Cement Concrete Research.** v. 24, n. 2, p. 303-312, 1994.

concretos foi hiperbólica, fato que denota a forte dependência do desgaste dos concretos com as suas respectivas resistências.

A segunda abordagem é que a resistência à abrasão dos concretos independe da sua resistência à compressão (NANNI, 1989⁵ apud LI; ZHANG; OU, 2006), tendo em vista que a resistência à abrasão não é uma propriedade de massa como a resistência, mas sim é uma propriedade de superfície. Logo, para Almeida (2000), é possível afirmar que tanto o acabamento superficial quanto o regime de cura afetam muito mais a resistência à abrasão dos materiais cimentícios do que a própria resistência à compressão.

Segundo Chodounsky e Viecili (2007), para a garantia de uma qualidade mínima da superfície, independentemente do processo executivo, deve-se especificar e empregar valores mínimos de resistência do concreto, não devendo ser entendida a resistência, como a única responsável pela qualidade de um piso de concreto. Uma elevada resistência à compressão, por si só, não garante uma elevada durabilidade da estrutura, porém a durabilidade advém também de uma boa resistência do concreto.

Neville (1997) afirma que a resistência mínima necessária vai depender da severidade da abrasão esperada. Segundo o manual da ACI 201.2R (ACI, 2008), concretos sujeitos a solicitações de abrasão devem ter pelo menos 28 MPa de resistência à compressão.

Ainda, segundo Brandão (1998), para garantir a qualidade deste concreto superficial, deve-se evitar segregações e exsudação excessivas, controlar a duração das operações de acabamento, proibir a adição de água para auxiliar o acabamento, desta forma evitando um aumento da relação a/c na superfície, retirar o excesso de água desta superfície antes do acabamento e promover cura apropriada e eficiente (normalmente mais prolongada do que a usual), para proporcionar a hidratação do cimento nas camadas externas e reduzir a porosidade. Além disso, a utilização de revestimentos absorventes nas fôrmas pode contribuir para a redução da relação a/c no concreto da superfície, promovendo aumento de resistência desta camada.

Liu (1981)⁶, citado por Mehta e Monteiro (2014), verificou uma boa correlação existente entre a relação a/c e a resistência do concreto à abrasão. A figura 5 mostra que uma diminuição na relação a/c dos concretos aumenta a resistência ao desgaste e que, além

51—

⁵ NANNI, A. Abrasion resistance of roller-compacted concrete. **ACI Materials Journal**. v. 86, n. 53, p. 559-565, 1989.

⁶ LIU, T. C. Abrasion resistance of concrete. **ACI Journal - Proceedings**. v. 78, n. 5, p. 341-350, sep-oct, 1981.

disso, o uso de agregados graúdos de elevada dureza também proporciona melhores resistências à abrasão.

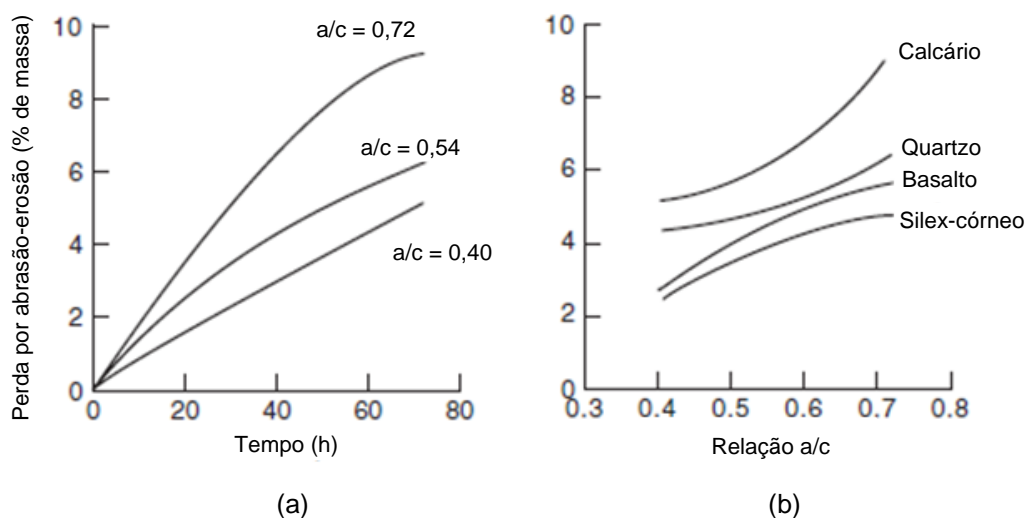


Figura 5: resistência à abrasão de concretos: (a) influência da relação a/c; (b) influência do tipo de agregado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2014)

2.2.2.2 Consumo de Cimento

Conforme já declarado por alguns autores, a resistência à perda de massa dos concretos (ou abrasão) depende da dureza da superfície, bem como da resistência interna, fato que pode exigir teores mais elevados de cimento (com conseqüente redução da relação a/c) nas dosagens do que seria necessário apenas para garantir uma adequada resistência à compressão (FARNY, 2001; TARR; FARNY, 2008).

Além disso, na fase de acabamento deve haver uma quantidade de pasta suficiente para o fechamento e alisamento superficial. Sem um adequado teor de argamassa, as partículas de agregado graúdo podem refletir através da superfície dos concretos, frequentemente aparecendo como pontos escuros (TARR; FARNY, 2008). Entretanto, teores muito altos de argamassa podem ocasionar a delaminação da camada superficial da estrutura (RODRIGUES; MONTARDO, 2002) e aumentar o potencial de retração por secagem, levando à fissuração e ao empenamento desta camada (TARR; FARNY, 2008).

Para Rodrigues e Montardo (2002), o consumo mínimo de cimento não é o único responsável pela resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos. Resumidamente a resistência superficial pode ser correlacionada diretamente com a resistência à compressão, como já mencionado por muitos autores, mas pode ser fortemente afetada pela exsudação do concreto, que leva a uma maior relação a/c na superfície resultando, portanto, em uma camada superficial enfraquecida. O fenômeno

relacionado à exsudação em superfície de concreto será tratado com maior profundidade no item 2.2.2.5.

O manual do ACI 302.1R (ACI, 2004) faz uma recomendação com relação ao teor de cimento para concretos empregados em pisos. Tal recomendação é feita com base na dimensão máxima do agregado a ser especificado (tabela 2). Segundo o manual americano, o consumo mínimo está associado com a redução da relação a/c, além de garantir trabalhabilidade, reduzir exsudação e evitar a segregação das misturas. Já o consumo máximo é estabelecido de forma a limitar a retração, o calor de hidratação, a fissuração, o empenamento e a delaminação das estruturas. Mais objetivo, este manual fixa valores de resistência mecânica mínima entre 21 MPa e 28 MPa, dependendo da classe do piso.

Tabela 2: teores de cimento recomendados para pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004)

Dimensão máxima nominal do agregado, mm	Cimento, * kg/m ³
37,5	280 a 330
25,0	310 a 360
19,0	320 a 375
12,5	350 a 405
9,5	360 a 415

* Inclui materiais suplementares cimentícios como parte do valor do cimento

2.2.2.3 Agregados

Segundo Fonseca (2009), a forma das partículas de agregado influencia diretamente as propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, o ângulo de atrito interno, a compactidade e, em última análise, todas aquelas que dependem da quantidade de água de amassamento. Embora a resistência à abrasão de concretos tenha um acréscimo com a dureza e rugosidade dos agregados graúdos (TARR; FARNY, 2008), é a resistência ao desgaste da argamassa composta pelos agregados miúdos e pelo cimento, assim como a ligação desta com os agregados graúdos, que condiciona a resistência à abrasão dos compósitos cimentícios (FONSECA, 2009).

Segundo Ugur, Demirdag e Yavuz (2010), a resistência à abrasão Los Angeles do agregado graúdo exerce influência substancial na qualidade da camada superficial de estruturas como pisos de concreto, principalmente na resistência à abrasão dos compósitos. Mencionam, ainda, que a resistência à abrasão dos agregados tem relação direta com as propriedades das rochas de origem, como a resistência (KAHRAMAN; FENER, 2007), a porosidade, a

dureza, entre outras. Tais autores determinaram equações que modelam relações evidentes entre as propriedades das rochas e a resistência à abrasão Los Angeles dos agregados.

Com relação aos agregados miúdos, a distribuição granulométrica destes exerce um papel de extrema importância na determinação do consumo de água de amassamento do concreto, na trabalhabilidade, na exsudação e no acabamento superficial (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Geralmente, uma redução do teor de agregados finos pode resultar em incremento da resistência à abrasão, desde que não haja aumento excessivo da exsudação e segregação das misturas de concreto (ACI 302.1R, 2004). Além disso, de acordo com Tarr e Farny (2008) e Chodounsky e Viecili (2007), a camada superficial de argamassa dos concretos contendo areia natural resiste melhor ao desgaste do que as superfícies dos concretos contendo agregados finos proveniente da britagem de rochas.

Li, Ke e Zhou (2011) estudaram a influência das características físicas e mineralógicas de diferentes tipos de agregados miúdos oriundos da britagem de rochas em concretos convencionais empregados em pavimentos. Dentre algumas características, os autores avaliaram a influência da rugosidade superficial, da resistência ao esmagamento e do teor de material fino inferior a $75\ \mu\text{m}$ (4,3 %, 7%, 10 %, 15 %, 20%) presente nas areias artificiais. Os autores concluíram que o teor de 10 % dos microfinos presentes nas areias proporcionou acréscimos significativos nas propriedades mecânicas e na resistência à abrasão dos concretos quando em comparação aos demais teores estudados. Somando-se a isto, o aumento na rugosidade superficial das partículas promoveu melhoras nessas propriedades.

Singh e Siddique (2012) investigaram as propriedades mecânicas e a resistência à abrasão de concretos contendo areia de fundição. Os autores avaliaram a influência da substituição do agregado miúdo natural por areia de fundição em diferentes teores (0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 %, em massa) nas propriedades mencionadas. Como resultados encontrados, tais autores destacam que com o aumento no teor de substituição foi possível verificar incrementos significativos nas propriedades mecânicas e na resistência à abrasão dos concretos. Além disso, observaram que a resistência à abrasão do concreto mostra ter forte correlação com as propriedades mecânicas testadas, independentemente do teor de substituição de areia e do tempo de cura.

Conforme Viecili (2004), em concretos com resistência acima de 56 MPa, a dureza dos agregados graúdos tem influência mínima na resistência ao desgaste, uma vez que ocorre uma redução da relação água/aglomerante (a/agl). Por conseqüência, uma melhora significativa da argamassa é esperada, a qual passa a contribuir de forma incisiva para a

resistência à abrasão do concreto. Já para resistências entre 21 MPa e 35 MPa, a resistência à compressão do agregado graúdo tem forte influência nos resultados, pois nestes concretos a relação a/agl da matriz cimentícia passa a ser o elo mais fraco, desgastando-se mais facilmente. Portanto, no caso de agregados de baixa qualidade, todo o concreto pode passar por um processo de desgaste rapidamente.

Özturan e Çeçen (1997) estudaram o efeito dos tipos de agregado graúdo nas propriedades mecânicas dos concretos com diferentes resistências. Eles concluíram que concretos convencionais feitos com basalto e seixo mostraram resistência à compressão similar; já os concretos com agregados calcários apresentaram resistência um pouco superior aos anteriores. Com relação aos CAR, a maior resistência à tração foi obtida por meio da combinação entre agregados basálticos e calcários quando em comparação aos concretos contendo seixo. Complementarmente, o efeito de quatro tipos de agregados graúdos na resistência à compressão e resistência à flexão de concretos convencionais e de alta resistência foi relatado por Ezeldin e Aitcin (1991)⁷ apud Kiliç et al. (2008). Os autores relatam que o tipo de agregado graúdo não influencia de maneira significativa as propriedades mecânicas dos concretos convencionais. No entanto, os CAR contendo agregado calcário produziram maior resistência à compressão do que as misturas de concreto contendo seixo ou agregados graníticos. Também foi relatado que o comportamento à flexão dos CAR não foi influenciado pelos tipos de agregados. É importante ressaltar o estudo proposto por Liu (1981) citado por Mehta e Monteiro (2014), onde o autor verificou a utilização de diferentes agregados na resistência à abrasão de concretos, e ressalta-se que compósitos produzidos com agregados calcários apresentam baixa resistência ao desgaste abrasivo, fato que pode ser visualizado na figura 5 (b).

Kiliç et al. (2008) examinaram a influência do tipo de agregado nas características mecânicas e de resistência à abrasão de CAR contendo sílica ativa. Cinco tipos diferentes de agregados (gabro, basalto, quartzo, calcário e arenito) foram utilizados. Os concretos constituídos por gabro apresentaram a maior resistência à compressão e à tração na flexão, assim como a maior resistência à abrasão, enquanto concretos contendo arenito mostraram ter as menores resistências mecânicas e ao desgaste. Os autores também relatam que agregados altamente resistentes à abrasão produziram concretos com elevada resistência a tal propriedade, onde foi possível verificar uma forte correlação, com coeficiente de determinação (R^2) de 88 %.

⁷ EZELDIN, A. S.; AITCIN, P. C. Effect of coarse aggregate on the behaviour of normal and high strength concretes. **Cement Concrete Aggregates**. v. 13, n. 2, p 121-124, 1991.

Saikia e Brito (2014) avaliaram a influência da substituição parcial de agregados calcários naturais por agregado reciclado de polietileno tereftalato (PET), em teores de 5 %, 10 % e 15 %, frente às propriedades mecânicas e ao desgaste de concretos convencionais (a/agl 0,53). Os autores observaram ganhos na resistência à abrasão dos concretos com o acréscimo na utilização dos agregados reciclados (PET); e, atribuem tal comportamento às características do agregado de PET, uma vez que o plástico apresenta elevada tenacidade e bom comportamento à abrasão. No entanto, a resistência à compressão dos compósitos foi reduzida com a presença do resíduo, o que segundo os autores está relacionada a falta de aderência na zona de transição entre o agregado reciclado e a matriz. Os autores não verificaram uma boa correlação entre as propriedades mecânicas e a resistência à abrasão, e destacam que os ensaios de compressão avaliam a resistência da massa, enquanto que os ensaios de abrasão medem a qualidade da superfície. Enfatizam ainda que, como o agregado tem um efeito importante sobre as propriedades da superfície do concreto, a qualidade e o tipo de agregado têm uma influência significativa na sua resistência abrasão.

2.2.2.4 Fibras e Adições Minerais

Diversas são as adições comumente empregadas nas misturas de concreto a fim de se obter uma melhoria quanto às características mecânicas e de durabilidade das estruturas. Dentre as mais usadas encontram-se as adições minerais, tais como a sílica ativa, o metacaulim, a cinza volante e a escória granulada de alto forno, além do reforço com a adição de fibras, podendo ser estas naturais, sintéticas, ou metálicas. A seguir serão abordados alguns destes materiais, ressaltando o papel que eles desempenham no comportamento do concreto, em especial no que diz respeito à resistência à abrasão.

A sílica ativa é um material suplementar altamente empregado em materiais cimentícios. Existe um grande consenso na bibliografia com relação aos efeitos benéficos desta adição mineral em estruturas de concreto. Segundo alguns autores, a ação benéfica da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas dos compósitos decorrem de dois efeitos: o efeito químico, através da rápida reação pozolânica entre a sílica (SiO_2) e o Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento para obtenção do silicato de cálcio hidratado, similar ao produto C-S-H (produto de hidratação das fases C_3S e C_2S , o qual é o grande responsável pela resistência da pasta); e o efeito físico, também chamado de efeito fíler, que compreende o preenchimento dos vazios intergranulares do concreto de cimento Portland, principalmente na interface agregado-pasta, pelas partículas micrométricas da sílica (NEVILLE, 1997; HOFFMANN, 2001; ROY; ARJUNAN; SILSBEE, 2001; KORMANN, 2002; MAZLOOM; RAMEZANIANPOUR; BROOKS, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014; KUMAR; SHARMA, 2014).

Segundo Neville (1997), essa interface entre os agregados e a pasta endurecida de cimento é conhecida como sendo a de menor resistência do concreto, devido ao efeito parede, que impede as partículas de cimento de se organizarem de forma compacta. Tal organização é obtida através da elevada finura das partículas de sílica ativa, as quais são, tipicamente, 100 vezes menores do que as partículas de cimento.

Metha e Monteiro (2006) explicam que a água exsudada internamente à massa de concreto tende a se acomodar próximo às partículas de agregado grandes, chatas e alongadas (figura 6). Por este motivo, a zona de transição que existe entre a pasta de cimento e o agregado graúdo tende a ser a mais fraca e muito mais propensa à fissuração. Esta região de menor resistência pode ocasionar a ruptura da aderência por cisalhamento na superfície da partícula de agregado.

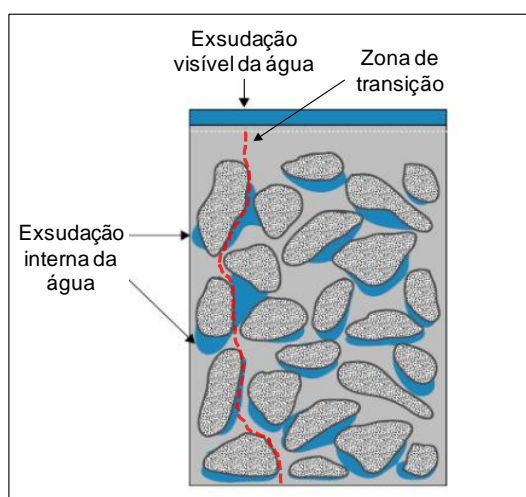


Figura 6: representação esquemática da exsudação em concreto recém-lançado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Todavia, outro fator considerado preponderante é o fato de que devido a sua grande finura, a sílica ativa reduz drasticamente a exsudação, de maneira que não fica água retida sob as partículas maiores de agregado graúdo, o que por conseqüência reduz a porosidade na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados (NEVILLE, 1997; KORMANN, 2002; MAZLOOM; RAMEZANIANPOUR; BROOKS, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Logo, a resistência e a durabilidade na interface pasta-agregado passam a ser significativamente melhoradas. Ainda, a presença de sílica ativa no concreto apresenta benefícios quanto à resistência à abrasão superficial, uma vez que diminui a exsudação e, portanto, não se forma uma camada enfraquecida na parte superior das estruturas. Além disso, aumenta a aderência entre a pasta de cimento hidratada e o agregado graúdo; dessa forma as ações de desgaste diferencial e desprendimento das partículas de agregado da matriz cimentícia passam a ser dificultadas (NEVILLE, 1997; HOFFMANN; 2001;

CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Entretanto, segundo os autores, o aumento da coesão da mistura e a pouca exsudação podem resultar em fissuração devido à retração plástica por secagem (dessecação superficial), a menos que se tomem certos cuidados durante a cura.

Ghafoori e Diawara (1999) avaliaram a resistência à abrasão de concretos contendo cinco teores de substituição de agregados finos por sílica ativa (5, 10, 15 e 20 %). Os autores concluíram que a resistência ao desgaste dos concretos contendo sílica foi aumentada com a substituição equivalente de agregado miúdo em até 10 %. Além disso, os resultados observados mostraram que após 28 e 91 dias de cura úmida, a adição de 10 % de sílica ativa ao concreto melhorou a sua resistência à abrasão em até 49 % e 51 %, respectivamente, em comparação às amostras de referência ou sem adição. Ainda, o aumento do teor de sílica ativa no concreto foi mais significativo no incremento da resistência à abrasão do que na resistência à compressão do material. Cabe salientar que os autores encontraram significativa correlação entre a profundidade de desgaste e a resistência à compressão dos concretos estudados.

Em estudo realizado por Yazici e İnan (2006), em concretos de alta resistência com sílica ativa e cinza volante, foi verificado que a menor perda de volume frente ao desgaste destes concretos ocorreu nas amostras preparadas apenas com emprego de sílica ativa (30 % de substituição em relação à massa de cimento), sendo o maior desgaste encontrado nos concretos que foram preparados apenas com a utilização de cinza volante (25 % de substituição em relação à massa de cimento). Os resultados mostraram que a resistência à abrasão dos CAR foi melhorada com o uso da sílica ativa incorporada às misturas, entretanto, tal propriedade diminuiu proporcionalmente com o teor de cinza adicionado às misturas dos concretos. De acordo com os autores a resistência ao desgaste dos concretos analisados aumentou com o aumento da sua resistência à compressão.

Diversos trabalhos têm sido relatados sobre o uso de cinza volante em concretos frente à análise de resistência ao desgaste por abrasão. De acordo com Siddique e Khatib (2009), muitos estudos realizados têm mostrado que concretos contendo teores de cinza que podem chegar até 50 %, em substituição à massa de cimento, apresentaram excelentes características quanto às propriedades de durabilidade e resistência mecânica, fato que diverge dos resultados encontrados no estudo proposto por Yazici e İnan (2006) citado anteriormente.

Ainda, segundo Siddique (2008), com a utilização de cinzas no concreto a qualidade da pasta de cimento é melhorada, e a lixiviabilidade do Ca(OH)_2 é dificultada com a idade. Para o autor, devido à densa estrutura da pasta de cimento e às características de uma boa

compatibilidade química do cimento com as cinzas, acredita-se que a tendência do agregado graúdo ser arrancado da ligação da matriz por ação abrasiva é reduzida. Ainda, segundo Chodounsky e Viecili (2007), o concreto com adição de cinza volante apresenta boa coesão e com isso uma menor tendência à exsudação.

Siddique e Khatib (2009) estudaram a influência da substituição de agregado miúdo por cinza volante na resistência à abrasão de concretos convencionais (a/c 0,46). Os teores de substituição avaliados foram de 35, 45 e 55 % pela massa de agregado. Os autores verificaram que a presença de quantidades crescentes de cinza reforçou a resistência à abrasão, uma vez que a profundidade do desgaste diminuiu com o aumento do teor de cinzas. Para os autores o aumento da resistência à abrasão na presença de cinzas é atribuído à reação pozolânica entre a cinza e os produtos de hidratação do cimento, gerando uma densificação da matriz cimentícia, ou ainda, a substituição parcial da areia por cinzas leva a uma redução na relação a/agl, o que acarreta em uma matriz de concreto mais resistente, aumentando a resistência à abrasão.

Siddique (2003) também investigou a influência da substituição de agregados finos das misturas de concreto por cinza volante, em teores de 10, 20, 30 e 40 %, na resistência à abrasão. As análises mostraram um aumento desta propriedade na medida em que aumentou-se o teor de substituição dos agregados finos. A resistência à abrasão teve um acréscimo de 40 % com 40 % de substituição dos agregados finos por cinza volante. O autor conclui que a resistência à abrasão dos concretos estudados foi significativamente influenciada pela resistência à compressão dos mesmos, ou ainda, a resistência à abrasão dos concretos foi proporcional às suas respectivas resistências à compressão.

Siddique, Prince e Kamali (2007) estudaram a influência da substituição de cimento por cinza volante, em teores de 35, 45, 55 e 65 %, na resistência à abrasão de concretos. Os testes de abrasão foram efetuados nas idades de 28, 91 e 365 dias. Os autores verificaram que tal resistência teve um acréscimo com o aumento das idades de ensaio e atribuem este resultado ao aumento da resistência à compressão dos concretos e à densificação da matriz de concreto com o passar do tempo. Entretanto, mencionam que, para todos os teores de substituição de cimento por cinza, a resistência à abrasão dos concretos foi inferior à dos concretos de referência ou sem a presença de tal adição, e salientam que para os compósitos cimentícios, com teor de substituição de 35 % em relação à massa de cimento, a resistência à abrasão foi similar à dos concretos de referência.

Importante destacar que, para uma mesma resistência à compressão, um concreto corretamente curado e acabado, com ou sem cinzas volantes, essencialmente irá exibir

igual resistência às forças de abrasão. A utilização de cinzas volantes afeta, portanto, este aspecto da durabilidade apenas na medida em que, geralmente, melhora a resistência à compressão do concreto devido à sua atividade pozolânica com o tempo (SIDDIQUE, 2008).

Segundo Rashad (2013), existem poucos trabalhos científicos publicados sobre a utilização de metacaulim em concretos, frente análises de resistência à abrasão. Neste particular, o autor desenvolveu um estudo em concretos convencionais, com relação a/agl 0,5, buscando avaliar a influência desta adição mineral como substituição em massa do agregado miúdo em teores de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %. Os resultados encontrados mostraram que os concretos com substituição parcial até 40 % tiveram acréscimos de resistência à abrasão, sendo que para este teor, aos 28 dias, a resistência ao desgaste superficial apresentou ganhos da ordem de 23 %; além disso, as propriedades mecânicas também foram melhoradas. Para o teor de 50 % não se verificou tal comportamento, pois os concretos testados mostraram resultados inferiores aos de referência. Segundo o autor, uma vez que o material apresenta maior área superficial específica por unidade de volume, o teor de cimento presente não foi capaz de promover aderência/ligação de ambos à matriz de concreto, acarretando em redução, tanto nas propriedades mecânicas, quanto no desgaste dos compósitos.

As fibras têm sido amplamente utilizadas em concreto a fim de melhorar suas propriedades mecânicas e sua durabilidade. A fibra de polipropileno é um tipo de fibra sintética que tem sido muito aplicada em estruturas de concreto, tais como pisos (TARR; FARNY, 2008), e muitos pesquisadores têm estudado as propriedades dos compósitos cimentícios com a adição de tal material (SUN; XU, 2009).

Chodounsky e Viecili (2007) relatam que as fibras sintéticas de polipropileno ou nylon apresentam baixo módulo de deformação em comparação ao do concreto, o que direciona a aplicação destas para o controle da fissuração por retração plástica, ou seja, enquanto o módulo de deformação do concreto for inferior ao da fibra. Por esta razão é que este material é caracterizado por proporcionar grandes benefícios no controle da fissuração do concreto nas primeiras idades. Segundo estes autores, parâmetros como o teor de fibra na mistura, a quantidade de fibras por quilograma (kg), a relação comprimento/diâmetro (fator de forma) e a ancoragem são considerados preponderantes no desempenho das fibras em materiais cimentícios.

No entanto, segundo Richardson (2006) e Chodounsky e Viecili (2007), a adição de fibras sintéticas de polipropileno ao concreto traz alguns efeitos secundários; um positivo, relacionado à redução da exsudação, diminuindo a mobilidade da água através da elevada

superfície específica das fibras, e outros dois negativos, relacionados à redução da trabalhabilidade dos compósitos e ao possível afloramento das fibras em decorrência da baixa densidade das mesmas, principalmente em misturas com elevada plasticidade. Cabe ressaltar que, de acordo com os autores, a diminuição de água exsudada evita a formação da camada enfraquecida na parte superior dos concretos, diminuindo o desgaste superficial ocasionado pela abrasão.

Ainda, segundo Li, Zhang e Ou (2006), várias pesquisas têm mostrado que a adição de fibras de polipropileno pode melhorar a resistência à abrasão de concretos. Resultados de estudos realizados por diversos pesquisadores, como Shuan-fa et al. (2001) e Bing-Qiang e Qiang (2002), indicaram que a resistência à abrasão dos concretos contendo fibras de polipropileno pode aumentar de 20 % a 60 %, de acordo com diferentes teores de adição às misturas; os autores atribuem tal comportamento à redução da exsudação.

Em estudo realizado por Sun e Xu (2009), os autores verificaram que a adição de fibras de polipropileno nos concretos, em teores de 0,45 e 0,9 kg/m³, reduziu a perda de massa por abrasão com relação às misturas de controle ou sem adição das fibras. Os resultados também indicam que o teor de 0,9 kg/m³ de fibras adicionadas às misturas mostrou um ótimo desempenho nos concretos em relação à propriedade analisada, havendo uma diminuição do desgaste em torno de 37,4 % com relação aos concretos de referência. Para os autores, a adição de fibras de polipropileno altera significativamente a microestrutura do concreto, uma vez que reduz o tamanho e orientação do Ca(OH)₂ e diminui os micro-vazios. Especificamente, as fibras de polipropileno, quando dosadas corretamente, criam uma rede que restringe o crescimento do Ca(OH)₂, reduzindo as micro fissuras na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, aumentando a resistência e a durabilidade dos concretos.

Zoran et. al (2012) realizaram um estudo sobre a influência da adição de diferentes microfibras de polipropileno (teor de 0,91 kg/m³) em concretos convencionais com distintas relações a/c (0,5, 0,6 e 0,7) frente ao desgaste por abrasão. Tais autores observaram acréscimos na resistência à abrasão dos compósitos com a adição das microfibras em comparação às amostras de referência. Além disso, com a redução da relação a/c os concretos mostraram maior desempenho quanto à perda de massa. Conjuntamente, foi constatado que existe forte correlação entre os parâmetros mecânicos e a resistência à abrasão dos concretos.

Complementarmente, Rodrigues e Montardo (2002) afirmam que através da formação de um microrreforço tridimensional que suspende ou sustenta os agregados, é possível atribuir

às fibras uma diminuição da segregação no concreto. Com isso, tem-se uma mistura mais homogênea e, conseqüentemente, um concreto com propriedades estruturais mais uniformes.

No entanto, estudos realizados por Silva (2011) demonstraram que a adição das microfibras de polipropileno ao concreto, em teores de 0,6 kg/m³, não causaram efeitos significativos no desgaste por abrasão. Foram avaliados concretos com mesma relação a/agl (0,53) e diferentes consumos de água (175 l/m³, 190 l/m³ e 205 l/m³), para dois tipos de cimento (CP V-ARI e CP IV). A autora atribui tais resultados ao fato de que este tipo de fibra empregado destina-se, principalmente, para melhorar a fissuração por retração dos compósitos cimentícios; corroborando com as menções feitas anteriormente por Richardson (2006) e Chodounsky e Viecili (2007).

2.2.2.5 Exsudação

Define-se exsudação como um fenômeno cuja manifestação externa é o aparecimento de água superficial logo após o lançamento e adensamento do concreto, porém antes de ocorrer a sua pega (NEVILLE, 1997; WAINWRIGHT; REY, 2000; TOPÇU; ELGÜN, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Sendo a água o componente mais leve da mistura, apresenta a tendência de aflorar na superfície do concreto, com a sedimentação das partículas sólidas sob a ação da força da gravidade (WAINWRIGHT; AIT-AIDER, 1995; WAINWRIGHT; REY, 2000; JOSSERAND; COUSSY; LARRARD, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Todos os concretos exsudam até certo ponto, mas a água exsudada é somente observada na superfície quando a taxa de exsudação excede a taxa de evaporação (WAINWRIGHT; AIT-AIDER, 1995; WAINWRIGHT; REY, 2000). Imediatamente depois da compactação, há um período curto de dormência que é seguido por um período em que a taxa de exsudação evolui de forma constante, mas logo essa taxa ou velocidade de exsudação decresce acentuadamente. A exsudação irá terminar quando o movimento da água é bloqueado pelo crescimento dos produtos de hidratação ou pelos sólidos que efetivamente entram em contato uns com os outros ou pela combinação de ambos (NEVILLE, 1997; WAINWRIGHT; REY, 2000; JOSSERAND; COUSSY; LARRARD, 2006).

Nem toda a água que é exsudada atinge a superfície do concreto, parte dela fica retida sob as partículas de dimensões maiores, como os agregados graúdos, contribuindo para o enfraquecimento da zona de transição ou de ligação pasta/agregado (JOSSERAND; COUSSY; LARRARD, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A nata porosa que se forma na superfície da estrutura devido à exsudação externa é causada

pela tendência da água percolar pelos capilares internos do concreto, carreando as partículas mais finas de cimento e areia para a camada superficial. Tal camada contém elevada relação a/c , sendo, portanto, porosa e fraca, podendo levar as superfícies dos concretos à tendência de um desgaste acentuado (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Geralmente, as causas da exsudação excessiva nas misturas de concreto estão relacionadas a uma combinação de fatores, como por exemplo, consistência inadequada ou muito elevada, agregados com deficiência de finos ou mal graduados, deficiência de partículas finas (baixo consumo de cimento e adições), e métodos inadequados de lançamento e adensamento (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Medidas que busquem um maior controle na escolha correta dos materiais e na dosagem, bem como nos métodos de manuseio e lançamento do concreto, podem reduzir a ocorrência do fenômeno.

De uma forma geral, a exsudação pode ser reduzida através das seguintes medidas (ACI 302.1R, 2004):

- a) emprego de uma granulometria contínua, e incremento de agregados com alta porcentagem de material retido nas peneiras 0,15 mm e 0,075 mm;
- b) aumento do teor de ar incorporado, limitando em no máximo 3 % para pisos de concreto, a fim de se evitar problemas de delaminação;
- c) emprego de cimentos mais finos, ou substituição de parte do cimento por uma adição de elevada finura, como a sílica ativa;
- d) redução do abatimento ao mínimo necessário, sendo o valor compatível com a forma e com os equipamentos de lançamento;
- e) redução do teor de água de amassamento da mistura, com a incorporação de aditivos redutores de água, plastificantes e/ou superplastificantes.

Importante ressaltar que cimentos com elevada finura diminuem a tendência à exsudação das misturas, possivelmente porque as partículas mais finas se hidratam mais cedo e, também, devido à menor velocidade de sedimentação e à maior quantidade de partículas sólidas em contato (NEVILLE, 1997). Além disso, cimentos com maiores porcentagens de C_3A e de álcalis, que resultam em grande perda de abatimento nas primeiras idades, também tendem a reduzir tal fenômeno (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Considerando-se a influência da temperatura, Neville (1997) afirma que em temperaturas mais elevadas, mas dentro de uma faixa normal, a velocidade de exsudação diminui. Entretanto, a capacidade total da exsudação não deve se alterar; já em temperaturas mais

baixas, a capacidade de exsudação pode ser aumentada, provavelmente devido ao maior intervalo de tempo para o enrijecimento da pasta, que impediria o processo de liberação da água.

Topçu e Elgün (2004) estudaram a influência do tipo e teor de cimento e do consumo de água na exsudação de concretos com diferentes resistências (25 MPa e 35 MPa). Não houve uma diferença significativa nas quantidades de exsudação para os concretos com 25 MPa e 35 MPa produzidos com o mesmo tipo de cimento. Para uma mesma quantidade de água de mistura e teor de cimento a exsudação foi menor para o cimento mais fino ou com maior área superficial específica e com maior teor de C_3A . Quando a quantidade de água foi aumentada de 190 para 230 kg/m³ para um mesmo teor de cimento (375 kg/m³), as quantidades exsudadas quase duplicaram. Aumentando-se os teores de cimento reduziu-se a exsudação. Segundo os autores isto pode estar relacionado ao elevado teor de cimento (450 kg/m³), assim como à capacidade de retenção de água das partículas de cimento. Essa capacidade de retenção das partículas de cimento é parcialmente dependente da quantidade de C_3A e C_4AF presentes. Paralelo a isto, aumentando-se a relação a/c, aumentou-se a exsudação.

2.2.2.6 Tratamento Superficial

O concreto é um material intrinsecamente frágil, propenso a danos pelo impacto de objetos pesados e cargas, com uma resistência à abrasão relativamente baixa. Para minimizar esses danos em superfícies de concreto, diversos tratamentos têm sido desenvolvidos, a fim de proteger a camada superficial das estruturas.

A presença de agentes agressivos pode reduzir o tempo de serviço de uma estrutura como um pavimento ou um piso de concreto, e, além disso, causar o acúmulo de poeira na sua superfície (GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008). Assim, quando estes fenômenos ocorrem, agregados especiais ou tratamentos de superfície são necessários, como por exemplo, endurecedores líquidos ou endurecedores cimentícios à base de agregados minerais ou metálicos, os quais podem ser adicionados à superfície, atuando como uma cobertura espessa, conforme destacado pela linha vermelha na figura 7 (RODRIGUES; MONTARDO, 2002; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008). A utilização destes materiais produz uma camada superficial eficiente, altamente resistente ao desgaste e ao impacto (GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008).



Figura 7: amostra laboratorial mostrando endurecedor superficial incorporado ao substrato de concreto (adaptado de GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008)

A aplicação de endurecedor superficial líquido promove maior resistência ao desgaste e menor permeabilidade ao concreto, ocasionando a vitrificação dos pisos em profundidade que pode atingir até mais de 4 mm (PICCOLI; SILVA; TOMASELLI, 1997; VIECILI, 2004). O acabamento superficial líquido é composto por componentes inorgânicos, os quais reagem com os compostos hidratados do cimento, gerando compostos de maior dureza. Além disso, esses endurecedores são eficazes em reduzir a formação de poeira no piso proveniente do próprio concreto (PICCOLI; SILVA; TOMASELLI, 1997; VIECILI, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

Existem endurecedores líquidos (químicos) à base de silicato de sódio e à base de flúor-silicato de zinco ou magnésio, que reagem com o Ca(OH)_2 presente na pasta de cimento para formar produtos insolúveis, selando e obstruindo os poros capilares próximos ou na superfície, e com isto aumentando a resistência à abrasão (METHA; MONTEIRO, 2008). A eficiência do incremento de resistência à abrasão está relacionada com a profundidade de penetração desses endurecedores (CHODOUNSKY, VIECILI, 2007). A figura 8 representa a eficiência do emprego de endurecedores líquidos em superfície de concreto quanto à formação de uma camada resistente e impermeável, onde se percebe que a aplicação de endurecedores à base de silicatos forma um filme de elevada dureza na superfície do material, enquanto que os endurecedores à base de flúor-silicatos proporcionam uma camada mais espessa de elevada dureza na superfície do mesmo.

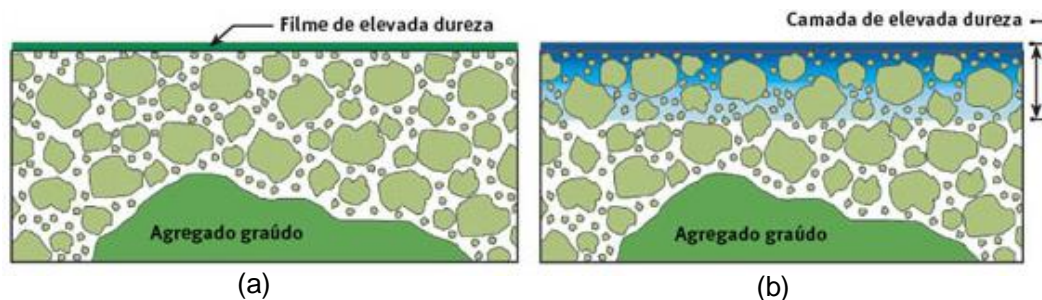


Figura 8: superfícies de concreto tratadas com endurecedores superficiais líquidos: (a) endurecedores à base de silicatos e (b) endurecedores à base de flúor-silicatos (OLIVEIRA; LULA, 2006)

Estudos realizados por Bauer et al. (2002) em argamassas concluíram que tanto endurecedores líquidos à base de silicatos quanto à base de flúor-silicatos têm praticamente o mesmo desempenho quanto à eficiência de endurecimento e poder de penetração. Além disso, ficou comprovado que a eficiência dos endurecedores na redução do desgaste é maior em argamassas com maior relação a/c (0,65), onde essa redução variou entre 15 % e 18 %, comparando-se com argamassas com menor relação a/c (0,40 e 0,50), onde a redução do desgaste ficou em torno de 10 %. A maior eficiência verificada para as matrizes mais porosas pode ser explicada em função da maior penetração do produto e menor resistência inicial apresentada pelas mesmas.

Os endurecedores cimentícios, também conhecidos como *dry shake*, são argamassas compostas de cimento, agregados de quartzo de alta dureza ou metálicos, e aditivos químicos, podendo conter sílica ativa em sua composição. A utilização destes produtos reduz a relação a/agl superficial, pela incorporação no concreto dos aglomerantes presentes, melhorando a matriz superficial deste concreto e principalmente a zona de transição, tornando a superfície dos pisos mais resistente à abrasão (VIECILI, 2004).

Com relação aos endurecedores cimentícios à base de agregados minerais, especificações de fabricantes do produto recomendam, para a maior parte dos casos, taxas de aplicação do produto entre 4 kg/m² e 9 kg/m², sendo 3 kg/m² a taxa mínima de aplicação. Já para endurecedores cimentícios com base em agregados metálicos, especificações recomendam taxas de aplicação entre 5 kg/m² e 14 kg/m² (VIECILI, 2004).

2.2.2.7 Cura

Problemas relacionados à resistência à abrasão inadequada nos concretos podem ser ocasionados, conforme mencionado anteriormente, pelas características dos materiais constituintes, pela proporção entre esses materiais e pelos procedimentos de execução e de cura. De acordo com Chodounsky e Viecili (2007), a realização da cura do concreto visa

impedir a perda de água pela superfície exposta do compósito, propiciando a hidratação do cimento de maneira uniforme e completa, e minimizando a possibilidade de empenamento por ressecamento da face superior, além de evitar o surgimento de fissuras por retração, incidindo de forma positiva sobre a resistência superficial à abrasão.

Conforme o ACI 302.1R (ACI, 2004), logo após um lançamento e acabamento adequados, a cura de um concreto corresponde ao fator mais importante na obtenção de uma elevada qualidade de uma estrutura como um piso de concreto. Segundo o mesmo manual, os procedimentos de cura normalmente adotados são:

- a) represamento ou imersão;
- b) borrifamento ou neblina de água;
- c) vedação da superfície concretada com a aplicação de manta de papel impermeável, mantas de polietileno;
- d) selamento da superfície do concreto com compostos formadores de membranas de cura (cura química).

O tempo requerido para cura úmida das estruturas de concreto é variável e deve ser estabelecido com relação a alguns parâmetros, tais como a relação a/c e o grau de hidratação do concreto (γ), o tipo de cimento, as condições locais (temperatura, vento e umidade relativa do ar - UR) e a geometria da peça (relação superfície de exposição/volume da peça - sup/vol). Logo, o período de cura deverá ser mais longo em concretos com elevadas relações a/c . Já em concretos de maiores resistências ou baixas relações a/c , o γ supera o valor de a/c rapidamente, fazendo com que o papel da cura no ganho de resistência (hidratação dos compostos cimentícios) apresente menor importância (NEVILLE, 1997; ACI 302.1R, 2004).

Em concretos empregados em pisos, onde a relação sup/vol é bastante alta, e as resistências mínimas à compressão ficam em torno de 25 MPa, com relação a/c máxima de aproximadamente 0,55, o tempo abrangente de cura úmida deverá ser, no mínimo, de 7 dias (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

O termo *cura* é utilizado equivocadamente com muita frequência para descrever o processo pelo qual os concretos conseguem adquirir a sua maturidade e desenvolver as suas propriedades, sendo isto resultado da hidratação contínua do cimento, desde que em presença de quantidade suficiente de água e temperatura adequada. É de se destacar que o desenvolvimento das propriedades mecânicas e de durabilidade não depende apenas da taxa de hidratação do cimento, mas também, e mais significativamente, da taxa de

preenchimento dos poros do concreto por produtos hidratados (FONSECA, 2009). Este processo depende do ambiente no qual o concreto se encontra, assim como das medidas adotadas para limitar a perda de água e de calor. Deste modo, o processo de cura pretende manter condições de umidade e de temperatura favoráveis, para que ocorra o desenvolvimento máximo das propriedades potenciais do concreto. A cura não só evita a perda de umidade, como pode também fornecer uma quantidade adicional de água, para que ocorra uma hidratação correta da matriz cimentícia. Um método eficaz de cura deve permitir que as propriedades atingidas dos compósitos sejam iguais ou superiores às desejadas (NEVILLE, 1997; ACI 301, 2010).

Sabe-se que o processo de cura irá influenciar inúmeras propriedades do concreto endurecido, como a resistência à tração, à compressão, o módulo de elasticidade, a permeabilidade, a retração, e em especial a resistência à abrasão (FONSECA, 2009). Somando-se a isto, em ambientes de altas temperaturas, vento ou baixa umidade relativa, os métodos de cura assumem uma grande importância. Uma cura inadequada tenderá a reduzir a resistência da camada superficial, podendo esta atingir 30 a 50 mm de espessura (NEWMAN; CHOO, 2003⁸ apud FONSECA, 2009). Ainda, segundo um estudo feito por Myers e Ramón (1998)⁹, citado por Fonseca (2009), fica evidenciado que o acabamento das superfícies de concreto, comparativamente às condições de cura, possui influência no desenvolvimento da resistência à abrasão (figura 9).

⁸ NEWMAN, J.; CHOO, B. *Advanced concrete technology: Concrete properties*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.

⁹ MYERS, J.; RAMÓN, C. **Production and quality control of high performance concrete in Texas bridge structures**. Report number 9-580/589-1. Texas Department of Transportation. University of Texas, Austin, 1998.

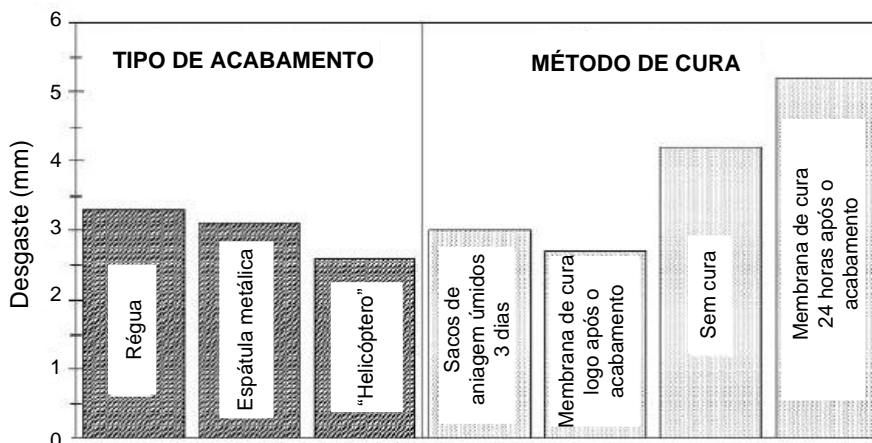


Figura 9: influência das condições de cura e dos métodos de acabamento na resistência à abrasão das superfícies de concreto (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009)

Segundo Chodounsky e Viecili (2007), estudos realizados em amostras extraídas de placas executadas com acabamento mecânico, na tentativa de simular as condições de execução dos pisos de concreto, comprovam que a falta de cura compromete a resistência à abrasão e que a cura química é uma forma eficiente de proteger o concreto na fase inicial de endurecimento. Além disso, esses estudos demonstram que o tipo de agregado utilizado no concreto tem forte influência na resistência ao desgaste e que as operações de acabamento superficial são tão determinantes para esse parâmetro quanto a própria resistência à compressão do concreto, além de evidenciar uma elevação da resistência ao desgaste com o aumento da resistência à compressão do material.

A resistência ao desgaste por abrasão também é afetada pela porosidade do concreto, diminuindo com o aumento desta última (figura 10). Deste modo, é essencial proceder-se a uma cura adequada que evite a evaporação da água de amassamento, de forma a diminuir a porosidade dos compósitos. Em composições com relações a/c baixas, é importante que o método de cura aplicado proporcione uma quantidade de água adicional, para que ocorra uma hidratação eficiente da matriz cimentícia (MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009).

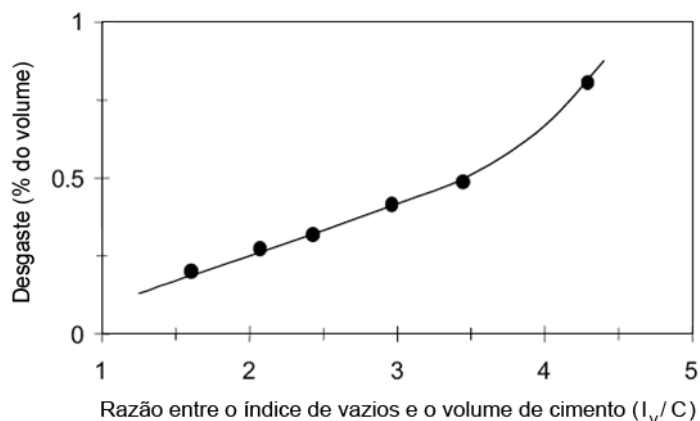


Figura 10: influência da porosidade na resistência ao desgaste por abrasão de concretos (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009)

Dhir, Hewlett e Chan (1991) realizaram um estudo sobre a resistência à abrasão das superfícies de concreto e a influência das condições de cura nessa propriedade. Foram avaliadas diversas relações a/c, bem como diferentes tipologias de cura, e ainda a evolução da resistência à abrasão ao longo do tempo (figura 11). Relativamente às diferentes condições de cura, os corpos de prova (CP's) de concreto foram mantidos durante 24 horas cobertos por sacos de aniagem úmidos, sendo posteriormente submetidos a quatro tipologias de cura distintas: 27 dias imersos em água a 20 °C (E1); 6 dias imersos em água a 20 °C, seguidos de 21 dias a 55 % UR e 20 °C (E2); 3 dias imersos em água a 20 °C, seguidos de 24 dias a 55 % UR e 20 °C (E3); 27 dias a 55 % UR e 20 °C (E4).

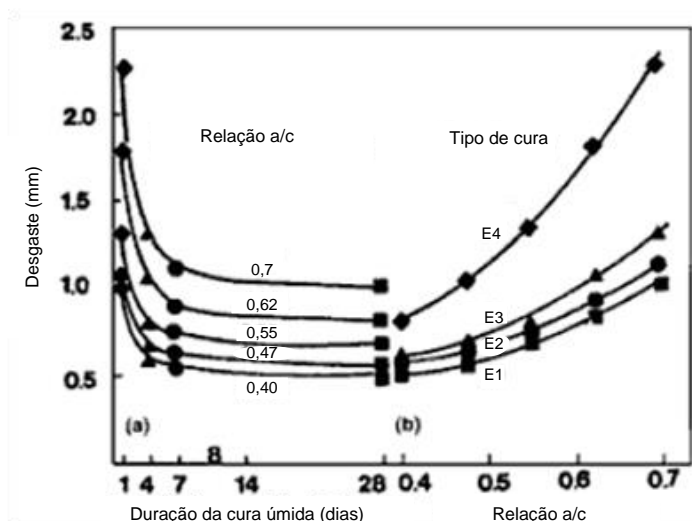


Figura 11: influência das condições de cura e da sua duração na resistência à abrasão de concretos, onde E1: 27 dias de imersão em água a 20 °C; E2: 6 dias de imersão em água a 20 °C, seguidos de 21 dias a 55 % UR e 20 °C; E3: 3 dias de imersão em água a 20 °C, seguidos de 24 dias a 55 % UR e 20 °C; E4: 27 dias a 55 % UR e 20 °C (adaptado de DHIR; HEWLETT; CHAN, 1991)

Como se pode observar, existe uma forte influência da cura nos primeiros 7 dias, além disso, verifica-se que as relações a/c mais baixas conduzem a valores de resistência à abrasão superiores. Comparando as diferentes condições de cura, verifica-se uma diminuição de resistência significativa na cura E4, ou seja, nos CP's que não foram submetidos a uma cura por imersão em água. As demais tipologias, E1, E2 e E3, registram valores de resistência à abrasão semelhantes, sendo que os CP's submetidos a 27 dias de cura por imersão em água (E1) apresentaram os melhores resultados. Através desse estudo fica comprovado não só a importância da cura nas idades iniciais, mas também a influência positiva da cura por imersão em água em concretos submetidos ao desgaste por abrasão.

Com a conclusão do item 2.2.2, pode-se perceber que muitos são os fatores que causam influência na ocorrência e magnitude do fenômeno do desgaste superficial por abrasão. Entretanto, nesta pesquisa optou-se por estudar apenas alguns destes fatores considerados significativos, em se tratando de concretos empregados em pisos. Com isso, espera-se avaliar a influência de cada um dos fatores, para que haja a possibilidade de empregar soluções mais efetivas e viáveis econômica e estruturalmente.

2.2.3 Métodos para Avaliação do Desgaste Abrasivo

A resistência à abrasão do concreto está relacionada ao seu desempenho funcional, portanto a avaliação desta propriedade permite o controle de qualidade do material e sua adequação ao uso. Normalmente, os métodos de ensaio para determinar a resistência à abrasão consistem em provocar o desgaste de um material através da ação mecânica de

determinada carga abrasiva e utilizar os resultados de forma comparativa. Além disso, tais métodos de ensaio não são suficientes para estimar vida útil, uma vez que em condições reais estão presentes condições agressivas que conduzem os materiais a comportamentos diferenciados. Qualquer que seja o ensaio empregado para avaliar a resistência à abrasão, esse irá evidenciar ou proporcionar uma capacidade ou habilidade do material.

Segundo Viecili (2004), se torna extremamente complexo prever modelos probabilísticos que expressem a durabilidade de superfícies solicitadas ao desgaste devido às variabilidades intrínsecas ao comportamento dos materiais, processos e ações de desgaste que elas estariam sujeitas por um determinado período de tempo.

Existem vários ensaios desenvolvidos para avaliar o efeito da abrasão em concretos. A seguir estão listados alguns destes ensaios ou métodos, como o da ABNT NBR 12042 (2012) e do CIENTEC, assim como alguns métodos propostos por normas nacionais e estrangeiras.

2.2.3.1 ABNT NBR 12042

O método descrito pela norma brasileira NBR 12042 (2012) consiste em simular um percurso de 1000 m aonde são ensaiados dois corpos de prova (CP's) de 70 x 70 mm simultaneamente, sendo que cada um gira em torno do próprio eixo e também segue uma trajetória circular de simulação do desgaste. O material abrasivo utilizado é areia seca número 50 (0,3 mm), conforme a norma brasileira NBR 7214 (2015). O resultado é dado pela diferença entre as médias das leituras efetuadas em quatro pontos, antes e após o ensaio, quando percorridos 500 m e 1000 m.

2.2.3.2 Cientec

O método CIENTEC de desgaste por abrasão consiste em simular um percurso de 500 m percorrido por um corpo-de-prova de 50 x 50 mm submetido a uma pressão constante de 0,06 MPa sobre carbetto de silício. O resultado é dado pelo desgaste em mm, que corresponde à média das diferenças entre as leituras de cinco pontos do corpo-de-prova antes e ao final do ensaio.

2.2.3.3 Abrasão Los Angeles – NBR NM 51

Com a finalidade de avaliar a resistência à abrasão e ao impacto de agregados graúdos empregados na confecção de concretos, existe o ensaio de abrasão Los Angeles, proposto pela NBR NM 51 (2001), o qual é utilizado para agregados graúdos com diâmetro máximo de 37,5 mm. O equipamento utilizado neste método consiste num tambor cilíndrico fechado em suas extremidades, com diâmetro interno de 700 mm e comprimento de 500 mm,

montado na direção horizontal, onde são introduzidas esferas de aço de aproximadamente 48 mm de diâmetro e massas diferentes. Este método de ensaio avalia a diferença de massa do agregado colocado dentro do tambor, antes e depois do ensaio, o qual consiste em promover 500 revoluções a uma velocidade de 30 a 33 rotações por minuto (rpm).

2.2.3.4 ASTM C 779

A ASTM C 779 (ASTM, 2012) apresenta três procedimentos de ensaio com a finalidade de avaliar a resistência do concreto ao desgaste por abrasão. Tal norma salienta que os métodos descritos não têm a intenção de estabelecer uma previsão de vida útil.

O procedimento A adota o uso de discos giratórios conjuntamente ao carbetto de silício como material intermediário abrasivo. Os discos giram a uma velocidade de 12 rpm e em torno do próprio eixo a uma velocidade de 280 rpm sobre a superfície do concreto a ser ensaiada. As medições são efetuadas em intervalos de 30 min e 60 min, sendo a avaliação realizada com base na profundidade desgastada após cada período de ensaio. O procedimento B utiliza três conjuntos de sete rodas desbastadoras de aço que se movimentam a uma velocidade de 56 rpm. Neste método não é utilizado nenhum tipo de material abrasivo auxiliar, e o procedimento de leitura do desgaste é igual ao adotado no método A. No procedimento C é utilizado um conjunto de oito bolas de aço de 18 mm de diâmetro, acopladas a uma cabeça rotativa; o material desgastado é retirado por água corrente. A velocidade do conjunto deve ser de 1000 rpm sobre carga de 120 N. As medições são realizadas a cada 50 s até se atingir um tempo máximo de 1200 s, ou quando a profundidade desgastada atingir 3 mm.

Com a conclusão deste capítulo fica evidente os inúmeros fatores que podem afetar a resistência à abrasão do concreto. Contudo, buscando mapear com maior profundidade a influência desses fatores no entendimento do mecanismo de desgaste por abrasão, iniciou-se um estudo preliminar, o qual está apresentado no capítulo seguinte. Este estudo preliminar buscou embasar o objetivo principal desta tese de doutorado, além de orientar quanto a seleção dos parâmetros que seriam avaliados.

3 ESTUDO PRELIMINAR

Neste capítulo são apresentados resultados de um trabalho preliminar relacionado ao mecanismo de desgaste superficial por abrasão de concretos empregados em pisos. Os parâmetros investigados neste estudo prévio foram definidos a partir de uma pesquisa desenvolvida por Silva (2011), onde a autora avaliou a influência de alguns materiais na composição do traço de concretos usualmente empregados em pisos frente ao mecanismo de desgaste superficial por abrasão. Dentro deste contexto, tal autora observou a influência do consumo de água, do teor de sílica ativa em substituição a massa de cimento, da presença de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento.

Como resultados, Silva (2011) menciona a influência significativa do tipo de cimento, onde o cimento Portland de alta resistência inicial, para uma mesma relação a/agl (0,53) e idade de cura dos concretos (28 dias), mostrou menores índices de desgaste gerados, comparativamente ao cimento Portland pozolânico. O consumo de água também promoveu influência estatística significativa na resistência à abrasão, onde o intermediário (190 l/m³) se mostrou mais eficiente em relação aos demais (175 l/m³; 205 l/m³). Quanto às análises do uso das fibras (teor de 0,6 kg/m³), Silva (2011) não observou uma tendência clara no comportamento dos concretos frente ao desgaste, uma vez que a função principal das fibras seria de minimizar a ocorrência da fissuração por retração dos concretos na fase plástica. Com relação ao efeito do teor de substituição de sílica ativa, esta mesma autora não verificou influência significativa, relacionando este comportamento ao acabamento superficial que foi realizado nas amostras destinadas ao ensaio de abrasão, o qual minimizou os efeitos decorrentes da exsudação, nivelando os diferentes traços de concreto testados.

A partir destas análises mencionadas foi possível identificar a necessidade de maiores estudos acerca de alguns parâmetros relacionados ao desempenho dos concretos utilizados em pisos quanto ao desgaste por abrasão. Tais parâmetros foram foco deste trabalho preliminar, o qual antecedeu a definição do programa experimental desta pesquisa de doutorado. Neste sentido, buscou-se verificar a influência do tipo de acabamento e da presença de sílica ativa na composição do traço dos concretos usualmente adotados nessas

estruturas. A seguir serão apresentados o objetivo, o programa experimental, os resultados e discussões e as conclusões obtidas para esse estudo prévio.

3.1 OBJETIVO

Este estudo preliminar teve como objetivo principal avaliar a influência da exsudação e do acabamento superficial em concretos comumente empregados em pisos com relação ao fenômeno do desgaste por abrasão, com a utilização de sílica ativa em substituição à massa de cimento.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL - FASE 1

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram estudados dois traços de concreto, ambos com mesma relação a/agl (0,53), sendo um o referência (sem a substituição de sílica ativa) e o outro com 10 % de substituição sobre a massa de cimento. Para cada traço de concreto foram analisadas, quanto ao desgaste abrasivo, três diferentes condições da camada superficial dos compósitos cimentícios (A - sem acabamento superficial; B - acabamento superficial realizado em uma única etapa (intermediário); C - acabamento superficial realizado em duas etapas). Salienta-se que cada etapa de acabamento efetuado consistia no desempenho da superfície dos compósitos, visando a obtenção de uma superfície plana, com o emprego de uma desempenadeira metálica. Tal procedimento era realizado em câmara climatizada (60 ± 5 % e 23 ± 2 °C), após a evaporação da água de exsudação que se formava na camada superficial dos concretos. Enfatiza-se que na condição C, repetia-se esse processo duas vezes, sendo a segunda, também, após a evaporação da exsudação externa.

Como variáveis de resposta foram escolhidas a resistência à abrasão, a dureza superficial por esclerometria, a resistência à compressão e a exsudação. Posteriormente, utilizaram-se ferramentas estatísticas para avaliar a influência dos fatores de controle (teor de sílica ativa e tipo de acabamento superficial) nas variáveis de resposta estudadas. A figura 12 apresenta o programa experimental deste estudo prévio.

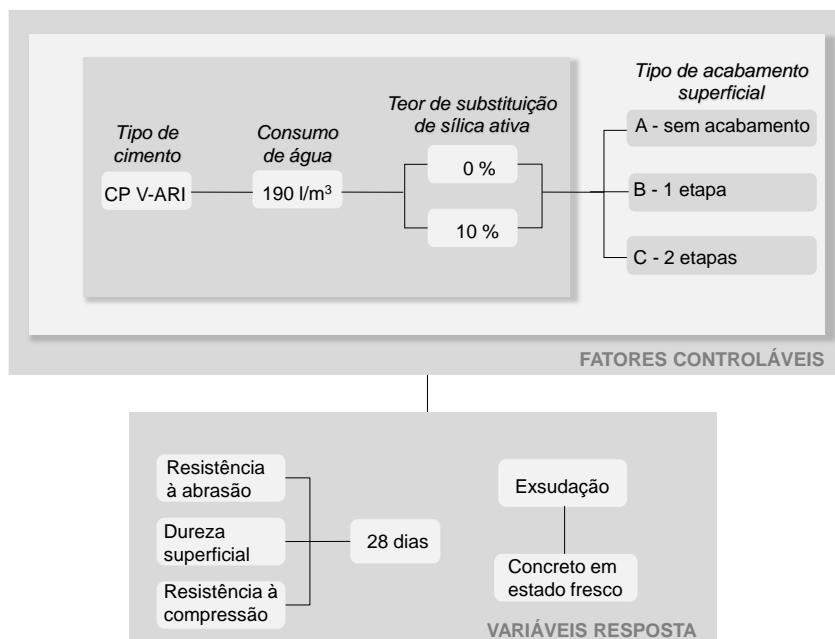


Figura 12: programa experimental - estudo preliminar

3.2.1 Materiais Utilizados

3.2.1.1 Cimento

No sul do Brasil, normalmente se empregam cimentos do tipo composto (CP II-Z), pozolânico (CP IV) ou de alta resistência inicial (CP V-ARI) em projetos de pisos de concreto. Logo, este estudo buscou adotar um destes cimentos, sendo escolhido o cimento Portland CP V-ARI, em função dos resultados verificados por Silva (2011). As tabelas 3, 4 e 5 apresentam um resumo da caracterização deste cimento.

Tabela 3: caracterização química do cimento

Parâmetros avaliados (% da massa)	CP V-ARI	
	Resultados (fabricante)	Exigências da NBR 5733/91
MgO	1,75	≤ 6,50
SO ₃	3,11	≤ 3,50
Perda ao fogo	3,30	≤ 4,50
Resíduo insolúvel	1,00	1,00

Tabela 4: caracterização física do cimento

Características avaliadas		CP V-ARI		
		Fabricante	NORIE	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (cm ³ /g)		3,15	3,15	-
Expansão à quente (mm)		0,0	-	≤ 5,0
Tempo de pega (h:min)	Início	02:40	-	≥ 1,0
	Fim	05:15	-	≤ 10,0
Finura Blaine (cm ² /g)		4467	-	≥ 3000
Resíduo peneira 75 mm (%)		1,5	-	≤ 6,0

Tabela 5: caracterização mecânica do cimento

Características avaliadas		CP V-ARI	
		Resultados obtidos	Exigências da NBR 5733/91
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	28,2	≥ 14,0
	3 dias	35,5	≥ 24,0
	7 dias	41,0	≥ 34,0
	28 dias	50,9	-

3.2.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo empregado neste estudo foi uma areia de origem quartzosa natural, com distribuição granulométrica contínua. Esta foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação da massa unitária (NBR NM 45/2006), determinação da absorção de água (NBR NM 30/2001) e determinação de massa específica (NBR NM 52/2009). Todas as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento para posterior execução dos ensaios de caracterização, possibilitando que as mesmas representassem o material na sua totalidade. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo estão expressos na tabela 6.

Tabela 6: caracterização do agregado miúdo

AGREGADO MIÚDO		
Abertura das peneiras (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
4,75	2	2
2,36	5	7
1,18	13	20
0,6	25	45
0,3	37	82
0,15	17	99
Fundo	1	100
Módulo de Finura		2,55
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,75
Massa Unitária (g/cm ³)		1,55
Massa Específica (g/cm ³)		2,63
Absorção de água (%)		0,87

3.2.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa foi uma brita de origem basáltica. Esta foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR NM 248/2003), determinação da massa unitária (NBR NM 45/2006), determinação de massa específica e absorção de água (NBR NM 53/2003). Todas as amostras foram submetidas a um processo de quarteamento para posterior execução dos ensaios de caracterização, possibilitando que as mesmas representassem o material na sua totalidade. Os resultados da caracterização física do agregado graúdo estão expressos na tabela 7.

Tabela 7: caracterização do agregado graúdo

AGREGADO GRAÚDO		
Abertura das peneiras (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
19	4	4
9,5	67	71
4,75	28	99
2,36	1	100
1,18	0	100
0,6	0	100
0,3	0	100
0,15	0	100
Fundo	0	100
Módulo de Finura		6,74
Dimensão Máxima Característica (mm)		19
Massa Específica (g/cm ³)		2,86
Massa Unitária (g/cm ³)		1,55

3.2.1.4 Sílica Ativa

A sílica ativa foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas, seguindo os ensaios de determinação da massa específica (NBR NM 23/2001) e determinação da composição granulométrica (granulometria a laser), a qual encontra-se no apêndice A. Na tabela 8 estão contidos os resultados da caracterização física desta adição.

Tabela 8: caracterização física da sílica ativa

SÍLICA ATIVA	
Diâmetro médio (μm)	13,49 *
Massa específica (g/cm^3)	2,17

* Diâmetro médio acima do esperado ($\approx 0,1 \mu\text{m}$), provavelmente em função da presença de possíveis aglomerações das partículas do material durante a execução da análise granulométrica.

3.2.1.5 Água

A água utilizada na dosagem dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento pública da cidade de Porto Alegre (RS).

3.2.1.6 Aditivo

O aditivo químico utilizado nas misturas foi um superplastificante para concreto, a base de policarboxilato. A tabela 9 apresenta as características físico-químicas do aditivo.

Tabela 9: caracterização físico-química do aditivo segundo o seu fabricante

Propriedades Físico-Químicas	
Estado físico	Líquido
Cor	Branco turvo
Odor	Característico
pH	5 - 7
Densidade (g/cm^3)	1,067 - 1,107
Solubilidade	Solúvel em água
Viscosidade (cps)	< 150
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5

3.2.2 Dosagem Experimental

Para este estudo foi adotada a metodologia de dosagem baseada no método do IPT/EPUSP, proposta por Helene e Terzian (1992), onde os parâmetros utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de 100 ± 20 mm, definido com base em especificações de projeto para pisos de concreto, e um teor de argamassa (α) de 55%, determinado experimentalmente. A tabela 10 apresenta a dosagem experimental realizada. A partir da dosagem foram definidos os traços dos concretos que foram estudados.

Tabela 10: dosagem experimental

Traço unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência potencial - 28 dias (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	H (%)	Abatimento (mm)
1 : 3,5	0,39	49,2	503	8,77	85
1 : 5,0	0,50	38,1	378	8,36	95
1 : 6,5	0,64	28,7	300	8,54	85

3.2.3 Quantidade de Material Empregada na Produção dos Concretos

Após a dosagem experimental foram determinados os traços dos concretos empregados nesta pesquisa. Primeiramente, foram fixados o valor referente à relação a/agl e o consumo de água (Cag), sendo estes definidos como 0,53 e 190 l/m³; parâmetros comumente utilizados em especificações de projetos de pisos de concreto. Além disso, para os concretos estudados, os valores referentes aos seus abatimentos foram fixados em 100 ± 20 mm. Os traços de concreto receberam dosagem de aditivo superplastificante de acordo com o necessário para se manter a trabalhabilidade das misturas e promover uma maior dispersão dos materiais. A tabela 11 apresenta os parâmetros dos traços avaliados nesta pesquisa.

Tabela 11: traços dos concretos avaliados neste estudo

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS			Consumo de cimento (kg/m ³)	TRAÇO UNITÁRIO				PARÂMETROS			
	Tipo de cimento	Consumo de água (l/m ³)	Teor de sílica ativa (%)		cim	a	p	m	H (%)	α (%)	Abatimento (mm)	Aditivo (%)
1	CP V-ARI	190	0	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	80	0,06
2	CP V-ARI	190	10	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	80	0,17

3.2.4 Descrição dos Ensaios

3.2.4.1 Resistência à Compressão

O método de ensaio de resistência à compressão de corpos de prova (CP's) cilíndricos de concreto seguiu as determinações da norma brasileira NBR 5739 (2007).

3.2.4.2 Exsudação

O método de ensaio de exsudação seguiu as prescrições da norma brasileira NBR 15558 (2008). Conforme a norma o ensaio foi efetuado no concreto em estado fresco, logo após a moldagem, em ambiente com temperatura e umidade controladas (60 ± 5 % e 23 ± 2 °C). As figuras 13, 14 e 15 demonstram a realização do ensaio de exsudação.



Figura 13: cilindro inclinado para coleta de água



Figura 14: coleta de água exsudada

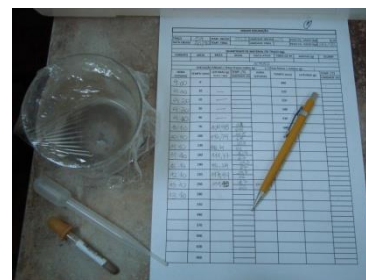


Figura 15: registro das leituras após pesagem de água exsudada

3.2.4.3 Resistência à Abrasão

Para o ensaio de resistência à abrasão foi adotado o método desenvolvido pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC). Neste ensaio foram utilizadas fôrmas metálicas com dimensões de 25 x 35 x 10 cm. Na execução de cada traço de concreto, três dessas fôrmas foram concretadas, das quais, posteriormente, aos 28 dias, foram extraídas as amostras destinadas aos ensaios de abrasão, perfazendo um total de 4 amostras para cada combinação da matriz experimental. Dois dos CP's moldados receberam acabamento manual com desempenadeira metálica especial para pisos de concreto (figura 16); o procedimento de acabamento dos concretos (figura 17) foi realizado em sala climatizada com temperatura e umidade controladas ($60 \pm 5 \%$ e $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), conforme apresentado no programa experimental. Cabe salientar que para execução deste procedimento esperava-se a evaporação da água exsudada que se formava na superfície dos compósitos. Após o término do período de cura úmida, todos os corpos de prova moldados foram serrados, sendo extraída uma faixa da parte central com 5 cm de largura, a qual foi enviada ao CIENTEC para posterior extração das amostras (figura 18) para execução do ensaio de resistência à abrasão (figura 19). As partes restantes dos CP's, com dimensões de 25 x 15 x 10 cm cada, foram destinadas aos ensaios de dureza superficial por esclerometria, resultando em um total de 6 corpos de prova por traço de concreto, sendo dois CP's sem acabamento superficial (condição A), dois CP's com acabamento em uma única etapa (condição B - intermediário) e dois CP's com acabamento executado em duas etapas (condição C).



Figura 16: desempenadeira metálica



Figura 17: acabamento superficial do concreto

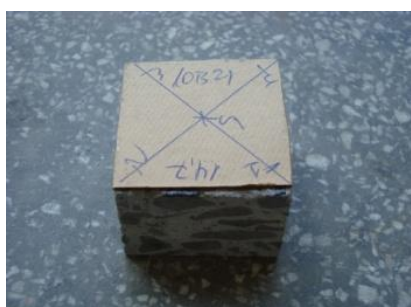


Figura 18: amostra para o ensaio de resistência à abrasão



Figura 19: ensaio de resistência à abrasão

3.2.4.4 Dureza Superficial por Esclerometria

O método de ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão seguiu as determinações da norma brasileira NBR 7584 (1995). Cabe salientar que esta Norma passou por atualizações, sendo válida atualmente a versão de janeiro de 2013. Conforme descrito no item anterior, o ensaio de dureza superficial por esclerometria foi efetuado nos corpos de prova moldados para o ensaio de abrasão. Logo, como já indicado para cada traço de concreto foram moldados três corpos de prova, nas dimensões de 25 x 35 x 10 cm, dos quais depois de serrada a faixa central destinada à extração das amostras para o ensaio de desgaste, resultaram 6 CP's nas dimensões de 25 x 15 x 10 cm.

A NBR 7584 (1995) recomendava em cada área de ensaio, 9 a 16 impactos do aparelho. Nesta pesquisa foram adotados 12 pontos para execução do ensaio em cada corpo-de-prova, distribuídos sobre a superfície dos mesmos, de acordo com recomendações da norma, a fim de medir a dureza superficial do material.

A figura 20 apresenta o corpo de prova de concreto que foi destinado ao ensaio de esclerometria, com os respectivos pontos marcados para os impactos com o esclerômetro de reflexão, e a figura 21 mostra a execução do referido ensaio.

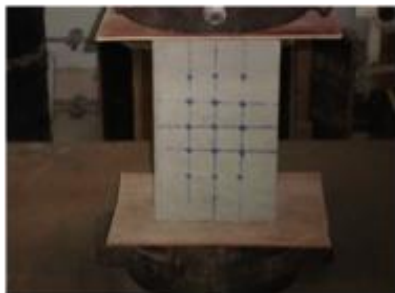


Figura 20: corpo-de-prova para o ensaio de esclerometria



Figura 21: ensaio esclerométrico

3.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste item estão apresentados os resultados obtidos para as propriedades analisadas. Cabe salientar que foi realizada uma análise estatística dos dados através do método de análise de variância (ANOVA).

3.3.1 Resistência à Compressão Uniaxial

A tabela 12 apresenta os resultados encontrados para a resistência à compressão uniaxial dos concretos avaliados. Os resultados obtidos para esta propriedade estão apresentados no apêndice B.

Tabela 12: resultados de resistência à compressão uniaxial

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)		
Traço (Teor Sílica)	Idade (dias)	Médias
	28	
1 (0%)	32,1	32,0
	31,9	
2 (10%)	38,6	37,8
	37,0	

De acordo com a tabela, é possível verificar um acréscimo de aproximadamente 18,0 % na resistência à compressão do concreto com 10 % de substituição de sílica ativa em relação ao concreto referência (sem substituição de sílica ativa). Tal aumento ocorreu devido ao efeito químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades mecânicas dos compósitos, comportamento já esperado e de consenso no meio acadêmico.

O efeito químico promovido pela sílica ativa na matriz de concreto está relacionado à rápida reação pozolânica entre o SiO_2 e o Ca(OH)_2 resultante da hidratação do cimento, aumentando a resistência da pasta. Já o efeito físico, ou efeito fíler, corresponde ao

preenchimento dos micro vazios existentes na interface agregado-pasta, aumentando a coesão interna da matriz de concreto, que por consequência aumenta a resistência mecânica do material. Somando-se a isto, destaca-se o efeito de nucleação que as partículas de sílica promovem ao cimento (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ainda, devido a sua grande finura, a sílica ativa minimiza a exsudação, evitando que a água de amassamento fique retida sob as partículas de agregado graúdo, o que por sua vez reduz a porosidade na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados. Logo, a resistência nesta interface passa a ser melhorada (NEVILLE,1997).

3.3.2 Exsudação

A figura 22 apresenta os resultados da exsudação, para os dois traços de concreto produzidos com cimento de alta resistência inicial e consumo de água de 190 l/m³.

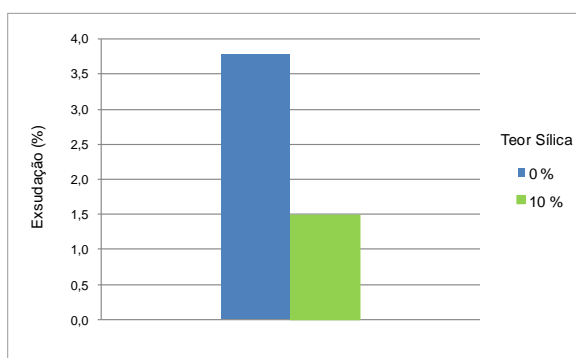


Figura 22: quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto

Analisando a figura, pode-se observar a influência da sílica ativa na exsudação dos concretos. O uso desta adição no proporcionamento dos concretos em um teor de 10 % em substituição à massa do cimento reduziu em aproximadamente 60,6 % a quantidade de água exsudada acumulada durante o ensaio, com relação ao concreto sem a presença de tal adição (concreto referência). Fato que ocorre em função do efeito microfíler que as partículas de sílica desempenham dentro das misturas refinando os poros, aumentando a coesão interna do concreto e, por consequência, reduzindo a exsudação (NEVILLE, 1997; ACI 302.1R, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

3.3.3 Dureza Superficial por Esclerometria

A análise de variância feita através da ANOVA dos dados experimentais obtidos para a dureza superficial por esclerometria dos concretos estudados encontra-se na tabela 13, onde somente o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa foi estatisticamente

significativo nos resultados obtidos. No apêndice B podem ser encontrados todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 13: análise de variância (ANOVA) – dureza superficial por esclerometria

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de acabamento (1)	2	4,64	2,953	0,127972	NS
Sílica (2)	1	10,19	6,486	0,043681	S
1 x 2	2	0,82	0,520	0,619296	NS
Erro	6	1,57			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância valor significativo NS: valor não significativo Se $p < 5\%$ = efeito significativo

S:

3.3.3.1 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 23 apresenta o efeito isolado significativo do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial dos concretos avaliados.

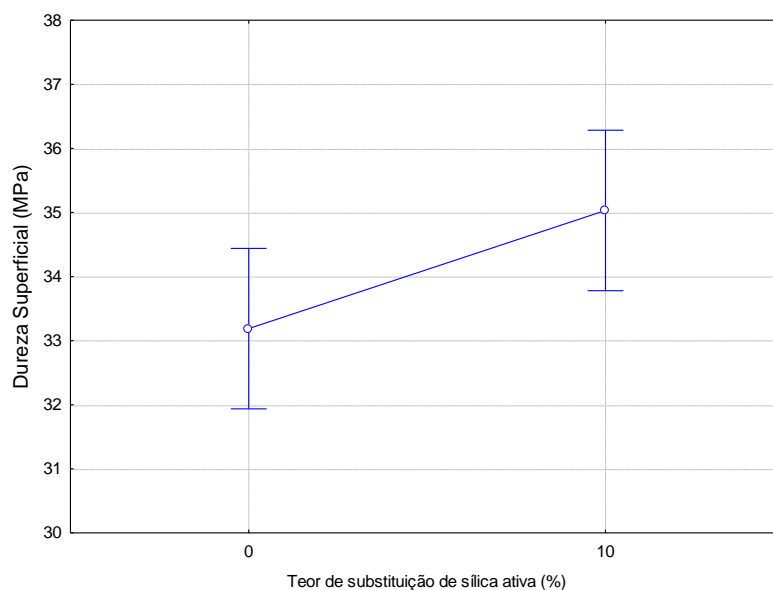


Figura 23: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um aumento na dureza superficial dos traços de concreto produzidos com teores de substituição de sílica ativa de 10 %. Tal aumento foi atribuído tanto ao efeito químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades de resistência dos compósitos, quanto à redução da exsudação (melhora da superfície), afetando de forma significativa a dureza da camada superficial dos concretos.

A figura 24 demonstra apenas a tendência de comportamento para o efeito isolado do tipo de acabamento na dureza superficial dos concretos avaliados. Salienta-se que tal efeito não foi estatisticamente significativo quando analisado através do método ANOVA (tabela 13).

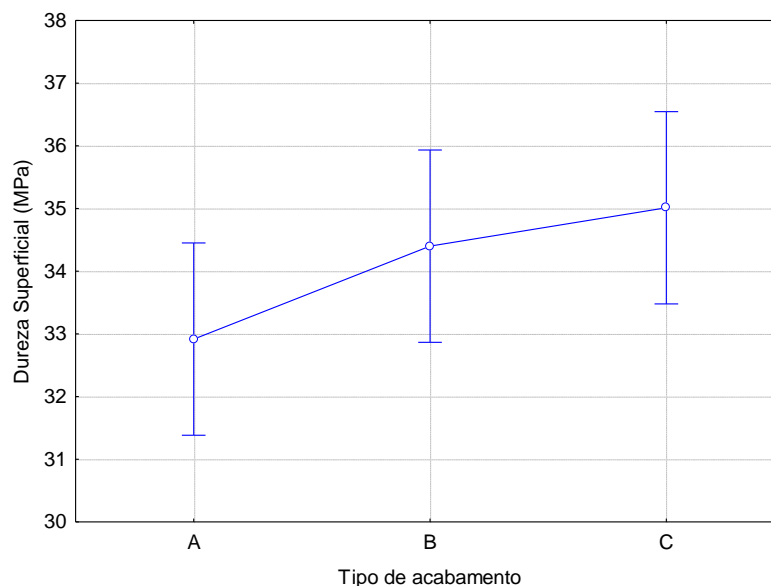


Figura 24: tendência de comportamento para o tipo de acabamento superficial na dureza superficial do concreto

De acordo com a figura é possível observar uma leve tendência de aumento da dureza superficial dos concretos avaliados com a aplicação das condições de acabamento empregadas (“B” e “C”). Nota-se, conforme esperado, uma melhora da camada superficial do concreto através da adoção de um acabamento ou desempenho como forma de tratamento. Além disso, foi verificado que os concretos sem acabamento (condição “A”) apresentaram uma superfície mais fraca e porosa, decorrente do efeito causado pela exsudação dos compósitos cimentícios. Salienta-se que o efeito isolado do tipo de acabamento não foi estatisticamente significativo segundo análise feita através do método ANOVA. No entanto, através do teste de Fisher foi possível observar que a condição “A”, comparativamente a condição “C”, está muito próxima do limiar de significância adotado nesta pesquisa ($p < 5\%$), o que poderia ser considerado como uma diferença estatística significativa, mostrando que o acabamento superficial efetivamente reduz as microfissuras e a porosidade presentes nessa camada exposta ao desgaste.

A figura 25 mostra a interação não significativa entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa (tabela 13) na dureza superficial dos concretos avaliados.

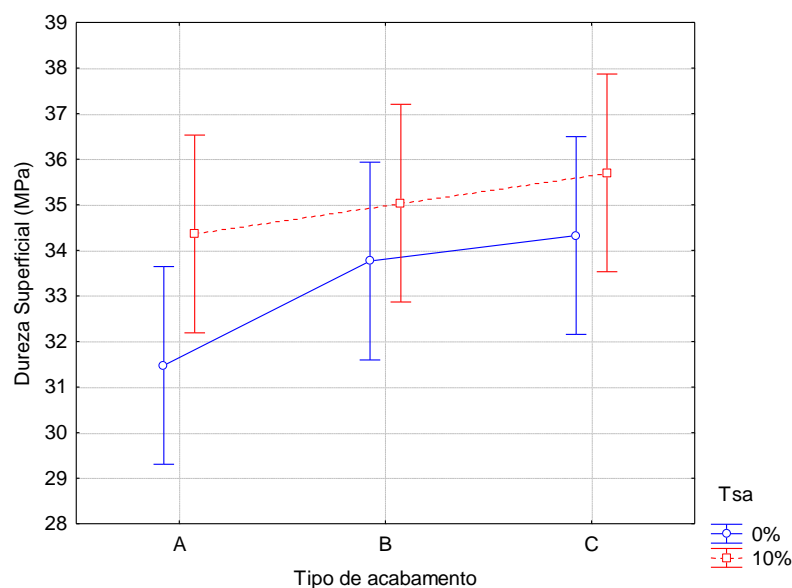


Figura 25: tendência de comportamento para o efeito da interação entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na dureza superficial do concreto

Através da figura, observa-se que o efeito do acabamento na dureza superficial dos compósitos é mais importante para concretos sem substituição de sílica ativa, já que estes apresentam maior exsudação (conforme item 3.3.2), cujos efeitos negativos podem ser minimizados com o acabamento superficial, aproximando a dureza superficial dos concretos com e sem a substituição de sílica ativa (condições “B” e “C”).

3.3.4 Resistência à Abrasão

A análise de variância feita através da ANOVA dos dados experimentais obtidos para a resistência à abrasão dos concretos estudados encontra-se na tabela 14, onde os efeitos isolados do teor de substituição de sílica ativa e do tipo de acabamento superficial foram estatisticamente significativos. Seguem, no apêndice B, todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 14: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de acabamento (1)	2	2,4127	10,804	0,002537	S
Sílica (2)	1	1,4733	6,597	0,026118	S
1 x 2	2	0,0619	0,277	0,762896	NS
Erro	11	0,2233			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância
valor significativo NS: valor não significativo Se $p < 5\%$ = efeito significativo

S:

3.3.4.1 Efeito do Tipo de Acabamento Superficial

A figura 26 mostra o efeito isolado significativo do tipo de acabamento superficial na resistência à abrasão dos concretos avaliados.

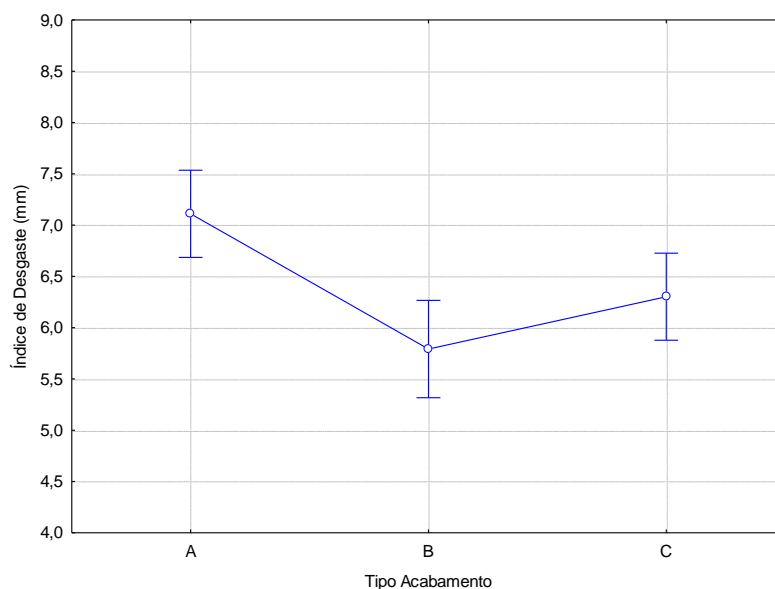


Figura 26: efeito isolado do tipo de acabamento superficial na resistência à abrasão do concreto

Através da figura é possível observar uma redução significativa de 19,1 % e 11,4 % no índice de desgaste dos concretos que receberam acabamento (“B” e “C”) em relação aos sem tratamento superficial (“A”). Fato que corrobora com a análise feita no item 3.3.3, onde o acabamento das superfícies de concreto, apesar de não mostrar efeito estatístico significativo, proporcionou um leve acréscimo na dureza superficial do material. Esse comportamento esperado e que pode ser explicado em função do efeito proporcionado por esta etapa de execução, a qual minimizou os problemas decorrentes da exsudação, como a porosidade e as microfissuras, melhorando a qualidade da superfície dos compósitos cimentícios e por conseqüência a resistência à abrasão.

As figuras 27 e 28 mostram a influência do acabamento na melhora da qualidade da camada superficial das amostras de concreto produzidas sem sílica ativa. Tais amostras foram digitalizadas através de scanner tridimensional a laser modelo Digimill 3D da Tecnodrill, com a lente Optimet 150 mm, e uma resolução de 0,1 mm nos eixos X e Y disponibilizado pelo Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS.

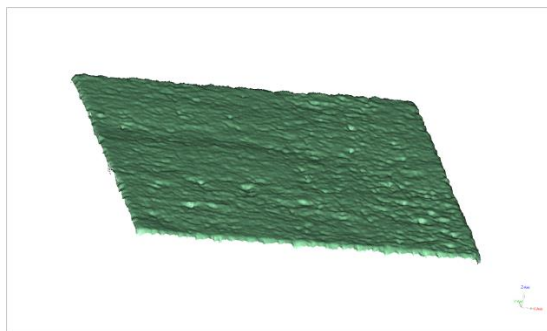


Figura 27: digitalização gráfica da superfície: amostra de concreto sem sílica ativa e sem acabamento

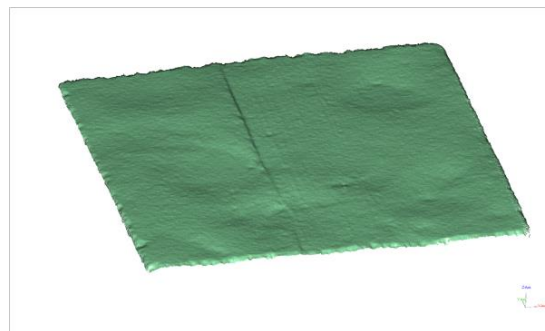


Figura 28: digitalização gráfica da superfície: amostra de concreto sem sílica ativa e com acabamento ("B")

De acordo com as figuras é possível observar a influência do acabamento como forma de tratamento superficial na camada exposta ao desgaste das amostras de concreto sem sílica ativa. De acordo com a figura 22, o concreto sem sílica ativa apresentou maiores taxas de exsudação comparativamente àquele com a presença da sílica ativa, em substituição a massa de cimento. Esse fato provavelmente ocasionou retração da camada superficial, gerando microfissuras e acréscimos na porosidade, como pode ser visto na figura 27, o que consequentemente promoveu decréscimos na resistência à abrasão. Logo, o procedimento do acabamento (figura 28) provavelmente mitigou parcialmente os problemas decorrentes da exsudação, como já citado anteriormente.

3.3.4.2 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 29 mostra o efeito isolado significativo do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão dos concretos avaliados.

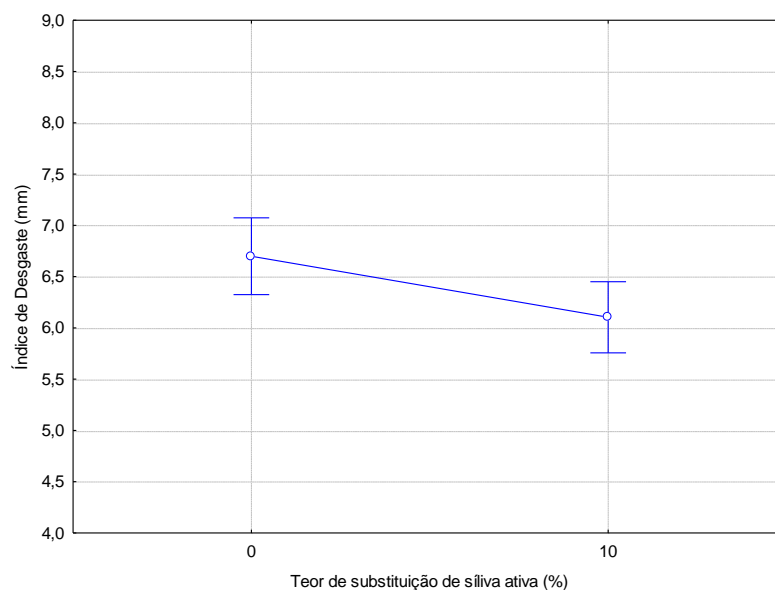


Figura 29: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto

De acordo com a figura verifica-se uma redução significativa de aproximadamente 10,0 % no índice de desgaste dos concretos com 10 % de substituição de sílica ativa em comparação aos concretos referência (sem sílica ativa). Tal comportamento pode ser atribuído, como já mencionado, aos efeitos benéficos (pozolânico e fíler) que a sílica ativa promove à microestrutura da matriz de concreto, melhorando as resistências mecânicas e por sua vez a resistência à abrasão (YAZICI; İNAN, 2006; LIU, 2007). Liu (2007) realizou um estudo em amostras de concreto com substituição de cimento por sílica ativa em teores de 5 % e 10 %, a fim de avaliar a resistência à abrasão. Os resultados dos concretos contendo 5 % e 10 % de substituição de sílica ativa, preparados com relação *a/c* de 0,38 e 0,40 e curados até a idade de 28 dias, apresentaram uma diminuição da taxa de abrasão em torno de 10 % e 16 %, respectivamente, comparando-se com as amostras de referência (sem adição de sílica). O autor atribuiu este resultado ao fato de que o aumento da substituição de sílica ativa conduziu a uma boa resistência ao cisalhamento interfacial (ligação/aderência pasta-agregado) e a uma densificação da matriz cimentícia.

Além disso, devido à sua grande finura, a sílica ativa reduz a exsudação e, portanto, minimiza a ocorrência de uma camada enfraquecida na parte superior das estruturas, aumentando a resistência ao desgaste (NEVILLE, 1997; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

A figura 30 demonstra apenas a tendência de comportamento para a interação entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão dos concretos avaliados. Salienta-se que tal efeito não mostrou influência estatisticamente significativa através do método ANOVA (tabela 14).

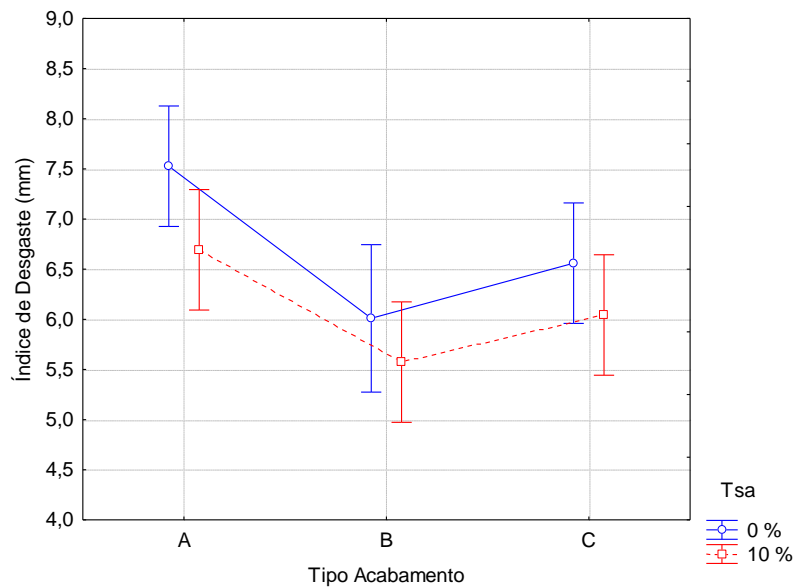


Figura 30: tendência de comportamento para o efeito da interação entre o tipo de acabamento superficial e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à abrasão do concreto

Analisando a figura verifica-se uma leve tendência de comportamento para os concretos estudados. O procedimento de acabamento superficial nivelou os diferentes concretos estudados quanto ao efeito da exsudação na análise do desgaste superficial por abrasão, fato que pode ser constatado nas condições “B” e “C”, onde o efeito da sílica foi minimizado em comparação à condição “A”, na qual os concretos não receberam tratamento de superfície.

A figura 31 apresenta a correlação entre os resultados médios de dureza superficial com a resistência à abrasão dos concretos.

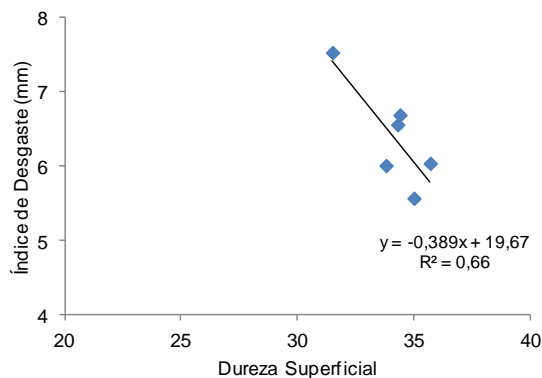


Figura 31: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto

Analisando a figura verifica-se que existe uma tendência clara de comportamento entre a dureza superficial e o desgaste por abrasão dos concretos. Como se pode observar, o

índice de desgaste superficial por abrasão tende a diminuir com o aumento da dureza superficial do concreto, como esperado.

3.4 CONCLUSÕES

Este estudo preliminar buscou avaliar tanto a influência de alguns parâmetros que constituem o traço de um concreto, quanto uma das etapas construtivas que é considerada extremamente relevante no desempenho dos pisos de concreto. Foram selecionados para a pesquisa o tipo de acabamento superficial (A - sem acabamento superficial; B – acabamento superficial realizado em uma única etapa (intermediário); C - acabamento superficial realizado em duas etapas) e o teor de substituição de sílica ativa (0 % e 10 %). Para tal avaliação realizaram-se ensaios de resistência à compressão uniaxial, dureza superficial por esclerometria, exsudação e resistência à abrasão dos concretos estudados.

As conclusões expostas a seguir não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que estão relacionadas a resultados de concretos que foram produzidos com tipos de materiais e técnicas de execução específicas. Ainda, importante ressaltar que a representatividade do comportamento destes concretos deve ser complementada pela realização de novos estudos, buscando confirmar e corroborar os resultados encontrados.

Com o objetivo de avaliar a influência de cada fator controlável nas propriedades estudadas neste trabalho, foram efetuadas análises estatísticas. As conclusões verificadas para a influência de cada um destes fatores escolhidos frente aos ensaios de resistência à compressão, dureza superficial por esclerometria, exsudação e resistência à abrasão estão apresentadas como segue:

- o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa de 10 % empregado na produção dos concretos influenciou estatisticamente no fenômeno do desgaste, aumentando a resistência à abrasão, e, além disso, promoveu uma redução na exsudação das misturas, melhorando a qualidade da superfície dos concretos, aumentando a dureza superficial e a resistência à compressão do material;
- o acabamento superficial se mostrou efetivo na redução do desgaste por abrasão dos concretos avaliados, uma vez que minimizou os efeitos decorrentes da exsudação. Salienta-se que a condição “A” (sem acabamento superficial) mostrou os maiores índices de desgaste verificados.

Com base nestas conclusões e em trabalhos que vem sendo desenvolvidos nesta linha de pesquisa (desgaste superficial por abrasão em concretos) foram definidos os parâmetros de análise e o programa experimental desta tese de doutorado. Buscando contribuir para o entendimento do problema, pretendeu-se avaliar a influência das propriedades de superfície e da matriz do concreto na magnitude do mecanismo de desgaste. Para tal avaliação, julgou-se importante dar continuidade ao estudo da utilização de sílica ativa como substituição, em massa, do cimento, e verificar a influência da cura na resistência à abrasão dos concretos, pois como apresentado no capítulo 2 (item 2.2.2.7), este fator mostra ter relação direta com essa propriedade. Conjuntamente a estes parâmetros, também foram avaliados a variação da relação a/agl e o tipo de cimento. Nesta pesquisa de doutorado não será verificada a influência do acabamento superficial, uma vez que esta é uma etapa construtiva que apresenta certa variabilidade em função dos procedimentos e mão de obra empregados, conforme apresentado nesse estudo preliminar (fase 1) e em estudo realizado por Silva (2011).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL - FASE 2

A metodologia de projetos de experimentos vem sendo aplicada na Engenharia Civil, observando-se uma preocupação crescente dos pesquisadores em comprovar estatisticamente as suas conclusões. Em pesquisas na área de materiais de construção civil, os experimentos geralmente envolvem um grande número de fatores. Portanto, torna-se necessário estudar o efeito de todas as interações possíveis entre esses fatores na variável de resposta (DAL MOLIN; KULAKOWSKI; RIBEIRO, 2005).

Conforme Cervo e Bervian (2002), é indispensável o planejamento do programa experimental de forma organizada para o adequado desenvolvimento da pesquisa; logo, é de extrema relevância a programação das atividades que serão desenvolvidas. O programa experimental dessa tese foi baseado em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis de controle em diferentes níveis e, posteriormente, utilizar ferramentas estatísticas para analisar a influência de cada variável, bem como a interação entre elas, nas variáveis de resposta. Tal programa foi elaborado objetivando avaliar alguns dos fatores constituintes do traço de concreto empregado em pisos, bem como a influência da cura, frente ao desgaste abrasivo. A figura 32 demonstra, esquematicamente, o programa experimental realizado nesta pesquisa.

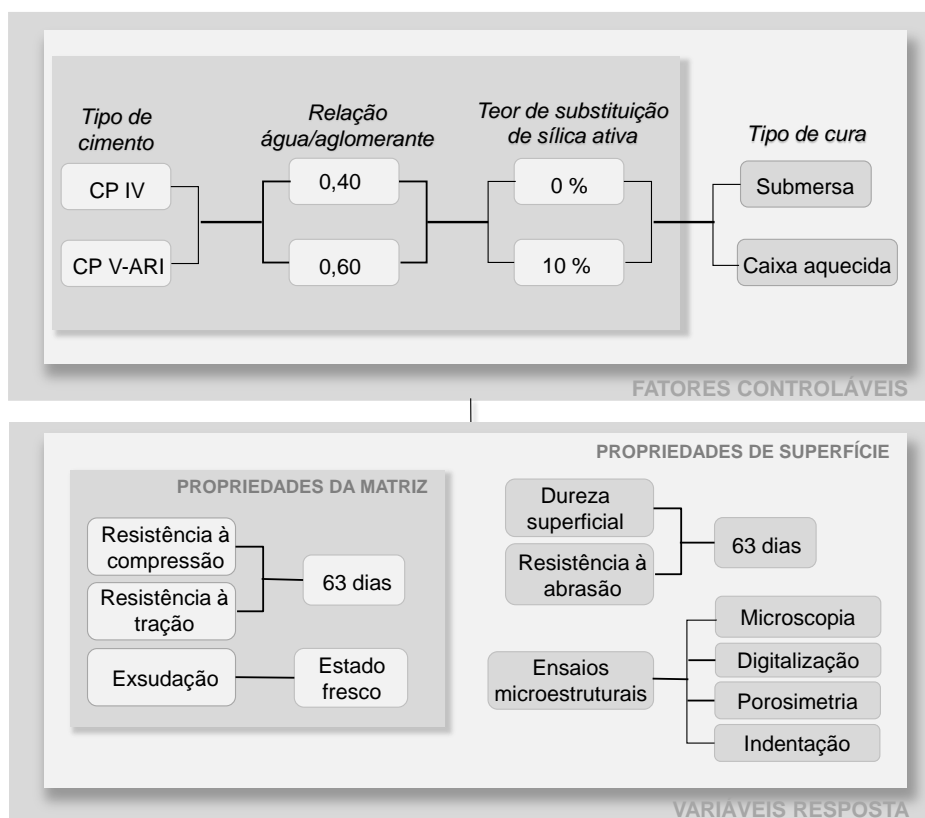


Figura 32: programa experimental da pesquisa

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Executar corretamente um planejamento experimental garante uma maior eficiência na obtenção de informações, quando em comparação com uma seqüência de ensaios de forma desestruturada. Possibilita também otimizar os recursos e o tempo empregado para desenvolver a pesquisa, viabilizando, de forma técnica e economicamente, a realização do projeto. Desta maneira, assegura a confiabilidade na interpretação dos dados obtidos, permitindo que uma análise estatística seja realizada de forma eficiente e coerente (CERVO; BERVIAN, 2002; DAL MOLIN; KULAKOWSKI; RIBEIRO, 2005; MARCONI; LAKATOS, 2008).

Nesta etapa foram definidas as variáveis de resposta e os fatores controláveis empregados nesta pesquisa, assim como a matriz experimental.

4.1.1 Variáveis de Resposta

As variáveis dependentes (variáveis de resposta), objeto de estudo deste projeto experimental, relacionam-se às características da qualidade do produto. As variáveis dependentes selecionadas para esta pesquisa estão apresentadas como segue:

4.1.1.1 Propriedades da matriz:

- a) resistência à compressão;
- b) resistência à tração na flexão;
- c) exsudação;

4.1.1.2 Propriedades de superfície:

- a) resistência à abrasão;
- b) dureza superficial;
- c) análise em microscópio estereoscópico;
- d) digitalização tridimensional à laser;
- e) microdureza da superfície;
- f) porosimetria por intrusão de mercúrio.

Como esta pesquisa procurou estudar a tendência de desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos, foram priorizadas algumas variáveis de resposta ou propriedades, as quais foram medidas no intuito de alcançar um maior entendimento quanto aos mecanismos geradores e aos fatores intervenientes do desgaste. Para tanto, foram priorizados ensaios relativos às propriedades de massa ou da matriz e às de superfície dos compósitos. Os ensaios de resistência à compressão uniaxial e resistência à tração na flexão foram realizados no intuito de controlar e caracterizar a produção dos concretos. Os ensaios de dureza superficial e resistência à abrasão foram realizados para avaliar a tendência de desgaste superficial nos diferentes traços de concretos produzidos. Somando-se a isto, foram feitos ensaios de exsudação, pois além de ser um parâmetro que está diretamente relacionado com a porosidade do concreto e, conseqüentemente, com a sua resistência, é mencionado por muitos autores (NEVILLE, 1997; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014) como sendo uma das principais causas da redução da resistência à abrasão dos pisos de concreto.

Para avaliar a microestrutura da camada superficial dos compósitos foram realizadas técnicas microestruturais, tais como análise em microscópio estereoscópico, digitalização tridimensional a laser, microdureza e porosimetria por intrusão de mercúrio. Tais técnicas foram adotadas de forma a complementar os resultados encontrados nos demais ensaios, buscando um maior entendimento do mecanismo em estudo. É importante ressaltar que dentre essas técnicas a digitalização tridimensional a laser foi a única aplicada a todas as combinações apresentadas no programa experimental (fase 2), pois conforme os resultados da análise estatística observados para a resistência à abrasão (tabela 41), não ocorreram

interações significativas de segunda ordem entre o tipo de cimento e os demais fatores controláveis. Logo, julgou-se adequado avaliar a aplicação das demais técnicas de forma mais completa para um tipo de cimento, uma vez que o comportamento para o outro tipo se replicaria, e, portanto, optou-se pelos compósitos produzidos com cimento de alta resistência inicial. Em virtude do exposto, com a finalidade de comparação entre os cimentos utilizados, foi tomado um ponto da matriz experimental para os compósitos com cimento pozolânico, sendo este o traço com relação a/agl 0,4 e 0 % de sílica ativa, onde foram empregadas as técnicas de microdureza por indentação instrumentada e porosimetria por intrusão de mercúrio.

É importante salientar que os parâmetros de qualidade que serão estudados não estão limitados a somente essas variáveis de resposta, na medida em que outras variáveis poderiam ser avaliadas. Contudo, após o estudo da revisão bibliográfica e pelos resultados obtidos no estudo preliminar (item 3) optou-se por estudar essas propriedades, as quais podem mostrar resultados coerentes e significativos frente ao problema do desgaste superficial decorrente da abrasão em pisos de concreto.

4.1.2 Fatores Controláveis

Neste item são definidos os fatores controláveis ou variáveis controláveis, que correspondem aos parâmetros do processo escolhidos com a meta de serem estudados em diferentes níveis no experimento e avaliar a real influência desses fatores nas variáveis de resposta. Assim, as variáveis de controle analisadas nesta pesquisa foram as seguintes:

- a) tipo de cimento: CP IV; CP V-ARI;
- b) relação a/agl: 0,40; 0,60;
- c) teor de substituição de sílica ativa: 0 %; 10 %;
- d) tipo de cura: submersa; caixa aquecida.

A escolha destas variáveis independentes baseou-se no conhecimento relacionado à dosagem de concretos, à tecnologia dos materiais cimentícios e aos parâmetros considerados importantes, empiricamente, por projetistas da área, nas especificações de concretos utilizados em pisos. A escolha dos cimentos dos tipos CP IV e CP V-ARI baseou-se em alguns fatos preponderantes. Primeiramente, questões relacionadas com especificações de projeto de pisos de concreto, disponibilidade destes materiais no mercado cimenteiro da região e sua grande empregabilidade em obras de construção deixam evidente a necessidade de obtenção de um maior conhecimento científico relacionado com estes cimentos por parte do meio técnico. Conjuntamente a estes fatos, a composição

química dos cimentos foi considerada extremamente relevante. Procurou-se escolher cimentos com características químicas, físicas e mecânicas diferenciadas. Assim, optou-se em estudar o cimento do tipo CP V-ARI, o qual apresenta o menor teor de adições minerais e a capacidade de atingir alta resistência inicial; e o cimento do tipo CP IV, o qual apresenta teores elevados de materiais pozolânicos e aumento do ganho de resistência à compressão em idades avançadas.

Quanto ao fator de controle relação a/agl , normalmente em especificações de pisos de concreto se empregam relações da ordem de 0,55, logo, julgou-se interessante avaliar valores que proporcionassem níveis de resistência distintos e que estivessem em torno do usual, sendo esses definidos como 0,40 e 0,60, respectivamente.

Tratando da substituição de sílica ativa, inúmeros estudos já foram realizados a respeito da sua utilização em concretos. Muitos destes mencionam que a incorporação em até 10% de tal material aumenta significativamente a durabilidade e resistência das estruturas de concreto, no entanto, com o uso de teores mais elevados não se observa grandes ganhos com relação ao seu desempenho. Além disso, cabe salientar que o uso da sílica ativa em teores acima de 10 % pode acarretar aumento significativo nos custos com o seu emprego. Logo, neste estudo optou-se por considerar esta variável de controle em dois diferentes níveis; sem substituição (0 %) e um teor mais elevado (10 % sobre a massa de cimento).

Quanto à influência do tipo de cura (submersa; caixa aquecida) dos concretos, salienta-se que esse fator controlável foi aplicado e avaliado apenas para as variáveis de resposta relacionadas às propriedades de superfície dos concretos (dureza superficial, resistência à abrasão e técnicas microestruturais). Além disso, enfatiza-se que foi descartada a ação combinada de elevação da temperatura por radiação solar e considerado apenas o aquecimento da superfície pelo calor do ar, uma vez que o aquecimento pela ação da radiação solar é bastante variável, dependendo da época do ano, da hora do dia, da orientação da superfície, entre outros.

Com relação à cura submersa dos concretos destaca-se que este procedimento foi feito em tanques de água com cal em ambiente climatizado (temperatura 23 ± 2 °C; umidade relativa do ar de 65 ± 5 %). Já para a condição sem cura foi utilizada uma caixa aquecida provida de lâmpadas incandescentes posicionadas de forma a proporcionar um aquecimento uniformemente distribuído e regular na superfície dos concretos. Tal caixa foi mantida em ambiente climatizado com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 65 ± 5 %.

A caixa aquecida foi construída em 3 módulos, sendo 2 deles correspondente aos compartimentos aquecidos e o terceiro, servindo como vedação do sistema. O primeiro e

terceiro módulos continham lâmpadas incandescentes fixadas nas laterais, em montantes e na parte superior da caixa, formando uma “moldura” de lâmpadas para cada corpo de prova (placas de concreto com dimensões de 250 x 350 x 100 mm destinadas aos ensaios de dureza superficial, resistência à abrasão e análises microestruturais). O segundo módulo, móvel, continha a base e uma tampa removível onde estava fixada uma moldura que, quando colocada, garantia o total isolamento dos dois compartimentos aquecidos. As figuras 33 e 34 apresentam, respectivamente, a montagem da caixa aquecida para utilização e a mesma em funcionamento.



Figura 33: montagem caixa aquecida



Figura 34: caixa aquecida em funcionamento

A cura dos concretos em caixa aquecida foi adotada com a finalidade de simular a influência das variações de temperatura diárias, em forma de ciclagem. Foram feitos quatro ciclos diários de 6 horas, ativados por um temporizador que controlava 2 termostatos, cada um programado para uma temperatura, sendo estas 23 °C e 40 °C. Ambos termostatos estavam em contato com os três compartimentos da caixa, garantindo que todo o sistema trabalhasse junto, e não de forma isolada. A tabela 15 apresenta a ciclagem de exposição das placas de concreto na caixa aquecida.

Tabela 15: ciclagem de exposição dos concretos na caixa aquecida

Ciclo	Intervalo (horas)	Temperatura (°C)
1	0 - 6	Crescente 23 - 40
2	6 - 12	Decrescente 40 - 23
3	12 - 18	Crescente 23 - 40
4	18 - 0	Decrescente 40 - 23

A definição dos 40°C foi feita a partir de dados fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a cidade de Porto Alegre no ano de 2005. A escolha foi obtida a partir da temperatura mais alta alcançada no ano (39,2°C), sendo definida como temperatura do ar. Existem alguns trabalhos publicados que já utilizaram este aparato como forma de

tratamento de materiais compósitos, como os propostos por Moura (2007) e Gasperin (2011).

É importante explicitar que o tempo de duração do acréscimo ou decréscimo de temperatura não foi controlado, apenas monitorado. O controle do temporizador e termostatos consistia apenas em manter a temperatura, quando alcançada, até que fosse completado o ciclo de 6 horas.

As placas de concreto destinadas à cura em caixa aquecida permaneceram nessa condição de controle por três dias, após esse período foram mantidas em câmara climatizada (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 65 ± 5 %) até a idade de análise. Com relação à cura submersa, as placas de concreto que foram submetidas a esse tratamento permaneceram nos tanques com cal até a idade prevista para os ensaios.

Com a definição das variáveis de resposta e a escolha dos fatores controláveis foi possível elaborar a matriz experimental (tabela 16) que foi adotada neste estudo.

Tabela 16: matriz experimental

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS				VARIÁVEIS RESPOSTA											
	Relação a/agl	Teor de sílica ativa (%)	Tipo de Cura	Tipo de cimento	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Exsudação	Dureza Superficial	Resistência à abrasão	Ensaio** Microestruturais						
1 A	0,4	0	submersa caixa aquecida*	CP IV	63 dias	63 dias	Concreto em estado fresco	63 dias	63 dias	100 dias						
2 A	0,4	10	submersa caixa aquecida													
3 A	0,6	0	submersa caixa aquecida													
4 A	0,6	10	submersa caixa aquecida													
1 B	0,4	0	submersa caixa aquecida								CP V-ARI	63 dias	63 dias	63 dias	63 dias	100 dias
2 B	0,4	10	submersa caixa aquecida													
3 B	0,6	0	submersa caixa aquecida													
4 B	0,6	10	submersa caixa aquecida													

*A cura em caixa aquecida foi adotada apenas para as análises das propriedades de superfície (dureza superficial, resistência à abrasão e ensaios microestruturais)

**Análise em microscópio estereoscópico, digitalização tridimensional à laser, microdureza por indentação e porosimetria por intrusão de mercúrio

Os ensaios relativos às propriedades de massa foram todos realizados aos 63 dias com a finalidade de verificar a influência da evolução do ganho de resistência dos compósitos produzidos com cimento CP IV, comparando-se aos com cimento CP V-ARI.

Os ensaios microestruturais foram todos avaliados na idade de 100 dias em função de disponibilidade dos laboratórios utilizados para o emprego dessas técnicas.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados no programa experimental (fase 2) dessa pesquisa diferem daqueles empregados no estudo preliminar, e foram provenientes do estado do Rio Grande do Sul, com exceção da sílica ativa. Na sequência, está apresentada a caracterização de cada material, obtida segundo as Normas expostas no estudo preliminar.

4.2.1 Cimento

A tabela 17 apresenta um resumo da composição dos cimentos adotados nesta pesquisa, segundo as respectivas normas brasileiras.

Tabela 17: composição dos cimentos empregados na pesquisa

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma brasileira
		Clínquer + gesso (sulfato de cálcio)	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V-ARI	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

As tabelas 18, 19 e 20 apresentam as características mecânicas, físicas e químicas dos cimentos, sendo estas obtidas junto aos seus fabricantes. Para complementar a caracterização, alguns ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica (LACER) e no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) do Núcleo Orientado para Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS.

Tabela 18: caracterização mecânica dos cimentos empregados na pesquisa, segundo o fabricante

Características avaliadas		Tipo de cimento Portland			
		CP IV		CP V-ARI	
		Resultados obtidos	Exigências da NBR 5736/91	Resultados obtidos	Exigências da NBR 5733/91
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	-	-	20,9	≥ 14,0
	3 dias	19,8	≥ 10,0	34,9	≥ 24,0
	7 dias	24,7	≥ 20,0	41,3	≥ 34,0
	28 dias	37,4	≥ 32,0	47,9	-

Tabela 19: caracterização física dos cimentos empregados na pesquisa

Características avaliadas	Tipos de cimento Portland - Resultados									
	CP IV					CP V-ARI				
	Fabricante	LACER	LAMTAC/ NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5736/91	Fabricante	LACER	LAMTAC/ NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (g/cm ³)	-	-	2,78	2,74	-	-	-	3,09	3,04	-
Expansão à quente (mm)	0,0	-	-	-	≤ 5,0	-	-	-	-	≤ 5,0
Tempo de pega (h:min)	Início	04:19	-	-	≥ 1,0	02:58	-	-	-	≥ 1,0
	Fim	05:38	-	-	≤ 12,0	04:16	-	-	-	≤ 10,0
Consistência normal (%)	32,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Finura Blaine (cm ² /g)	4503	-	-	-	-	4678	-	-	-	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)	0,6	-	-	-	≤ 8,0	0,2	-	-	-	≤ 6,0
Resíduo peneira #325µm (%)	4,68	-	-	-	-	2,04	-	-	-	-
Diâmetro médio (µm)	-	13,83	-	-	-	-	11,54	-	-	-

Tabela 20: caracterização química dos cimentos empregados na pesquisa

Parâmetros avaliados (% da massa)	Tipos de cimento Portland					
	CP IV			CP V-ARI		
	Resultados (fabricante)	Resultados (Lacer)	Exigências da NBR 5736/91	Resultados (fabricante)	Resultados (Lacer)	Exigências da NBR 5733/91
Al ₂ O ₃	-	10,12	-	-	3,41	-
SiO ₂	-	32,84	-	-	20,16	-
Fe ₂ O ₃	-	3,78	-	-	3,67	-
CaO	-	40,26	-	-	58,52	-
MgO	4,70	1,44	≤ 6,50	2,65	0,81	≤ 6,50
SO ₃	2,30	4,52	≤ 4,00	3,09	4,55	≤ 4,00
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	-	1,62	-	-	1,17	-
SrO	-	0,21	-	-	0,51	-
TiO ₂	-	0,73	-	-	0,33	-
MnO	-	0,09	-	-	0,06	-
P ₂ O ₅	-	0,18	-	-	0,19	-
Perda ao fogo	3,00	-	≤ 4,50	3,28	-	≤ 4,50
CaO livre	-	-	-	-	-	-
Resíduo insolúvel	28,80	-	-	-	-	-
Equivalente alcalino (Na ₂ O _{eq})*	-	-	-	-	-	-

*Na₂O_{eq} = 0,658 x K₂O% + Na₂O%

4.2.2 Agregados

Para o proporcionamento dos concretos foram utilizados agregados miúdo e graúdo, ambos provenientes do estado do Rio Grande do Sul. Estes materiais estão especificados e caracterizados nos itens 4.2.2.1 e 4.2.2.2 a seguir.

4.2.2.1 Agregado Miúdo

Nesta pesquisa o agregado miúdo empregado foi uma areia de origem quartzosa natural, com distribuição granulométrica contínua. Esta foi caracterizada quanto as suas propriedades físicas. Os ensaios de caracterização foram realizados no LAMTAC/NORIE, da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo estão expressos na tabela 21.

Tabela 21: caracterização agregado miúdo - areia média

AGREGADO MIÚDO						
Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
			Limites Inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona utilizável	Zona ótima
4,75	2	2	0	0	5	10
2,36	5	7	0	10	20	25
1,18	7	14	5	20	30	50
0,6	12	26	15	35	55	70
0,3	51	77	50	65	85	95
0,15	22	99	85	90	95	100
< 0,15	1	100	100	100	100	100
Módulo de Finura		2,25	1,55 - 2,20	2,2	2,90 - 3,50	2,9
Dimensão Máxima (mm)		4,8				
Massa Específica (g/cm³)		2,62				
Massa Unitária (g/cm³)		1,55				
Absorção de água (%)		0,47				

Os resultados da caracterização física do agregado miúdo atendem as especificações prescritas pela norma NBR 7211 (2009).

4.2.2.2 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa foram britas de origem basáltica, com distribuição granulométrica contínua, comercialmente denominadas britas 0 e 1. Estas foram caracterizadas quanto as suas propriedades físicas. Os ensaios de caracterização foram realizados no LAMTAC/NORIE da UFRGS. Os resultados da caracterização física dos agregados graúdos estão contidos nas tabelas 22 e 23, respectivamente.

Tabela 22: caracterização agregado gráudo contido na zona granulométrica 4,75/12,5 - brita 0

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D ¹				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 - 100	-
19	0	0	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
12,5	1	1	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-
9,5	23	24	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-	-
6,3	44	68	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-	-
4,75	21	89	80 ² - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	11	100	95 - 100	-	-	-	-
1,18	0	100	-	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-
Módulo de Finura	6,13		¹ - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado gráudo ² - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados				
Dimensão Máxima (mm)	12,5						
Massa Específica (g/cm³)	2,93						
Absorção de Água (%)	1,50						
Massa Unitária (g/cm³)	1,51						

Tabela 23: caracterização agregado gráudo contido na zona granulométrica 9,5/25 - brita 1

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)				
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa				
			Zona Granulométrica - d/D ¹				
			4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
25	0	0	-	0 - 5	5 - 25 ²	87 - 100	-
19	16	16	-	2 - 15 ²	65 ² - 95	95 - 100	-
12,5	77	93	0 - 5	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-
9,5	7	100	2 - 15 ²	80 ² - 100	95 - 100	-	-
6,3	0	100	40 ² - 65 ²	92 - 100	-	-	-
4,75	0	100	80 ² - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	0	100	95 - 100	-	-	-	-
1,18	0	100	-	-	-	-	-
0,6	0	100	-	-	-	-	-
0,3	0	100	-	-	-	-	-
0,15	0	100	-	-	-	-	-
Fundo	0	100	-	-	-	-	-
Módulo de Finura	7,16		¹ - Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado gráudo ² - Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados				
Dimensão Máxima (mm)	25						
Massa Específica (g/cm³)	2,88						
Absorção de Água (%)	1,30						
Massa Unitária (g/cm³)	1,55						
Índice de Forma	2,19						

Os resultados da caracterização física do agregado gráudo atendem as especificações prescritas pela norma NBR 7211 (2009).

4.2.2.3 Composição granulométrica entre os agregados gráudos

Nesta pesquisa foi utilizada uma composição entre os agregados gráudos, definida com base na maior massa unitária ou menor índice de vazios através de ensaio de massa específica aparente, conforme norma NBR NM 45 (2006). Através do ensaio foi encontrado

para a composição um percentual de 60 % de agregado graúdo contido na zona granulométrica 9,5/25 (brita 1) e 40% de agregado graúdo contido na zona granulométrica 4,75/12,5 (brita 0).

A tabela 24 apresenta os resultados de densidade aparente e volume de vazios que foram encontrados para o ensaio. Já a figura 35 apresenta o percentual de agregados graúdos (zona granulométrica 4,75/12,5) em função do volume de vazios. O ensaio foi realizado no LAMTAC/NORIE, da UFRGS.

Tabela 24: composição granulométrica entre agregados graúdos - resultados do ensaio de massa específica aparente

Percentual de Agregados		Massa Parcial (kg)		Massa Total (kg)	Acréscimos (kg)		Massa Encontrada (kg)			Massa Média (kg)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Volume de Vazios (cm ³)
brita 1	brita 0	brita 1	brita 0		brita 1	brita 0	massa 1	massa 2	massa 3			
100%	0%	24,00	0,00	24	24,00	0	25,36	25,40	25,34	25,37	1,79	0,38
80%	20%	24,00	6,00	30	0,00	6,00	26,28	26,48	26,14	26,30	1,85	0,36
70%	30%	24,00	10,29	34	0,00	4,29	26,48	26,72	26,72	26,64	1,88	0,35
60%	40%	24,00	16,00	40	0,00	5,71	26,44	26,66	26,68	26,59	1,87	0,35
50%	50%	24,00	24,00	48	0,00	8,00	26,50	26,16	26,22	26,29	1,85	0,36
40%	60%	16,00	24,00	40	5,71	0,00	26,18	25,84	26,26	26,09	1,84	0,37
30%	70%	10,29	24,00	34	4,29	0,00	25,98	25,94	26,02	25,98	1,83	0,37
20%	80%	6,00	24,00	30	6,00	0,00	25,58	25,36	25,52	25,49	1,79	0,38
0%	100%	0,00	24,00	24	0,00	24,00	24,60	24,82	24,74	24,72	1,74	0,40

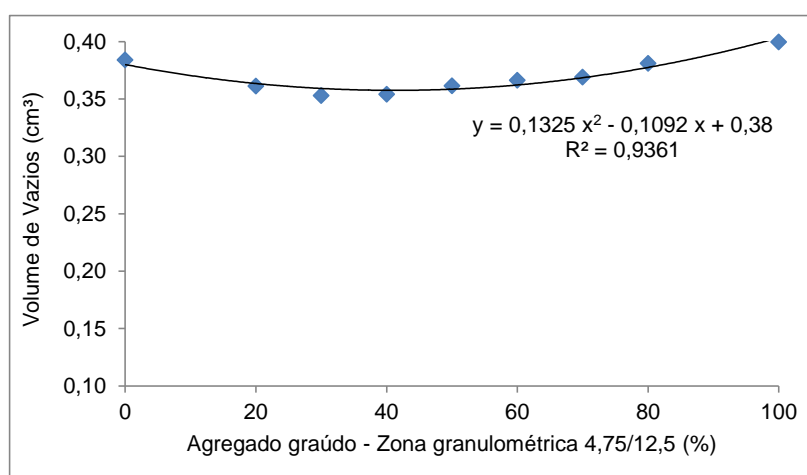


Figura 35: percentual de agregados graúdos (zona 4,75/12,5) na composição em função do volume de vazios

4.2.3 Sílica Ativa

Nesta pesquisa a sílica ativa foi empregada como adição mineral nas misturas de concretos, substituindo-se em massa, conforme apresentado no programa experimental. Para análise do material foi realizado o ensaio de determinação da massa específica, análise química através de fluorescência de raios-X e granulometria a laser, conforme tabelas 25 e 26, respectivamente. Os ensaios foram realizados no LACER e no LAMTAC/NORIE, ambos da UFRGS.

Tabela 25: caracterização física da sílica ativa

SÍLICA ATIVA	
Característica avaliada	Resultado obtido
Diâmetro médio (μm)	15,51*
Massa específica (g/cm^3)	2,20

* Diâmetro médio acima do esperado ($\approx 0,1 \mu\text{m}$), provavelmente em função da presença de possíveis aglomerações das partículas do material durante a execução da análise granulométrica.

Tabela 26: caracterização química da sílica ativa

SÍLICA ATIVA											
Características avaliadas (% da massa)	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CO_2	MgO	SO_3	K_2O	MnO	P_2O_5	CaO	Na_2O
Resultados obtidos	0,20	92,36	0,14	5,06	0,24	0,15	0,86	0,03	0,11	0,77	0,06

Com relação a granulometria a laser da sílica ativa salienta-se que o procedimento de dispersão usado pelo laboratório responsável não foi informado. Conjuntamente a isto, utilizar um agente dispersante é necessário para se obter melhores resultados, no entanto, a granulometria apresentada pelo material ficou muito acima do apontado pela bibliografia. Sendo assim, o processo de dispersão usado pelo laboratório não foi o adequado. Devido ao processo de densificação dessa adição, suas partículas se encontram fortemente unidas, podendo resultar em aglomerados macroscópicos que não se rompem com facilidade mesmo após cisalhamento intenso.

Romano (2008) estudou as características de dispersão em água de duas sílicas ativas, as quais foram submetidas a condições de cisalhamento brando e intenso em um misturador convencional de baixa energia e em um dispersor de alta energia de cisalhamento, respectivamente. Para o autor o dispersor de elevada energia de cisalhamento promoveu partículas com diâmetro médio de $20 \mu\text{m}$, acima do diâmetro das partículas primárias de sílica ativa ($0,1 \mu\text{m}$). Sendo assim, conclui que a dispersão da sílica ativa necessita de equipamentos com maior eficiência. Diamond (2006) relatou que os aglomerados de sílica ativa deveriam sofrer intensos tratamentos ultrassônicos para serem divididos em conjuntos de esferas menores.

Rodríguez (2012) avaliaram amostras de sílica ativa submetidas a um tratamento ultrassônico, buscando melhorar a dispersão do material. Verificou-se a redução na distribuição de tamanho das partículas de sílica através do tratamento ultrassônico, comparativamente as amostras sem tratamento. Através desse processo de dispersão foi possível obter um volume de partículas com diâmetro inferior a $1 \mu\text{m}$.

4.2.4 Água

A água utilizada na dosagem dos concretos foi proveniente da rede de abastecimento pública da cidade de Porto Alegre (RS).

4.2.5 Aditivo

Nesta pesquisa foi utilizado um superplastificante para concreto a base de policarboxilato. A quantidade de aditivo adicionada nos concretos de referência (sem sílica ativa) foi definida durante a dosagem experimental. O aditivo superplastificante teve como principal função alcançar a trabalhabilidade do concreto, fixada pelo ensaio de abatimento (NBR NM 67/1998) e, além disso, atuar como um dispersor nas misturas. Cabe salientar que todos os traços de concreto foram dosados com superplastificante. Esta medida foi tomada com a finalidade de buscar melhores resultados quanto às propriedades analisadas e uniformizar os materiais para os distintos traços que foram estudados. A tabela 27 apresenta a caracterização físico-química do aditivo empregado, segundo seu o fabricante.

Tabela 27: Caracterização físico-química do aditivo empregado

Propriedades Físico-Químicas	
Estado físico	Líquido
Cor	Branco turvo
Odor	Característico
pH	5 - 7
Base química	Éter policarboxílico
Ponto de fulgor	-
Explosividade	-
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107
Solubilidade	Solúvel em água
Viscosidade (cps)	< 150
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5

4.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para este estudo foi adotado o método de dosagem do IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992), onde os parâmetros utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de 130 ± 20 mm, definido com base em especificações de projeto para pisos de concreto, e um teor de argamassa (α) ideal de 52 %, determinado experimentalmente. As tabelas 28 e 29 apresentam as dosagens experimentais realizadas para os cimentos CP IV e CP V-ARI, respectivamente.

Tabela 28: Dosagem experimental - CP IV

Traço unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência Média 28 dias (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	H (%)	Abatimento (mm)	Teor Aditivo (%)
1 : 3,5	0,40	42,82	495,942	8,90	120	0,10
1 : 5,0	0,46	30,76	381,544	7,65	120	
1 : 6,5	0,64	23,39	299,039	8,48	110	

Tabela 29: Dosagem experimental - CP V-ARI

Traço unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência Média 28 dias (MPa)	Consumo de cimento (kg/m ³)	H (%)	Abatimento (mm)	Teor Aditivo (%)
1 : 3,5	0,36	55,48	514	8,10	120	0,10
1 : 5,0	0,47	46,08	385	7,90	120	
1 : 6,5	0,60	39,63	306	8,00	120	

Após a realização das dosagens experimentais e com o auxílio das curvas de dosagem foram determinados os traços dos concretos. A tabela 30 apresenta a definição dos parâmetros dos traços que foram empregados nesta pesquisa.

Tabela 30: Parâmetros dos traços empregados

Tipo de cimento	Relação água/cimento (a/c)	Lei de Lise	m (a+p)	α (%)	Traço Unitário	Consumo de cimento (kg/m ³)
CP IV	0,4	m = 11,7*a/c - 0,8507 R ² = 0,92	3,8	52	1:1,50:2,30	471
	0,6		6,2		1:2,74:3,46	313
CP V-ARI	0,4	m = 12,7*a/c - 1,0816 R ² = 0,99	4	52	1:1,60:2,40	463
	0,6		6,5		1:2,90:3,60	306

4.3.1 Produção dos Concretos

A moldagem dos traços de concreto foi definida de forma aleatória. Esta aleatorização foi feita com o objetivo de diluir os fatores não controláveis no experimento, tais como variações da umidade relativa e temperatura, grau de cansaço do laboratorista, entre outros, buscando aleatorizar os fatores de ruído no experimento.

A produção diária dos concretos foi definida e limitada pelo número dos moldes dos corpos de prova (cilindro metálico) disponíveis para o ensaio de exsudação (NBR 15558/2008). Desta forma, a moldagem dos concretos foi determinada pela capacidade do laboratório, contemplando, no máximo, dois traços de concreto por dia.

Para todos os traços de concreto estudados, os valores referentes aos seus abatimentos foram fixados em 130 ± 20 mm. Cabe salientar que todos os traços de concreto receberam dosagem de aditivo superplastificante, conforme estabelecido na dosagem experimental, com a finalidade de manter a trabalhabilidade das misturas e promover uma maior dispersão dos materiais; além disso, quando houve a necessidade de aumentar tal propriedade dos

concretos, principalmente quando em presença de baixa relação água/aglomerante (0,40) e teor mais elevado de substituição de sílica ativa (10 %), foi ajustada a quantidade de aditivo durante o processo de mistura, aumentando-se a dosagem deste no proporcionamento dos compósitos.

Na tabela 31 são apresentadas as características dos concretos estudados, como os fatores controláveis (tipo de cimento, relação a/agl, teor de substituição de sílica ativa e tipo de cura), consumo de cimento, traço unitário e parâmetros relacionados às misturas, como a relação água/materiais secos (H%), o teor de argamassa (α), o abatimento do concreto e a quantidade de aditivo dosada, em massa, em relação à quantidade de cimento.

Tabela 31: Traços dos concretos avaliados na pesquisa

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS				Consumo de cimento (kg/m ³)	TRAÇO UNITÁRIO					PARÂMETROS			
	Tipo de cimento	Relação a/agl	Teor de sílica ativa (%)	Tipo de cura		cim	a	b0	b1	m	H (%)	α (%)	Abatimento (mm)	Aditivo (%)
1 A	CP IV	0,4	0	submersa	471	1	1,5	0,92	1,38	3,8	8,33	52	110	0,10
				caixa aquecida										
2 A	CP IV	0,4	10	submersa	471	1	1,5	0,92	1,38	3,8	8,33	52	125	0,25
				caixa aquecida										
3 A	CP IV	0,6	0	submersa	313	1	2,74	1,38	2,07	6,2	8,34	52	125	0,02
				caixa aquecida										
4 A	CP IV	0,6	10	submersa	313	1	2,74	1,38	2,07	6,2	8,34	52	115	0,10
				caixa aquecida										
1 B	CP V-ARI	0,4	0	submersa	463	1	1,6	0,96	1,44	4	8,00	52	145	0,07
				caixa aquecida										
2 B	CP V-ARI	0,4	10	submersa	463	1	1,6	0,96	1,44	4	8,00	52	120	0,17
				caixa aquecida										
3 B	CP V-ARI	0,6	0	submersa	306	1	2,9	1,44	2,16	6,5	8,00	52	120	0,08
				caixa aquecida										
4 B	CP V-ARI	0,6	10	submersa	306	1	2,9	1,44	2,16	6,5	8,00	52	120	0,11
				caixa aquecida										

4.3.2 Moldagem dos Concretos

O processo de mistura dos materiais foi efetuado em uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com uma mistura de cimento, areia e água. A colocação dos materiais na betoneira seguiu a mesma ordem para todos os traços. A ordem de mistura se deu da seguinte forma: agregado graúdo; 30 % de água; cimento; 30 % de água; sílica ativa (quando presente); agregado miúdo; 40 % de água; e aditivo superplastificante para atingir o abatimento (pré-estabelecido em 130 ± 20 mm) e a dispersão destes materiais no concreto.

As moldagens foram feitas com fôrmas metálicas no intuito de minimizar a provável perda de pasta de cimento e a variabilidade dimensional entre os diferentes traços de concreto analisados. Os corpos de prova referentes a cada traço foram moldados simultaneamente. O processo de adensamento adotado foi mecânico, com o auxílio de uma mesa vibratória, a exceção do cilindro metálico moldado para o ensaio de exsudação dos concretos, onde o

adensamento foi manual, com haste de compactação, conforme prescreve a norma NBR 15558 (2008).

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados corpos de prova cilíndricos, de dimensões 100 x 200 mm, conforme figura 36. Corpos de prova prismáticos, de dimensões 100 x 100 x 350 mm, figura 37, foram utilizados para os ensaios de resistência à tração na flexão. No ensaio de exsudação foi utilizado um molde cilíndrico metálico, com diâmetro interno de 250 mm e altura interna de 280 mm, visto na figura 38. Já para os ensaios de dureza superficial e resistência à abrasão foram utilizadas fôrmas metálicas prismáticas de dimensões 250 x 350 x 100 mm, como se observa na figura 39.



Figura 36: fôrma cilíndrica de 100 x 200 mm



Figura 37: fôrma prismática de 100 x 100 x 350 mm



Figura 38: cilindro metálico de 250 mm de diâmetro e 280 mm de altura

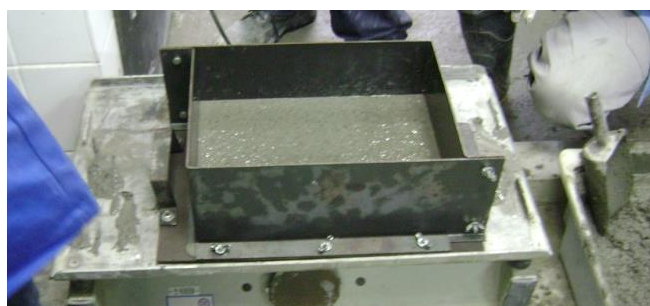


Figura 39: fôrma prismática de 250 x 350 x 100 mm

4.4 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos dos ensaios empregados neste programa experimental estão explicitados nos itens a seguir.

4.4.1 Resistência à Compressão Uniaxial

O método de ensaio de resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto seguiu as determinações da norma brasileira NBR 5739 (2007). Os corpos de prova

cilíndricos (CP's) utilizados neste ensaio foram moldados e, posteriormente, retificados, de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003). Foram ensaiados seis CP's à compressão, aos 63 dias, para cada traço de concreto. Após a moldagem, os CP's foram cobertos por um plástico, não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto para o ambiente externo. Estes foram armazenados em superfície horizontal rígida e em ambiente livre da ação de intempéries, durante as primeiras 24 horas. Após esta etapa, os CP's foram desmoldados e mantidos em cura submersa ($UR \geq 95\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C) até o momento da realização do ensaio.

4.4.2 Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 12142 (2010). Os CP's prismáticos empregados neste ensaio foram moldados de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003). Foram ensaiados quatro corpos de prova à tração na flexão, aos 63 dias, para cada traço de concreto do programa experimental. Foi empregada a mesma metodologia para a cura inicial, desforma e cura submersa, conforme descrito anteriormente no ensaio de resistência à compressão.

4.4.3 Exsudação

O método de ensaio de exsudação seguiu as prescrições da norma brasileira NBR 15558 (2008). Conforme a norma, neste ensaio utiliza-se um cilindro metálico, o qual foi moldado de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003), e, posteriormente, compactado segundo a norma brasileira NBR 9833 (2008). O ensaio foi efetuado no concreto em estado fresco em ambiente com temperatura e umidade controladas ($UR 65 \pm 5\%$ e temperatura de 23 ± 2 °C).

Como no programa experimental tem-se 8 combinações ou traços de concreto, foi ensaiado um total de 8 corpos de prova. A equação 1 calcula, de acordo com a norma brasileira NBR 15558 (2008), a massa de água de mistura do concreto contida dentro do corpo de prova moldado. A equação 2 calcula a água exsudada ou acumulada por exsudação, também conforme a referida norma, expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto contida dentro do molde.

$$m_{ar} = \frac{m_{am}}{m_t} * m_e \quad \text{Equação 1}$$

$$E = \frac{m_{ae}}{m_{ar}} * 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E - é a quantidade de água exsudada, expressa em porcentagem (%);

m_{ar} - é a massa de água do concreto do recipiente cilíndrico, expressa em gramas (g);

m_t - é a massa total do traço, expressa em gramas (g);

m_{am} - é a água de mistura do traço, ou seja, a massa da água de amassamento com os agregados na condição saturado superfície seca, descontando a água absorvida, expressa em gramas (g);

m_e - é a massa da amostra ensaiada, expressa em gramas (g);

m_{ae} - é a massa de água exsudada, expressa em gramas (g), ou o volume total de água retirado do corpo-de-prova, expresso em centímetros cúbicos (cm³), multiplicado por 1 g/m³.

4.4.4 Resistência à Abrasão

Para análise da resistência à abrasão foi empregado o método descrito pela norma brasileira NBR 12042 (2012), conforme apresentado no item 2.2.3.1. Na execução de cada traço de concreto da matriz experimental foram moldadas fôrmas metálicas com dimensões de 250 x 350 x 100 mm, das quais foram extraídas as amostras destinadas aos ensaios de abrasão aos 63 dias. A moldagem das placas foi realizada em duas camadas, com adensamento mecânico (mesa vibratória) e posterior regularização da superfície, conforme prescrições da norma brasileira NBR 5738 (2003). Da mesma maneira como para os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, as placas foram revestidas por um plástico, imediatamente após o processo de moldagem, no local em que seriam armazenadas durante as primeiras 24 horas. Após esta etapa, as mesmas foram desmoldadas e destinadas aos processos de cura (submersa; caixa aquecida) até o momento da realização dos ensaios.

Para o ensaio segundo a NBR 12042 (2012) três CP's nas dimensões de 70 x 70 x 30 mm foram retirados de cada placa de concreto, perfazendo um total de 9 amostras para cada combinação. Tais amostras foram obtidas através do corte refrigerado em serra diamantada. Primeiramente, as placas foram cortadas transversalmente, sendo obtidas duas partes iguais nas dimensões de 250 x 175 x 100 mm. Uma das partes foi utilizada para a extração das amostras destinadas ao ensaio de resistência abrasão e às técnicas de microdureza e porosimetria por intrusão de mercúrio, enquanto que a outra foi empregada para a medição da dureza superficial por esclerometria (figura 40).

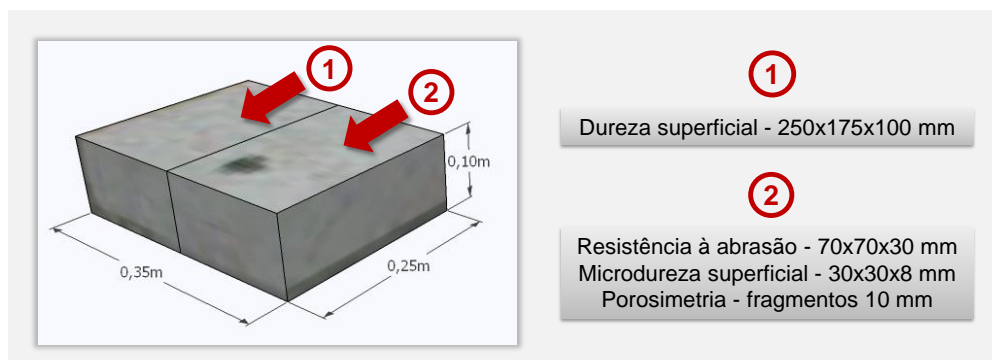


Figura 40: metodologia para obtenção das amostras para os ensaios de superfície

Na figura 41 está apresentada uma amostra que foi preparada para a execução do ensaio de resistência à abrasão e na figura 42 demonstra-se a mesma desgastada, cujo ensaio foi realizado através de um equipamento abrasor tipo Amsler (figura 43).



Figura 41: CP para o ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042



Figura 42: CP após ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042



Figura 43: equipamento para ensaio de resistência à abrasão - NBR 12042

4.4.5 Dureza Superficial por Esclerometria

O método de ensaio de avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão seguiu as determinações da norma brasileira NBR 7584 (2012). Esse método mede a dureza superficial do concreto, fornecendo elementos para avaliação da qualidade do concreto endurecido, tendo como parâmetro de controle o índice esclerométrico (IE). O princípio de funcionamento é baseado na ação de uma massa ou martelo que, ao ser impulsionado por uma mola, se choca através de uma haste com a superfície de ensaio; o aparelho então registra a energia remanescente através do recuo do martelo.

O ensaio de dureza superficial por esclerometria foi efetuado, conforme mencionado anteriormente, em parte das placas de concreto moldadas para o ensaio de abrasão. Logo, para cada traço de concreto resultaram 3 CP's nas dimensões de 250 x 175 x 100 mm.

A NBR 7584 (2012) recomenda em cada área de ensaio, no mínimo, 16 impactos do aparelho. Nesta pesquisa foram adotados 16 pontos para execução do ensaio em cada corpo de prova, distribuídos sobre a superfície dos mesmos, de acordo com recomendações da norma, a fim de medir a dureza superficial dos compósitos.

A figura 44 apresenta o corpo de prova de concreto que foi destinado ao ensaio de esclerometria nesta pesquisa, enquanto que a figura 45 mostra a execução do referido ensaio, com os respectivos pontos para impacto do esclerômetro de reflexão.



Figura 44: corpo de prova para o ensaio de esclerometria



Figura 45: ensaio esclerométrico

Antes da execução de cada ensaio foi efetuada a calibração do equipamento, empregando-se para tal uma bigorna de aço, segundo recomendações da NBR 7584 (2012). Foram registrados 10 impactos sobre a bigorna de aço, sendo que o aparelho foi considerado apto para uso, uma vez que nenhuma das leituras situou-se fora do intervalo estabelecido pelo fabricante do aparelho.

Segundo a referida norma, mediante as 10 leituras, calcula-se o coeficiente de correção (K), o qual é aplicado aos valores dos IE obtidos no ensaio. Através da equação 3 é possível obter o valor do K para cada ensaio.

$$K = \frac{n * IE_{nom}}{\sum_{i=1}^n IE_i} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

K - é o coeficiente de correção do índice esclerométrico;

n - é o número de impactos na bigorna de aço (10);

IE_{nom} - é o índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante (80);

IE_i - é o índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço.

Ainda, conforme a norma, após cada ensaio realizado, calcula-se a média aritmética dos 16 valores individuais dos índices esclerométricos, desprezando-se todo índice individual que esteja afastado em mais de 10 % do valor médio obtido. Caso algum valor seja descartado, uma nova média aritmética deve ser calculada. Cabe salientar que o IE final deve ser obtido com no mínimo cinco valores individuais. Quando isto não for possível, o ensaio esclerométrico da área analisada deve ser descartado. Uma vez obtido o valor do IE de cada corpo de prova de concreto, calcula-se o IE efetivo (IE_{ef}), de acordo com a equação 4.

$$IE_{ef} = IE * K \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

IE_{ef} - é o índice esclerométrico efetivo;

K - é o coeficiente de correção, obtido conforme equação 3;

IE - é o índice esclerométrico médio (média dos impactos).

O valor do IE_{ef} de cada traço de concreto moldado foi dado pela média aritmética dos valores dos IE_{ef} dos 3 CP's ensaiados.

4.4.6 Análise em Microscópio Estereoscópico

Nesta pesquisa foram feitas análises da superfície das amostras destinadas ao ensaio de resistência à abrasão pelo método da norma brasileira (NBR 12042/2012), antes e depois de desgastadas. Salienta-se que foram avaliadas apenas algumas amostras para ambos os cimentos, buscando complementar os resultados encontrados nessa pesquisa. Para essas análises microscópicas foi adotado um microscópio estereoscópico modelo SZX16, com objetiva de 1x e ocular de 10x disponibilizado pelo Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS.

4.4.7 Digitalização Tridimensional a Laser

Além das análises em microscópio estereoscópico, as amostras de concreto destinadas ao ensaio de abrasão pelo método da norma brasileira também foram digitalizadas tridimensionalmente a laser, antes e depois do desgaste. Tais análises foram efetuadas com objetivo de verificar a perda de espessura e a distribuição de desgaste na superfície das amostras. Conforme descrito no programa experimental essa técnica foi aplicada a todas as

combinações da matriz experimental, onde duas amostras para cada traço de concreto foram digitalizadas. Para tanto foi empregado um scanner modelo Digimill 3D da Tecnodrill, com a lente Optimet 150 mm, e uma resolução de 0,1 mm nos eixos X e Y disponibilizado pelo LdSM/UFRGS. A figura 46 demonstra a digitalização à laser de uma das amostras de concreto desgastadas.

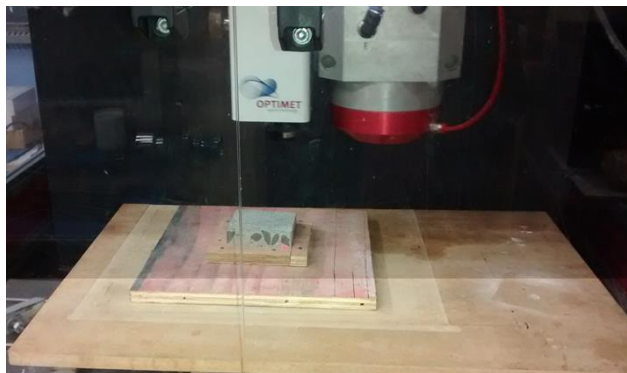


Figura 46: Digitalização Tridimensional à Laser das amostras de concreto

Como metodologia para o emprego da técnica foi adotado um gabarito em compensado resinado onde as amostras eram encaixadas, conforme figura 46, sendo que o mesmo serviu como referência para as digitalizações, antes e depois do desgaste abrasivo. Ainda, salienta-se que foi feita uma marcação em uma das laterais do gabarito bem como em uma das arestas da amostra; logo, no momento das análises essas marcações deveriam coincidir, fazendo com que as leituras tomadas na superfície destas amostras de concreto, antes a após o ensaio de abrasão, tivessem sempre a mesma orientação. Tal metodologia foi adotada de forma a se evitar variabilidades no procedimento. Para obtenção dos resultados finais das digitalizações, as malhas de pontos digitalizadas, antes e após o desgaste, foram sobrepostas respeitando-se a orientação preestabelecida através do gabarito; com isso foi possível obter a espessura final desgastada e a distribuição diferencial de desgaste das amostras. Para o tratamento e análise dos resultados das digitalizações foi utilizado o software Geomagic Studio 10.

4.4.8 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio

Conforme mencionado anteriormente, para analisar a microestrutura da superfície dos concretos estudados, foram adotadas algumas técnicas microestruturais, dentre essas, a porosimetria por intrusão de mercúrio. O método de porosimetria por intrusão de mercúrio se baseia no fato de que, para atravessar um fluido não molhante em um poro de diâmetro d , uma pressão p inversamente proporcional ao diâmetro deste poro deve ser aplicada. Tais

pressões são convertidas em diâmetro equivalente de poros através da fórmula de Washburn da equação de Laplace (COOK; HOVER, 1993; SANTOS, 2006):

$$d = \frac{-4 * \sigma * \cos\theta}{p} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

d = diâmetro equivalente dos poros preenchidos pelo mercúrio;

σ = tensão superficial do mercúrio;

p = pressão aplicada pelo equipamento para a intrusão do mercúrio na amostra;

θ = ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro.

Neste ensaio, primeiramente a amostra é seca para retirar dos poros qualquer água ou fluido existente. Após a pesagem, a amostra é transferida para a câmara no penetrômetro, onde é feito vácuo e o mercúrio é introduzido, cercado a amostra. Como o mercúrio não molha os grãos de cimento espontaneamente, ele não entra dentro dos poros vazios, a menos que uma pressão seja aplicada. A pressão é progressivamente aumentada e aplicada ao mercúrio, e a intrusão do mercúrio é então monitorada (DIAMOND, 2000).

Os resultados obtidos a partir da técnica de porosimetria são apresentados de forma gráfica em que aparecem os volumes de mercúrio intrudidos em função do diâmetro de poro da amostra. A faixa de poros avaliada por este método depende da pressão de intrusão do mercúrio. Cabe salientar que a porosidade alcançada pelo ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio não é uma medida total de porosidade do sistema, pois os poros finos (poros do gel hidratado) existentes em pastas de cimento requerem pressão mais elevada do que a capacidade dos instrumentos comerciais para serem penetrados. Além disso, segundo Diamond (2000), podem existir poros fechados, inteiramente selados contra a intrusão. Se o sistema de poros é contínuo, pode haver uma determinada pressão em que o mercúrio penetra os menores poros do sistema e o volume inteiro da amostra. No entanto, se o sistema de poros não é contínuo, o mercúrio pode penetrar o volume da amostra pela quebra das paredes dos poros (COOK; HOVER, 1999).

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados no Instituto de Materiais Cerâmicos (IMC) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Para a realização deste ensaio foi utilizado um porosímetro a mercúrio, fabricado pela Quantachrome Corporation, modelo Poremaster 60, com capacidade para medir o volume de poros de 1000

a 0,0035 μm de diâmetro, trabalhando com uma pressão de 0,2 a 50 Psi para o sistema de baixa pressão e com uma pressão de 20 a 60000 Psi para o sistema de alta pressão.

As amostras destinadas ao ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio foram retiradas da superfície das mesmas placas de concreto moldadas para as análises de dureza superficial e resistência à abrasão. Para cada traço de concreto avaliaram-se duas amostras, às quais foram coletadas de placas diferentes. Tais amostras foram obtidas através do seu corte transversal, sendo extraídas faixas com 10 mm de espessura por meio de corte refrigerado em serra diamantada. A partir destas faixas foram obtidos, manualmente, pequenos fragmentos de argamassa, evitando-se a presença de agregados graúdos. Os fragmentos apresentavam dimensões inferiores a 10 mm em todas as direções (figura 47).



Figura 47: fragmentos de argamassa para análise de porosimetria por intrusão de mercúrio dos concretos

Todas as amostras foram mantidas em estufa ventilada a 110 °C por 24 horas e, então, acondicionadas em dessecador sob vácuo para resfriamento. Por fim foram pesadas em balança analítica e introduzidas no porosímetro. Para análise de baixa pressão, as amostras foram colocadas em um porta amostras e submetidas a uma pressão de 0,01 mbar durante cinco minutos, para a remoção do ar contido nos poros. Após esse processo, o mercúrio é intrudido no porta amostras e submetido a uma pressão de 50 Psi. Na sequência iniciam-se as análises de alta pressão, onde se remove aproximadamente 15 mm de coluna de Hg do porta amostra e, então, este é submetido a uma pressão, com taxa fixa, de 60000 Psi. Cabe salientar que os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados em amostras com mais de 100 dias, porém todas na mesma idade de análise. Esta técnica foi aplicada a todas as combinações dos compósitos que empregaram cimento de alta resistência inicial. Já para as demais, com cimento pozolânico, foi tomado um ponto da matriz experimental para fins comparativos, conforme citado anteriormente no programa experimental.

4.4.9 Microdureza da Superfície

Para analisar a microdureza da superfície dos diferentes traços de concretos estudados foi empregada a técnica microestrutural da endentação instrumentada. Foi utilizado um microdurômetro modelo Dynamic Ultra Micro Hardness Tester (Shimadzu), equipado com indentador piramidal de base triangular tipo “Berkovich”, do IMC da UCS. Essa técnica consiste em penetrar uma ponta de diamante no material, controlando e registrando a carga e a profundidade de penetração. Os dados obtidos são colocados num gráfico “força aplicada x deslocamento” (medido a partir da superfície do material), o qual descreve uma curva denominada curva carga-descarga (figura 48). Essa curva permite a aferição dos valores de dureza e módulo elástico da amostra, caracterizando assim o material quanto as suas propriedades mecânicas (ZORZI; PEROTTONI, 2013).

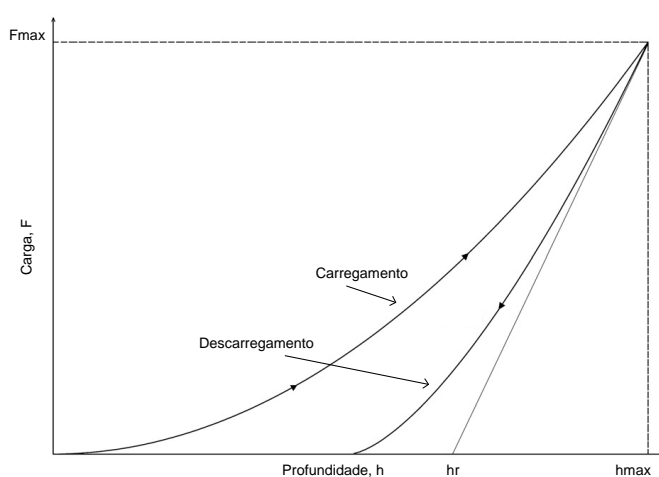


Figura 48: representação da curva carga-descarga da técnica de indentação instrumentada (adaptado de ZORZI; PEROTTONI, 2013)

Quando a carga aplicada é máxima ($F_{m\acute{a}x}$), a profundidade de indentação aumenta até um valor máximo $h_{m\acute{a}x}$ (curva de carregamento). À medida que a carga vai sendo retirada, uma curva é registrada até o final do descarregamento. A profundidade final não será zero, o que seria típico de um material com comportamento 100% elástico, mas algum valor finito h_r , devido à deformação plástica do material durante a indentação.

O valor da microdureza do material é calculado através da seguinte fórmula:

$$H = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

H = microdureza, em GPa;

$F_{\text{máx}}$ = carga máxima aplicada, em mN;

A = área de contato do indentador projetada. Para indentador tipo “Berkovich” a área de contato projetada é dada pela seguinte função:

$$A = 23,96 * hc^2 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

h_c = profundidade de contato, definida como o intervalo de profundidade no qual a ponta do indentador esteve em contato direto com o material. Sendo tal parâmetro determinado através da expressão abaixo:

$$h_c = h_{\text{máx}} - \varepsilon * (h_{\text{máx}} - h_r) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$h_{\text{máx}}$ = profundidade no ponto de carga máxima, em μm ;

h_r = profundidade residual, devido a deformação plástica deixada pelo indentador, em μm ;

ε = constante relacionada a geometria do indentador. Recomendado como valor-padrão 0,75 para ensaios que utilizam pontas piramidais.

Para aplicação da técnica foram extraídas amostras da superfície das placas de concreto através de corte refrigerado em serra diamantada. As amostras foram cortadas paralelas ao eixo de 100 mm das placas a partir da superfície, até uma profundidade de 30 mm. A face ensaiada apresentava dimensões de 30 x 30 mm e profundidade de 8 mm. Após o corte das amostras, as mesmas foram mantidas em estufa ventilada a 110 °C por 24 horas, e após resfriadas ao ar. Posteriormente, a face de análise das amostras foi polida com lixas de diferentes tamanhos de grão (# 220, # 600, # 1200, # 2000). A figura 49 apresenta algumas das amostras que foram preparadas para aplicação da técnica.

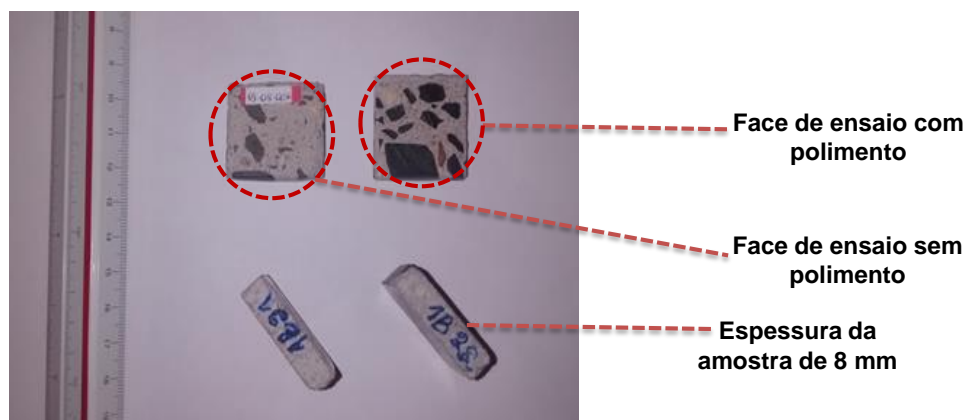


Figura 49: amostras destinadas ao ensaio de microdureza por indentação

Como metodologia de teste, as amostras polidas foram posicionadas no porta amostras do equipamento com a superfície da amostra (área exposta ao desgaste) alinhada na direção-x (figura 50).

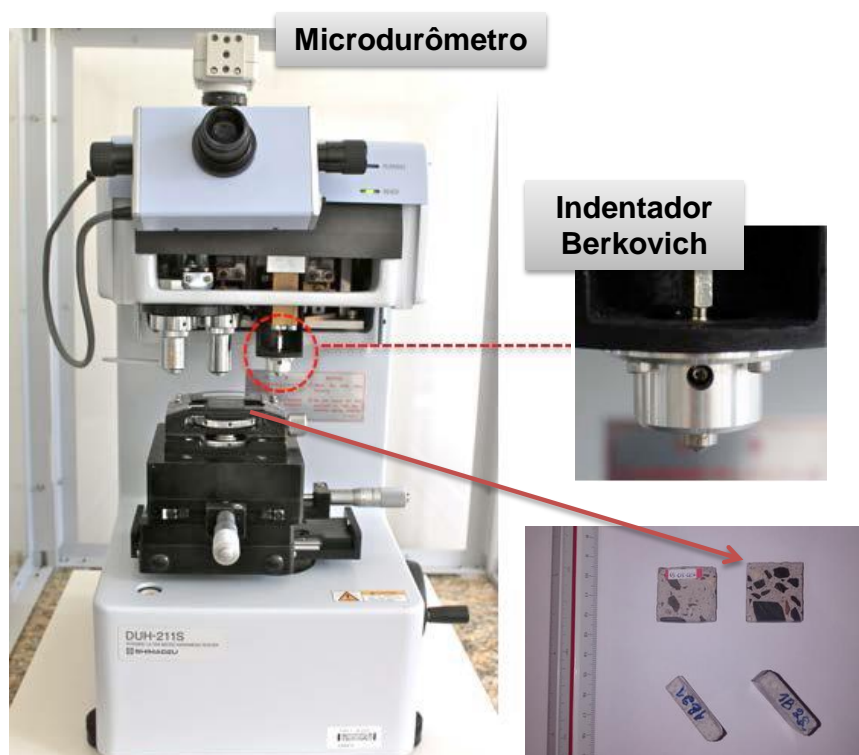


Figura 50: Microdurômetro com ponteira Berkovich empregado na técnica de indentação instrumentada

Após a fixação da mesma, foram definidas diferentes posições para verificação da microdureza, sendo uma delas em torno de 1 mm a partir da superfície e a outra em torno de 10 mm (figura 51). Em cada uma das posições foram tomadas seis indentações, alinhadas paralelamente à superfície da amostra. Após a série de pontos obtidos na primeira

posição (1 mm) o indentador era deslocado em direção ao centro da amostra (10 mm), sendo este deslocamento na direção-y. Os pontos indentados foram selecionados afastados de partículas de agregados visíveis ou vazios, além disso, evitou-se efetuar impressões muito próximas, prevenindo interferências mútuas nos dados obtidos.



Figura 51: posições de indentação nas amostras de concreto

A carga aplicada nos testes foi de 500 mN, com duração de 15 segundos em todos os casos. Foram descartadas impressões irregulares ou com evidência de microfissuras. A figura 52 apresenta as micrografias de indentações realizadas em amostras de concreto, com ampliação de 50 x.

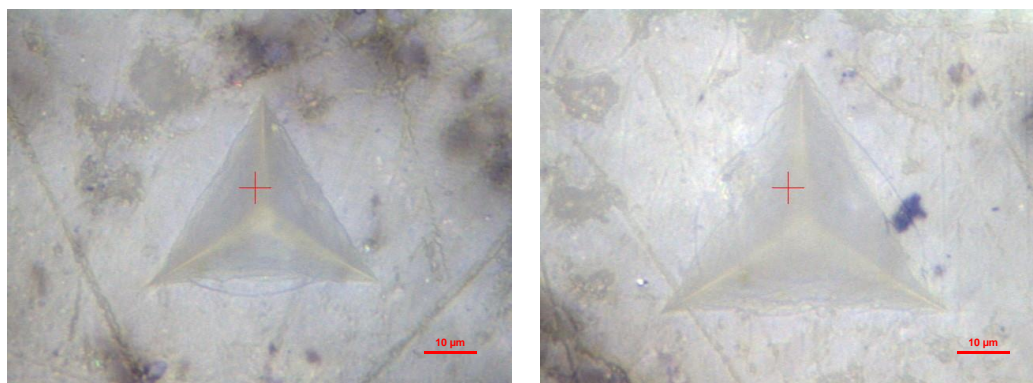


Figura 52: micrografias de indentações em superfície de amostras de concreto com cimento CP V-ARI submetidas a cura submersa: (a) a/agl 0,4 - 10 % sa (b) a/agl 0,6 - 10 % sa

Cabe salientar que os ensaios de microdureza por indentação foram realizados em amostras com mais de 100 dias, porém todas na mesma idade de análise. Assim como para a porosimetria, essa técnica foi empregada de forma mais completa para as matrizes cimentícias com cimento de alta resistência inicial, onde somente um ponto das matrizes com cimento pozolânico foi avaliado.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios propostos no programa experimental dessa pesquisa. Além disso, é efetuada uma análise dos resultados obtidos, no intuito de verificar se os objetivos propostos para este estudo foram atingidos por meio dos ensaios que foram realizados.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Os resultados da resistência à compressão uniaxial média para os concretos estudados encontram-se na tabela 32. No apêndice C podem ser encontrados todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 32: resultados para o ensaio de resistência à compressão uniaxial

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa) - VALORES MÉDIOS									
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)					CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)				
Traços	a/agl - Tsa (%)	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Traços	a/agl - Tsa (%)	Médias	Desvio Padrão	CV (%)
1A	0,4 - 0	52,1	1,4	2,7	1B	0,4 - 0	54,0	1,1	2,1
2A	0,4 - 10	57,7	3,2	5,6	2B	0,4 - 10	63,3	1,6	2,6
3A	0,6 - 0	31,5	0,9	2,9	3B	0,6 - 0	42,5	0,5	1,1
4A	0,6 - 10	39,3	0,4	0,9	4B	0,6 - 10	47,1	0,9	1,9

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (resistência à compressão uniaxial) medida.

A análise de variância feita através da ANOVA dos dados experimentais obtidos para a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados encontra-se na tabela 33.

Tabela 33: análise de variância (ANOVA) - resistência à compressão uniaxial

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	371,28	148,90	0,000000	S
Relação a/agl (2)	1	2396,09	960,94	0,000000	S
Teor Sílica (3)	1	401,44	161,00	0,000000	S
(1) x (2)	1	69,32	27,80	0,000015	S
(1) x (3)	1	0,09	0,04	0,852565	NS
(2) x (3)	1	3,91	1,57	0,221143	NS
(1) x (2) x (3)	1	24,96	10,01	0,003832	S
Erro	27	2,49			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a tabela 33 é possível verificar que os efeitos isolados dos fatores controláveis (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa) foram significativos na variável de resposta. Para os efeitos de 2ª ordem, apenas a interação entre o tipo de cimento e a relação a/agl causou efeito significativo. Além disso, destaca-se que a interação de 3ª ordem mostrou inferência significativa na propriedade avaliada.

A seguir são analisados os efeitos significativos dos fatores controláveis, bem como de suas interações, os quais tiveram uma influência significativa na análise de variância (ANOVA) realizada.

5.1.1 Efeito do Tipo de Cimento

A figura 53 mostra a tendência de comportamento para o tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos traços estudados, na idade de 63 dias.

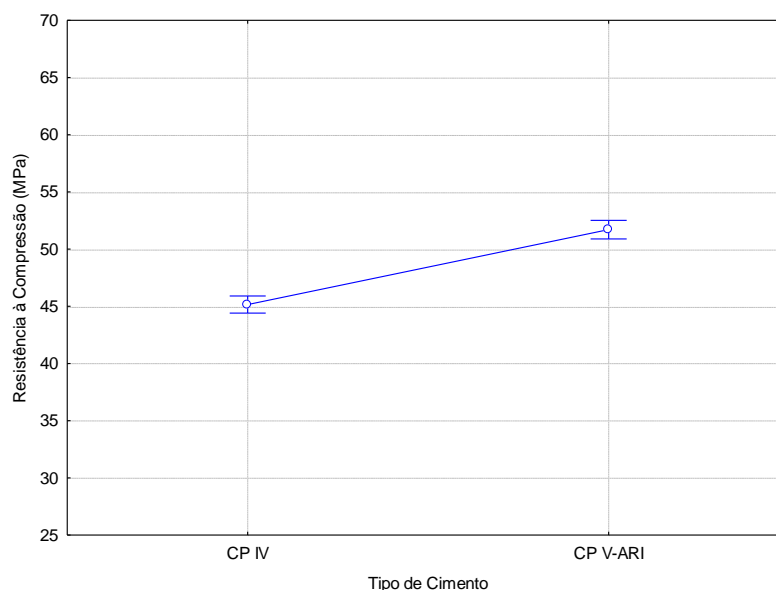


Figura 53: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto

Através da figura, é possível verificar a influência do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados, para uma mesma idade de análise (63 dias). A análise de variância ANOVA mostra que os resultados encontrados para os concretos feitos com cimento pozolânico diferem de forma significativa dos resultados dos concretos feitos com cimento de alta resistência inicial.

A resistência à compressão dos concretos com cimento pozolânico foi inferior, principalmente, por conta da velocidade das reações de hidratação, que afeta a porosidade do compósito, da menor quantidade de clínquer na composição, em função da substituição por pozolanas, e das propriedades de resistência apresentadas por esse cimento em comparação ao de alta resistência inicial (tabela 18). Tal redução verificada foi de aproximadamente 12,1 %. Salienta-se que em estudo realizado por Silva (2011), a autora observou uma redução de aproximadamente 34,0 % na resistência à compressão dos concretos produzidos com cimento pozolânico comparativamente aos com cimento de alta resistência inicial, porém as análises foram feitas aos 28 dias de cura submersa. Para Senisse (2010), os concretos que empregaram cimento pozolânico apresentaram reduções de 33,1 % e 26,2 % na resistência à compressão, aos 28 e aos 91 dias de cura úmida, respectivamente, comparando-se aos compósitos com cimento de alta resistência inicial.

Cabe salientar que os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle tipo de cimento frente à variável de estudo (resistência à compressão), e que existem outros fatores envolvidos, como a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa.

5.1.2 Efeito da Relação a/agl

A figura 54 mostra a influência isolada da relação a/agl sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos traços estudados, na idade de 63 dias.

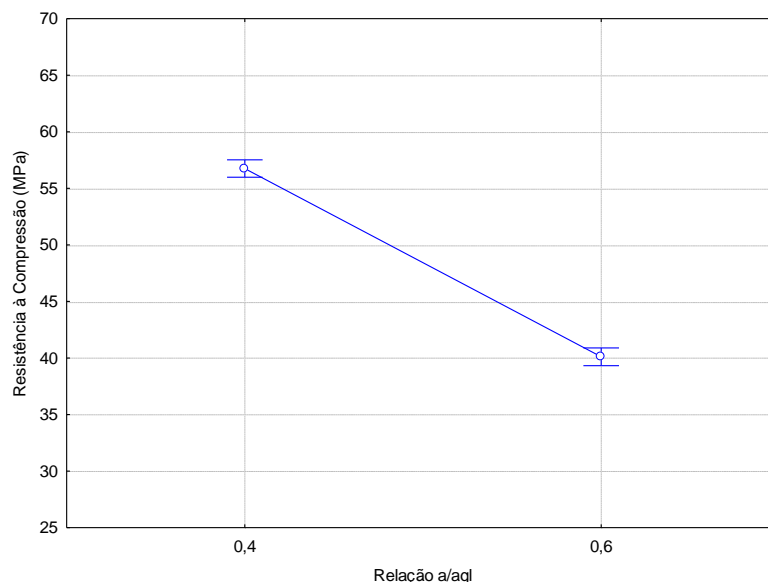


Figura 54: efeito da relação a/agl na resistência à compressão uniaxial do concreto

Através da análise do gráfico verifica-se, conforme esperado, uma redução significativa na resistência à compressão dos concretos produzidos com relação a/agl 0,6 em comparação aos compósitos com relação a/agl 0,4. Esse comportamento ocorre em função do acréscimo da porosidade na pasta e na zona de transição pasta-agregado, e pela presença de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ orientados e mais desenvolvidos com o aumento da relação a/agl (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Salienta-se que tal redução foi de aproximadamente 29,9 %. Em estudo realizado por Zoran et al. (2012), os autores avaliaram compósitos com diferentes relações a/c (0,5; 0,6; 0,7) e teor de adição de microfibras de polipropileno ($0,91 \text{ kg/m}^3$) frente análises de propriedades mecânicas e de resistência à abrasão. Tais autores verificaram decréscimos na resistência à compressão de 24,0 % para os concretos com relação a/c 0,6 em comparação àqueles com relação a/c 0,5. Já o aumento da relação a/c de 0,5 para 0,7 causou reduções na resistência à compressão da ordem de 50,0 % para todos os concretos estudados.

5.1.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 55 mostra a tendência de comportamento para o teor de substituição de sílica ativa na resistência à compressão uniaxial dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através

dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos traços estudados, na idade de 63 dias, na análise de variância ANOVA.

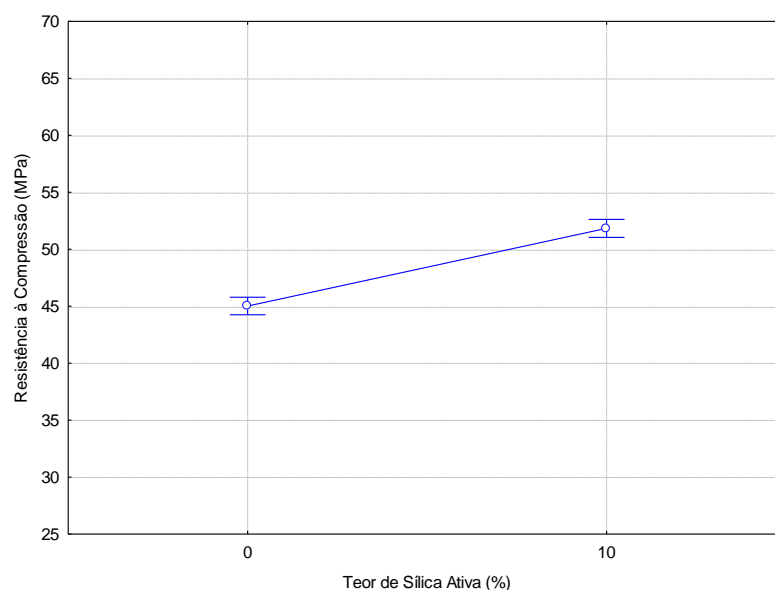


Figura 55: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à compressão uniaxial do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um aumento na resistência à compressão uniaxial dos traços de concreto produzidos com teor de substituição de sílica ativa de 10 %. Tal aumento ocorreu devido ao efeito químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades mecânicas dos compósitos, comportamento já esperado e de consenso no meio acadêmico (NEVILLE, 1997; KORMANN, 2002; MAZLOOM; RAMEZANIANPOUR; BROOKS, 2004; YAZICI; İNAN, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A partir da análise estatística verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 10 % de sílica ativa apresentaram um aumento de 16,8 % com relação aos concretos sem adição. Hoffmann (2001) observou comportamento semelhante para a presença da sílica ativa nas matrizes cimentícias estudadas, onde a substituição em 10 % sobre o cimento promoveu acréscimos na resistência à compressão de 16,0 % e 13,0 %, para relações a/agl de 0,45 e 0,60, respectivamente.

Contudo, é relevante ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à compressão uniaxial do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o tipo de cimento e a relação a/agl .

5.1.4 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e a Relação a/agl

A figura 56 apresenta o efeito da interação entre o tipo de cimento e a relação a/agl frente à resistência à compressão uniaxial do concreto. A figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial de todos os traços avaliados, na idade de 63 dias, na análise de variância ANOVA, cuja interação mostrou-se significativa.

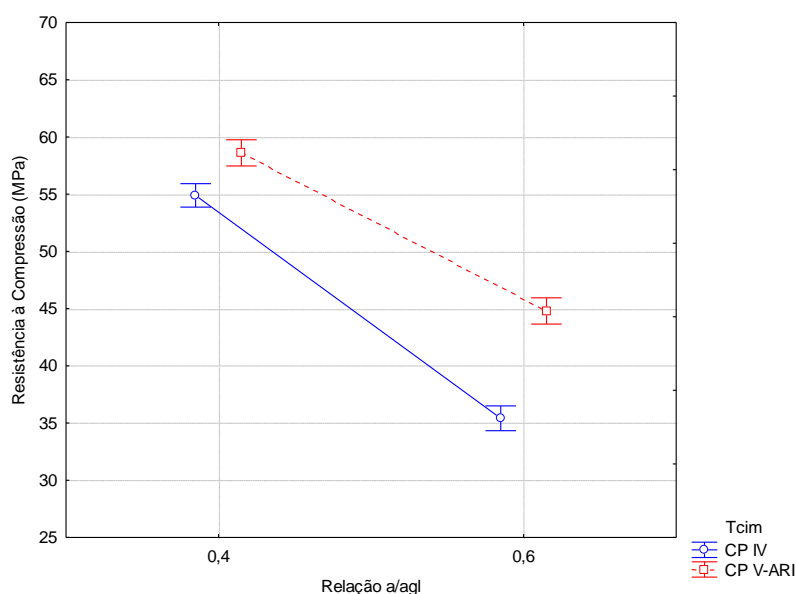


Figura 56: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e a relação a/agl na resistência à compressão uniaxial do concreto

Em análise comparativa é possível verificar que o acréscimo de resistência para os concretos com CP V-ARI comparativamente aos com cimento CP IV foi mais incisivo para a relação a/agl 0,6, perfazendo um total de 28,0 %. Esse fato pode estar relacionado tanto com a elevada porosidade da matriz, onde o efeito proporcionado pela reação pozolânica do cimento CPIV tende a ser menos eficaz comparativamente às matrizes mais densas ou com menores relações a/agl, quanto com a menor disponibilidade de Ca(OH)_2 .

5.1.5 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 57 apresenta o efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à compressão uniaxial do concreto. A figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial de todos os traços avaliados, na idade de 63 dias, cuja interação mostrou efeito significativo na variável de resposta.

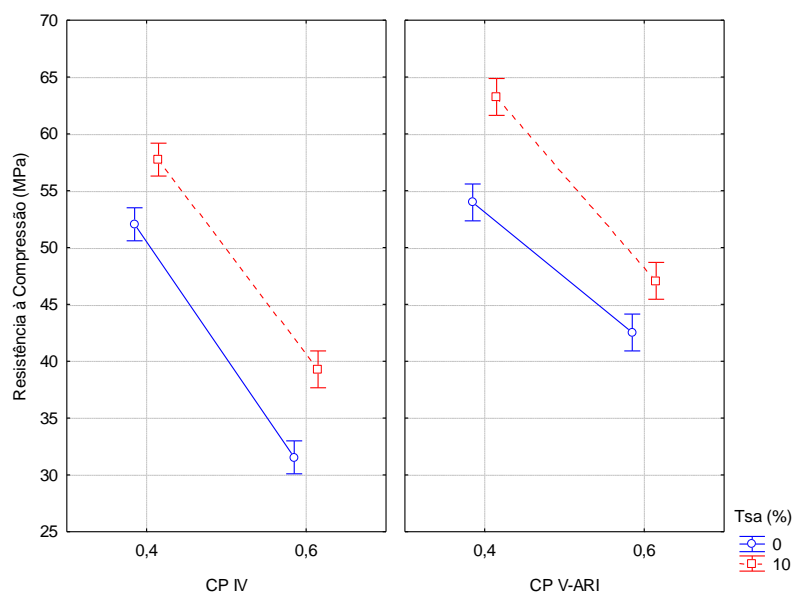


Figura 57: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à compressão uniaxial do concreto

Fazendo-se uma análise criteriosa dos resultados, observa-se que, para os compósitos produzidos com relação a/agl 0,4 e cimento de alta resistência inicial, o efeito da sílica ativa se torna mais eficaz em comparação àqueles produzidos com cimento pozolânico, perfazendo um acréscimo de 17,2 % na resistência à compressão; fato relacionado a menor disponibilidade de Ca(OH)_2 nos compósitos com cimento CP IV. Para matrizes menos porosas, o uso da sílica ativa nas misturas de concreto com o tipo de cimento mais puro, sem a presença de adições, proporciona um aumento na resistência da matriz cimentícia em função da disponibilidade Ca(OH)_2 , do efeito pozolânico e dos efeitos microfíler de nucleação e de densificação da zona de transição decorrentes da elevada finura deste material sintetizado.

Já para a relação a/agl 0,6 tal comportamento se inverte, uma vez que a presença da adição mineral promoveu acréscimos de 24,5 % na resistência dos concretos feitos com cimento pozolânico. Esse fato pode ser explicado em função da porosidade da matriz, uma vez que para relações a/agl mais elevadas o melhor desempenho pode estar relacionado ao somatório dos efeitos gerados pela presença da cinza e da sílica ativa, que proporcionaram, além dos efeitos químicos, um maior empacotamento granulométrico dos compósitos.

Somando-se a isto, sabe-se que a coesão da mistura é controlada pelo volume de pasta presente no concreto. Assim sendo, tem-se com a substituição em massa de cimento por pozolanas com menor massa específica, o aumento da quantidade de pasta, o que resulta numa melhoria do aspecto reológico da mistura. Além disso, o menor diâmetro das

partículas da sílica ativa reduz o tamanho e o volume dos vazios, fato que está diretamente relacionado com a melhoria das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A tabela 34 apresenta os resultados médios da resistência à tração na flexão de todos os traços estudados, para a idade de 63 dias. No apêndice D encontram-se todos os resultados relacionados a este ensaio.

Tabela 34: resultados para ensaio de resistência à tração na flexão

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa) - VALORES MÉDIOS									
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)					CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)				
Traços	a/agl - Tsa (%)	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Traços	a/agl - Tsa (%)	Médias	Desvio Padrão	CV (%)
1A	0,4 - 0	5,96	0,12	1,91	1B	0,4 - 0	6,08	0,22	3,65
2A	0,4 - 10	6,70	0,17	2,51	2B	0,4 - 10	7,99	0,07	0,86
3A	0,6 - 0	3,14	0,16	5,04	3B	0,6 - 0	4,12	0,04	1,03
4A	0,6 - 10	5,57	0,13	2,25	4B	0,6 - 10	6,05	0,05	0,76

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (resistência à tração na flexão) medida.

A análise de variância feita através da ANOVA dos dados experimentais obtidos para a resistência à tração na flexão dos concretos estudados encontra-se na tabela 35.

Tabela 35: análise de variância (ANOVA) - resistência à tração na flexão

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	2,7393	151,98	0,000000	S
Relação a/agl (2)	1	20,5234	1138,68	0,000000	S
Teor Sílica (3)	1	16,3956	909,66	0,000000	S
(1) x (2)	1	0,0007	0,04	0,843828	NS
(1) x (3)	1	0,1481	8,22	0,012427	S
(2) x (3)	1	0,9785	54,29	0,000004	S
(1) x (2) x (3)	1	0,9483	52,61	0,000004	S
Erro	14	0,0180			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a tabela 35 é possível verificar que os efeitos isolados dos fatores controláveis (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa) foram significativos na variável de resposta. Para os efeitos de 2ª ordem, apenas a interação entre o tipo de cimento e a relação a/agl não causou efeito significativo. Além disso, destaca-se que a interação de 3ª ordem mostrou inferência significativa na propriedade avaliada.

A seguir são analisados os efeitos significativos dos fatores controláveis, bem como de suas interações, os quais tiveram uma influência significativa na análise de variância (ANOVA) realizada.

5.2.1 Efeito do Tipo de Cimento

A figura 58 mostra a tendência de comportamento para o tipo de cimento na resistência à tração na flexão dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos traços estudados, na idade de 63 dias.

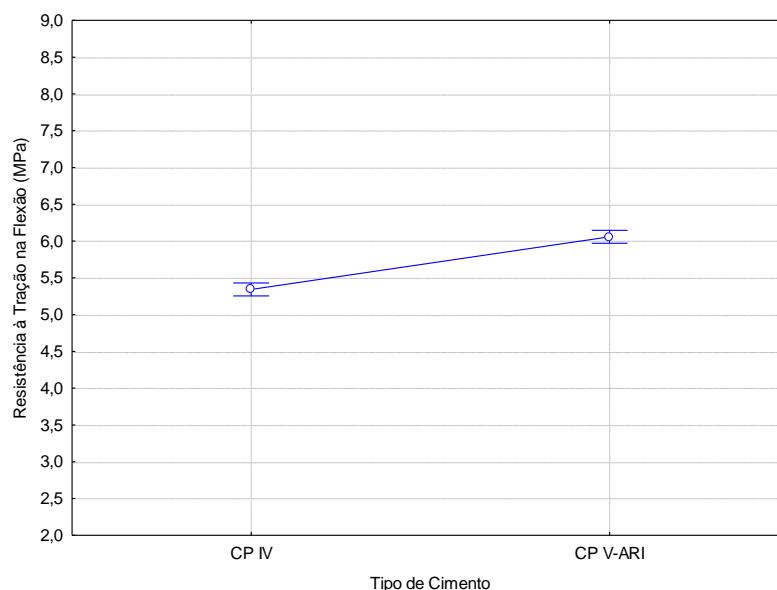


Figura 58: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à tração na flexão do concreto

Através da análise da figura, verifica-se a influência do fator tipo de cimento na resistência à tração na flexão dos concretos estudados, para uma mesma idade de análise (63 dias). Os resultados encontrados para os concretos com cimento CP V-ARI foram significativamente maiores quando comparados aos concretos com cimento CP IV, conforme análise feita pelo método ANOVA. Este comportamento também foi verificado para a resistência à compressão uniaxial dos concretos, item 5.1.1.

Analisando os resultados em termos percentuais observa-se uma redução de aproximadamente 15,2 % na resistência à tração na flexão dos compósitos com cimento pozolânico. Em estudo realizado por Silva (2011), a autora verificou um decréscimo de aproximadamente 20,0 % na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com cimento pozolânico comparativamente aos com cimento de alta resistência inicial, porém as análises foram feitas aos 28 dias de cura submersa. Para Senisse (2010), os concretos que empregaram cimento pozolânico apresentaram reduções de 15,2 % e 8,7 % na resistência à tração na flexão, aos 28 e aos 91 dias de cura úmida, respectivamente, comparando-se aos compósitos com cimento de alta resistência inicial.

Cabe salientar que os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle tipo de cimento frente à variável de estudo (resistência à compressão), e que existem outros fatores envolvidos, como a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa.

5.2.2 Efeito da Relação a/agl

O efeito isolado da relação a/agl na resistência à tração na flexão dos traços estudados está mostrado na figura 59.

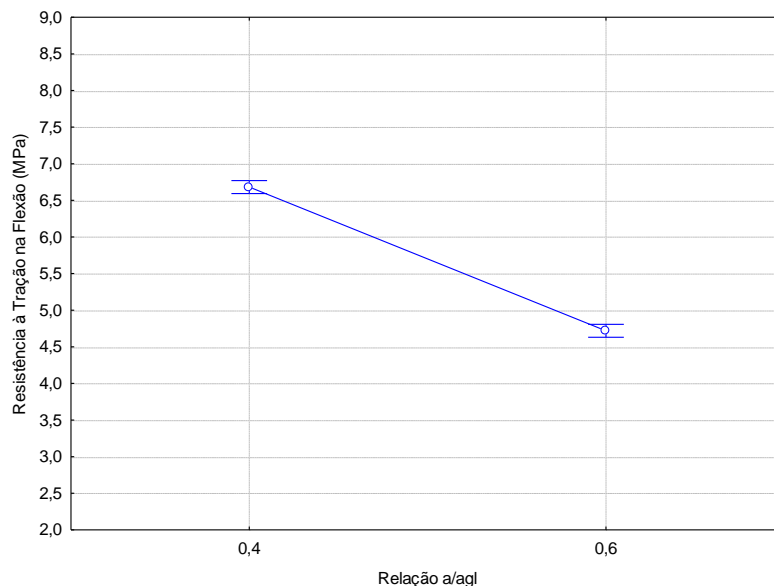


Figura 59: efeito isolado da relação a/agl na resistência à tração na flexão do concreto

Através da análise do gráfico verifica-se, conforme esperado, uma redução significativa na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com relação a/agl 0,6 em comparação aos compósitos com relação a/agl 0,4. Salienta-se que tal redução foi de aproximadamente 29,3 %.

5.2.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 60 apresenta a tendência de comportamento para o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão dos concretos avaliados. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos traços estudados, na idade de 63 dias.

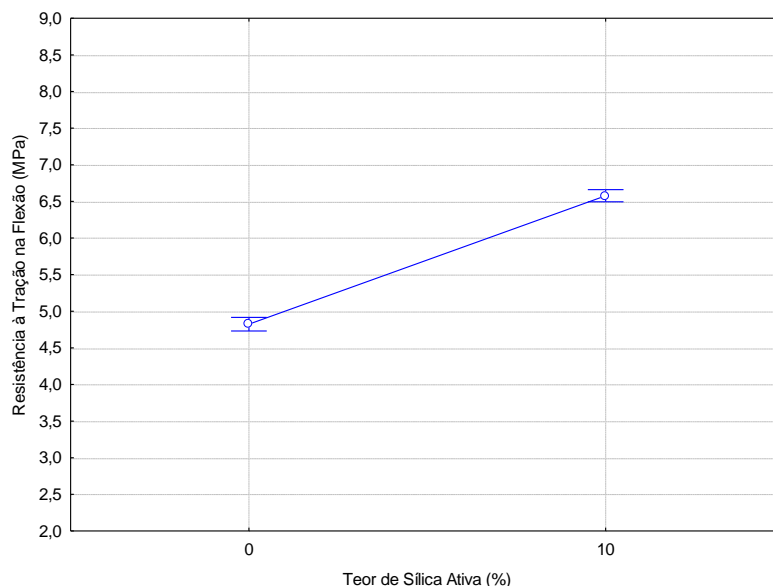


Figura 60: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto

Observando-se a figura, é possível constatar um acréscimo significativo na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com 10 % de sílica ativa. Tal aumento promovido pela adição também foi encontrado nas análises de resistência à compressão dos compósitos, conforme item 5.1.3.

A partir da análise estatística verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 10 % de sílica ativa apresentaram um aumento de 37,4 % com relação aos concretos sem adição. Destaca-se que a maior influência da sílica ativa na resistência à tração na flexão, comparativamente a resistência à compressão (ganhos de 16,8 %), deve-se, provavelmente, ao acréscimo de aderência na zona de transição que essa adição proporciona, pois nos compósitos submetidos ao esforço de tração na flexão essa interface passa a ser mais solicitada, mostrando forte interferência nesse comportamento. Contudo, é relevante ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à tração na flexão do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o tipo de cimento e a relação a/agl.

5.2.4 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 61 apresenta o efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à tração na flexão do concreto. A figura foi obtida através

dos resultados do ensaio de resistência à tração na flexão de todos os traços avaliados, na idade de 63 dias, cuja interação mostrou efeito significativo na variável de resposta.

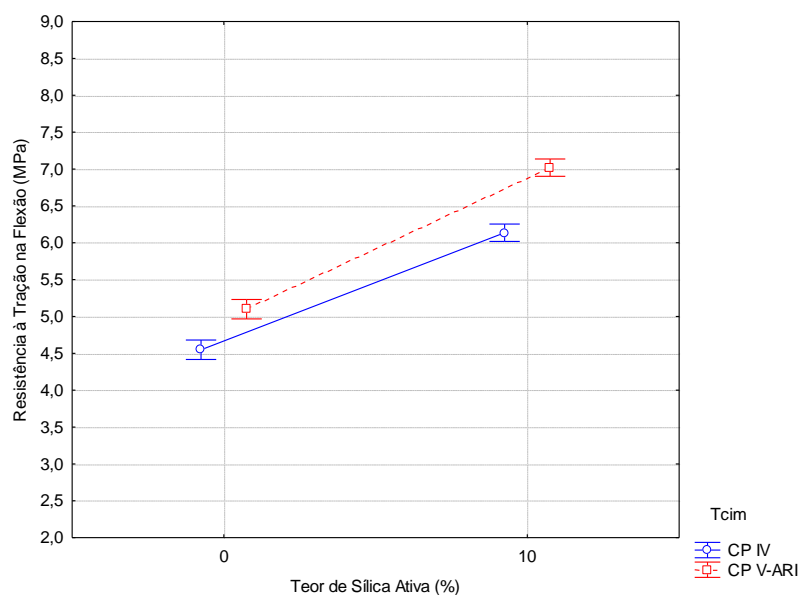


Figura 61: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto

Analisando a figura, nota-se que o efeito da sílica ativa promoveu acréscimos significativos na resistência à tração na flexão dos concretos equivalentes a 37,4 % para o cimento pozolânico e 34,6 % para o cimento de alta resistência inicial. Salienta-se que os maiores acréscimos de resistência à tração na flexão verificados para o cimento pozolânico estão diretamente relacionados ao somatório dos efeitos da sílica ativa e da cinza volante, o qual proporcionou, provavelmente, aumento da aderência na interface pasta-agregado.

5.2.5 Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

O efeito combinado da relação a/agl e do teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão dos traços estudados está mostrado na figura 62.

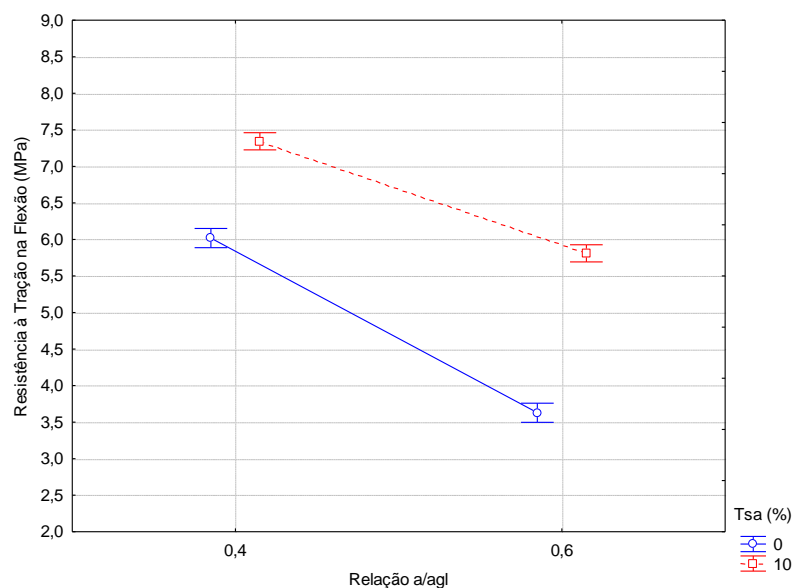


Figura 62: efeito da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à tração na flexão do concreto

Observando-se o gráfico é possível verificar, segundo análise de variância (ANOVA), que os maiores ganhos na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com a presença da adição foram encontrados para as matrizes com maior relação a/agl (0,6), sendo equivalentes a 64,6 %, aos 63 dias. Já para os concretos com relação a/agl 0,4 tal aumento foi de aproximadamente 21,7 %. Este comportamento pode ser explicado em função da evolução das reações de hidratação das partículas de cimento e sílica, uma vez que misturas com relações a/agl mais baixas têm aumento de resistência mais rápido, devido ao fato de que os grãos de cimento estão mais próximos uns dos outros formando mais rapidamente um sistema contínuo de gel (NEVILLE, 1997). Logo, quanto maior a relação a/agl, maior foi o ganho de resistência com a idade (63 dias).

Além disso, observa-se que para os concretos com relação a/agl 0,6 e teor de substituição de 10 % de sílica ativa as resistências à tração na flexão ficaram muito próximas dos concretos com relação a/agl 0,4 e sem a presença da sílica ativa na composição. No entanto, através de análise pelo Método de Fisher, constatou-se que esses concretos apresentam diferença estatística significativa entre si.

5.2.6 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 63 apresenta o efeito combinado da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica na resistência à tração na flexão dos concretos, através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

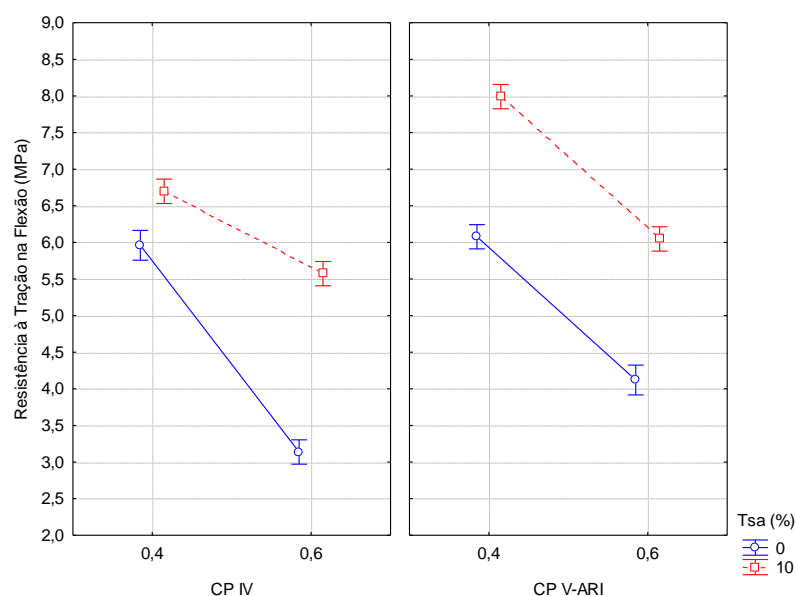


Figura 63: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à tração na flexão do concreto

Analisando-se o gráfico, é possível observar que para os compósitos produzidos com menor relação a/agl (0,4) e cimento de alta resistência inicial, a presença da sílica ativa se torna mais eficaz em comparação àqueles produzidos com cimento pozolânico, promovendo um acréscimo de 31,6 % na resistência à compressão, comportamento já relatado anteriormente. Já para a relação a/agl 0,6 tal resultado se inverte, uma vez que a presença da adição mineral promoveu acréscimos de 77,9 % na resistência dos concretos feitos com cimento pozolânico; para relações a/agl mais elevadas o melhor desempenho pode estar relacionado ao somatório dos efeitos gerados pela presença da cinza e da sílica ativa, que promoveram, além dos efeitos químicos, um maior empacotamento granulométrico aos compósitos. Somando-se às análises feitas salienta-se que estes comportamentos também foram encontrados para a resistência à compressão dos concretos estudados, conforme item 5.1.5.

Além das considerações mencionadas, é relevante salientar que a presença da substituição da adição mineral nos concretos com relação a/agl 0,6 e cimento de alta resistência inicial

promoveu uma igualdade na resistência à tração na flexão destes com os compósitos sem substituição e com relação a/agl 0,4. Fato verificado através de análise feita pelo Método de Fisher.

5.3 DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA

Segundo Neville (1997), o ensaio esclerométrico, além de servir para estimar a resistência à compressão do concreto, é utilizado para a determinação de propriedades da superfície do material, as quais têm uma influência direta em seu desempenho, como por exemplo, na resistência à abrasão de pisos de concreto.

Os resultados da dureza superficial média para os concretos estudados encontram-se na tabela 36. Seguem, no apêndice E, todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 36: resultados para o ensaio de dureza superficial por esclerometria

DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA (MPa) - VALORES MÉDIOS									
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)					CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)				
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão	CV (%)
1A	0,4 - 0 - submersa	47,6	1,53	3,23	1B	0,4 - 0 - submersa	53,1	0,06	0,12
	0,4 - 0 - caixa aquecida	45,5	0,25	0,54		0,4 - 0 - caixa aquecida	50,1	0,66	1,31
2A	0,4 - 10 - submersa	51,7	0,55	1,07	2B	0,4 - 10 - submersa	55,3	0,78	1,41
	0,4 - 10 - caixa aquecida	46,5	1,71	3,68		0,4 - 10 - caixa aquecida	52,4	1,24	2,36
3A	0,6 - 0 - submersa	37,8	0,48	1,27	3B	0,6 - 0 - submersa	44,5	0,26	0,59
	0,6 - 0 - caixa aquecida	42,1	0,42	0,99		0,6 - 0 - caixa aquecida	42,0	1,01	2,41
4A	0,6 - 10 - submersa	41,2	0,33	0,81	4B	0,6 - 10 submersa	44,5	1,41	3,18
	0,6 - 10 - caixa aquecida	43,5	0,28	0,63		0,6 - 10 caixa aquecida	44,7	0,23	0,52

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (tipo de cimento, relação a/agl, tipo de cura e teor de substituição de sílica ativa) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (dureza superficial por esclerometria) medida.

A análise de variância feita através da ANOVA dos dados experimentais obtidos para a dureza superficial dos concretos estudados encontra-se na tabela 37.

Tabela 37: análise de variância (ANOVA) - dureza superficial por esclerometria

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	120,95	169,52	0,000000	S
Relação a/agl (2)	1	489,30	685,83	0,000000	S
Teor Sílica (3)	1	36,72	51,47	0,000002	S
Tipo de cura (4)	1	9,93	13,92	0,001662	S
(1) x (2)	1	9,20	12,90	0,002251	S
(1) x (3)	1	0,93	1,30	0,269237	NS
(2) x (3)	1	0,63	0,89	0,358739	NS
(1) x (4)	1	7,61	10,66	0,004556	S
(2) x (4)	1	38,96	54,61	0,000001	S
(3) x (4)	1	0,69	0,96	0,340168	NS
(1) x (2) x (3)	1	0,33	0,46	0,505017	NS
(1) x (2) x (4)	1	13,15	18,43	0,000492	S
(1) x (3) x (4)	1	7,89	11,05	0,004009	S
(2) x (3) x (4)	1	1,89	2,65	0,121792	NS
(1) x (2) x (3) x (4)	1	0,25	0,35	0,564276	NS
Erro	17	0,71			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

De acordo com a tabela, observa-se que todos os efeitos isolados das variáveis de controle foram significativos na variável de resposta.

Com relação aos efeitos de 2ª ordem, as interações que se mostraram significativas foram o tipo de cimento com a relação a/agl, o tipo de cimento com o tipo de cura e a relação a/agl com o tipo de cura. Para os efeitos de 3ª ordem, a interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura causou efeito significativo, além da interação entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura. A interação de 4ª ordem não causou efeito estatístico significativo na propriedade avaliada.

Os itens que seguem analisam os efeitos isolados e as interações significativas, verificadas através da análise de variância (ANOVA), as quais tiveram uma influência expressiva nos resultados obtidos.

5.3.1 Efeito do Tipo de Cimento

A figura 64 apresenta o efeito isolado do tipo de cimento na dureza superficial dos concretos, na idade de 63 dias, através da análise de variância (ANOVA).

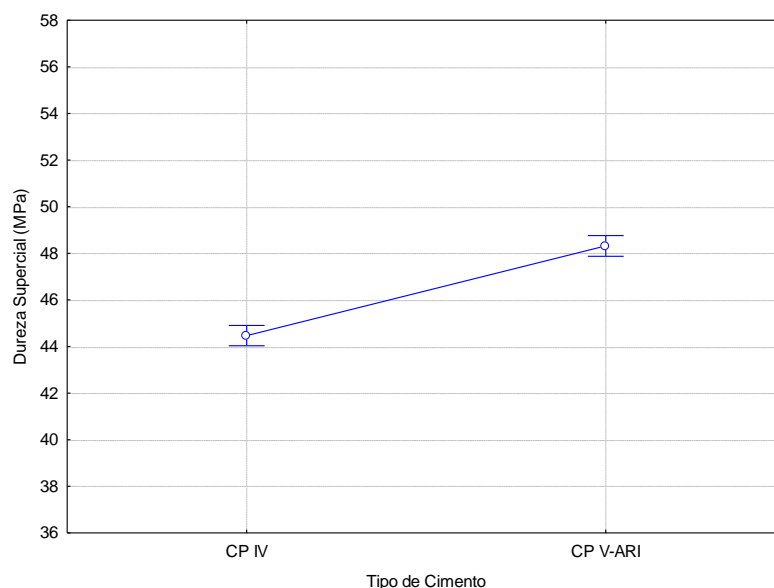


Figura 64: efeito isolado do tipo de cimento na dureza superficial do concreto

Através da análise da figura, verifica-se a influência do tipo de cimento na variável de resposta analisada, conforme esperado. Os resultados da dureza superficial para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial foram significativamente maiores se comparados com os produzidos com cimento pozolânico, conforme mostram os índices esclerométricos analisados pelo método ANOVA. Este comportamento também foi observado para as resistências à compressão e à tração na flexão dos concretos estudados nesta pesquisa. Os acréscimos promovidos pelo cimento CP V-ARI foram de aproximadamente 9,0 % em comparação ao cimento CP IV, na idade de 63 dias. Em estudo realizado por Silva (2011), a autora observou acréscimos de aproximadamente 26,7 % na dureza superficial dos concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial comparativamente aos com cimento pozolânico, no entanto, as análises foram feitas aos 28 dias de cura submersa.

Como esta é uma propriedade do concreto que está relacionada com a sua resistência, tal comportamento pode ser explicado através das características dos cimentos, às quais já foram mencionadas no item 5.1.1. Os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência de comportamento da variável controlável tipo de cimento frente à dureza superficial do concreto, uma vez que outros fatores também estão envolvidos, como a relação a/agl , o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura.

5.3.2 Efeito da Relação a/agl

A figura 65 mostra a influência isolada da relação a/agl sobre a dureza superficial dos concretos. Tal figura foi obtida através dos resultados do ensaio de esclerometria dos traços estudados, aos 63 dias de idade, na análise de variância ANOVA.

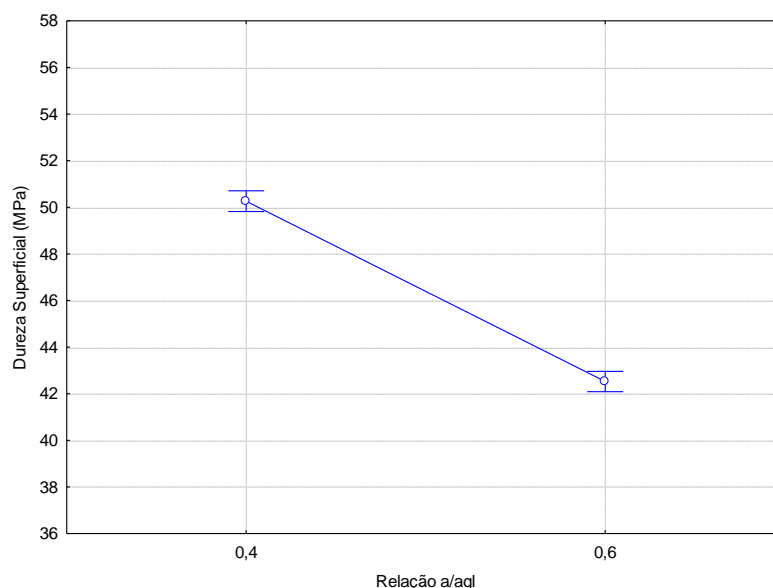


Figura 65: efeito isolado da relação a/agl na dureza superficial do concreto

Observando-se o gráfico é possível observar o efeito da relação a/agl na dureza superficial dos compósitos cimentícios. Para os concretos produzidos com maior relação a/agl (0,6) a dureza superficial mostrou um decréscimo da ordem de 15,4 % comparativamente àqueles produzidos com relação a/agl 0,4. Este comportamento também foi evidenciado nas análises de resistência à compressão (item 5.1.2) e à tração na flexão (5.2.2) e já era esperado e de consenso acadêmico.

5.3.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 66 mostra o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial dos concretos, através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

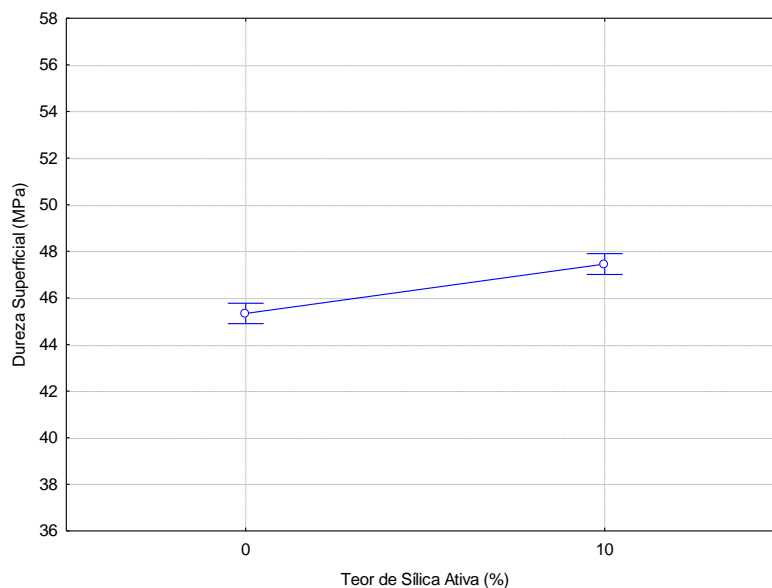


Figura 66: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um aumento na dureza superficial dos traços de concreto produzidos com teores de substituição de sílica ativa de 10 %. Tal aumento foi de aproximadamente 5,1 % e está atribuído ao efeito químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades de resistência dos compósitos. Tal comportamento foi verificado em estudo anterior, onde Silva (2011) encontrou acréscimos na dureza superficial dos concretos da ordem de 4,2 %, com relação aos de referência, na idade de 28 dias em cura submersa.

Contudo, é relevante ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao teor de substituição de sílica ativa frente à dureza superficial do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura.

5.3.4 Efeito do Tipo de Cura

O efeito isolado do tipo de cura na dureza superficial dos concretos está demonstrado na figura 67. Tal resultado foi obtido através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

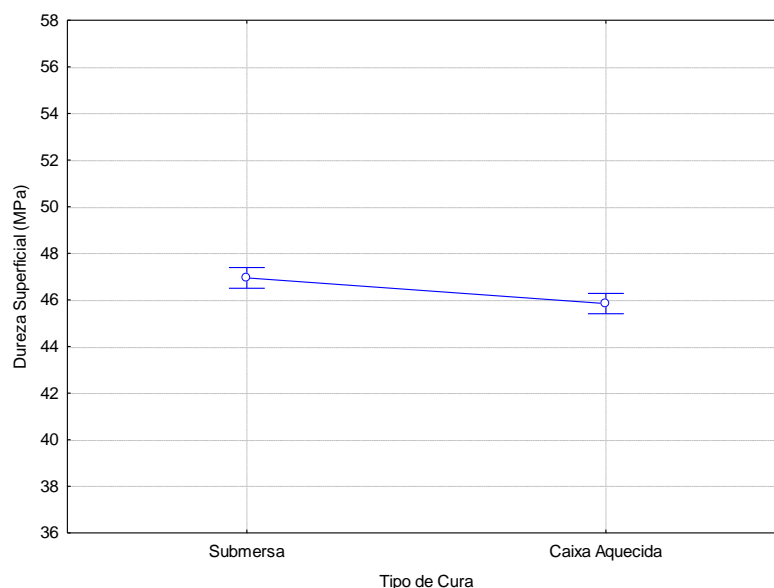


Figura 67: efeito isolado do tipo de cura na dureza superficial do concreto

Através da análise da figura, verifica-se um decréscimo de aproximadamente 2,8 % na dureza superficial dos concretos que foram submetidos à cura em caixa aquecida, comparativamente àqueles sob cura submersa. Essa redução na dureza pode ser atribuída a uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação, por causa da rápida hidratação inicial dos compostos em função da temperatura elevada, ocasionando perda de resistência e aumento da porosidade (NEVILLE, 1997; MARTINS, 2001; FERREIRA JÚNIOR, 2003; BINGÖL; TOHUMCU, 2013). Além disso, com grande velocidade inicial de hidratação não há tempo para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento, o que acaba formando espaços intersticiais na matriz. Com isso, o material terá maior porosidade e mesmo que apresente resistência inicial elevada poderá apresentar menor potencial de desenvolvimento de resistência mecânica final (SALVADOR FILHO, 2001; RAMEZANIANPOUR et al., 2014). Cabe salientar nestas análises a evidência da menor influência do tipo de cura, em relação às avaliações anteriores (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa), na dureza da superfície dos compósitos.

Conjuntamente a isto, o efeito da elevação da temperatura na superfície dos concretos promoveu a formação de microfissuras (figura 68) e, além disso, aumentou a porosidade dessa camada em função da evaporação de parte da água necessária para a hidratação do cimento, conforme será apresentado posteriormente nas análises de porosimetria por intrusão de mercúrio (item 5.6), o que acabou reduzindo a dureza superficial do material.

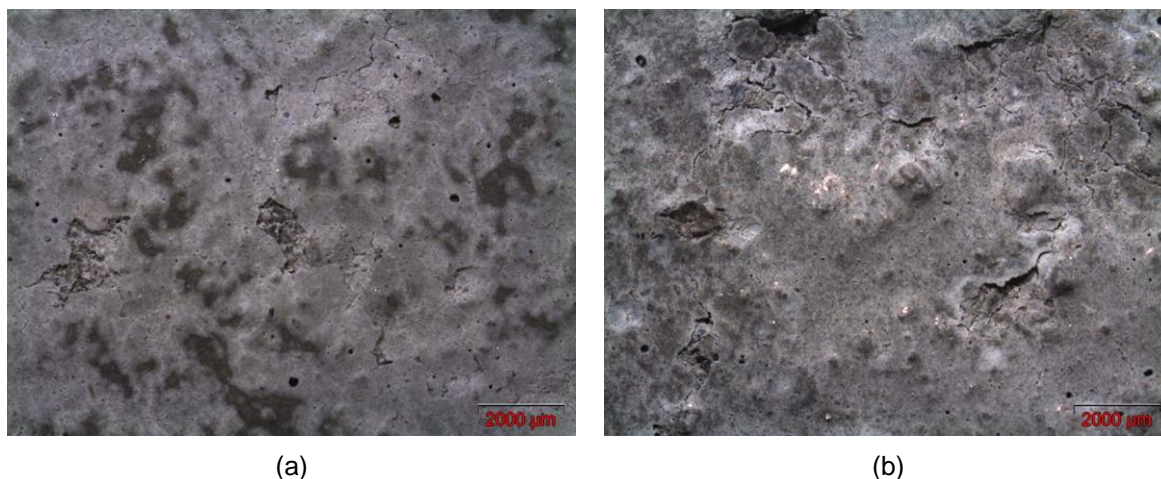


Figura 68: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP V-ARI, relação a/agl 0,4 e 0 % de sílica ativa. Ampliação de 70 x: (a) submersa; (b) caixa aquecida

Cabe ressaltar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao tipo de cura frente à dureza superficial do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o tipo de cimento, a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa.

5.3.5 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e a Relação a/agl

A análise da interação entre o tipo de cimento e a relação a/agl na dureza superficial dos concretos está apresentada na figura 69. Tal análise foi obtida através da ANOVA, na idade de 63 dias.

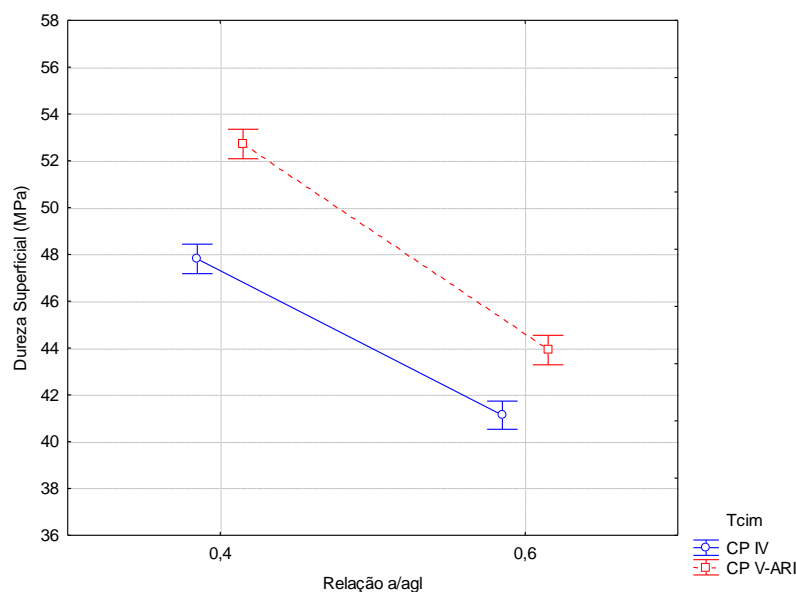


Figura 69: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e a relação a/agl na dureza superficial do concreto

De acordo com o gráfico é possível verificar, para ambas as relações a/agl (0,4; 0,6), um acréscimo significativo na dureza superficial dos concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial em relação aos produzidos com cimento pozolânico, na idade de 63 dias. Comportamento já observado para a resistência à compressão dos compósitos, conforme apresentado no item 5.1.4. Para a relação a/agl 0,4 esse acréscimo na dureza dos compósitos com CP V-ARI foi de 10,3 %, já para a relação a/agl 0,6 esse aumento foi da ordem de 6,5 %. Ressalta-se que para a análise da resistência à compressão, os concretos com relação a/agl 0,6 e cimento pozolânico mostraram maiores decréscimos em relação àqueles com cimento de alta resistência inicial, o que foi explicado em função das maiores taxas de exsudação encontradas. No entanto, para a dureza superficial tal comportamento se inverteu, mas também pode estar relacionado ao efeito da exsudação, uma vez que a água que exsuda para a superfície acaba carreando os finos de menor densidade, incluindo a cinza volante, fato observado visualmente durante as moldagens e que pode ter promovido uma leve redução na porosidade externa pelo efeito químico de densificação, melhorando a camada superficial dos concretos.

5.3.6 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Tipo de Cura

A figura 70 apresenta a interação entre o tipo de cimento e o tipo de cura na dureza superficial do concreto, através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

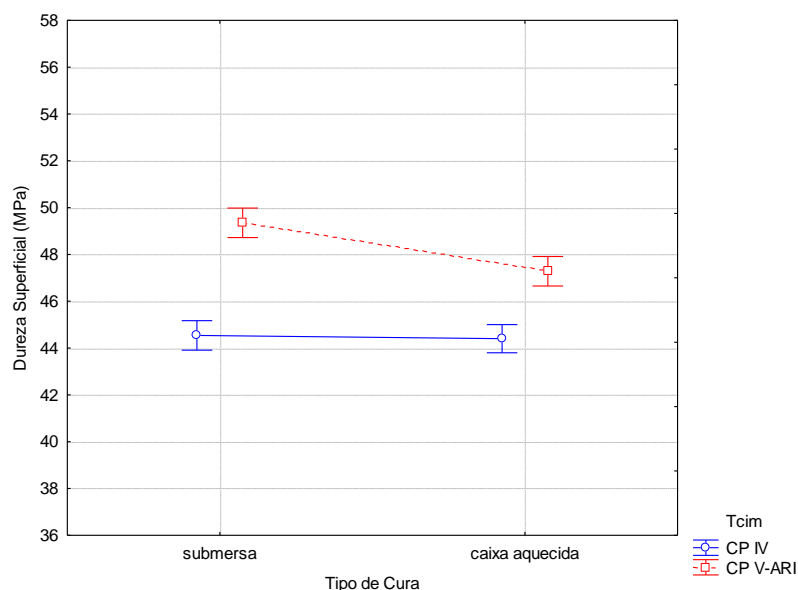


Figura 70: efeito da interação entre o tipo de cimento (Tcim) e o tipo de cura na dureza superficial do concreto

Através da análise do gráfico observa-se que a cura em caixa aquecida, conforme o tipo de cimento empregado, influencia de maneira diferente os compostos cimentícios. Para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI, a cura em caixa aquecida promoveu decréscimos de 4,2 % na dureza superficial em comparação aos concretos curados de forma submersa. Acredita-se que este comportamento pode estar relacionado à rápida velocidade das reações de hidratação do cimento principalmente para a menor relação a/agl (0,4), onde o efeito da cura submersa se mostra mais eficiente (tabela 36), acabando por aumentar os índices esclerométricos quando comparados ao processo realizado em caixa aquecida. Conforme mencionado no item 5.3.4, o efeito da cura em caixa aquecida pode ter acelerado as reações de hidratação dos cimentos em idade inicial, o que por sua vez promoveu a formação dos cristais de $Ca(OH)_2$ e C-S-H mais rapidamente em comparação a cura submersa (RAMEZANIANPOUR et al., 2014). Essa rápida reação de hidratação, principalmente nos cimentos mais puros, acaba gerando uma distribuição não uniforme dos produtos hidratados, com a formação de cristais maiores e mais frágeis, acarretando em maior porosidade e menor resistência da matriz (BINGÖL; TOHUMCU, 2013), além de interferir também na dureza superficial do material. Somando-se a isto, o aquecimento da superfície, promovido pela temperatura mais elevada, pode ter levado ao surgimento de microfissuras pela evaporação e decorrente variação volumétrica, como já relatado em análise anterior.

Para os concretos dosados com cimento pozolânico foi possível constatar que não ocorreram alterações significativas na dureza superficial em função do tipo de cura

empregada. Sugere-se que este comportamento esteja relacionado a maior relação a/agl (0,6), associada às reações de hidratação mais lentas do cimento, onde a cura em caixa aquecida promoveu acréscimos na dureza superficial (tabela 36). A temperatura elevada acelerou as reações pozolânicas, e a relação a/agl mais alta pode ter aumentado a umidade interna na caixa aquecida, favorecendo o ganho de resistência. Ainda, acredita-se que as partículas da cinza tenham atuado como pontos de nucleação para a hidratação do cimento. Tais efeitos proporcionaram uma estrutura mais densa e um maior refinamento da estrutura de poros da matriz (IRSASSAR, 2009; RAMEZANIANPOUR et al., 2014; RAMEZANIANPOUR, 2014), contribuindo para uma aproximação dos índices esclerométricos destes concretos àqueles curados de forma submersa.

5.3.7 Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Tipo de Cura

A figura 71 apresenta o efeito da interação entre a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial do concreto aos 63 dias.

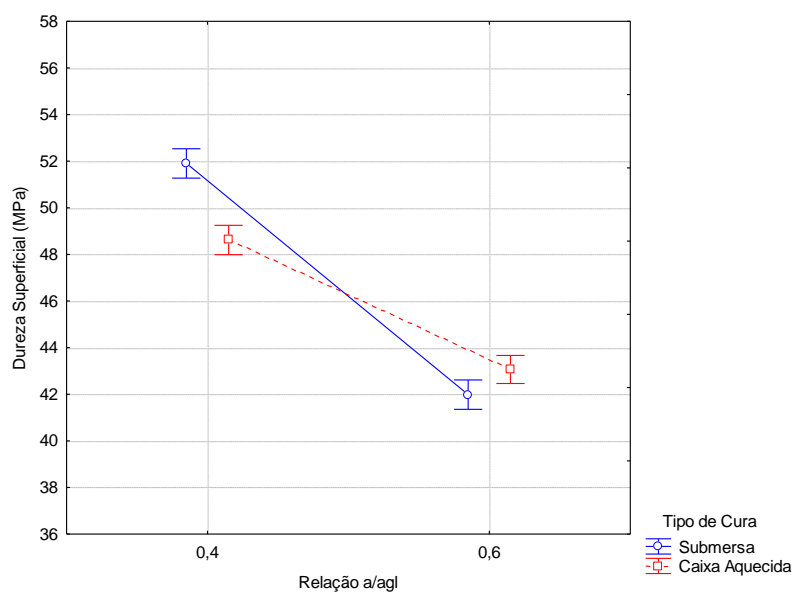


Figura 71: efeito da interação entre a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial do concreto

Analisando a figura, verifica-se a influência significativa da interação entre a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial dos concretos. Conforme análise estatística, o efeito da cura em caixa aquecida para a relação a/agl 0,4 causou decréscimos significativos da ordem de 6,3 % na dureza dos compósitos com relação à cura submersa. Este fato pode estar relacionado, como já comentado anteriormente, ao efeito da temperatura tanto na velocidade das reações de hidratação das partículas de cimento, quanto na evaporação da

água de amassamento do concreto, principalmente das camadas mais externas do material, ocasionando em matrizes mais porosas e superfícies com presença de microfissuras.

Em contrapartida observa-se um comportamento inverso para os compósitos dosados com relação a/agl 0,6, onde a cura em caixa aquecida, comparativamente à cura submersa, acarretou em acréscimo na dureza superficial de aproximadamente 2,3 %. Esse aumento encontrado está diretamente relacionado aos compósitos com cimento pozolânico, conforme descrito no item 5.3.6. Sugere-se que mesmo ocorrendo evaporação da água de amassamento pelo aquecimento da superfície das placas, houve um excedente de umidade que pode ter permanecido internamente no dispositivo e na matriz do concreto, contribuindo de forma benéfica para as reações de hidratação, minimizando a incidência de poros, e conseqüentemente, aumentando a resistência e a dureza do material. Salienta-se que apesar desta análise mostrar diferença estatística pelo teste de Fisher, ou seja, a cura em caixa aquecida mostrou ser diferente da cura submersa, o resultado ficou muito próximo do limiar de análise ($p < 5\%$).

A figura 72 apresenta o efeito do tipo de cura na superfície dos concretos produzidos com cimento pozolânico, para a relação a/agl 0,6 estudada. Salienta-se que a mesma foi obtida através de microscópio estereoscópico, com ampliação de 70 x.

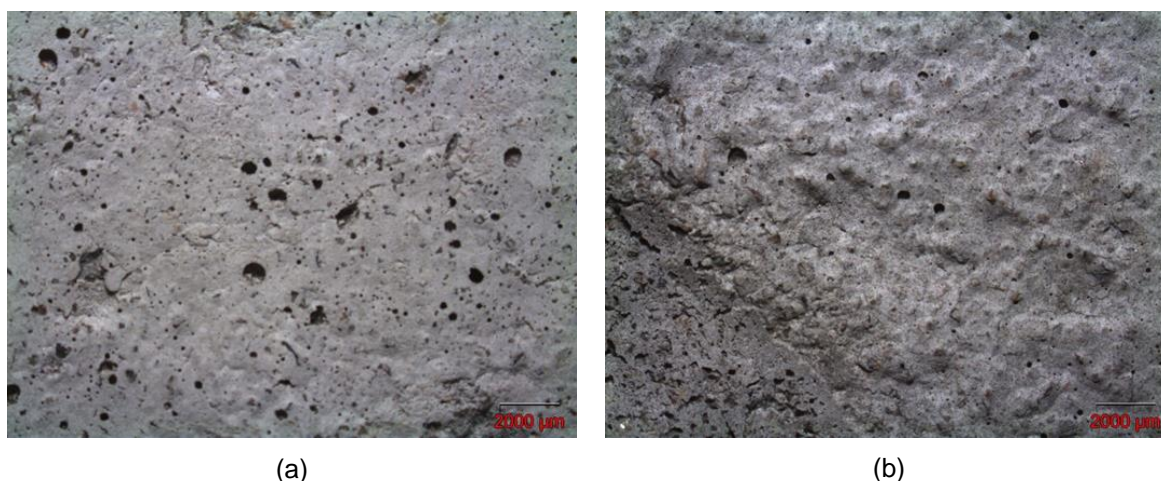


Figura 72: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP IV, relação a/agl 0,6 e 0 % de substituição de sílica ativa: (a) submersa; (b) caixa aquecida

Através da análise da figura observa-se, qualitativamente, a redução da porosidade superficial para os compósitos produzidos com cimento pozolânico, relação a/agl 0,6 e sem sílica ativa, curados em caixa aquecida (figura 72 (b)) quando comparados à cura submersa (figura 72 (a)).

5.3.8 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Tipo de Cura

O efeito estatístico significativo de terceira ordem entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura, na dureza superficial dos concretos, está demonstrado na figura 73. Tal análise foi obtida através do método ANOVA, na idade de 63 dias.

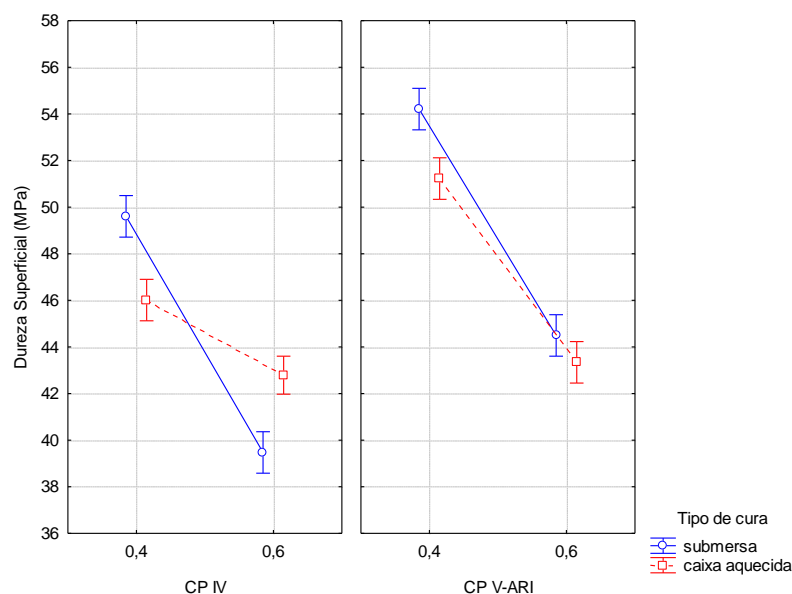


Figura 73: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura na dureza superficial do concreto

Através da análise da figura, é possível observar o efeito da cura em caixa aquecida nos compósitos dosados com menor relação a/agl (0,4), para ambos os cimentos empregados na pesquisa (CP IV; CP V-ARI), uma vez que a dureza desses compósitos reduziu de forma significativa, comparativamente a cura submersa. Nos concretos com cimento pozolânico a redução da dureza foi de aproximadamente 7,2 %, já para àqueles com cimento de alta resistência inicial esse decréscimo foi da ordem de 5,5 %. Esse fato pode ser explicado, conforme mencionado no item 5.3.7, em função da velocidade das reações de hidratação das partículas de cimento (resistência inicial elevada, com menor potencial de desenvolvimento de resistência mecânica final) e da evaporação da água de amassamento.

Já para os concretos com relação a/agl 0,6, a cura em caixa aquecida mostrou efeito inverso, onde a maior relação a/agl presente nas misturas pode ter proporcionado um acréscimo no teor de umidade dentro da caixa aquecida e da matriz do material, minimizando a porosidade e a presença de microfissuras como já abordado anteriormente (item 5.3.7). Complementarmente as análises feitas é possível perceber que para o cimento

pozolânico a cura em caixa aquecida promoveu acréscimos na dureza superficial em comparação a cura submersa. Esse comportamento corrobora com resultados descritos em estudos anteriores (IRSASSAR, 2009; RAMEZANIANPOUR et al., 2014; RAMEZANIANPOUR, 2014) e já foi descrito no item 5.3.6. Salienta-se que através do teste de Fisher os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6, curados em caixa aquecida, não se mostraram estatisticamente diferentes daqueles mantidos em cura submersa.

5.3.9 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Tipo de Cura

A figura 74 apresenta o efeito da interação de terceira ordem entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica e o tipo de cura na dureza superficial dos concretos, através da ANOVA, aos 63 dias de análise.

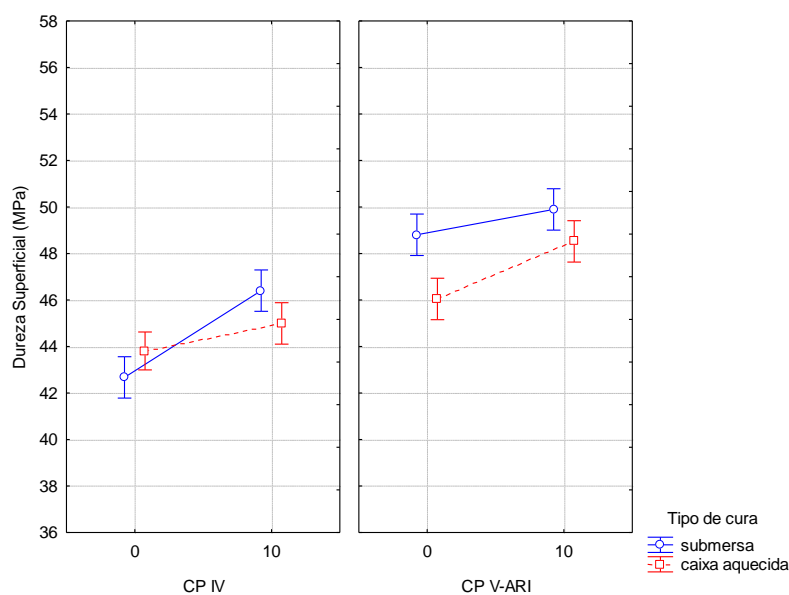


Figura 74: efeito da interação entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura na dureza superficial do concreto

Através de análise da figura, é possível fazer algumas considerações com relação ao efeito estatístico de terceira ordem entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura na dureza superficial dos concretos. Para os compósitos confeccionados com cimento pozolânico, sem a presença de sílica ativa (0 %), a cura realizada em caixa aquecida não alterou de forma significativa a dureza superficial, onde o aumento da temperatura em idades iniciais pode ter promovido melhoras na matriz, como já citado anteriormente (item 5.3.6), aproximando a qualidade da camada externa desses concretos

àqueles curados de forma submersa. Já para os traços moldados com cimento de alta resistência inicial, sem sílica ativa (0 %), a caixa aquecida ocasionou em queda na dureza superficial, comportamento também já relatado em discussão anterior (item 5.3.6) e que corrobora com alguns trabalhos publicados (BINGÖL; TOHUMCU, 2013).

Além disso, destaca-se que para os concretos produzidos com 10 % de sílica ativa quando comparados aos de referência (0 % de sílica ativa), independente do tipo de cimento empregado (CP IV; CP V-ARI), a cura em caixa aquecida não promoveu reduções na dureza superficial do material; esse fato demonstra que a adição mineral foi capaz de proteger a superfície dos compósitos frente às variações de temperatura provocadas pela caixa aquecida.

5.4 EXSUDAÇÃO

A exsudação tem extrema importância na execução de pisos de concreto, uma vez que a camada exsudada que se forma na superfície do piso, por apresentar elevada relação a/c, e, por consequência ser fraca e porosa, pode permitir o desgaste acentuado dos compósitos. Os resultados do ensaio de exsudação das diferentes misturas encontram-se na tabela 38. Seguem, no apêndice F, todas as leituras realizadas para obtenção dos dados.

Tabela 38: exsudação de concretos com diferentes materiais e proporcionamentos

EXSUDAÇÃO					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%)	E (%)	Traços	a/agl - Tsa (%)	E (%)
1A	0,4 - 0	4,59	1B	0,4 - 0	1,44
2A	0,4 - 10	0,45	2B	0,4 - 10	0,03
3A	0,6 - 0	13,71	3B	0,6 - 0	9,10
4A	0,6 - 10	2,13	4B	0,6 - 10	1,65

Segundo Rodrigues (2010), o controle da exsudação está relacionado às técnicas de dosagem, como o ajuste de materiais finos, a curva granulométrica dos agregados e o controle no uso de aditivos; normalmente para pisos, o percentual de exsudação não deve

exceder a 4 % (ACI 302.1R, 2004). Segundo análise da tabela verifica-se que algumas misturas ultrapassaram o valor recomendado, apresentando altos percentuais de exsudação (traços 1A, 3A e 3B).

A figura 75 apresenta os resultados da exsudação para os traços de concreto produzidos com cimento pozolânico e de alta resistência inicial, relações a/agl 0,4 e 0,6, com e sem a presença de sílica ativa em substituição à massa de cimento (0 %; 10 %).

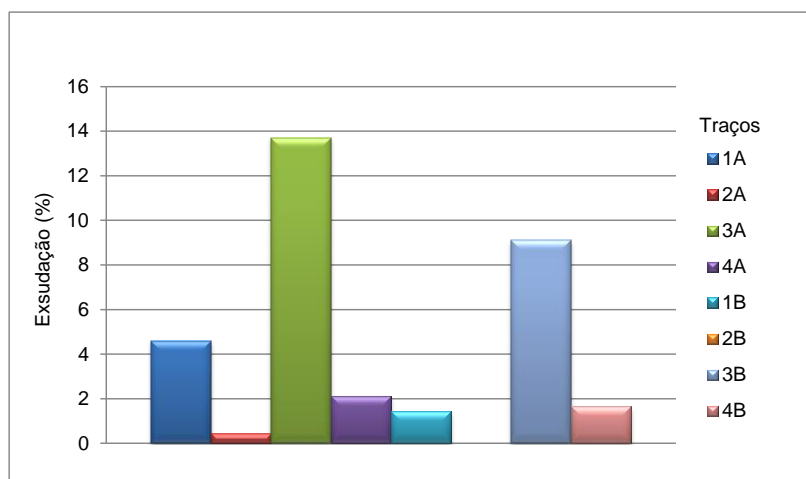


Figura 75: quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto

De acordo com a tabela e o gráfico é possível constatar algumas tendências claras de comportamento para os diferentes traços de concreto estudados. Logo, alguns aspectos relevantes serão discutidos com maior profundidade.

Analisando os resultados encontrados verifica-se que para as misturas produzidas com cimento de alta resistência inicial, comparativamente às com cimento pozolânico, ocorreu uma redução da exsudação. Tal redução pode estar relacionada às características físicas desse cimento apresentadas na tabela 19, como a finura, o diâmetro médio, o tempo de pega, entre outras. Segundo Mehta e Monteiro (2014), cimentos que apresentam grande perda de abatimento, com maior área superficial específica, tendem a reduzir tal fenômeno.

Tal comportamento também foi evidenciado em pesquisa realizada por Topçu e Elgün (2004), onde os concretos produzidos com cimento de maior área superficial específica, para uma mesma relação a/c, mostraram uma redução na exsudação da ordem de 25 % em relação aos demais. Os autores atribuem tal comportamento à finura e ao elevado teor de C_3A e de álcalis no cimento. Ainda, segundo os mesmos autores, a redução da exsudação está relacionada à capacidade de retenção de água das partículas finas de cimento. Essa

capacidade de retenção é parcialmente dependente da quantidade de C_3A e C_4AF presentes.

Somando-se a isto, salienta-se o efeito da relação a/agl nas misturas, onde o aumento desse parâmetro promoveu acréscimos nas quantidades de água exsudada, comportamento já esperado e de consenso no meio acadêmico.

Quanto à influência da sílica ativa na exsudação dos concretos produzidos, para ambos os tipos de cimento, observa-se que o uso dessa adição no proporcionamento dos compósitos (traços 2A, 4A, 2B e 4B) no teor de 10 % em substituição à massa do cimento, reduziu a quantidade de água exsudada acumulada durante o ensaio com relação aos concretos de referência (1A, 3A, 1B e 3B). Fato que ocorre em função do efeito microfíler que as partículas de sílica desempenham dentro das misturas, aumentando a coesão interna do concreto e, por consequência, reduzindo a exsudação (NEVILLE, 1997; ACI 302.1R, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

5.5 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

Os resultados de resistência à abrasão média para os concretos estudados encontram-se na tabela 39. Seguem, no apêndice G, todos os dados obtidos para este ensaio.

Tabela 39: resultados para o ensaio de resistência à abrasão pelo Método da NBR 12042

DESGASTE POR ABRASÃO (mm) - VALORES MÉDIOS													
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)						CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
Percurso (m)	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Percurso (m)	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão	CV (%)		
500	1A	0,4 - 0 - submersa	1,37	0,05	3,96	500	1B	0,4 - 0 - submersa	1,20	0,10	8,16		
		0,4 - 0 - caixa aquecida	1,54	0,05	3,29			0,4 - 0 - caixa aquecida	1,37	0,12	8,87		
	2A	0,4 - 10 - submersa	1,08	0,07	6,25		2B	0,4 - 10 - submersa	1,10	0,01	1,36		
		0,4 - 10 - caixa aquecida	1,11	0,17	15,29			0,4 - 10 - caixa aquecida	1,23	0,10	8,33		
	3A	0,6 - 0 - submersa	1,44	0,14	9,71		3B	0,6 - 0 - submersa	1,31	0,10	7,78		
		0,6 - 0 - caixa aquecida	1,54	0,25	16,48			0,6 - 0 - caixa aquecida	1,51	0,13	8,55		
	4A	0,6 - 10 - submersa	1,46	0,22	14,75		4B	0,6 - 10 submersa	1,39	0,08	5,99		
		0,6 - 10 - caixa aquecida	1,58	0,06	3,83			0,6 - 10 caixa aquecida	1,48	0,16	10,78		
	1000	1A	0,4 - 0 - submersa	3,37	0,04		1,32	1000	1B	0,4 - 0 - submersa	3,04	0,08	2,50
			0,4 - 0 - caixa aquecida	3,68	0,18		4,97			0,4 - 0 - caixa aquecida	3,28	0,13	4,02
		2A	0,4 - 10 - submersa	2,88	0,12		4,15		2B	0,4 - 10 - submersa	2,68	0,10	3,59
			0,4 - 10 - caixa aquecida	2,90	0,15		5,10			0,4 - 10 - caixa aquecida	2,81	0,03	1,20
3A		0,6 - 0 - submersa	3,37	0,20	6,01	3B	0,6 - 0 - submersa		3,15	0,12	3,78		
		0,6 - 0 - caixa aquecida	3,97	0,18	4,62		0,6 - 0 - caixa aquecida		3,32	0,17	5,13		
4A		0,6 - 10 - submersa	3,74	0,17	4,43	4B	0,6 - 10 submersa		3,58	0,36	10,18		
		0,6 - 10 - caixa aquecida	4,07	0,19	4,65		0,6 - 10 caixa aquecida		3,60	0,23	6,43		

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método ANOVA. Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (tipo de cimento, relação a/agl , tipo de cura e teor

de substituição de sílica ativa) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (resistência à abrasão) medida.

Na tabela 40 está apresentada a análise de variância para os dados medidos aos 500 metros de desgaste. Já na tabela 41 encontra-se tal análise aos 1000 metros de ensaio.

Tabela 40: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão - 500 metros

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	0,0862	4,474	0,038306	S
Relação a/agl (2)	1	0,8544	44,366	0,000000	S
Teor Sílica (3)	1	0,2213	11,491	0,001202	S
Tipo de cura (4)	1	0,2921	15,168	0,000238	S
(1) x (2)	1	0,0056	0,290	0,591770	NS
(1) x (3)	1	0,0646	3,356	0,071615	NS
(2) x (3)	1	0,3572	18,551	0,000058	S
(1) x (4)	1	0,0084	0,435	0,511990	NS
(2) x (4)	1	0,0000	0,002	0,968768	NS
(3) x (4)	1	0,0248	1,289	0,260480	NS
(1) x (2) x (3)	1	0,0695	3,609	0,061980	NS
(1) x (2) x (4)	1	0,0003	0,017	0,897213	NS
(1) x (3) x (4)	1	0,0004	0,023	0,880957	NS
(2) x (3) x (4)	1	0,0016	0,084	0,772890	NS
(1) x (2) x (3) x (4)	1	0,0159	0,825	0,367249	NS
Erro	64	0,0193			NS

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Observando-se a tabela 40, percebe-se que os efeitos isolados de todas as variáveis controláveis mostraram-se significativas na análise realizada. Ainda, salienta-se que apenas a interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa causou efeito significativo no desgaste por abrasão, aos 500 metros de percurso.

Tabela 41: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão - 1000 metros

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	1,6347	47,05	0,000000	S
Relação a/agl (2)	1	4,4442	127,90	0,000000	S
Teor Sílica (3)	1	0,1884	5,42	0,023150	S
Tipo de cura (4)	1	0,7997	23,01	0,000010	S
(1) x (2)	1	0,0453	1,30	0,257861	NS
(1) x (3)	1	0,0999	2,88	0,094912	NS
(2) x (3)	1	3,0047	86,47	0,000000	S
(1) x (4)	1	0,0998	2,87	0,095182	NS
(2) x (4)	1	0,0335	0,96	0,329911	NS
(3) x (4)	1	0,1515	4,36	0,040887	S
(1) x (2) x (3)	1	0,0173	0,50	0,482757	NS
(1) x (2) x (4)	1	0,1411	4,06	0,048250	S
(1) x (3) x (4)	1	0,0155	0,45	0,506339	NS
(2) x (3) x (4)	1	0,0006	0,02	0,899291	NS
(1) x (2) x (3) x (4)	1	0,0063	0,18	0,671176	NS
Erro	62	0,0347			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Conforme a tabela 41, igualmente ao mencionado para a análise anterior, todos os efeitos isolados dos fatores controláveis mostraram-se significativos. Além disso, verifica-se que algumas interações de 2ª e 3ª ordem não se mostraram significativas nesta análise aos 1000 metros de ensaio.

A seguir são demonstrados os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) das variáveis controláveis que se mostraram significativas, bem como de suas interações, na resistência à abrasão dos concretos, aos 500 e aos 1000 metros.

5.5.1 Efeito do Tipo de Cimento

O efeito isolado do tipo de cimento na resistência à abrasão dos concretos está demonstrado na figura 76, a qual foi obtida através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

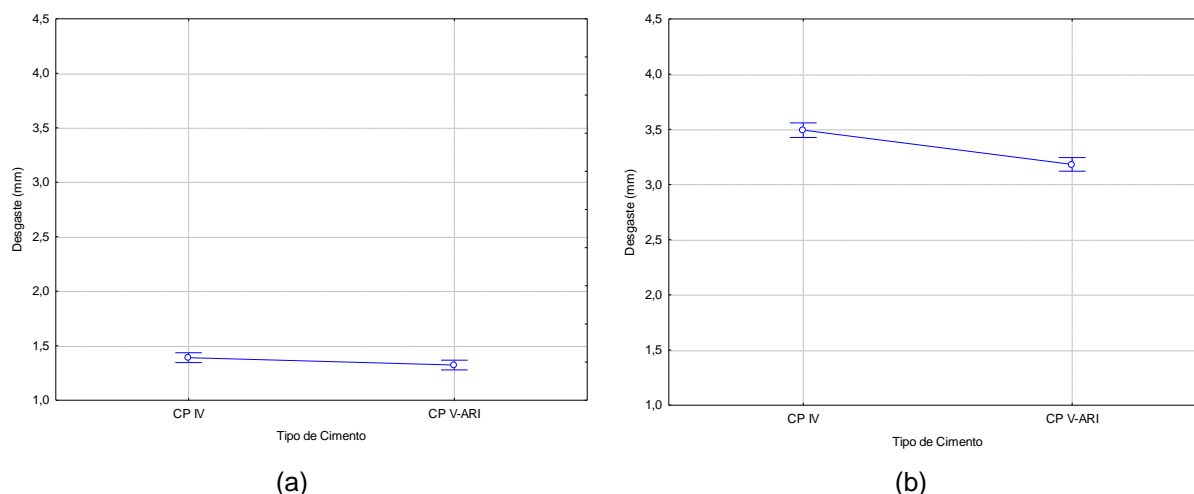


Figura 76: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros

Observando-se a figura é possível detectar a influência significativa do tipo de cimento na resistência à abrasão dos concretos, onde os menores índices de desgaste foram encontrados para os compósitos produzidos com cimento de alta resistência inicial, tanto aos 500 (figura 76 (a)), quanto aos 1000 metros (figura 76 (b)) de ensaio, na idade de 63 dias. Esse comportamento verificado corrobora com as demais análises feitas para as propriedades mecânicas (compressão e tração na flexão), para a dureza superficial e exsudação das misturas. Tal resultado mostra uma importante relação tanto das propriedades de resistência, quanto da qualidade da camada superficial dos concretos com a resistência à abrasão.

O resultado encontrado pode ser explicado em função da hidratação do cimento pozolânico, que ocorre de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, a resistência à abrasão dos compósitos. Resumidamente, a resistência superficial pode ser correlacionada diretamente com as propriedades mecânicas dos concretos, como previamente relatado por muitos autores (NAIK; SINGH; RAMME, 2002; ATIŞ, 2002; ATIŞ, 2003; VIECILI, 2004; SIDDIQUE; KHATIB, 2009).

Analisando os resultados em termos percentuais observa-se uma redução de aproximadamente 3,5 % e 8,6 % nos índices de desgaste dos compósitos com cimento de alta resistência inicial comparando-se aos com cimento pozolânico, aos 500 e aos 1000 metros de desgaste, respectivamente. Em estudo realizado por Silva (2011), a autora verificou um decréscimo de aproximadamente 12,6 % no desgaste por abrasão dos concretos produzidos com CP V-ARI comparativamente aos com CP IV, porém as análises foram feitas aos 28 dias de cura submersa.

Importante salientar que estes resultados demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle tipo de cimento frente à variável de estudo (resistência à abrasão), e que existem outros fatores envolvidos, como a relação a/agl , o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura.

5.5.2 Efeito da Relação a/agl

O efeito isolado da relação a/agl na resistência à abrasão dos traços estudados está apresentado na figura 77. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de resistência à abrasão para os concretos avaliados na idade de 63 dias.

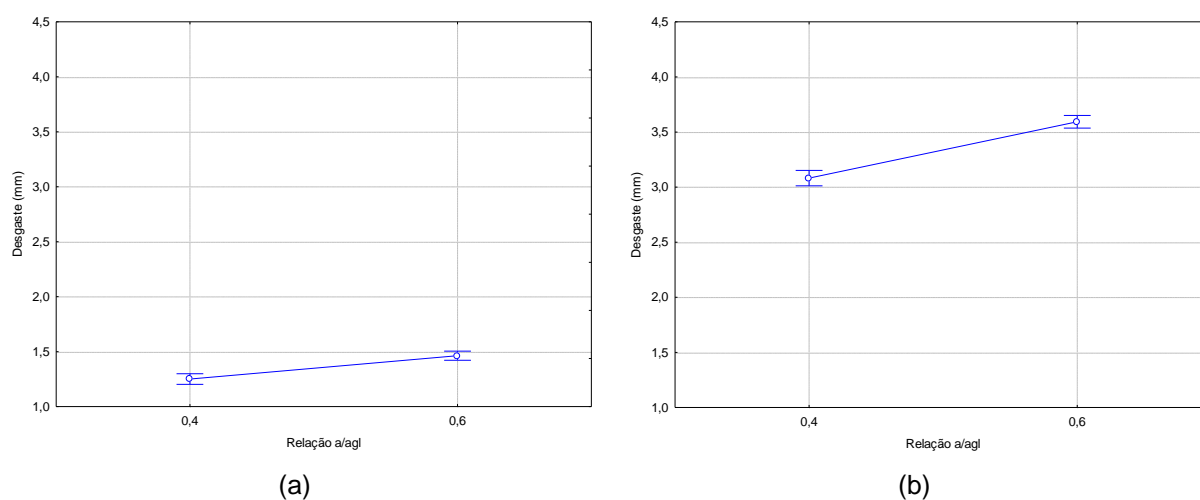


Figura 77: efeito isolado da relação a/agl na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros

Através de análise da figura verifica-se a influência significativa da relação a/agl na resistência à abrasão dos compósitos, onde o aumento desse parâmetro promoveu acréscimos no índice de desgaste do material, como já era esperado, uma vez que quanto maior a quantidade de água na mistura, maior será a porosidade da matriz cimentícia, devido às reações volumétricas químicas, característica que limita o crescimento da resistência dos materiais cimentícios, e por consequência a resistência ao desgaste superficial (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Aos 500 e aos 1000 metros de percurso o aumento no desgaste foi da ordem de 16,0 % com o aumento da relação a/agl de 0,4 para 0,6. Salienta-se que, para as propriedades mecânicas (compressão e tração na flexão), os concretos com maior relação a/agl mostram uma redução de aproximadamente 30,0 % nos dados obtidos. Já com relação à dureza da superfície, os resultados apresentaram decréscimos de 15,0 % nos índices esclerométricos medidos. Observa-se que existe uma estreita semelhança nos resultados verificados para a

resistência à abrasão e para a dureza superficial, uma vez que ambas avaliam a superfície e não a matriz/massa dos concretos.

Os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle relação a/agl frente à resistência à abrasão, e que existem outros fatores envolvidos, como o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura.

5.5.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 78 demonstra o efeito isolado significativo do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão dos concretos, na idade de 63 dias. A mesma foi obtida através de análise de variância (ANOVA).

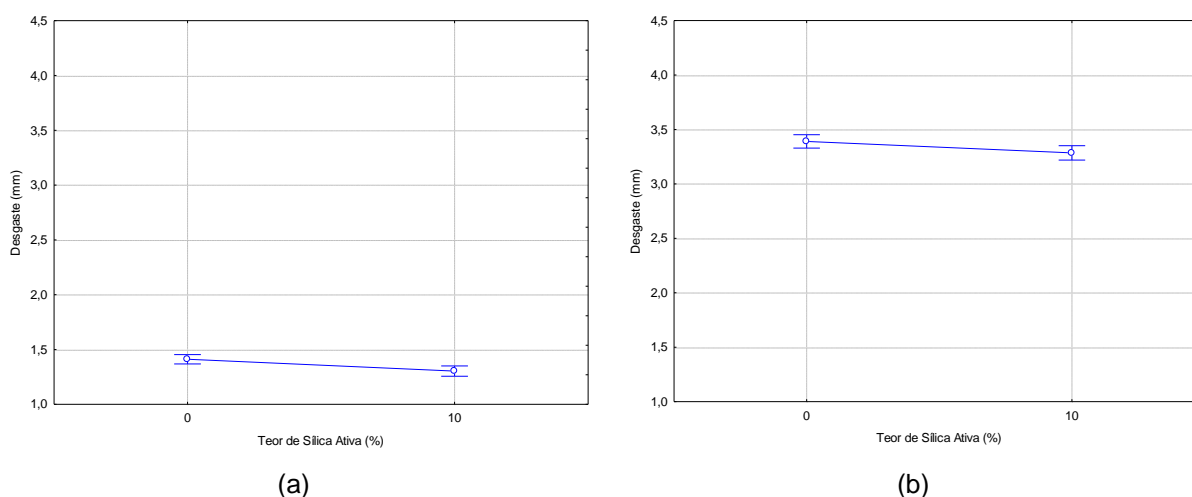


Figura 78: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros

Analisando-se a figura é possível verificar a influência significativa do teor de 10,0 % de substituição de sílica ativa na massa cimento, frente ao desgaste das amostras de concreto. Aos 500 metros de ensaio (figura 78 (a)) foi detectado um decréscimo no índice de desgaste de aproximadamente 7,1 %, comparando-se às amostras de referência (sem sílica ativa). Já aos 1000 metros (figura 78 (b)) essa redução ficou em torno de 3,0 %. Esse comportamento corrobora com as análises anteriores realizadas (Estudo Preliminar) e o efeito benéfico que o material proporciona aos compósitos já foi relatado neste trabalho e por diversos autores (ATIŞ et al., 2005; YAZICI; İNAN, 2006; LIU, 2007; KUMAR; SHARMA, 2014).

Comparando-se o desgaste das amostras aos 500 e aos 1000 metros é possível verificar a maior influência da sílica ativa nesta primeira etapa de ensaio, fato que pode ser explicado em função da ausência de agregados graúdos nessa camada superficial, onde o efeito da sílica ativa promoveu uma maior densificação. Externamente o concreto apresenta uma fina

camada de argamassa, normalmente com menor resistência à abrasão do que a matriz de concreto, onde a presença do agregado graúdo contribui para uma menor perda de massa do material.

Os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à abrasão, e que existem outros fatores envolvidos, como o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura.

5.5.4 Efeito do Tipo de Cura

A figura 79 apresenta o efeito isolado significativo do tipo de cura na resistência à abrasão do concreto, aos 63 dias. Esta figura foi obtida através da análise de variância (ANOVA).

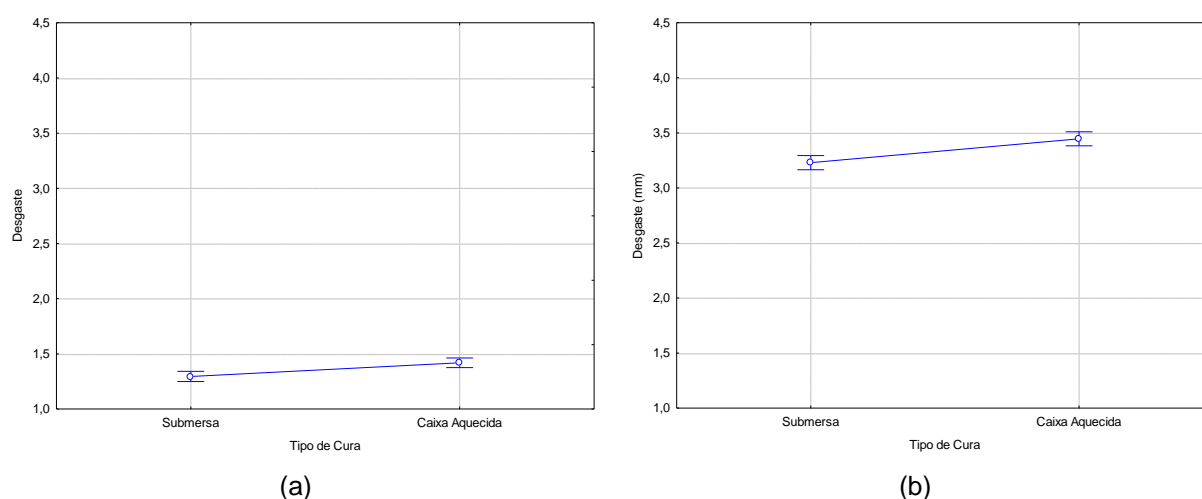


Figura 79: efeito isolado do tipo de cura na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros

Através da análise dos gráficos verifica-se a influência significativa do tipo de cura na resistência à abrasão dos concretos, onde a cura submersa mostrou melhores resultados em comparação à cura em caixa aquecida. Esse comportamento também foi encontrado para a dureza superficial dos compósitos e pode ser explicado em função da distribuição não uniforme dos produtos de hidratação decorrente da temperatura elevada, fato que acarreta em perda de resistência e aumento da porosidade (MARTINS, 2001; FERREIRA JÚNIOR, 2003; BINGÖL; TOHUMCU, 2013). Ainda, segundo Ramezani pour et al. (2014), com a grande velocidade inicial de hidratação, a difusão dos produtos se dá próximo às partículas de cimento, o que acaba formando espaços intersticiais na matriz, gerando maior porosidade ao material. Assim como para a dureza superficial, fica evidente nestas análises a menor influência do tipo de cura comparativamente ao efeito do tipo de cimento e da relação a/agl , na resistência à abrasão dos compósitos.

Somando-se a isto, a elevação da temperatura na superfície dos concretos promoveu a formação de microfissuras, além de aumentar a porosidade dessa camada em decorrência da evaporação de parte da água de amassamento, conforme será apresentado posteriormente nas análises de porosimetria por intrusão de mercúrio (item 5.6), o que acabou reduzindo a resistência à abrasão do material.

5.5.5 Efeito da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 80 apresenta o efeito estatístico significativo da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão dos concretos, aos 63 dias. Tal figura foi obtida através da análise de variância (ANOVA).

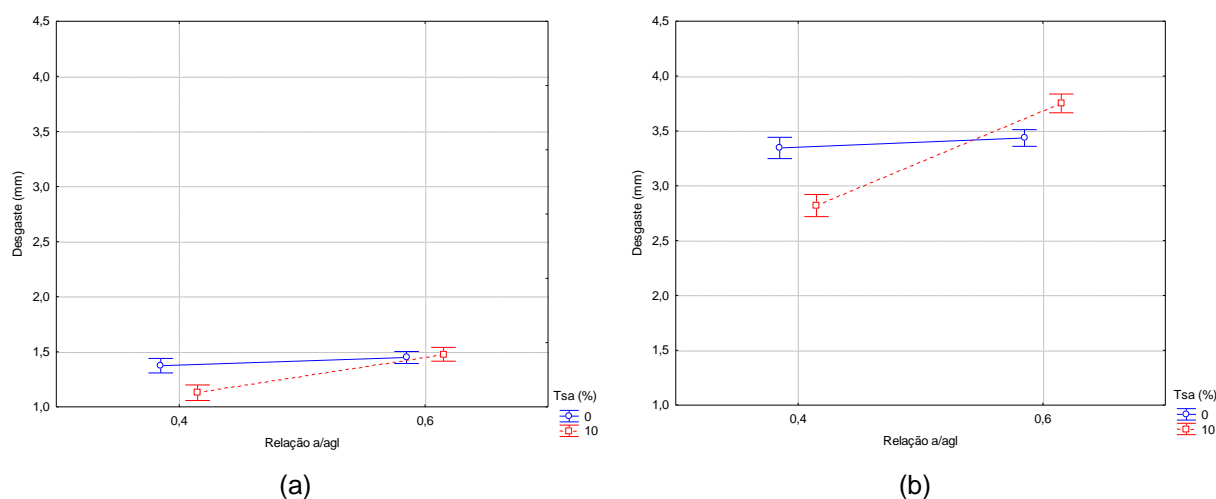


Figura 80: efeito da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa (Tsa) na resistência à abrasão do concreto: (a) 500 metros; (b) 1000 metros

Observando-se a figura é possível verificar o efeito distinto do teor de substituição de sílica ativa nas diferentes relações a/agl avaliadas. Para a relação a/agl 0,4 a sílica ativa presente promoveu acréscimos na resistência à abrasão dos compósitos, onde a redução no índice de desgaste ficou em torno de 17,0 %. Já para a relação a/agl 0,6, os resultados encontrados sugerem que a presença de sílica ativa não causou influência na resistência à abrasão; esse comportamento não segue um padrão e foi encontrado para ambos os tipos de cimento estudados, independente da condição de cura empregada (tabela 39).

Salienta-se que se repetiu a moldagem dos traços de concreto com relação a/agl 0,6 e 0 % de sílica ativa, uma vez que os índices de desgaste ficaram muito próximos daqueles com relação a/agl 0,4 e 0 % de sílica ativa, mas os resultados obtidos seguiram a mesma tendência de comportamento não esperada, para os dois cimentos empregados.

5.5.6 Efeito da Interação entre o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Tipo de Cura

A figura 81 apresenta o efeito combinado significativo do teor de substituição de sílica ativa e do tipo de cura na resistência à abrasão do concreto. Essa figura foi obtida através da análise de variância (ANOVA), na idade de 63 dias.

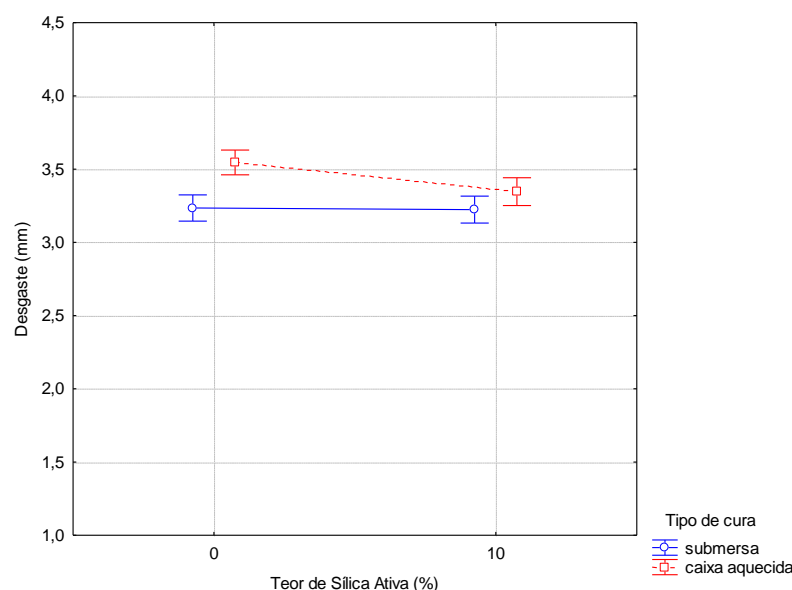


Figura 81: Efeito da interação entre o teor de substituição de sílica ativa e o tipo de cura na resistência à abrasão do concreto - 1000 metros

Através da análise da figura verifica-se que as amostras de concreto sem sílica ativa apresentaram menor resistência à abrasão quando submetidas a cura em caixa aquecida, comparando-se àquelas em cura submersa (ver figura 68). Por outro lado, os concretos dosados com 10 % de sílica ativa mostraram-se mais resistentes ao desgaste por abrasão quando foram submetidos à cura em caixa aquecida. Esse resultado indica que a sílica ativa foi capaz de proteger a superfície dos compósitos frente às variações de temperatura provocadas pela caixa aquecida. Salienta-se que estas análises corroboram com o que foi mencionado no item 5.3.9. Ainda, tais resultados também foram encontrados em trabalhos publicados (MAZLOOM; RAMEZANIANPOUR; BROOKS, 2004).

A figura 82 apresenta o efeito do tipo de cura na superfície dos compósitos dosados com 10 % de substituição sílica ativa, a qual foi obtida através de análise em microscópio estereoscópico, com aumento de 70 x.

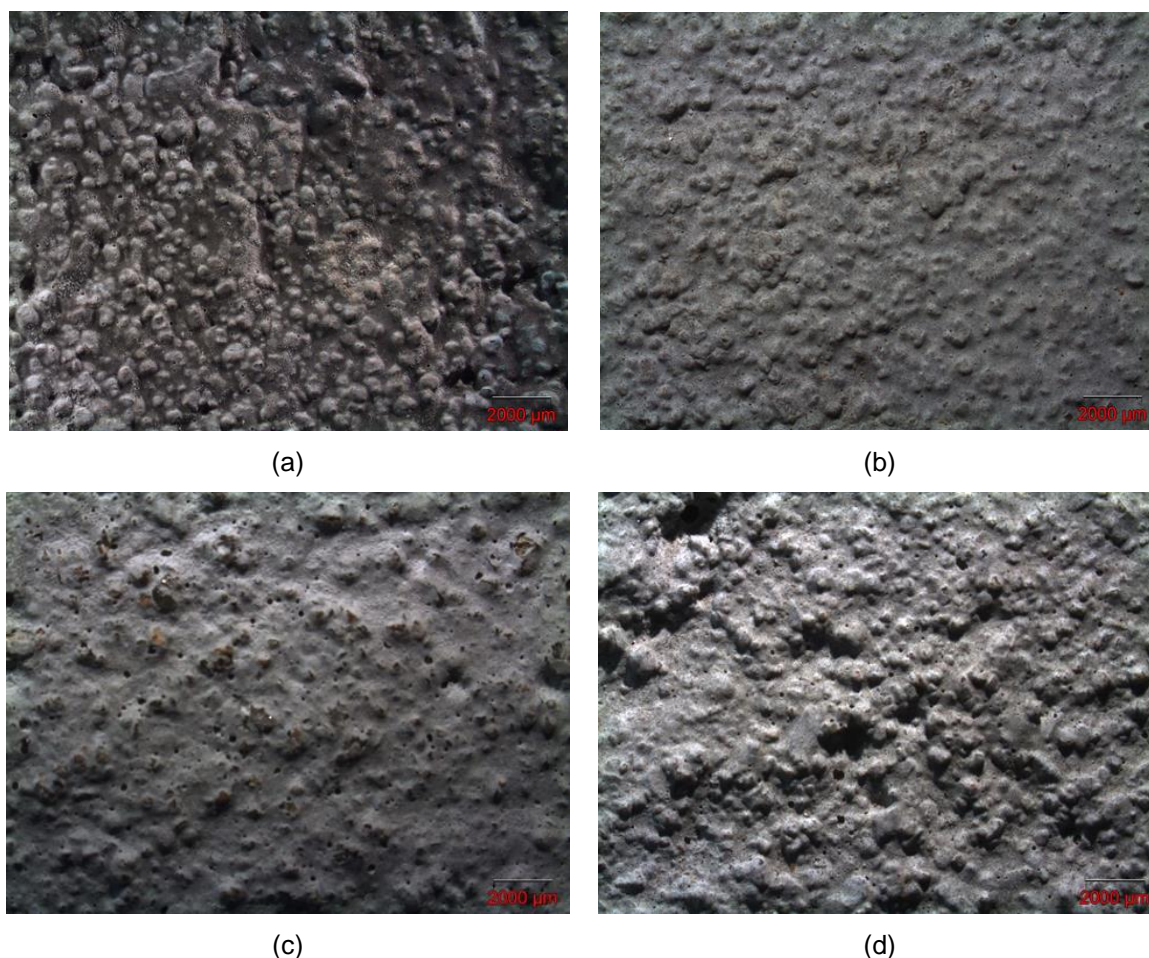


Figura 82: efeito do tipo de cura na superfície de amostras de concreto com cimento CP V-ARI e 10 % de substituição de sílica ativa: (a) relação a/agl 0,4 - submersa; (b) relação a/agl 0,4 - caixa aquecida; (c) relação a/agl 0,6 - submersa; (d) relação a/agl 0,6 - caixa aquecida

Analisando a figura 82 observa-se, primeiramente, que a substituição de sílica ativa em 10 % sobre a massa de cimento promoveu a proteção da superfície das amostras com relação aos efeitos negativos da variação de temperatura simulados pela caixa aquecida. Este fato pode ser explicado em função da ausência de microfissuras visíveis decorrentes da dessecação ou variação volumétrica da camada externa dos compósitos (figura 82 (a) e (b)). Tal condição pode ser observada para ambas as relações a/agl avaliadas. Ainda, é possível verificar o efeito da relação a/agl na porosidade superficial das amostras produzidas com cimento de alta resistência inicial, onde a maior relação a/agl ocasionou a presença de poros visíveis (figura 82 (c) e (d)), em comparação à menor relação a/agl (figura 82 (a) e (b)).

5.5.7 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento, a Relação a/agl e o Tipo de Cura

A figura 83 apresenta o efeito significativo de terceira ordem entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura na resistência à abrasão dos concretos, aos 63 dias de análise.

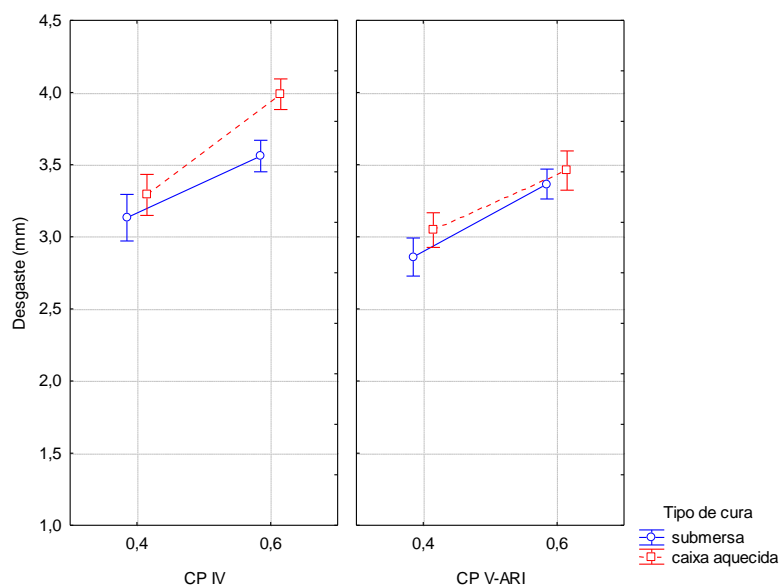


Figura 83: efeito da interação entre o tipo de cimento, a relação a/agl e o tipo de cura na resistência à abrasão do concreto - 1000 metros

Através da análise do gráfico é possível fazer algumas considerações a respeito do efeito da cura nos compósitos, para ambos os cimentos (CP IV; CP V-ARI) e relações a/agl (0,4; 0,6) empregados. Para a relação a/agl 0,4 a cura em caixa aquecida mostrou uma tendência de acréscimo nos índices de desgaste dos concretos, sendo significativa apenas para o cimento de alta resistência inicial (através do teste de Fisher), corroborando com os resultados de dureza superficial (item 5.3.8). Esse comportamento pode ser explicado, conforme mencionado no item 5.3.7, em função da velocidade das reações de hidratação das partículas de cimento (resistência inicial elevada, com menor potencial de desenvolvimento de resistência mecânica final) e da evaporação da água de amassamento. Conjuntamente a isto, sugere-se que nos compósitos com cimento pozolânico a maior coesão das misturas para a relação a/agl 0,4 minimizou a sedimentação das partículas de agregado graúdo, diminuindo a espessura da camada de argamassa que se forma na superfície, o que pode ter influenciado para uma redução do desgaste; logo, os agregados acabam contribuindo para um aumento na resistência à abrasão das amostras, conforme indicam alguns estudos publicados (ZORAN et al., 2012; SAIKIA; BRITO, 2014; KUMAR;

SHARMA, 2014). A figura 84 apresenta uma imagem comparativa da superfície das amostras de concreto que foram desgastadas, produzidas com cimento pozolânico, para as relações a/agl 0,4 e 0,6.

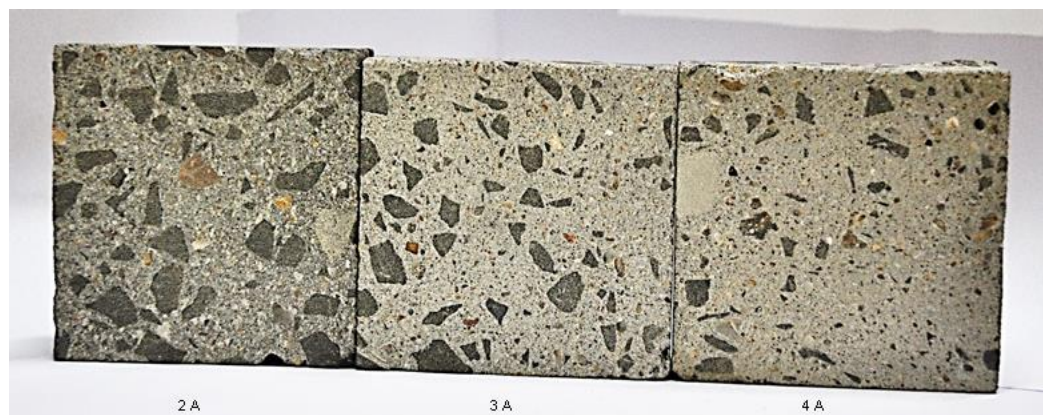


Figura 84: superfícies desgastadas de amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico, onde: (2A) a/agl 0,4 - 10 % sa; (3A) a/agl 0,6 - 0 % sa; (4A) a/agl 0,6 - 10 % sa

Analisando a figura observa-se uma diferença de distribuição de agregados causada pela maior coesão das misturas de concreto para a relação a/agl 0,4 (2A) em comparação às matrizes com relação a/agl 0,6 (3A; 4A). Este fato justifica-se em função da quantidade de agregados graúdos próximos a camada superficial, o que pode ter contribuído para uma redução nos índices de desgaste destas amostras, conforme mencionado.

Para a relação a/agl 0,6 a cura em caixa aquecida não afetou de forma significativa o desgaste dos compósitos com cimento de alta resistência inicial, o que pode estar relacionado ao efeito da redução da evaporação da água de amassamento, conforme já relatado nas análises feitas para a dureza superficial. No entanto, para os concretos com cimento pozolânico foi possível observar um acréscimo significativo no índice de desgaste das amostras, o que pode estar associado à sedimentação das partículas de agregado graúdo (figura 84), aumentando a espessura da camada de argamassa solicitada ao desgaste, às maiores taxas de exsudação e às menores resistências mecânicas encontradas.

5.6 POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

Para analisar a microestrutura da superfície dos concretos estudados e complementar as análises de desgaste por abrasão, foram adotadas algumas técnicas microestruturais, como a porosimetria por intrusão de mercúrio. Os resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio serão apresentados de forma gráfica, buscando-se avaliar a influência de cada

fator de controle na porosidade da superfície dos compósitos. Salienta-se que o comportamento verificado para as amostras de mesmo traço foi semelhante quanto às análises de porosimetria, logo, foram demonstrados nesse capítulo os resultados para apenas uma amostra de cada combinação. Ainda, enfatiza-se que esta técnica foi realizada de forma mais completa para os compósitos produzidos com cimento de alta resistência inicial. Para comparar a influência dos dois tipos de cimento na porosidade da superfície, um ponto da matriz experimental para o cimento pozolânico foi avaliado. No apêndice H podem ser encontrados todos os resultados obtidos para este ensaio.

A figura 85 apresenta os gráficos resultantes das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio, considerando o volume intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros.

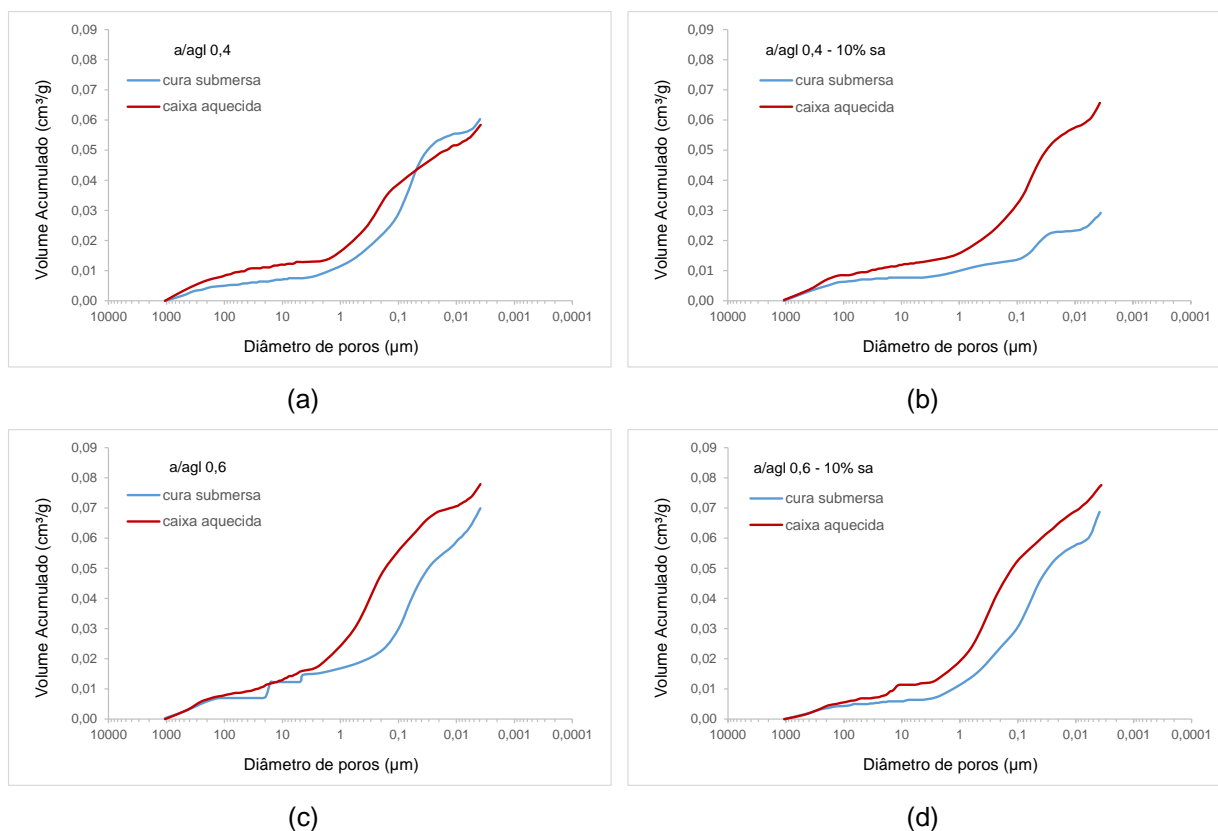


Figura 85: volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros para os concretos: (a) a/agl 0,4 - 0 % sa; (b) a/agl 0,4 - 10 % sa; (c) a/agl 0,6 - 0 % sa; (d) a/agl 0,6 - 10 % sa.

A figura 86 apresenta os gráficos resultantes das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio, considerando o volume de mercúrio intrudido em função do diâmetro dos poros.

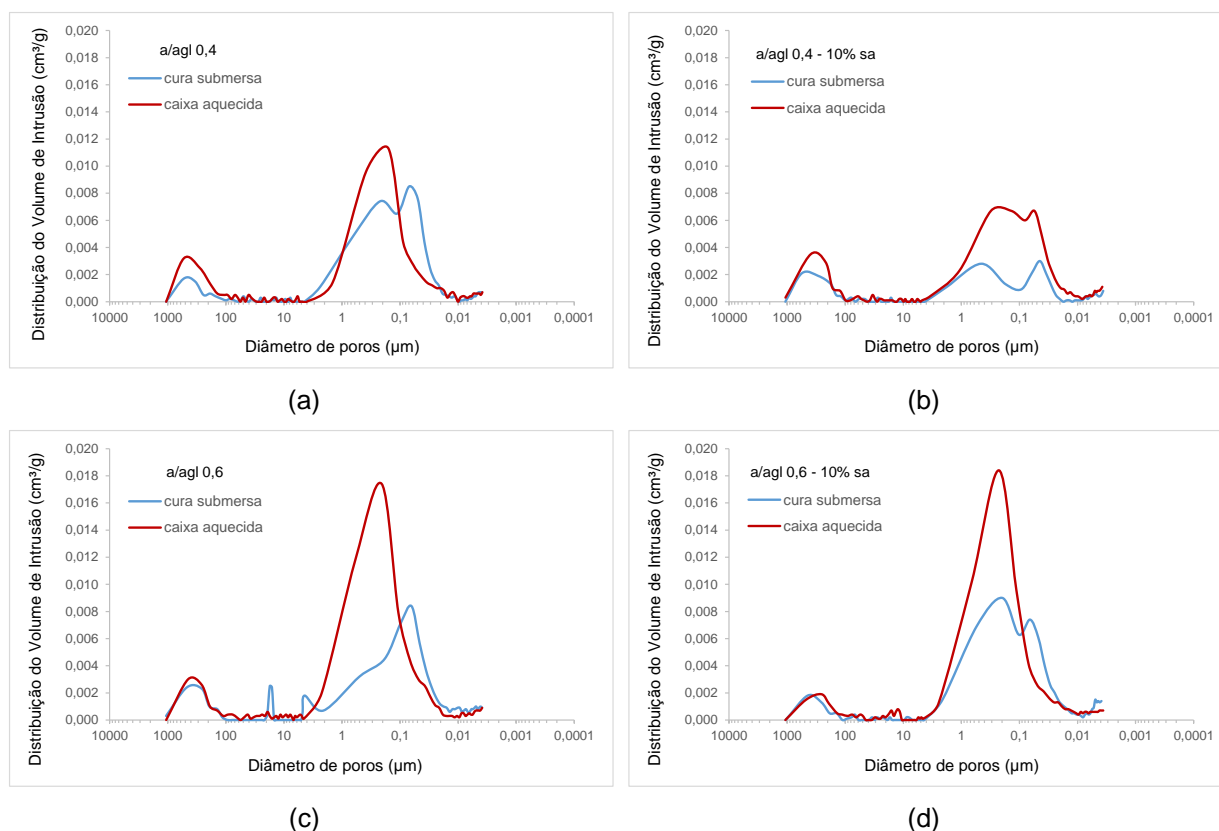


Figura 86: volume de mercúrio intrudido em função do diâmetro dos poros para os concretos: (a) a/agl 0,4 - 0 % sa; (b) a/agl 0,4 - 10 % sa; (c) a/agl 0,6 - 0 % sa; (d) a/agl 0,6 - 10 % sa.

Através da análise dos gráficos é possível fazer algumas considerações. Com relação à variação da relação a/agl observa-se que o aumento desse parâmetro promove uma tendência de acréscimo na porosidade total da camada superficial dos compósitos, fato que corrobora com as análises anteriores.

Complementarmente a estas análises, a presença de sílica ativa (sa) na composição dos concretos com relação a/agl 0,4 indica uma redução importante na porosidade total da superfície, principalmente na condição de cura submersa (figura 85 (b)). O valor máximo de volume intrudido para essa amostra foi de 0,0292 cm³/g, já na amostra de referência (a/agl 0,4 e 0 % sa), sob mesma condição de cura (figura 85 (a)), esse volume foi de 0,0603 cm³/g, significando um decréscimo da ordem de 51,6 % na porosidade total. Já para a relação a/agl 0,6 a sílica ativa presente não promoveu alterações perceptíveis na porosidade total das amostras, independente do tipo de cura adotada.

Considerando o efeito do tipo de cura, verifica-se através dos gráficos, que a cura submersa promoveu deslocamentos para a direita das curvas representativas do volume de mercúrio intrudido acumulado das amostras, significando que houve uma redução do tamanho de poros comparando-se com as amostras curadas em caixa aquecida, o que resultou em um

refinamento da estrutura porosa da superfície. Esse comportamento corrobora com as análises realizadas para a dureza superficial e resistência à abrasão dos concretos estudados.

Tratando de diâmetro médio dos poros sabe-se que esse parâmetro está relacionado ao volume acumulado de mercúrio intrudido cujo valor é igual à metade do volume total intrudido. A tabela 42 apresenta o diâmetro médio encontrado para cada uma das amostras avaliadas.

Tabela 42: diâmetro médio de poros

CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	ϕ médio (μm)
1B	0,4 - 0 - submersa	0,070
	0,4 - 0 - caixa aquecida	0,158
2B	0,4 - 10 - submersa	0,060
	0,4 - 10 - caixa aquecida	0,081
3B	0,6 - 0 - submersa	0,098
	0,6 - 0 - caixa aquecida	0,207
4B	0,6 - 10 - submersa	0,103
	0,6 - 10 - caixa aquecida	0,225

De acordo com a tabela é possível verificar que tanto o aumento da relação a/agl quanto a cura em caixa aquecida acarretaram em acréscimos no diâmetro médio dos poros das amostras. Ainda, constata-se que a presença da sílica ativa na relação a/agl 0,4 reduziu consideravelmente esse parâmetro, enquanto que para a relação a/agl 0,6 esse efeito não foi observado.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), a distribuição de tamanhos dos poros, e não a porosidade total, é o melhor critério para avaliação das características de vazios capilares maiores que 0,05 μm de uma pasta, referidos na literatura atual como macroporos, sendo admitidos como prejudiciais à resistência e à permeabilidade, enquanto vazios menores do que 0,05 μm , referidos como microporos, são admitidos como mais importantes para a retração por secagem e a fluência.

Sendo assim, foram calculados os percentuais de volume intrudido para poros maiores e menores que 0,05 μm , conforme tabela 43.

Tabela 43: % de volume intrudido em poros de diâmetro menor de 0,05 μm e acima de 0,05 μm

CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	$\phi > 0,05 \mu\text{m}$ (%)	$\phi < 0,05 \mu\text{m}$ (%)
1B	0,4 - 0 - submersa	71,97	28,03
	0,4 - 0 - caixa aquecida	75,68	24,31
2B	0,4 - 10 - submersa	64,38	35,62
	0,4 - 10 - caixa aquecida	63,16	36,83
3B	0,6 - 0 - submersa	63,51	36,48
	0,6 - 0 - caixa aquecida	80,23	19,77
4B	0,6 - 10 - submersa	63,46	36,53
	0,6 - 10 - caixa aquecida	74,87	25,13

Através da tabela percebe-se uma clara tendência de comportamento, onde a cura em caixa aquecida promoveu acréscimos nos percentuais de poros acima de 0,05 μm , fato que corrobora com a redução da dureza superficial e com a menor resistência à abrasão dos concretos. Além disso, é possível verificar o efeito benéfico da sílica ativa nas misturas com menor relação a/agl, onde o decréscimo nos percentuais de poros acima de 0,05 μm foi da ordem de 10,5 % para a condição de cura submersa, fato que se relaciona com as análises apresentadas anteriormente no item 5.5.5.

Neville (1997) salienta que devido à existência de poros de natureza diferentes, alguns dos quais contribuem para a permeabilidade e outros não, é importante fazer distinção entre porosidade e permeabilidade. Porosidade é a medida da proporção do volume total do concreto ocupada pelos poros. Se a porosidade for grande e se os poros estiverem interligados, estes contribuem para o deslocamento de fluidos através do concreto, de modo que a permeabilidade também passa a ser alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, dificultando o deslocamento de fluidos, a permeabilidade será baixa, ainda que com uma porosidade alta.

Com relação à interligação entre os poros, pode-se, através da determinação do diâmetro crítico de poro, obter-se informações a respeito. O diâmetro crítico de poro é definido como a menor dimensão de poros acima da qual se estabelece uma trajetória de poros conectados. Considera-se o ponto de mudança da curva, obtida pelo volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros, onde ocorre o início da sua verticalização, indicando uma maior facilidade de comunicação entre os poros.

Silveira (2007) relata que o diâmetro crítico é frequentemente citado como parâmetro de durabilidade, onde a conectividade dos poros influencia a entrada de agentes agressivos em concretos e argamassas, sendo que um diâmetro crítico menor significa maior dificuldade de acesso de agentes agressivos. A tabela 44 apresenta o diâmetro crítico para os diferentes traços avaliados.

Tabela 44: diâmetro crítico de poro

CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	ϕ crítico (μm)
1B	0,4 - 0 - submersa	2,37
	0,4 - 0 - caixa aquecida	1,45
2B	0,4 - 10 - submersa	0,09
	0,4 - 10 - caixa aquecida	1,07
3B	0,6 - 0 - submersa	2,08
	0,6 - 0 - caixa aquecida	2,23
4B	0,6 - 10 - submersa	2,11
	0,6 - 10 - caixa aquecida	2,48

Analisando-se a tabela é possível dizer que a menor relação a/agl (0,4) reduziu o diâmetro crítico de poro das amostras de concreto, minimizando a quantidade de poros interligados, com exceção da amostra 1B (a/agl 0,4 - 0 % - submersa) em relação a amostra 3B (a/agl 0,6 - 0 % - submersa). Esse mesmo comportamento também foi evidenciado pela presença da sílica ativa nas misturas com tal relação a/agl, no entanto, quando se considera essa adição nas amostras com relação a/agl 0,6, percebe-se uma leve inversão nos resultados. Somando-se a isto, o efeito do tipo de cura no diâmetro crítico também está evidente, onde a cura submersa mostrou maiores reduções na quantidade de poros interligados, desta forma melhorando a resistência à penetração de agentes agressivos na camada superficial dos concretos.

A figura 87 apresenta um comparativo entre os resultados das análises de porosimetria por intrusão de mercúrio para as amostras de referência (sem sílica ativa) produzidas com relação a/agl 0,4 e cimentos pozolânico e de alta resistência inicial, curadas de forma submersa.

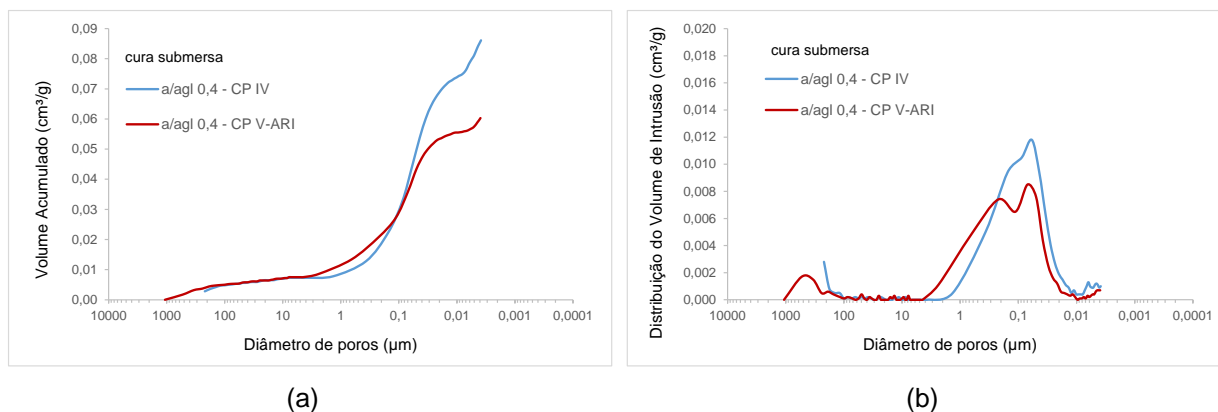


Figura 87: análises de porosimetria para amostras de concretos produzidos com cimento pozolânico e de alta resistência inicial (a) volume de mercúrio intrudido acumulado em função do diâmetro dos poros; (b) distribuição do volume de mercúrio intrudido em função do diâmetro dos poros

Através da análise dos gráficos é possível fazer algumas considerações. Com relação ao tipo de cimento observa-se que o cimento pozolânico ocasiona uma tendência de acréscimo na porosidade total da camada superficial dos compósitos (figura 87 (a)), fato que corrobora com as análises anteriores de redução da resistência à abrasão. No entanto, é possível verificar, através dos gráficos, que esse cimento promoveu deslocamentos para a direita das curvas representativas da distribuição de volume de mercúrio intrudido da amostra (figura 87 (b)), significando que houve uma redução do tamanho de poros comparando-se a amostra com cimento de alta resistência inicial, fato este relacionado à presença da pozolana, o que resultou em um refinamento da estrutura porosa da superfície. Conjuntamente à estas análises, para a amostra com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4, o valor máximo de volume intrudido foi de 0,0603 cm³/g, enquanto que para a amostra com cimento pozolânico, sob mesma condição de cura e relação a/agl, esse volume foi de 0,0861 cm³/g, significando um incremento da ordem de 42,8 % na porosidade total. A tabela 45 apresenta um comparativo entre os cimentos CP IV e CP V-ARI para os parâmetros de análise da porosimetria por intrusão de mercúrio.

Tabela 45: comparativo dos resultados de porosimetria entre amostras de concreto - CP IV x CP V-ARI

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO - CP IV x CP V-ARI						
Traços	Tcim - a/agl - Tsa (%) - Tcura	Porosidade Total (cm ³ /g)	φ médio (μm)	φ crítico (μm)	φ > 0,05 μm (%)	φ < 0,05 μm (%)
1A	CP IV - 0,4 - 0 - submersa	0,0861	0,060	1,35	50,41	49,59
1B	CP V-ARI - 0,4 - 0 - submersa	0,0603	0,070	2,37	71,97	28,03

Através da tabela é possível detectar que a amostra com cimento pozolânico (1A), em relação àquela com cimento de alta resistência inicial (1B), apresentou uma redução no diâmetro médio de poros, bem como uma redução no diâmetro crítico de poro. Além disso,

destaca-se que ocorreram reduções nos percentuais de poros classificados como macroporos ($> 0,05 \mu\text{m}$), o que está diretamente relacionado à presença da cinza volante na sua composição, conforme abordado anteriormente. Ressalta-se, ainda, que apesar de verificado esse comportamento, a porosidade total para essa amostra foi superior a observada para o cimento de alta resistência inicial, o que vai ao encontro das demais análises encontradas nessa pesquisa para as propriedades de superfície.

5.7 MICRODUREZA SUPERFICIAL

A microdureza da superfície dos concretos foi realizada através da técnica de indentação, conforme descrito no item 4.4.9. Os resultados de microdureza média para os concretos estudados encontram-se na tabela 46. Seguem, no apêndice I, todos os dados obtidos para este ensaio.

Tabela 46: resultados médios de microdureza por indentação

MICRODUREZA POR INDENTAÇÃO (GPa) - VALORES MÉDIOS				
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)				
Traços	a/agl - Tsa (%) - Posição	Médias	Desvio Padrão	CV (%)
1B	0,4 - 0 - S*	0,62	0,08	13,63
	0,4 - 0 - M*	0,58	0,06	10,01
2B	0,4 - 10 - S	0,61	0,06	10,35
	0,4 - 10 - M	0,61	0,07	11,43
3B	0,6 - 0 - S	0,43	0,01	3,05
	0,6 - 0 - M	0,46	0,06	12,98
4B	0,6 - 10 - S	0,33	0,06	18,13
	0,6 - 10 - M	0,43	0,05	12,55

S* - Superfície da amostra M* - Meio da amostra

A figura 88 apresenta os resultados da microdureza para os traços de concreto produzidos com cimento de alta resistência inicial, relações a/agl 0,4 e 0,6, com e sem a presença de sílica ativa em substituição à massa de cimento (0 %; 10 %). Cabe salientar que as análises para esta técnica foram efetuadas próximo à camada externa (S) das amostras, cerca de 1 mm de profundidade, e a aproximadamente 10 mm desta camada (M). Além disso, ressalta-se que o efeito da cura não foi estudado na aplicação dessa técnica, onde apenas as amostras extraídas de concretos submetidos à cura submersa foram testadas.

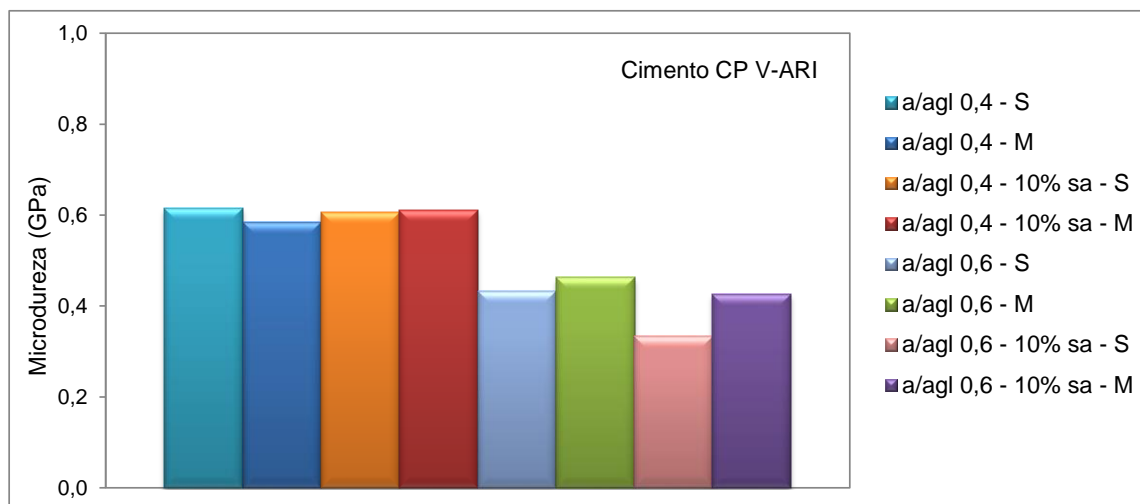


Figura 88: resultados médios de microdureza superficial para as amostras de concreto com cimento CP V-ARI

Como pode ser observado na tabela e na figura, a variação na relação a/agl causa influência direta na microdureza superficial das amostras, onde a relação a/agl 0,4 mostrou os maiores valores encontrados, comparativamente aos da relação a/agl 0,6. Analisando-se os dados em termos percentuais verifica-se, por exemplo, para a amostra com a/agl 0,4 - S, em relação a amostra com a/agl 0,6 - S, um decréscimo de 29,7 % na microdureza. Esse comportamento vai ao encontro do que foi relatado anteriormente para todas as propriedades já analisadas. Além disso, fica evidente a maior influência da relação a/agl , relacionando-se aos demais fatores, na microdureza dos concretos.

Quanto à utilização de sílica ativa nas misturas observa-se que para os concretos com menor relação a/agl (0,4) a sílica ativa parece melhorar a camada superficial, uma vez que igualou a microdureza das amostras indentadas a 10 mm de profundidade (M) com àquelas indentadas próximo à superfície (S). Esse fato pode estar relacionado à redução da exsudação destas misturas, o que reduziu a porosidade e formação de uma camada mais frágil na superfície dos compósitos; comportamento que se relaciona com a maior resistência à abrasão e maior dureza superficial encontradas. Já para a relação a/agl 0,6 a presença da sílica mostrou comportamento inverso, reduzindo a microdureza dos compósitos, principalmente para as análises próximas à superfície (S); fato que também corrobora com os resultados observados para a resistência à abrasão (item 5.5.5).

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método ANOVA. Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (relação a/agl , teor de substituição de sílica ativa e posição de indentação na amostra) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (microdureza superficial). Na tabela 47 está apresentada a análise de variância para os dados medidos.

Tabela 47: análise de variância (ANOVA) - microdureza superficial por indentação

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Relação a/agl (1)	1	0,48860	128,156	0,000000	S
Teor Sílica (2)	1	0,00965	2,532	0,118289	NS
Posição amostra (3)	1	0,00692	1,816	0,184217	NS
(1) x (2)	1	0,01935	5,074	0,028990	S
(1) x (3)	1	0,02193	5,753	0,020479	S
(2) x (3)	1	0,00838	2,198	0,144893	NS
(1) x (2) x (3)	1	0,00130	0,341	0,562016	NS
Erro	47	0,00381			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo

Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a tabela 47 observa-se que o efeito isolado da relação a/agl, bem como das interações de segunda ordem (relação a/agl e teor de sílica ativa; relação a/agl e posição de indentação na amostra) causaram efeito significativo na microdureza superficial.

A seguir são demonstrados os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) das variáveis controláveis que se mostraram significativas, bem como de suas interações, na microdureza superficial dos concretos.

5.7.1 Influência da Relação a/agl

A figura 89 apresenta o efeito isolado significativo da relação a/agl na microdureza superficial dos concretos, através da análise de variância.

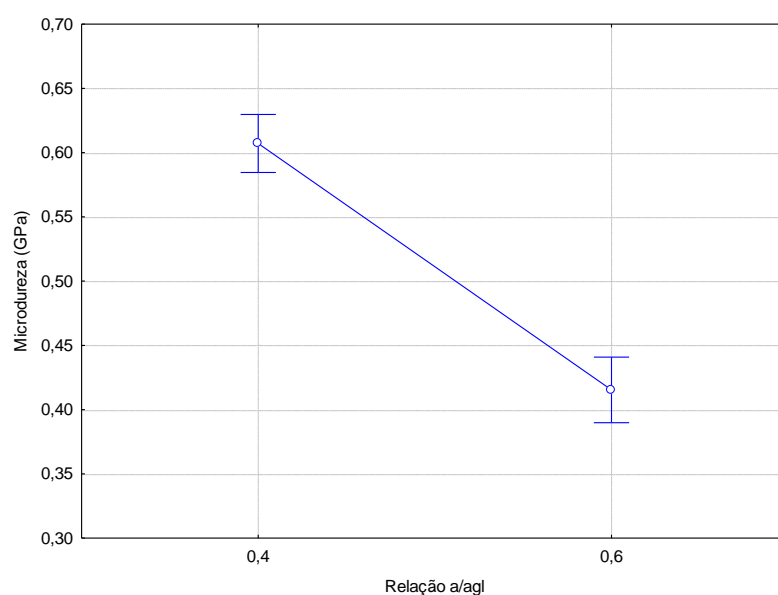


Figura 89: efeito isolado da relação a/agl na microdureza superficial do concreto

Como pode ser verificado no gráfico, a relação a/agl 0,6, comparando-se com a relação a/agl 0,4, causou um decremento da ordem de 31,8 % na microdureza superficial. Esse fato está relacionado aos resultados encontrados para as demais análises realizadas e mostra que a microdureza superficial tem relação direta com a qualidade da matriz de concreto.

5.7.2 Influência da Interação entre a Relação a/agl e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A influência significativa da interação entre a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa na microdureza superficial está apresentada na figura 90, a qual foi obtida através da análise de variância (ANOVA).

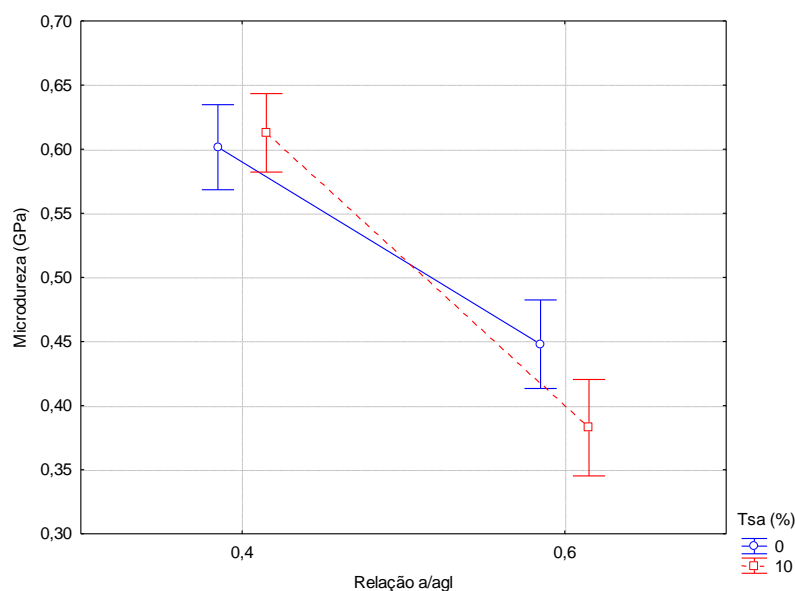


Figura 90: efeito da interação entre o a relação a/agl e o teor de substituição de sílica ativa na microdureza superficial do concreto

Através da figura verifica-se que a substituição de sílica ativa em 10,0 % sobre a massa de cimento promoveu reduções significativas na microdureza superficial das amostras de concreto com relação a/agl 0,6. Tal decremento foi de aproximadamente 15,3 %. Esse mesmo comportamento foi detectado para a resistência à abrasão das amostras, onde os maiores índices de desgaste foram encontrados para estas matrizes. Somando-se a isto, a presença da sílica não reduziu de forma perceptível a porosidade total da superfície destas amostras nas análises de porosimetria por intrusão de mercúrio, aumentando o diâmetro médio de poros e crítico das mesmas. Esses resultados não seguem um padrão e não eram esperados.

5.7.3 Influência da Relação a/agl e da Posição de Indentação na Amostra

A figura 91 apresenta o efeito significativo entre a interação da relação a/agl com a posição de indentação nas amostras de concreto, frente à microdureza superficial. Tal figura foi obtida através da análise de variância (ANOVA).

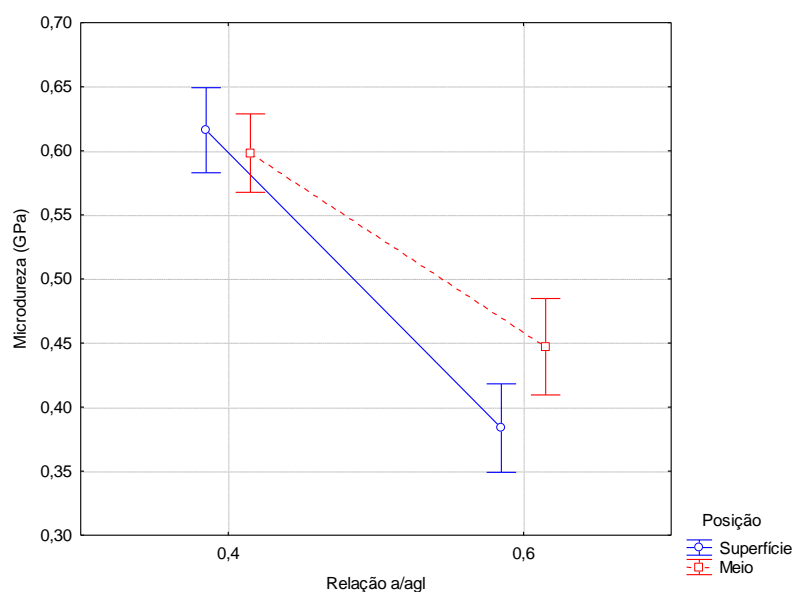


Figura 91: efeito da interação entre a relação a/agl e a posição de indentação na microdureza superficial do concreto

A figura demonstra que para a relação a/agl 0,6 os maiores índices de microdureza foram detectados para os pontos indentados mais afastados da superfície (10 mm a partir da camada superficial das amostras). Fato que pode estar relacionado a maior porosidade dessa superfície, em função dos maiores percentuais de exsudação desses compósitos, uma vez que para as camadas mais internas esse efeito é menos intenso. Para as amostras com menor relação a/agl (0,4) não ocorreram diferenças significativas quanto à posição de indentação, o que também pode estar ligado ao efeito da exsudação, o qual foi menor para estas misturas (item 5.4).

Como mencionado no programa experimental dessa pesquisa, para avaliar a influência do tipo de cimento na qualidade da camada superficial dos compósitos foi tomado apenas um ponto da matriz experimental para o cimento CP IV (relação a/agl 0,4, sem sílica ativa, submetido a cura submersa). A tabela 48 apresenta um comparativo entre os resultados médios da microdureza realizada nas amostras produzidas com cimento pozolânico e cimento de alta resistência inicial. Cabe salientar que as análises para esta técnica foram

efetuadas próximo à camada externa (S) das amostras, cerca de 1 mm de profundidade, e a aproximadamente 10 mm desta camada (M).

Tabela 48: comparativo entre os resultados de microdureza superficial para os concretos - CP IV x CP V-ARI

MICRODUREZA POR INDENTAÇÃO (GPa) - VALORES MÉDIOS									
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)					CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)				
Traços	a/agl - Tsa (%) - Posição	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Traços	a/agl - Tsa (%) - Posição	Médias	Desvio Padrão	CV (%)
1A	0,4 - 0 - S*	0,49	0,08	15,45	1B	0,4 - 0 - S*	0,62	0,08	13,63
	0,4 - 0 - M*	0,47	0,06	13,70		0,4 - 0 - M*	0,58	0,06	10,01

S* - Superfície da amostra M* - Meio da amostra

Como pode ser observado na tabela, o tipo de cimento causa influência direta na microdureza superficial das amostras, onde o cimento Portland de alta resistência inicial mostrou os maiores valores encontrados, comparativamente ao pozolânico. Analisando-se os dados em termos percentuais verifica-se, por exemplo, para a amostra com cimento CP IV, a/agl 0,4 - S, em relação a amostra com cimento CP V-ARI, a/agl 0,4 - S, um acréscimo de 26,5 % na microdureza. Esse comportamento vai ao encontro do que foi relatado anteriormente para todas as propriedades já analisadas.

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método ANOVA. Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (tipo de cimento e posição de indentação na amostra) e as suas interações causam efeito significativo na variável de resposta (microdureza superficial). Na tabela 49 está apresentada a análise de variância para os dados medidos.

Tabela 49: análise de variância (ANOVA) - microdureza superficial - CP IV x CP V-ARI

	GDL	MQ	F (calc)	p	SIGNIFICÂNCIA
Tipo de Cimento (1)	1	0,13971	27,829	0,000008	S
Posição amostra (2)	1	0,00637	1,269	0,267752	NS
(1) x (2)	1	0,00034	0,067	0,796894	NS
Erro	34	0,00502			

GDL: grau de liberdade (n-1) MQ: média quadrada F(calc): valor calculado de F p: nível de significância S: valor significativo NS: valor não significativo Se $p < 5\%$ = efeito significativo

Analisando a tabela observa-se que apenas o efeito isolado do tipo de cimento causou efeito significativo na microdureza superficial. A seguir são demonstrados os resultados obtidos pela análise de variância (ANOVA) na microdureza superficial dos concretos.

A figura 92 apresenta o efeito isolado significativo do tipo de cimento na microdureza superficial dos concretos.

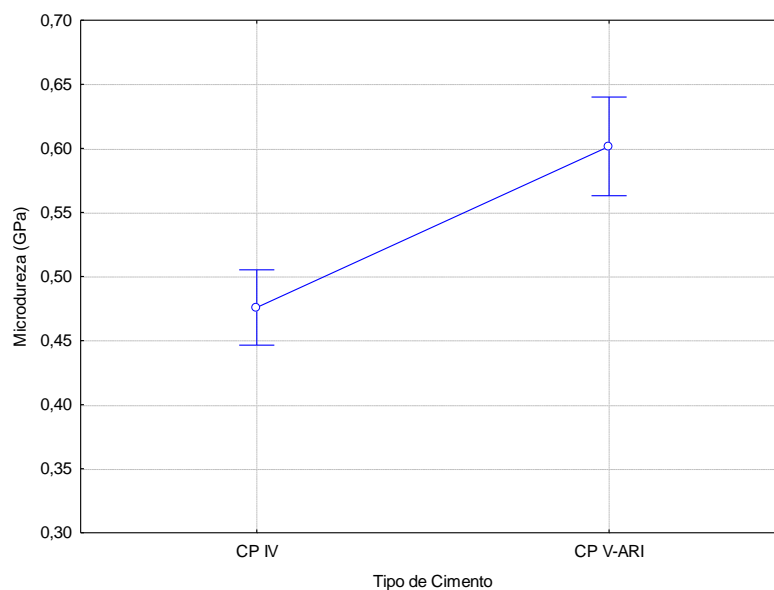


Figura 92: efeito isolado do tipo de cimento na microdureza superficial dos concretos

Através da análise da figura, verifica-se a influência do tipo de cimento na variável de resposta analisada, conforme esperado. Os resultados da microdureza superficial para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial foram significativamente maiores se comparados com os produzidos com cimento pozolânico, conforme mostram os dados analisados pelo método ANOVA. Este comportamento também foi observado para as demais propriedades estudadas nesta pesquisa. Os acréscimos promovidos pelo cimento CP V-ARI foram de aproximadamente 27,7 % em comparação ao cimento CP IV, na idade de 63 dias.

5.8 DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL À LASER

A digitalização tridimensional à laser da superfície das amostras de concreto foi realizada conforme descrito no item 4.4.7. Os resultados dessa técnica estão apresentados de forma gráfica, buscando-se complementar as análises do desgaste dos compósitos. Como o comportamento verificado para as amostras de mesmo traço foi semelhante quanto a estas análises, foram demonstrados nesse capítulo os resultados para apenas uma amostra de cada combinação. A tabela 50 apresenta os resultados de desgaste medidos através da digitalização da superfície das amostras de concreto produzidos com cimento pozolânico e de alta resistência inicial.

Tabela 50: digitalização tridimensional à laser - índices de desgaste

DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL À LASER - ÍNDICES DE DESGASTE (mm)							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Médias	Desvio Padrão
1A	0,4 - 0 - submersa	3,84	0,46	1B	0,4 - 0 - submersa	2,48	0,30
	0,4 - 0 - caixa aquecida	4,96	0,36		0,4 - 0 - caixa aquecida	3,52	0,28
2A	0,4 - 10 - submersa	2,38	0,30	2B	0,4 - 10 - submersa	1,79	0,46
	0,4 - 10 - caixa aquecida	2,21	0,66		0,4 - 10 - caixa aquecida	2,36	0,32
3A	0,6 - 0 - submersa	4,28	0,25	3B	0,6 - 0 - submersa	3,74	0,34
	0,6 - 0 - caixa aquecida	3,90	0,33		0,6 - 0 - caixa aquecida	3,14	0,36
4A	0,6 - 10 - submersa	3,73	0,30	4B	0,6 - 10 submersa	3,06	0,21
	0,6 - 10 - caixa aquecida	3,78	0,22		0,6 - 10 caixa aquecida	4,16	0,32

A figura 93 apresenta os resultados de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,4, submetidas às condições de cura submersa e caixa aquecida.

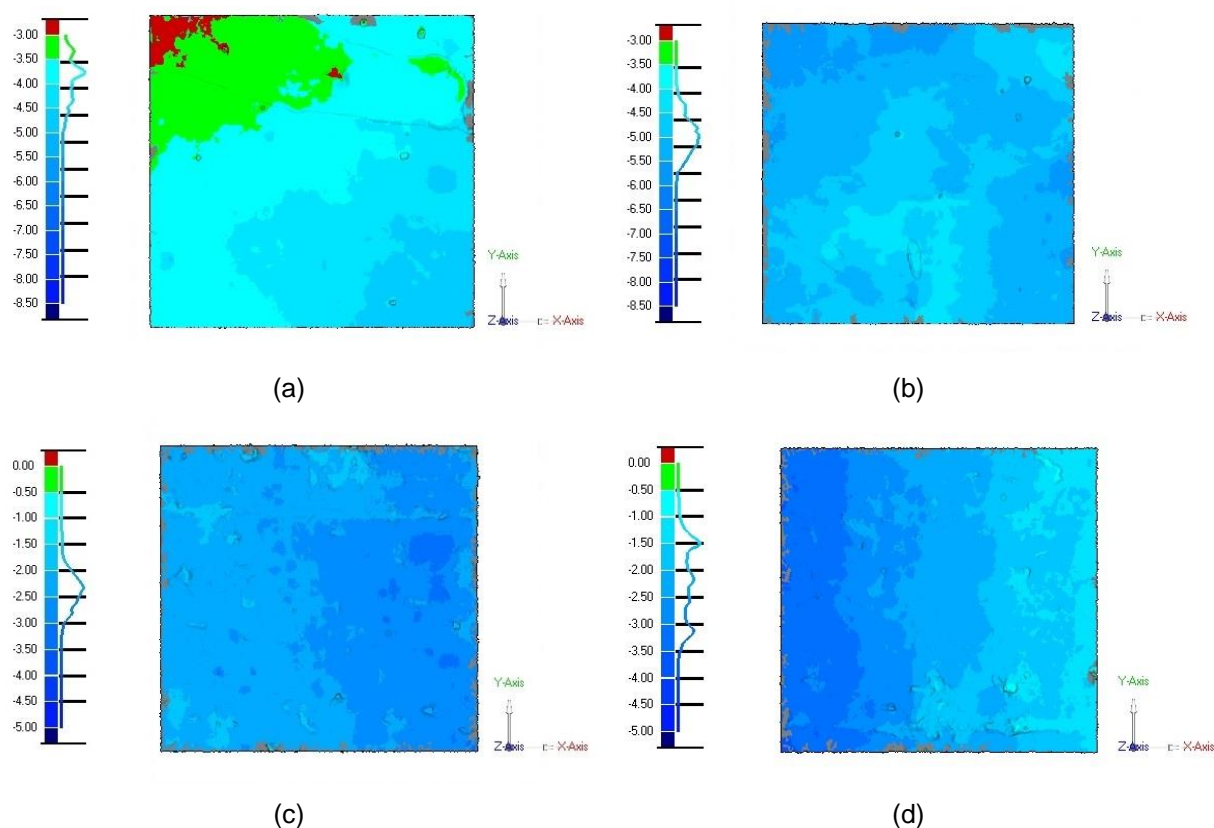


Figura 93: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,4: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida

Analisando a tabela 50 e os gráficos da figura 93 é possível verificar os menores índices de desgaste para as amostras com 10 % de sílica ativa (sa). Além disso, a presença dessa adição minimizou os efeitos negativos promovidos pela cura em caixa aquecida para os concretos produzidos com cimento pozolânico e relação a/agl 0,4. Esse comportamento também foi verificado para o ensaio de resistência à abrasão e pode ser visualizado no item 5.5.6.

A figura 94 apresenta os resultados de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,6, submetidas às condições de cura submersa e caixa aquecida.

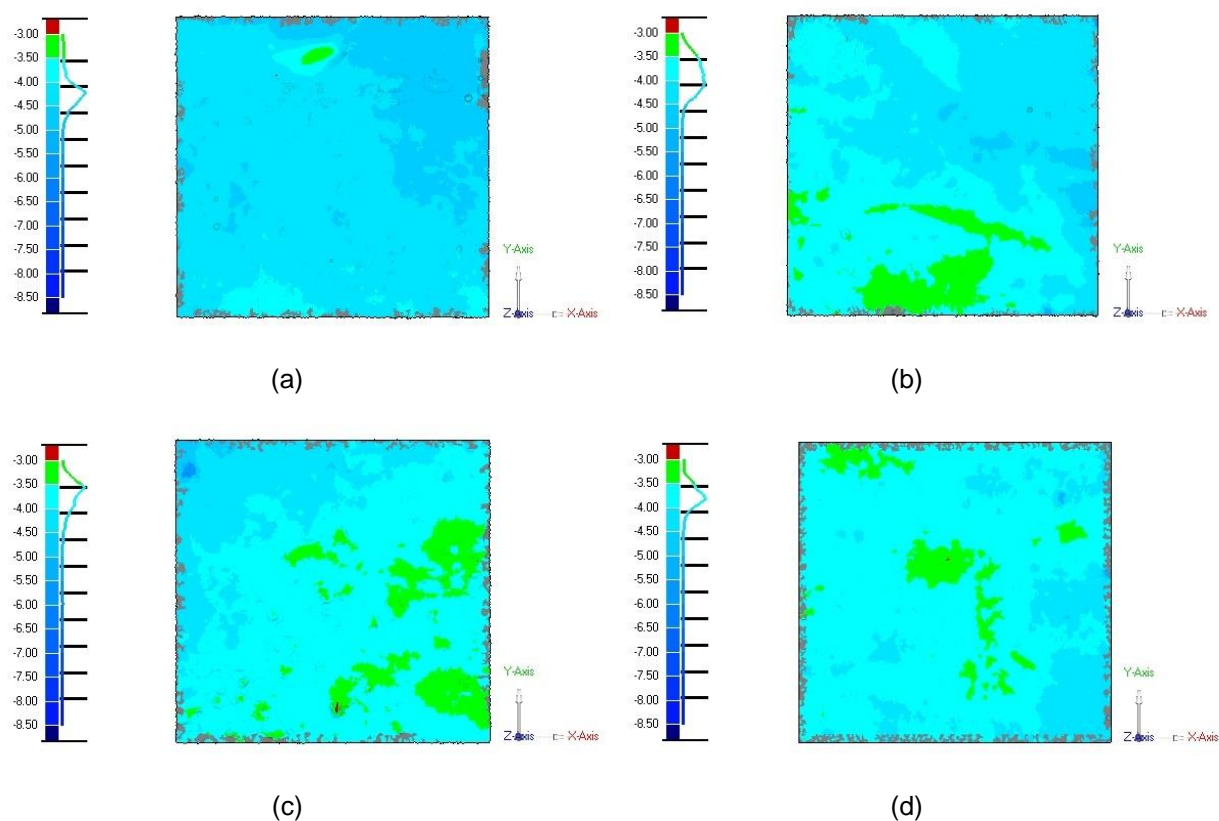


Figura 94: Índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento pozolânico e relação a/agl 0,6: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida

Através da figura observa-se o menor efeito da sílica ativa na resistência à abrasão dos concretos com relação a/agl 0,6 produzidos com cimento pozolânico; comportamento já relatado anteriormente. Ainda, observa-se que a cura em caixa aquecida aumentou os índices de desgaste medidos, corroborando com os demais resultados apresentados nessa pesquisa.

Em análise comparativa das figuras 93 e 94, destaca-se que as amostras com maior relação a/agl (0,6) apresentaram um desgaste mais homogêneo da superfície, fato que pode estar relacionado à formação de uma camada de argamassa mais espessa decorrente da sedimentação das partículas de agregado graúdo em função da menor coesão e maior exsudação dessas misturas. Logo, além dos agregados contribuírem para um aumento na resistência à abrasão das amostras, conforme indicam alguns estudos publicados (ZORAN et al., 2012; SAIKIA; BRITO, 2014), acabam gerando desgastes diferenciais na superfície dos concretos. Esse comportamento corrobora com resultados discutidos no item 5.5.7.

A figura 95 apresenta os resultados de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4, submetidas às condições de cura submersa e caixa aquecida.

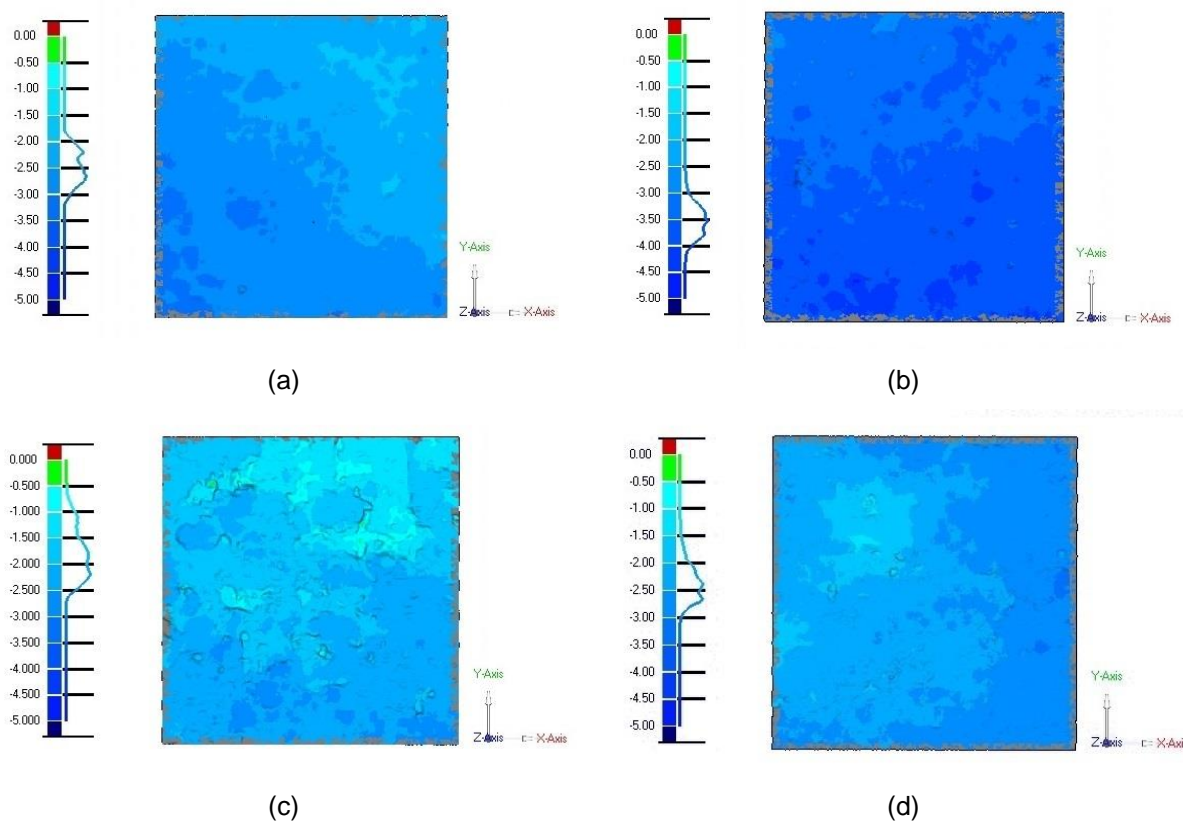


Figura 95: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida

De acordo com os gráficos é possível observar um comportamento semelhante ao apresentado anteriormente naqueles da figura 93, onde verifica-se claramente os efeitos benéficos da sílica ativa e da cura submersa nas amostras com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4, submetidas ao desgaste por abrasão.

A figura 96 apresenta os resultados de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6, submetidas às condições de cura submersa e caixa aquecida.

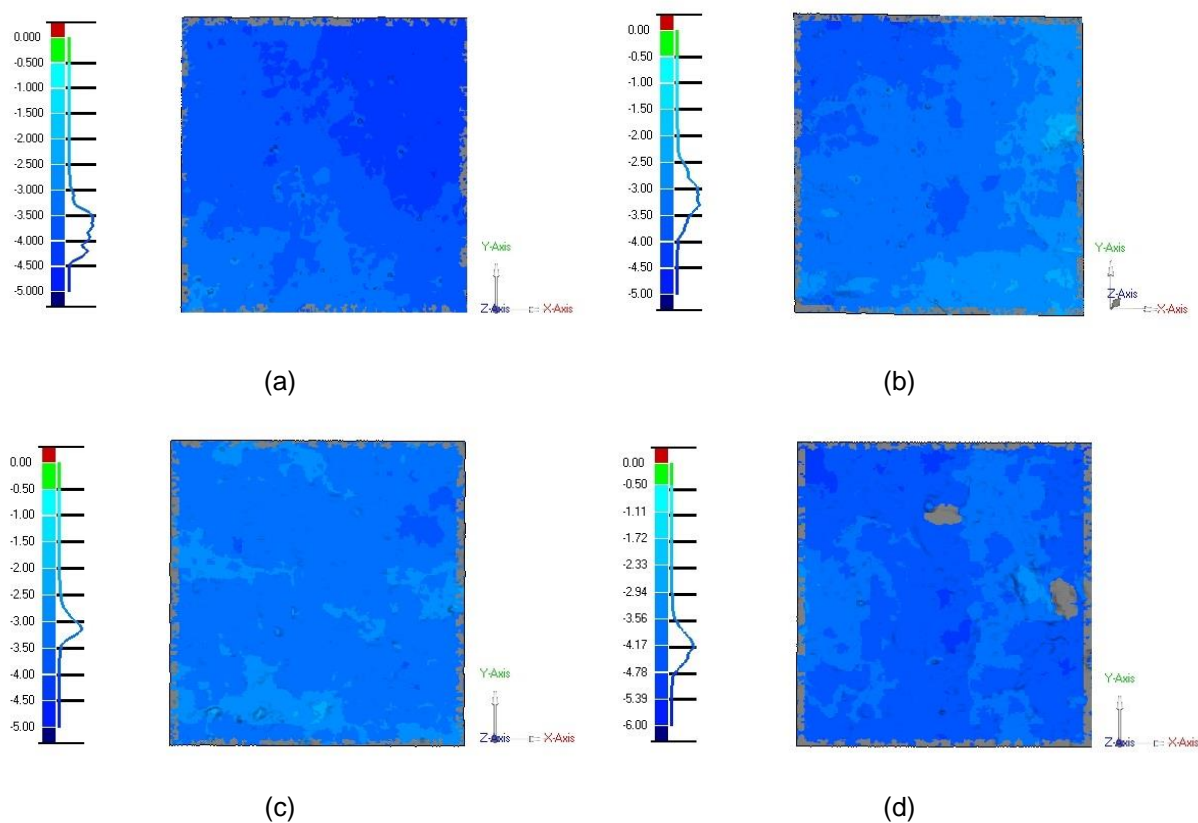


Figura 96: índices de desgaste medidos através da digitalização tridimensional à laser das amostras de concreto produzidas com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6: (a) 0 % sa - cura submersa; (b) 0 % sa - caixa aquecida; (c) 10 % sa - cura submersa; (d) 10 % sa - caixa aquecida

Através da figura verifica-se que a cura em caixa aquecida para os concretos com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6, sem sílica ativa, gerou uma leve tendência de redução no desgaste superficial, o que pode estar relacionado a uma diminuição da evaporação da umidade das camadas externas do compósito. Tal comportamento também foi encontrado para as análises da dureza e microdureza superficial. Ainda, a presença da sílica nessas matrizes não promoveu melhoras perceptíveis, o que corrobora com os resultados de resistência à abrasão obtidos pelo método da norma brasileira, de microdureza e porosimetria por intrusão de mercúrio.

5.9 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO COM AS DEMAIS PROPRIEDADES ANALISADAS

A tabela 51 apresenta um resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta estudadas nesta pesquisa, em percentual, frente aos fatores controláveis analisados de forma isolada.

Tabela 51: resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta frente aos fatores controláveis analisados isoladamente

Fatores Controláveis		Variáveis de Resposta (%)							
		Resistência à Compressão	Resistência à Tração na Flexão	Dureza Superficial - Índice Esclerométrico	Exsudação	Abrasão - Índice de Desgaste	Porosimetria - Porosidade Total	Microdureza - Indentação	Digitalização Tridimensional - Índice de Desgaste
Tcim	CP IV	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência
	CP V-ARI	↑ 14	↑ 12	↑ 9	↓ 40	↓ 9	↓ 30	↑ 28	↓ 16
a/agl	0,4	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência
	0,6	↓ 30	↓ 29	↓ 15	↑ 407	↑ 16	↑ 37	↓ 32	↑ 26
Tsa (%)	0	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência	referência
	10	↑ 17	↑ 37	↑ 5	↓ 85	↓ 3	↓ 9	↓ 5	↓ 21
Tcura	submersa	-	-	referência	-	referência	referência	-	referência
	caixa aquecida	-	-	↓ 3	-	↑ 6	↑ 22	-	↑ 10

Conforme a tabela observa-se que, para uma mesma idade de análise (63 dias), o uso do cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) resultou em uma melhoria de todas as propriedades estudadas. Salienta-se que o índice de desgaste para os compósitos, segundo o método da norma brasileira, foi reduzido em média 9 % para este tipo de cimento, em comparação ao cimento pozolânico, enquanto a resistência à compressão foi majorada em 14 %. Sugere-se que em igualdade de resistência esta diferença verificada para os cimentos talvez não ocorra.

Analisando o efeito da variação da relação a/agl é possível observar que esse fator promoveu as alterações mais marcantes sobre os parâmetros avaliados, sendo que para a resistência à abrasão pelo método da norma brasileira foi detectado um acréscimo médio de 16 % no desgaste das amostras com relação a/agl 0,6, comparadas àquelas com relação a/agl 0,4.

O fator teor de substituição de sílica ativa (Tsa) teve influência significativa nas propriedades mecânicas, na dureza superficial, na resistência à abrasão e, principalmente, na exsudação dos concretos. Quanto às propriedades microestruturais esse fator também promoveu algumas tendências de comportamento, onde para as análises de porosimetria por intrusão de mercúrio a presença da sílica reduziu a porosidade total da camada superficial das amostras em aproximadamente 9 %. Já para a microdureza por indentação foram observados decréscimos de 5 %. Salienta-se que a sílica ativa presente nas matrizes

cimentícias mostrou efeitos distintos para as diferentes relações a/agl (0,4; 0,6) estudadas, onde na maior relação a/agl o efeito benéfico não ficou evidenciado. Este comportamento foi verificado, principalmente nas propriedades de superfície (dureza superficial, resistência à abrasão, porosimetria e microdureza), porém não segue um padrão e não era esperado.

Finalmente, quanto ao tipo de cura empregada, os concretos submetidos a cura em caixa aquecida, de uma forma geral, mostraram os piores resultados obtidos.

Com todos os dados obtidos, buscou-se fazer correlações entre os resultados de resistência à abrasão e os resultados encontrados para as demais propriedades estudadas (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, dureza superficial, exsudação, porosimetria por intrusão de mercúrio e microdureza superficial).

No caso da resistência à compressão uniaxial, como apresentado no item 5.1, todos os fatores de controle (tipo de cimento, relação a/agl e teor de substituição de sílica ativa) tiveram efeito significativo sobre os resultados obtidos. A tabela 52 apresenta os resultados médios de resistência à compressão em função da relação a/agl, e a sua relação com os índices de desgaste medidos. A figura 97 resume os resultados em forma gráfica.

Tabela 52: relação dos resultados médios de resistência à compressão uniaxial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl

a/agl	Resistência à Compressão (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0,4	54,9	58,6	3,1	2,9
0,6	35,4	44,8	3,6	3,4
Média	45,2	51,7	3,3	3,1

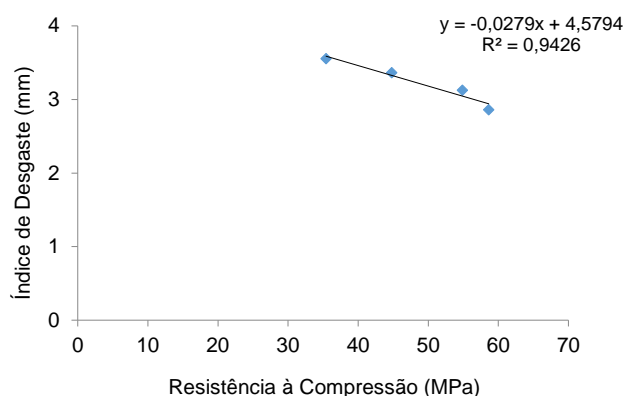


Figura 97: correlação entre a resistência à abrasão e à compressão do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl

Através da análise da figura verifica-se que existe uma correlação importante entre a resistência à compressão e o desgaste por abrasão dos concretos, considerando os fatores controláveis tipo de cimento (Tcim) e relação a/agl. Como se pode observar, o índice de desgaste superficial por abrasão tende a diminuir com o aumento da resistência à compressão do concreto, como esperado.

A tabela 53 mostra os resultados médios de resistência à compressão em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa, e sua relação com os índices de desgaste. Enquanto que a figura 98 demonstra estes resultados graficamente.

Tabela 53: relação dos resultados médios de resistência à compressão uniaxial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

Tsa (%)	Resistência à Compressão (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0	41,8	48,3	3,4	3,1
10	48,5	55,2	3,3	3,1
Média	45,2	51,7	3,3	3,1

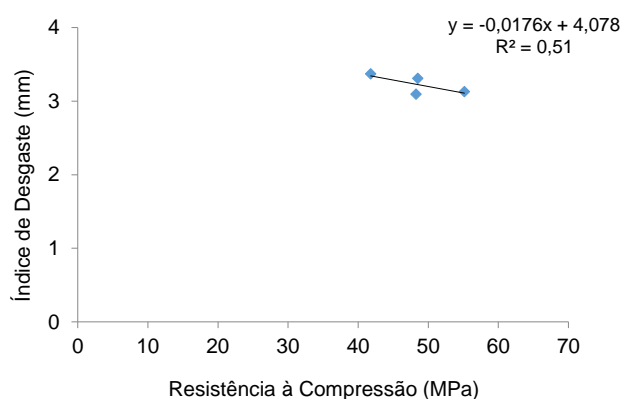


Figura 98: correlação entre a resistência à abrasão e à compressão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de substituição de sílica ativa

Como se pode verificar na figura, existe uma tendência de comportamento entre o desgaste por abrasão e a resistência à compressão dos concretos, considerando o Tcim e o Tsa. No entanto, tal correlação foi mais baixa comparando-se à realizada na figura 97 para as mesmas variáveis de resposta, a qual foi obtida a partir dos fatores Tcim e relação a/agl.

Para a resistência à tração na flexão, conforme apresentado no item 5.2, tanto o tipo de cimento, quanto a relação a/agl e o teor de sílica ativa mostraram efeito significativo sobre os resultados obtidos. Salienta-se que não houve uma correlação expressiva entre a

resistência à abrasão e à tração do concreto, considerando o tipo de cimento e o teor de sílica ativa, logo esses resultados não serão apresentados.

A tabela 54 apresenta os resultados médios de resistência à tração na flexão em função do tipo de cimento e da relação a/agl, bem como a sua relação com os índices de desgaste medidos. A figura 99 resume os resultados de forma gráfica.

Tabela 54: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl

a/agl	Resistência à Tração (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0,4	6,3	7,0	3,1	2,9
0,6	4,4	5,1	3,6	3,4
Média	5,3	6,1	3,3	3,1

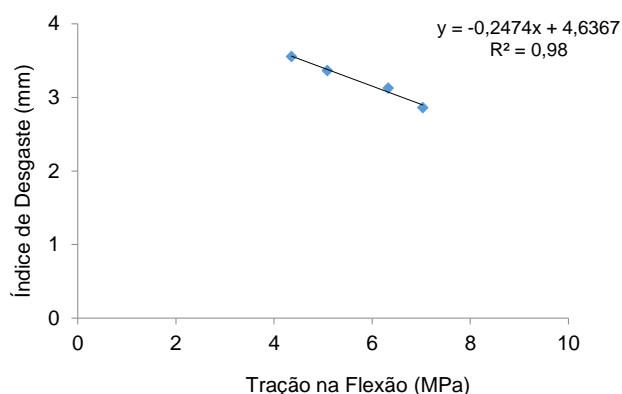


Figura 99: correlação entre a resistência à abrasão e à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl

Conforme a figura pode-se verificar que existe uma tendência clara de comportamento entre a resistência à tração na flexão e o desgaste por abrasão dos concretos, considerando os fatores controláveis T_{cim} e relação a/agl. Ainda, conforme a figura, o índice de desgaste superficial por abrasão tende a diminuir com o aumento da resistência à tração na flexão do concreto, como esperado.

Quanto à dureza superficial por esclerometria, como apresentado no item 5.3, todos os fatores controláveis (tipo de cimento, relação a/agl, teor de sílica ativa e tipo de cura) tiveram efeito significativo sobre os resultados obtidos. A tabela 55 apresenta os resultados médios de dureza superficial em função do tipo de cimento e da relação a/agl, e a sua relação com os índices de desgaste obtidos. A figura 100 resume os resultados graficamente.

Tabela 55: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl

a/agl	Dureza Superficial (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0,4	47,8	52,7	3,2	3,0
0,6	41,1	43,9	3,8	3,4
Média	44,5	48,3	3,5	3,2

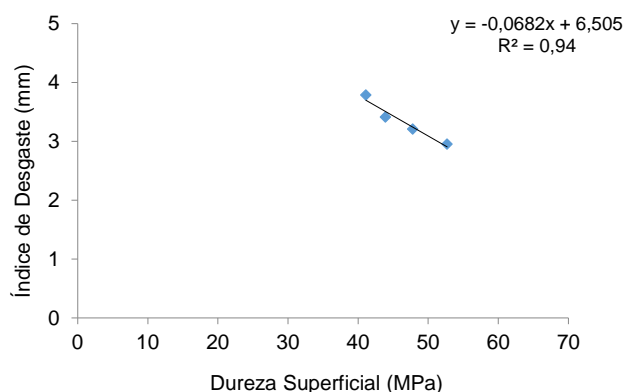


Figura 100: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl

Analisando a figura verifica-se que existe uma tendência clara de comportamento entre a dureza superficial e o desgaste por abrasão dos concretos, considerando os fatores controláveis T_{cim} e relação a/agl. Como se pode observar, o índice de desgaste por abrasão tende a diminuir com o aumento da dureza superficial do concreto, onde essa correlação mostrou ter um coeficiente de determinação de 0,94.

A tabela 56 mostra os resultados médios de dureza superficial em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa, e sua relação com os índices de desgaste medidos. Enquanto que a figura 101 demonstra estes resultados de forma gráfica.

Tabela 56: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica

Tsa (%)	Dureza Superficial (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0	43,2	47,4	3,6	3,2
10	45,7	49,2	3,4	3,2
Média	44,5	48,3	3,5	3,2

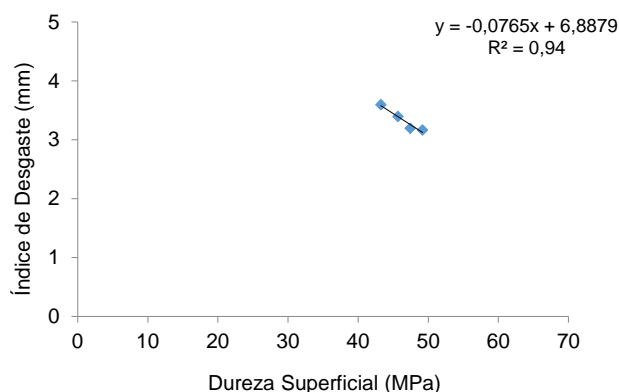


Figura 101: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

Segundo a figura é possível constatar que existe uma correlação direta entre a resistência à abrasão e a dureza superficial dos concretos, considerando o tipo de cimento e teor de substituição de sílica ativa. Para as análises de correlação realizadas anteriormente, entre a resistência à compressão e à tração na flexão com a abrasão, tal comportamento não foi observado, evidenciando a maior relação das propriedades de superfície com o desgaste por abrasão.

Na tabela 57 estão apresentados os resultados médios de dureza superficial em função do tipo de cimento e da cura, e sua relação com os índices de desgaste medidos. Já na figura 102 estes resultados estão expressos de forma gráfica.

Tabela 57: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da cura

Tcura	Dureza Superficial (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
submersa	44,5	49,4	3,3	3,1
caixa aquecida	44,4	47,3	3,7	3,3
Média	44,5	48,3	3,5	3,2

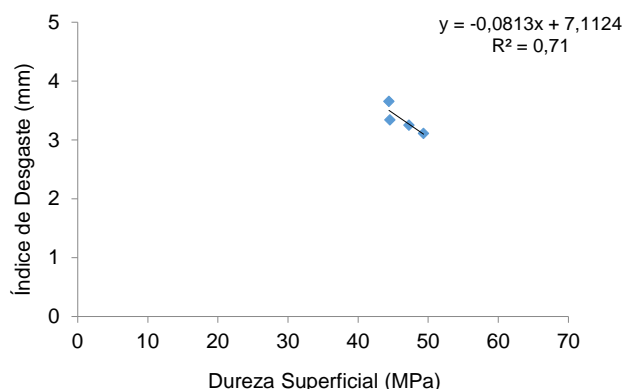


Figura 102: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e da cura

Em análise da figura verifica-se que o tipo de cura, para ambos os cimentos avaliados, promoveu comportamentos semelhantes na resistência à abrasão e na dureza superficial dos compósitos, indicando que existe uma correlação importante entre esses parâmetros. Cabe salientar que tal correlação foi mais baixa comparativamente às anteriores.

Para a exsudação das misturas não foram realizadas análises estatísticas, mas julgou-se relevante avaliar as possíveis correlações existentes com a resistência à abrasão, considerando os fatores de controle avaliados (tipo de cimento, relação a/agl e teor de sílica ativa). Salienta-se que não se observou uma tendência de comportamento entre os resultados obtidos para a exsudação e os índices de desgaste medidos com relação ao teor de sílica ativa. Logo, não foi possível a obtenção de uma curva de correlação com um bom coeficiente de determinação.

A tabela 58 mostra os resultados médios de exsudação em função do tipo de cimento e da relação a/agl, e sua relação com os índices de desgaste. Enquanto que a figura 103 demonstra estes resultados graficamente.

Tabela 58: relação dos resultados médios da exsudação com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e da relação a/agl

a/agl	Exsudação (%)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0,4	2,5	0,7	3,1	2,9
0,6	7,9	5,4	3,6	3,4
Média	5,2	3,1	3,3	3,1

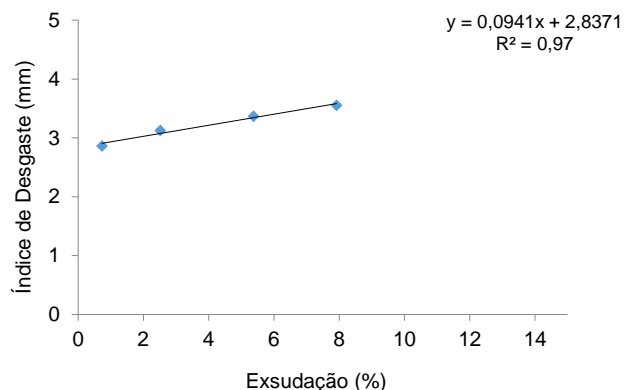


Figura 103: correlação entre a resistência à abrasão e a exsudação do concreto em função do tipo de cimento e da relação a/agl

A figura demonstra claramente o efeito da relação a/agl nos parâmetros avaliados, indicando a forte correlação existente, com coeficiente de determinação de 0,97. Esse comportamento já foi encontrado nas demais análises, e mostra que a relação a/agl promove maior influência na qualidade da camada da superfície dos concretos, comparativamente às condições de cura e a presença da sílica ativa, independente do tipo de cimento empregado.

A tabela 59 apresenta os resultados de porosimetria e sua relação com os índices de desgaste. Na figura 104 está apresentado o comportamento da resistência à abrasão em função da porosimetria por intrusão de mercúrio. Esse gráfico foi obtido através de todos os resultados de porosimetria relacionados com os índices de desgaste medidos, considerando a relação a/agl (0,4; 0,6), o teor de substituição de sílica ativa (0 %; 10 %) e o tipo de cura (submersa; caixa aquecida).

Tabela 59: relação dos resultados de porosimetria com os índices de desgaste medidos

CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Volume de Mercúrio Intrudido Acumulado (cm ³ /g)	Índice de Desgaste (mm)
1B	0,4 - 0 - submersa	0,060	3,04
	0,4 - 0 - caixa aquecida	0,058	3,28
2B	0,4 - 10 - submersa	0,029	2,68
	0,4 - 10 - caixa aquecida	0,066	2,81
3B	0,6 - 0 - submersa	0,070	3,15
	0,6 - 0 - caixa aquecida	0,078	3,32
4B	0,6 - 10 - submersa	0,069	3,58
	0,6 - 10 - caixa aquecida	0,078	3,60

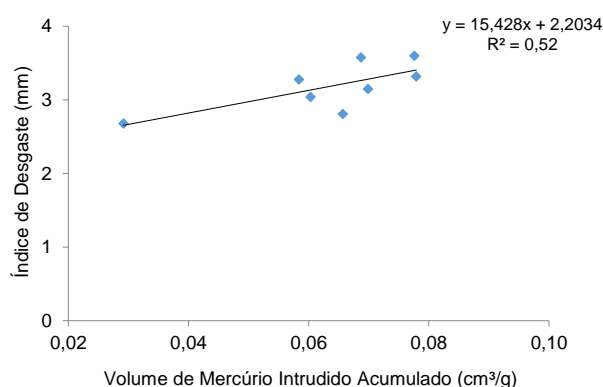


Figura 104: correlação entre a resistência à abrasão e o volume de mercúrio intrudido acumulado do concreto

Analisando a figura pode-se dizer que existe uma tendência de correlação entre a resistência à abrasão e a porosimetria por intrusão de mercúrio, no entanto, esse comportamento apresentou um coeficiente de determinação mais baixo em comparação às avaliações anteriores. Essa redução pode ser explicada em função dos resultados verificados para as matrizes mais porosas (a/agl 0,6) com a presença de sílica ativa, conforme já foi discutido nesse capítulo.

Ainda, de forma a complementar estas análises foi considerado relevante avaliar as correlações entre porosimetria e resistência à abrasão segundo o tipo de cura adotada. A figura 105 apresenta essas análises.

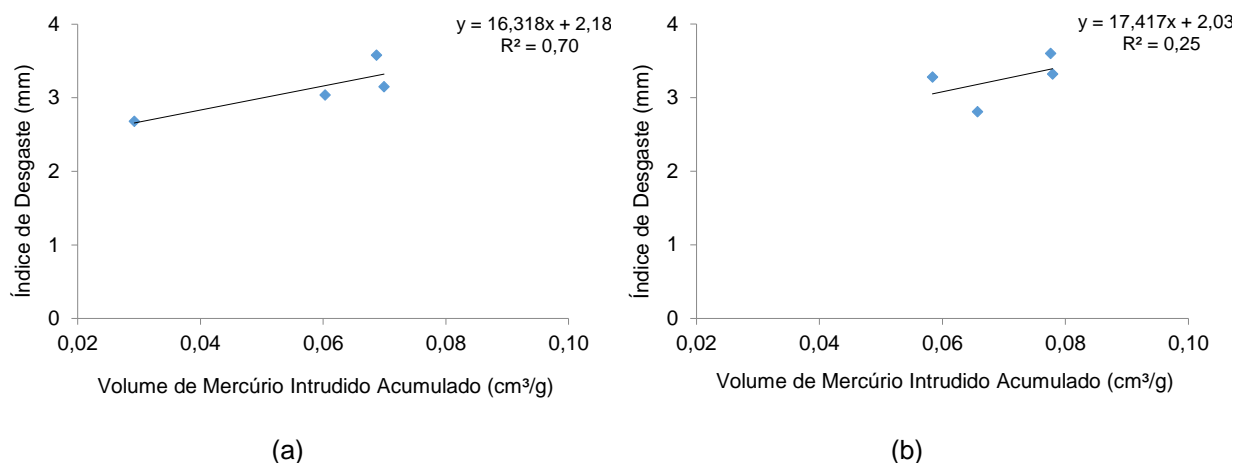


Figura 105: correlação entre a resistência à abrasão e o volume de mercúrio intrudido acumulado do concreto: (a) cura submersa; (b) caixa aquecida

Analisando os gráficos observa-se que a cura submersa promoveu uma maior correlação entre os resultados de porosimetria com os índices de desgaste obtidos (figura 105 (a)). Já a cura em caixa aquecida (figura 105 (b)) não gerou um comportamento claro entre as propriedades avaliadas, o que está diretamente associado aos resultados encontrados para as propriedades de superfície dos concretos produzidos com relação a/agl 0,6 e 10 % de substituição de sílica ativa, conforme já discutido.

Na tabela 60 estão apresentados os resultados médios de microdureza superficial e sua relação com os índices de desgaste medidos. Já na figura 106 estes resultados estão expressos de forma gráfica.

Tabela 60: relação dos resultados médios da microdureza com os índices de desgaste medidos

CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Microdureza (GPa)	Índice de Desgaste (mm)
1B	0,4 - 0 - submersa	0,62	3,04
2B	0,4 - 10 - submersa	0,61	2,68
3B	0,6 - 0 - submersa	0,43	3,15
4B	0,6 - 10 - submersa	0,33	3,58

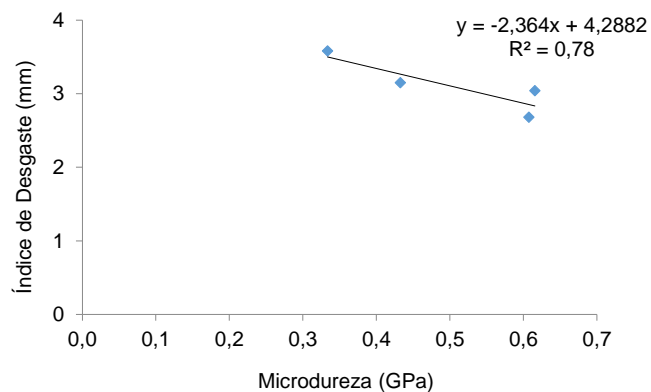


Figura 106: correlação entre a resistência à abrasão e a microdureza do concreto

O gráfico demonstra de forma clara a correlação direta existente entre a microdureza superficial e a resistência à abrasão dos concretos. Esse comportamento corrobora com as análises discutidas nesse capítulo. Logo, pode-se dizer que a resistência à abrasão de concretos produzidos com agregados convencionais é amplamente determinada pela estrutura de poros e pela microdureza da matriz cimentícia da camada superficial do material.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa de doutorado teve como objetivo avaliar tanto a influência da qualidade da camada superficial dos compósitos cimentícios, quanto das propriedades da matriz, frente ao mecanismo de desgaste por abrasão. Dentro desse contexto, foram analisados alguns parâmetros que constituem o traço de um concreto comumente empregado em pisos, tais como o tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI), a relação a/agl (0,4; 0,6) e o teor de substituição de sílica ativa (0 %; 10 %), além da influência da cura (submersa; caixa aquecida). Para tal avaliação realizaram-se alguns ensaios relacionados às propriedades de massa (resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão e exsudação) e às de superfície (dureza superficial por esclerometria, resistência à abrasão, análise em microscópio estereoscópico, digitalização tridimensional à laser, microdureza superficial por indentação e porosimetria por intrusão de mercúrio) nos concretos estudados.

As conclusões expostas a seguir não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que estão relacionadas a resultados de concretos que foram produzidos com tipos de materiais e técnicas de execução específicas. Ainda, importante ressaltar que a representatividade do comportamento destes concretos deve ser complementada pela realização de novos estudos, buscando confirmar e corroborar os resultados encontrados.

6.1 CONCLUSÕES

Com o objetivo de avaliar a influência de cada fator controlável nas propriedades estudadas nesta pesquisa, foram efetuadas análises estatísticas. As conclusões verificadas para a influência de cada um destes fatores escolhidos frente aos ensaios relativos à matriz e à superfície dos compósitos estão apresentadas como segue:

A. Quanto a resistência à compressão:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- o efeito isolado do tipo de cimento influenciou diretamente na resistência à compressão dos compósitos, onde o cimento de alta resistência inicial mostrou os maiores resultados, para uma mesma idade análise (63 dias);
- o efeito isolado da relação a/agl causou influência estatística significativa na resistência à compressão dos concretos, sendo que a relação a/agl 0,6 promoveu decréscimos da ordem de 29,9 %, comparando-se à relação a/agl 0,4;
- o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa gerou influência na resistência à compressão dos concretos, uma vez que a utilização da adição em 10,0 % sobre a massa de cimento proporcionou um aumento de 16,8 %, comparativamente aos concretos de referência;
- avaliando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl”, frente a resistência à compressão, observa-se que o acréscimo de resistência para os concretos com CP V-ARI, comparativamente aos com cimento CP IV, foi mais incisivo para a relação a/agl 0,6, perfazendo um total de 28,0 %;
- analisando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl x Teor de Substituição de Sílica Ativa”, na resistência à compressão, observa-se que para os compósitos produzidos com relação a/agl 0,4 e cimento de alta resistência inicial o efeito da sílica ativa se torna mais eficaz em comparação àqueles produzidos com cimento pozolânico, perfazendo um acréscimo de 17,2 %. Já para a relação a/agl 0,6 tal comportamento se inverte, uma vez que a presença da adição mineral promoveu acréscimos de 24,5 % na resistência dos concretos feitos com cimento pozolânico;

B. Quanto a resistência à tração na flexão:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- o efeito isolado do tipo de cimento causou influência na resistência à tração na flexão dos concretos, sendo verificado as maiores resistências para o cimento de alta resistência inicial, para uma mesma idade de análise (63 dias);
- o efeito isolado da relação a/agl promoveu influência direta na resistência à tração na flexão, sendo verificado decréscimos da ordem de 29,3 % para os concretos com relação a/agl 0,6, em relação àqueles com a/agl 0,4;

- o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa gerou efeito estatístico significativo na resistência à tração na flexão dos compósitos, onde a presença de 10,0 % do material promoveu ganhos da ordem de 37,4 %, em relação aos concretos sem adição;
- considerando a interação “Tipo de Cimento x Teor de Substituição de Sílica Ativa”, o efeito da sílica ativa promoveu acréscimos significativos na resistência à tração na flexão dos concretos equivalentes a 37,4 % para o cimento pozolânico e 34,6 % para o cimento de alta resistência inicial;
- avaliando a interação “Relação a/agl x Teor de Substituição de Sílica Ativa”, observa-se que os maiores ganhos na resistência à tração na flexão dos concretos produzidos com a presença da adição foram encontrados para as matrizes com maior relação a/agl (0,6), perfazendo 64,6 %. Já para os concretos com relação a/agl 0,4 tal aumento foi de aproximadamente 21,7 %;
- analisando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl x Teor de Substituição de Sílica Ativa”, na resistência à tração na flexão, verifica-se que para os compósitos produzidos com menor relação a/agl (0,4) e cimento de alta resistência inicial a presença da sílica ativa se torna mais eficaz em comparação àqueles produzidos com cimento pozolânico, promovendo um acréscimo de 31,6 %. Para a relação a/agl 0,6 tal comportamento se inverte, uma vez que a presença da adição mineral promoveu acréscimos de 77,9 % na resistência à tração dos concretos feitos com cimento pozolânico;

C. Quanto a dureza superficial:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- o efeito isolado do tipo de cimento gerou influência direta na dureza superficial dos concretos, onde o cimento de alta resistência inicial promoveu maiores índices esclerométricos medidos, comparando-se ao cimento pozolânico, aos 63 dias de análise;
- o efeito isolado da relação a/agl promoveu influência significativa na dureza superficial, uma vez que os concretos produzidos com maior relação a/agl (0,6) apresentaram um decréscimo de 15,4 % nessa propriedade quando comparados àqueles com relação a/agl 0,4;

- o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa promoveu influência significativa na dureza superficial, onde a presença de 10,0 % dessa adição aumentou os índices esclerométricos medidos em 5,0 %, comparando-se aos compósitos sem sílica;
- o efeito isolado do tipo de cura causou influência na dureza superficial, sendo que a cura em caixa aquecida promoveu decréscimos de 3,0 % nessa propriedade, comparando-se aos concretos submetidos a cura submersa;
- analisando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl”, verifica-se que para os compósitos com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4 ocorreu um acréscimo na dureza superficial de 10,3 %, já para a relação a/agl 0,6 esse aumento foi de 6,5 %.
- avaliando a interação “Tipo de Cimento x Tipo de Cura” na dureza superficial, observa-se que a cura em caixa aquecida, conforme o tipo de cimento empregado, influencia de maneira diferente os compósitos cimentícios. Para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI, a cura em caixa aquecida promoveu decréscimos de 4,2 % na dureza superficial em comparação aos concretos curados de forma submersa. Para os concretos dosados com cimento pozolânico foi possível constatar que não ocorreram alterações significativas na dureza superficial em função do tipo de cura empregada.
- considerando a interação “Relação a/agl x Tipo de Cura”, observa-se que a cura em caixa aquecida para a relação a/agl 0,4 causou decréscimos significativos de 6,3 % na dureza dos compósitos, com relação a cura submersa. Já para os compósitos dosados com relação a/agl 0,6, a cura em caixa aquecida, comparativamente a cura submersa, acarretou em acréscimo na dureza superficial de aproximadamente 2,3 %;
- analisando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl x Tipo de Cura”, frente à dureza superficial, observa-se que nos concretos com a/agl 0,4 e cimento pozolânico a redução da dureza foi de aproximadamente 7,2 % para a cura em caixa aquecida comparando-se aos mantidos na cura submersa. Para àqueles com cimento de alta resistência inicial esse decréscimo foi da ordem de 5,5 %. No entanto, para os concretos com relação a/agl 0,6, a cura em caixa aquecida mostrou efeito inverso para os cimentos estudados;
- com relação a interação “Tipo de Cimento x Teor de Substituição de Sílica Ativa x Tipo de Cura”, destaca-se que para os concretos produzidos com 10 % de sílica

ativa, independente do tipo de cimento empregado (CP IV; CP V-ARI), a cura em caixa aquecida, comparando-se a cura submersa, não alterou de forma significativa a dureza superficial do material;

D. Quanto a exsudação:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- com relação ao tipo de cimento, analisando os resultados encontrados verifica-se que para as misturas produzidas com cimento de alta resistência inicial, comparativamente às com cimento pozolânico, ocorreu uma importante redução da exsudação;
- para a maior relação a/agl (0,6) verificaram-se aumentos de 4 vezes nas quantidades de água exsudada, comportamento já esperado e de consenso no meio acadêmico;
- quanto a influência da sílica ativa, para ambos os tipos de cimento, observa-se que o uso dessa adição no proporcionamento dos compósitos reduziu a exsudação em 85 % com relação aos concretos de referência;

E. Quanto a resistência à abrasão:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- quanto ao efeito isolado do tipo de cimento, os resultados mostram, em termos percentuais, uma redução de aproximadamente 3,5 % e 8,6 % nos índices de desgaste dos compósitos com cimento de alta resistência inicial comparando-se aos com cimento pozolânico, aos 500 e aos 1000 metros de desgaste, respectivamente;
- o efeito isolado da relação a/agl causou influência direta na resistência à abrasão dos concretos, uma vez que, tanto aos 500 quanto aos 1000 metros de percurso, o acréscimo no desgaste foi de 16,0 % com o aumento da relação a/agl de 0,4 para 0,6;
- o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa em 10 % sobre a massa de cimento reduziu o desgaste dos concretos de forma significativa, em relação aos concretos de referência;

- o efeito isolado do tipo de cura promoveu influência no desgaste dos concretos, onde a cura em caixa aquecida aumentou os índices de desgaste das amostras, comparando-se àquelas mantidas em cura submersa;
- analisando a interação “Relação a/agl x Teor de Substituição de Sílica Ativa” no desgaste dos concretos, observa-se que para a relação a/agl 0,4 a sílica ativa presente promoveu acréscimos na resistência à abrasão dos compósitos, onde a redução no índice de desgaste ficou em torno de 17,0 %. Já para a relação a/agl 0,6, os resultados encontrados sugerem que a presença de sílica ativa não causou influência na resistência à abrasão;
- considerando a interação “Teor de Substituição de Sílica x Tipo de Cura”, frente ao desgaste, observa-se que as amostras de concreto sem sílica ativa apresentaram menor resistência à abrasão quando submetidas a cura em caixa aquecida, comparando-se àquelas em cura submersa. Por outro lado, os concretos dosados com 10 % de sílica ativa mostraram-se mais resistentes ao desgaste quando foram submetidos à cura em caixa aquecida;
- avaliando a interação “Tipo de Cimento x Relação a/agl x Tipo de Cura” na resistência à abrasão, verifica-se que para a relação a/agl 0,4 a cura em caixa aquecida mostrou uma tendência de acréscimo nos índices de desgaste dos concretos, sendo significativa apenas para o cimento de alta resistência inicial (através do teste de Fisher), corroborando com os resultados de dureza superficial. Para a relação a/agl 0,6 a cura em caixa aquecida não afetou de forma significativa o desgaste dos compósitos com cimento de alta resistência inicial. No entanto, para os concretos com cimento pozolânico foi possível observar um acréscimo significativo no índice de desgaste das amostras, o que pode estar associado à sedimentação das partículas de agregado graúdo, às maiores taxas de exsudação e às menores resistências mecânicas encontradas.

F. Quanto a porosimetria por intrusão de mercúrio:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- considerando o efeito da relação a/agl nos compósitos com cimento de alta resistência inicial, observa-se que o aumento desse parâmetro promove uma tendência de acréscimo na porosidade total da camada superficial dos compósitos;

- com relação a presença de sílica ativa (sa) na composição dos concretos com cimento de alta resistência inicial, foi possível verificar que para a relação a/agl 0,4 a adição proporcionou uma redução importante na porosidade total da superfície, principalmente na condição de cura submersa. O valor máximo de volume intrudido para essa amostra foi de 0,0292 cm³/g, já na amostra de referência, sem sílica, sob mesma condição de cura, esse volume foi de 0,0603 cm³/g, significando um decremento da ordem de 51,6 % na porosidade total. Já para a relação a/agl 0,6 a sílica ativa presente não promoveu alterações perceptíveis na porosidade total das amostras, independente do tipo de cura adotada;
- a cura submersa promoveu deslocamentos para a direita das curvas representativas do volume de mercúrio intrudido acumulado das amostras com cimento CP V-ARI, significando que houve uma redução do tamanho de poros comparando-se as amostras curadas em caixa aquecida, o que resultou em um refinamento da estrutura porosa da superfície;
- com relação ao tipo de cimento observa-se que o cimento pozolânico ocasiona uma tendência de acréscimo na porosidade total da camada superficial dos compósitos, fato que corrobora com as análises anteriores de redução da resistência à abrasão. Para a amostra com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,4, submetidas à cura submersa, o valor máximo de volume intrudido foi de 0,0603 cm³/g, enquanto que para a amostra com cimento pozolânico, sob mesma condição de cura e relação a/agl, esse volume foi de 0,0861 cm³/g, significando um incremento da ordem de 42,8 % na porosidade total.

G. Quanto a microdureza superficial por indentação instrumentada:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- a variação na relação a/agl causa influência direta na microdureza superficial das amostras, onde a relação a/agl 0,4 mostrou os maiores valores encontrados, comparativamente a relação a/agl 0,6;
- quanto a presença de sílica ativa frente a microdureza, observa-se que para os concretos com menor relação a/agl (0,4) a sílica ativa parece melhorar a camada superficial, uma vez que igualou a microdureza das amostras indentadas a 10 mm de profundidade (M) com àquelas indentadas próximo à superfície (S). Já para a relação a/agl 0,6 a presença da sílica mostrou comportamento inverso, reduzindo a

microdureza dos compósitos, principalmente para as análises próximas à superfície (S);

- para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial os acréscimos promovidos na microdureza da superfície foram de, aproximadamente, 28,0 % em comparação ao cimento CP IV, na idade de 63 dias. Comportamento que corrobora com as demais análises feitas nessa pesquisa.

H. Quanto a digitalização tridimensional à laser:

Apesar dos efeitos dos fatores estudados serem conhecidos, os resultados apresentados servem para a verificação da consistência da pesquisa.

- analisando a influência do tipo de cimento empregado, verifica-se novamente, que as amostras com cimento de alta resistência inicial se mostraram mais resistentes à abrasão, em comparação àquelas com cimento pozolânico;
- foi possível verificar através da digitalização os efeitos benéficos da sílica ativa e da cura submersa nas amostras de concreto produzidas com ambos os tipos de cimento (CP IV; CP V-ARI) e relação a/agl 0,4, submetidas ao desgaste por abrasão;
- para os compósitos produzidos com cimento pozolânico, as amostras com maior relação a/agl (0,6) apresentaram um desgaste mais homogêneo da superfície, em função da formação de uma camada de argamassa mais espessa decorrente da sedimentação das partículas de agregado graúdo, em virtude da menor coesão dessas misturas;
- a cura em caixa aquecida para os concretos com cimento de alta resistência inicial e relação a/agl 0,6, sem sílica ativa, gerou uma leve tendência de redução no desgaste superficial. Ainda, a presença da sílica nessas matrizes não promoveu melhoras perceptíveis. Tal comportamento também foi encontrado para as análises da dureza e microdureza superficial. Ainda, a presença da sílica nessas matrizes não promoveu melhoras perceptíveis, o que corrobora com os resultados de resistência à abrasão, obtidos pelo método da norma brasileira, de microdureza e porosimetria por intrusão de mercúrio.

De uma forma geral, conclui-se que foi possível verificar a influência das propriedades da matriz e da superfície na magnitude do mecanismo de desgaste por abrasão de concretos proporcionados para pisos. Contudo, há a necessidade de mais estudos nesta área do

conhecimento, uma vez que tais resultados estão relacionados a compósitos que apresentam características específicas, com materiais, proporcionamentos e parâmetros de dosagem específicos.

Finalizando, destaca-se que a resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos parece ser influenciada não somente pelas propriedades de massa do material cimentício, mas também pela qualidade da sua camada superficial, uma vez que apresentou forte correlação com as propriedades de superfície avaliadas, como a dureza superficial, a microdureza e a porosimetria ao mercúrio. Salienta-se ainda, que o ensaio de dureza superficial por esclerometria poderia ser adotado como parâmetro para determinação direta da resistência ao desgaste pois, conforme os resultados encontrados e a tabela 51, foi o que apresentou comportamento mais próximo ao de resistência à abrasão (medida pelo índice de desgaste) dos compósitos, frente aos fatores de controle avaliados; conjuntamente a isto, enfatiza-se a facilidade e o baixo custo de aplicação dessa técnica, comparativamente às demais que foram empregadas para analisar a camada externa do material (microdureza e porosimetria). Além disso, sugere-se que a exsudação dos pisos de concreto venha a ser o fator principal no controle da qualidade da camada superficial da placa de concreto.

Como colaboração à indústria, recomenda-se que se tenha um maior controle na dosagem do traço de concreto (evitar relações a/agl elevadas), podendo-se empregar adições minerais como a sílica ativa para a redução do desgaste abrasivo. Conjuntamente a isto, enfatiza-se que a resistência ao desgaste em concretos proporcionados para pisos, além de apresentar importante relação com os materiais constituintes e seus proporcionamentos, é uma propriedade dependente dos processos de execução, principalmente das ações de acabamento superficial e das condições de cura empregadas.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização desta pesquisa surgiram novos questionamentos, uma vez que o presente estudo ficou limitado às variáveis controláveis propostas, logo novas pesquisas nesta linha podem ser feitas, tais como:

- avaliar a influência dos cimentos pozolânico e de alta resistência inicial, em igualdade de resistência à compressão, no desgaste superficial por abrasão dos concretos empregados em pisos;
- avaliar a influência de agregados graúdos com diferentes resistências na resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos;

- avaliar a influência da matriz de argamassa, com diferentes materiais e proporcionamentos, e de agregados graúdos distintos, de forma isolada e conjunta, no fenômeno do desgaste por abrasão dos concretos empregados em pisos;
- avaliar a variação do nível de desgaste, ao longo do ensaio de resistência à abrasão, através de análises microscópicas da superfície nos concretos proporcionados para pisos;
- avaliar a influência de diferentes tratamentos superficiais com endurecedores na resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos;
- avaliar diferentes condições de cura na resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITANTE, A. L. R. **Estimativa da vida útil de placas cerâmicas esmaltadas solicitadas por abrasão através de ensaios acelerados**. 2004. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ACI Committee 201. **ACI 201.2R-92 - Guide to Durable Concrete**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2008.

ACI Committee 301. **ACI 301-05 - Specifications for Structural Concrete**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2010.

ACI Committee 302. **ACI 302.1R-04 - Guide to Concrete Floor and Slab Construction**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2004.

ALMEIDA, I. R. **Influência da resistência à abrasão do agregado graúdo na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho**. In: REIBRAC-IBRACON, 42, Fortaleza/CE, 2000.

American Society for Testing and Materials. **ASTM C 779**: Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces: Pennsylvania, 2012.

_____. **ASTM C1138**: Abrasion resistance of concrete (underwater method): West Conshohocken, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. [s. l.], 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. [s. l.], 2001.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR NM 76**: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 7809**: Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco – Determinação da massa específica do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 12042**: Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 15558**: Concreto – Determinação da exsudação. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO (ANAPRE). **ANAPRE em notícias**, São Paulo, v. 1, n. 3, 2006. Edição especial. Disponível em: <http://www.anapre.com.br/Boletim/ANAPREed3_final.pdf>. Acessado em: 24 out. 2009.

ATIŞ, C. D. High volume fly ash abrasion resistant concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 14, n. 3, p. 274-277, 2002.

ATIŞ, C. D. Abrasion-porosity-strength model for fly ash concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 15, n. 4, p. 408-410, 2003.

ATIŞ, C. D.; ÖZCAN F.; KILIÇ, A.; KARAHAN, O.; BILIM, C.; SEVERCAN, M. H. Influence of dry and wet curing conditions on compressive strength of silica fume concrete. **Building and Environment**. v. 40, p. 1678-1683, 2005.

BAUER, R. J. F.; PAULON, V. A.; TOKUDOME, S.; SANTOS, F. B. **Influência dos endurecedores de superfície sobre a resistência ao desgaste por abrasão**. In: REIBRAC-IBRACON, 44, Belo Horizonte/MG, 2002.

BERGMANN, C. P.; MADRUGA, T.P.; SILVEIRA, M. M. **Resistência ao desgaste de aluminas**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 38, Blumenau/SC, 1994(a).

BERGMANN, C. P.; MADRUGA, T.P.; SILVEIRA, M. M. **Resistência ao desgaste de materiais cerâmicos a base de Al_2O_3** . In: III Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste, Fortaleza/CE, 1994(b).

BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado**. 1998. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BING-QIANG, Z.; QIANG, Z. Study on the application of polypropylene fiber concrete in water and hydropower projects. **Water Res. Plann Design** (in Chinese). n.1, p. 54–58, 2002.

BINGÖL, A. F.; TOHUMCU, İ. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. **Materials and Design**. n. 51, p. 12-18, 2013.

ÇAVDAR, A.; YETGIN, Ş. Investigation of abrasion resistance of cement mortar with different pozzolanic compositions and subjected to sulfated medium. **Construction and Building Materials**. v. 24, n. 4, p. 461-470, april 2010.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia Científica**. 5 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. **Pisos Industriais de Concreto - Aspectos Teóricos e Executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.

COOK, R. A.; HOVER, K.C. Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors. **ACI Materials Journal**p. p. 152-161, 1993.

COOK, R. A.; HOVER, K.C. Mercury porosimetry of hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 933-943, 1999.

DAL MOLIN, D. C. C., OLIVEIRA, A. P. M., KULAKOWSKI, M. P. **Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microssílica) frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais**. 1995. Disponível em: <http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/Estudo_de_Concretos_com_Adicao_de_S%C3%ADlica_Ativa_2006122610819.pdf>. Acessado em: 16 jan. 2010.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P.; RIBEIRO, J. L. D. Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 37-49, abr./jun. 2005.

DHIR, R.; HEWLETT, P.; CHAN, Y. Near-surface characteristics of concrete: Abrasion resistance. **Materials and Structures**. v. 24, n. 2, p. 122-128, 1991.

DIAS, L. L.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. **Efecto de la presencia de cristales sobre la resistencia al desgaste de vidrados**. In: Qualicer, Castellón (Espanha), Proceedings VI Congresso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico, 2000.

DIAMOND, S. Mercury porosimetry: An inappropriate method for measurement of pore size distributions in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1517-1525, 2000.

DIAMOND, S.; SAHU, S. Densified silica fume: particle sizes and dispersion In: **Concrete. Materials and Structures**, RILEM, 2006.

FARNY, J. A. **Concrete Floors on Ground**. 3 ed. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 2001.

FEIJÃO, J. F. M.; ALARCON, O. E.; MELLO, J. D. B.; ROSA, F. G.; SILVEIRA, R.; SILVEIRA, M. Estudo do mecanismo de abrasão de pavimentos cerâmicos utilizando a técnica esclerométrica. **Cerâmica**. v. 42, n. 275, p. 205-208, maio/jun. 1996.

FERREIRA JUNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FONSECA, N. M. S. **Betões estruturais com a incorporação de agregados grossos reciclados de betão: influência das condições de cura no desempenho mecânico**. 2009. 248 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

GARCÍA, A.; FRESNO, D. C.; POLANCO, J. A. Effect of dry-shaking treatment on concrete pavement properties. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 11, p. 2202-2211, nov. 2008.

GASPERIN, J. **Aderência de Revestimentos de Argamassa em Substrato de Concreto: Influência da Forma de Aplicação e Composição do Chapisco**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

GHAFOORI, N.; DIAWARA, H. Abrasion resistance of fine aggregate replaced silica fume concrete. **ACI Materials Journal**. v. 96, n. 5, p. 555-567, set-out. 1999.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349p.

HOFFMANN, A. T. **Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos**. 2001. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

IBÁÑEZ, M. J. G. **Estudio de las propiedades mecánicas y superficiales de recubrimientos vidrados de piezas cerámicas: Puesta a punto de nuevas técnicas de medida**. 1998. 243p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales. Departamento de Ingeniería Química da Universitat Jaume I, Castellón, Espanha.

IRSASSAR, E. Sulfate attack on cementitious materials containing limestone filler - a review. **Cement and Concrete Research**. n. 39, p. 241-254, 2009.

JOSSERAND, L.; COUSSY, O.; LARRARD, F. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. **Cement and Concrete Research**. v. 36, n. 9, p. 1603-1608, sep. 2006.

KAHRAMAN, S.; FENER, M. Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength. **Materials Letters**. n. 61, p. 4861-4865, 2007.

KHRUSCHOV, M. M. Principles of abrasive wear. **Wear**, v. 28, n. 1, p. 69-88, apr. 1974.

KILIÇ, A.; ATIŞ, C. D.; TEYMEN, A.; KARAHAN, O.; ÖZCAN, F.; BILIM, C.; ÖZDEMİR, M. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 30, n. 4, p. 290-296, apr. 2008.

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concretos de barragens**. 2002. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

KUMAR, G. B. R.; SHARMA, U. K. Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 66, p. 712-722, 2014.

LARSEN-BASSE, J. Role of microstructure and mechanical properties in abrasion. **Scripta Metallurgica et Materialia**. v. 24, n. 5, p. 821-826, may 1990.

LAWRENCE, J. A comparative analysis of the wear characteristics of glazes generated on the ordinary Portland cement surface of concrete by means of CO₂ and high power diode laser radiation. **Wear**. v. 257, n. 5-6, p. 590-598, mar. 2004.

LI, H.; ZHANG, MAO-HUA; OU, JIN-PING. Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement. **Wear**. v. 260, n. 11-12, p. 1262-1266, jun. 2006.

LI, B.; KE, G.; ZHOU, M. Influence of manufactured sand characteristics on strength and abrasion resistance of pavement cement concrete. **Construction and Building Materials**. n. 25, p. 3849-3853, 2011.

LIMA, E. O. **Durabilidade do concreto armado em indústrias siderúrgicas: contribuição à identificação e mapeamento dos agentes agressivos**. 2000. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

LIU, YIU-WEN. Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. **Construction and Building Materials**. v. 21, n. 5, p. 972-977, may 2007.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobertura**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 26, n. 4, p. 347-357, may 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MENG, H. C.; LUDEMA, K. C. Wear models and predictive equations: their form and content. **Wear**. v. 181-183, part 2, p. 443-457, mar. 1995.

MOMBER, A. W. The erosion of cement paste, mortar and concrete by gritblasting. **Wear**. v. 246, part 2, p. 46-54, 2000.

MOURA, C.B. **Aderência de Revestimentos Externos de Argamassa em Substratos de Concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

NAIK, T. R.; SINGH S. S.; RAMME B. W. Effect of source of fly ash abrasion resistance of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. n. 14, p. 417-426, 2002.

NAIK, T. R., SINGH, S. S., HOSSAIN, M. M. Abrasion resistance of high strength concrete made with class C fly ash. **ACI Materials Journal**. v. 92, n. 66, p. 649-659, 1995.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997.

OLIVEIRA, P. S. F.; LULA, L. Tratamento anti-pó para pisos de concreto com endurecedores de superfície químicos à base de flúor-silicatos metálicos. **Revista Pisos Industriais**, São Paulo, n. 5, p. 42-47, sep. 2006. Disponível em: <<http://www.pisosindustriais.com.br/materias/noticia.asp?ID=115>>. Acessado em: 10 jan. 2010.

ÖZTURAN, T.; ÇEÇEN, C. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths. **Cement and Concrete Research**. v. 27, n. 2, p. 165-170, mar. 1997.

PICCOLI, G. M.; SILVA, P. L. F.; TOMASELLI, C. A. **Pisos de concreto de alto desempenho - Tecnologia de crescente aplicação**. In: REIBRAC-IBRACON, 39, São Paulo/SP, 1997.

RAMEZANIANPOUR, A. A. Cement replacement materials: properties, durability, sustainability. Berlin: **Springer**: 2014. p. 16-33.

RAMEZANIANPOUR, A. M.; ESMAEILI, Kh.; GHAHARI, S. A.; RAMENZANIANPOUR, A. A. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. n. 73, p. 187-194, 2014.

RASHAD, A. M. A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. **Construction and Building Materials**. n. 44, p. 487-495, 2013.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Série Monográfica Qualidade: Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. **Série Monográfica Qualidade: Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: PPGE/UFRGS, 2003.

RICHARDSON, A. E. Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions. **Structural Survey**. v. 24, n. 2, p. 138-153, 2006.

ROCHER, W. T. M. **Identificação dos agentes agressivos e das patologias em pisos industriais de frigoríficos de suínos**. 2007. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROMANO, R. C. O.; SCHREURS, H.; JOHN, V. M. ; PILEGGI, R. G. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa. **Associação Brasileira de Cerâmica, Cerâmica [online]**. v. 54, n. 332, 2008.

RODRÍGUEZ, E. D.; SORIANO L.; PAYÁ J.; BORRACHERO M. V.; MONZÓ J. M.. Increase of the reactivity of densified silica fume by sonication treatment. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 19, 2012.

RODRIGUES, P. P. F. **Manual de Pisos Industriais: Fibras de Aço e Protendido**. São Paulo: Pini, 2010.

RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A Influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos**. In: REIBRAC-IBRACON, 44, Belo Horizonte/MG, 2002.

ROPKE, J. C. **Concrete Problems: causes and cures**. New York: McGraw-Hill, 1982.

ROY, D. M.; ARJUNAN, P.; SILSBEE, M. R. Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 31, n. 12, p. 1809-1813, dec. 2001.

SAIKIA, N.; BRITO, J. DE. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. **Construction and Building Materials**. n. 52, p. 236-244, 2014.

SALVADOR FILHO, J. A. A. **Cura Térmica dos Concretos de Alto Desempenho: Análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade**. 2001. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

SANTOS, N. **Avaliação de Micro e Nanoporosidade de Argamassas Colantes**. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SCHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 5 ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.

SEBÖK, T.; STRÁNĚL, O. Wear resistance of polymer-impregnated mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 10, p. 1853-1858, oct. 2004.

SENISSE, J. A. L. **Influência do consumo de água, da adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento nas variações dimensionais de concretos empregados em pisos**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SHANNAG, M.J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. **Cement and Concrete Composites**. v. 22, n. 6, p. 399-406. dec. 2000.

SHUAN-FA, C.; DENG-LIANG, Z.; JIE, Z.; FENG, L. The study of the road performance of the polypropylene fiber concrete. **Northeast Highway**. v. 24, n. 2, p. 23-25, 2001.

SIDDIQUE, R. Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 33, n. 11, p. 1877-1881, jun. 2003.

SIDDIQUE, R. **Waste Materials and By-Products in Concrete. Chapter 6: Coal Fly Ash**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

SIDDIQUE, R.; KHATIB, J. M. Abrasion resistance and mechanical properties of high-volume fly ash concrete. **Materials and Structures**. v. 43, n. 5, p. 709-718, jul. 2009.

SIDDIQUE, R.; PRINCE, W.; KAMALI, S. Influence of utilization of high-volumes of class F fly ash on the abrasion resistance of concrete. **Journal of Practices and Technologies**. n. 10, p. 13-28, jan-jun. 2007.

SIDDIQUE, R.; KAPOOR, K.; KADRI, E.; BENNACER, R. Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. **Construction and Building Materials**. n. 29, p. 270-278, 2012.

SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Abrasion resistance and strength properties of concrete containing waste foundry sand (WFS). **Construction and Building Materials**. n. 28, p. 421-426, 2012.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**. 2011. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao Estudo do Efeito da Incorporação de cinza de casca de Arroz em Concretos Submetidos à Reação Álcali-Agregado**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

STACK, A.; MANCIO, M.; MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Low-cost and Sustainable Self-consolidating Concrete with Fly Ash and Limestone Powder. **ACI Materials Journal**. Submetido e aceito para publicação. 2011.

SUN, Z.; XU, Q. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**. v. 527, n. 1-2, p. 198-204, dec. 2009.

TARR, S. M.; FARNY, J. A. **Concrete Floors on Ground**. 4 ed. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, U.S.A., 2008.

TIER, M. A. **Avaliação da resistência ao desgaste do aço AISi M2 nitretado a plasma**. 1998. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TOPÇU, İ. B.; ELGÜN, V. B. Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 2, p. 275-281, feb. 2004.

UGUR, I.; DEMIRDAG S.; YAVUZ, H. Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates. **Materials Characterization**. n. 61, p. 90-96, 2010.

VIECILI, F. A. **Influência da utilização dos endurecedores superficiais cimentícios na resistência à abrasão de pisos industriais de concreto**. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Mestrado Profissionalizante, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WAINWRIGHT, P. J.; REY, N. The influence of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) additions and time delay on the bleeding of concrete. **Cement and Concrete Composites**. v. 22, n. 4, p. 253-257, dec. 2000.

WAINWRIGHT, P. J.; AIT-AIDER, H. The influence of cement source and slag additions on the bleeding of concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 25, n. 7, p. 1445-1456, feb. 1995.

YAZICI, Ş.; İNAN, G. An investigation on the wear resistance of high strength concretes. **Wear**. v. 260, n. 6, p. 615-618, mar. 2006.

ZORAN, J. G.; GORDANA, A. T. C.; NENAD, S. R.; IVA, M. D. Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**. n. 27, p. 305-312, 2012.

ZORZI, J. E.; PEROTTONI, C. A. Estimating Young's modulus and Poisson's ratio by instrumented indentation test. **Materials Science and Engineering A**. n. 574, p. 25-30, 2013.

APÊNDICE A - ESTUDO PRELIMINAR: GRANULOMETRIA À LASER DA SÍLICA ATIVA

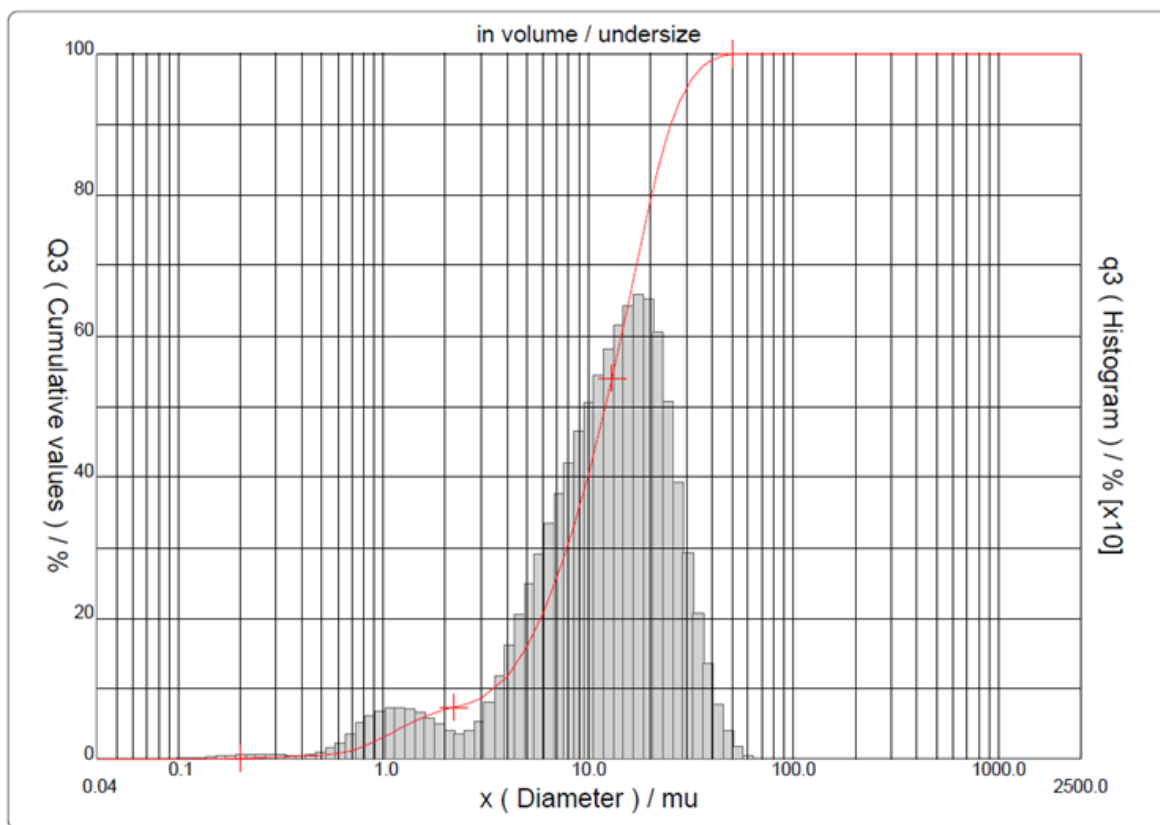


PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1180 Liquid

Range : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

Sample Ref	: Silica 06.07.10	Ultrasounds	: 60 s (+during)
Type produit	: Silica	Concentration	: 155
Client	: NORIE	Diameter at 10%	: 3.41 mu
Comments	:	Diameter at 50%	: 12.07 mu
Liquid	: Agua	Diameter at 90%	: 25.22 mu
Dispersing agent	: Nenhum	Mean diameter	: 13.49 mu
Operator	: Malu	Fraunhofer	
Company	:	Density/Factor	-----
Location	:	Specific surface	-----
Date : 09/07/2010	Time : 15:42:35	Automatic dilution	: No / No
Index meas.	: 752	Meas./Rins.	: 60/60/2
		SOP	: Padrão Acil



Serial nb : 570 | Ref : 1.r110.m0.45A1818/5.00/752/m24.12.40.20.1Fh.20.40.20.1Bh/Q-.0.0.0.0/300.0.15.g60.2.16.10.1.10.P7200.24.80.P29.0/V 3.10/635

	Standards classes									
	in volume / undersize									
x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.14	0.36	0.48	0.61	0.87	1.29	1.90
q3	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.04	0.05	0.12	0.24	0.39
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	2.55	3.20	3.82	4.39	4.91	5.37	6.13	6.70	7.13	7.44
q3	0.48	0.53	0.56	0.57	0.56	0.54	0.49	0.42	0.35	0.28
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	7.72	8.00	8.67	11.65	15.97	20.79	23.27	25.76	28.26	30.75
q3	0.28	0.30	0.40	0.89	1.67	2.28	2.68	2.90	3.13	3.33
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	33.24	35.70	40.52	45.18	49.67	54.00	58.16	62.14	65.95	69.56
q3	3.55	3.72	3.95	4.22	4.46	4.67	4.85	4.98	5.10	5.14
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	72.95	76.14	79.07	84.15	89.71	93.38	96.43	98.18	98.73	99.12
q3	5.12	5.09	4.93	4.60	3.76	2.80	1.97	1.28	0.88	0.66
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	99.69	99.91	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.42	0.18	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	600.0	700.0	800.0	900.0	1000.0	1100.0	1200.0	1300.0	1400.0	1500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	1600.0	1700.0	1800.0	1900.0	2000.0	2100.0	2200.0	2300.0	2400.0	2500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / μ Q3 : cumulative value / % q3 : population density / %

**APÊNDICE B - ESTUDO PRELIMINAR: RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO UNIAXIAL, DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA E
RESISTÊNCIA À ABRASÃO**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)								
Traços (Teor Sílica)	Idade (dias)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média +/- 1 desvio	Variância	fc Tratado	Médias
	28							
1 (0%)	32,12	27,5	7,86	28,63	19,64	61,85	32,12	32,01
	18,39							
	31,9							
2 (10%)	38,61	36,8	1,96	5,32	34,84	3,83	38,61	37,82
	34,72							
	37,03							

DUREZA SUPERFICIAL - Índice Esclerométrico					
Traços (Teor Sílica)	Idade (dias)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Variância
	28				
1A (0%)	32,92	31,5	2,04	6,49	4,18
	30,03				
1B (0%)	34,26	33,8	0,70	2,07	0,49
	33,27				
1C (0%)	35,31	34,3	1,39	4,06	1,94
	33,34				
2A (10%)	33,41	34,4	1,34	3,91	1,80
	35,31				
2B (10%)	35,74	35,0	1,00	2,85	0,99
	34,33				
2C (10%)	35,81	35,7	0,16	0,44	0,02
	35,59				

RESISTÊNCIA À ABRASÃO - ÍNDICE DE DESGASTE (mm)								
Traços (Teor Sílica)	Idade (dias)	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Média +/- desvio	Variância	Índice trat.	Médias
	28							
1A (0%)	7,66	7,4	0,26	3,49	7,15	0,07	7,66	7,53
	7,42							
	7,50							
	7,05							
1B (0%)	6,05	6,0	0,25	4,14	5,79	0,06	6,05	6,01
	5,76							
	5,97							
	6,36							
1C (0%)	8,41	7,0	1,02	14,46	6,01	1,03	6,55	6,56
	6,55							
	6,04							
	7,09							
2A (10%)	7,59	7,1	1,00	14,22	6,06	1,01	7,59	6,69
	8,18							
	6,53							
	5,96							
2B (10%)	5,72	5,4	0,40	7,36	5,01	0,16	5,72	5,57
	5,26							
	4,91							
	5,74							
2C (10%)	5,82	6,6	1,08	16,47	5,48	1,17	5,82	6,04
	5,78							
	6,53							
	8,09							
					7,63			

APÊNDICE C - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%)	Idades (dias)	Traços	a/agl - Tsa (%)	Idades (dias)
		63			63
1A	0,4 - 0	53,62	1B	0,4 - 0	53,16
		51,93			55,49
		53,11			53,03
		45,68			54,19
		50,06			55,96
		51,51			51,66
2A	0,4 - 10	63,10	2B	0,4 - 10	62,16
		52,45			70,67
		59,24			61,73
		61,02			55,06
		58,03			63,90
		57,92			65,22
3A	0,6 - 0	30,83	3B	0,6 - 0	42,02
		31,30			40,49
		32,12			42,46
		30,65			42,51
		34,20			44,64
		32,82			43,11
4A	0,6 - 10	39,32	4B	0,6 - 10	45,87
		39,27			43,74
		38,82			47,19
		39,72			47,22
		37,36			51,46
		41,12			47,99

APÊNDICE D - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%)	Idades (dias)	Traços	a/agl - Tsa (%)	Idades (dias)
		63			63
1A	0,4 - 0	5,96	1B	0,4 - 0	7,05
		6,16			6,26
		5,96			5,83
		5,73			6,14
2A	0,4 - 10	6,55	2B	0,4 - 10	7,95
		6,88			9,37
		7,25			8,07
		6,66			7,95
3A	0,6 - 0	3,70	3B	0,6 - 0	4,15
		3,10			4,09
		3,00			4,60
		3,31			4,68
4A	0,6 - 10	4,44	4B	0,6 - 10	6,02
		5,59			6,02
		5,69			6,10
		5,44			5,42

APÊNDICE E - RESULTADOS DE DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA

DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA (MPa)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Idades (dias)	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Idades (dias)
		63			63
1A	0,4 - 0 - submersa	46,46	1B	0,4 - 0 - submersa	53,05
		48,63			53,14
		52,20			55,03
	0,4 - 0 - caixa aquecida	45,71		50,54	
		49,00		52,72	
		45,36		49,61	
2A	0,4 - 10 - submersa	51,27	2B	0,4 - 10 - submersa	54,77
		52,05			51,75
		48,46			55,87
	0,4 - 10 - caixa aquecida	47,70		49,00	
		51,34		53,25	
		45,28		51,50	
3A	0,6 - 0 - submersa	37,46	3B	0,6 - 0 - submersa	44,33
		38,14			44,70
		39,55			43,00
	0,6 - 0 - caixa aquecida	42,07		46,30	
		42,50		42,73	
		41,67		41,30	
4A	0,6 - 10 - submersa	40,91	4B	0,6 - 10 - submersa	45,47
		41,38			41,14
		39,84			43,47
	0,6 - 10 - caixa aquecida	43,30		44,83	
		41,89		44,50	
		43,69		41,96	

APÊNDICE F - RESULTADOS DE EXSUDAÇÃO

APÊNDICE G - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO

DESGASTE POR ABRASÃO (mm) - 500 m					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Idades (dias) 63	Traços	a/agl - Tsa (%) - Tcura	Idades (dias) 63
1A	0,4 - 0 - submersa	1,16	1B	0,4 - 0 - submersa	1,32
		1,43			1,15
		1,56			1,54
		1,40			1,11
		1,36			1,25
		1,31			
		1,54			1,56
	0,4 - 0 - caixa aquecida	1,39		1,28	
		1,46		1,52	
		1,55		1,49	
		1,58		1,30	
		1,59		1,28	
				1,08	
				0,96	
2A	0,4 - 10 - submersa	1,40	2B	0,4 - 10 - submersa	1,23
		1,01			1,11
					1,11
					1,10
					1,21
					0,98
					0,92
	0,4 - 10 - caixa aquecida	0,95		1,43	
		1,28		1,17	
		1,23		1,29	
		0,56		1,21	
		1,59		1,10	
		0,97		1,37	
				1,60	
3A	0,6 - 0 - submersa	1,31	3B	0,6 - 0 - submersa	1,10
		1,65			1,39
		1,62			1,13
		1,61			1,38
		1,42			1,33
		1,01			1,09
		1,32			1,24
	0,90	1,37			
	0,6 - 0 - caixa aquecida	1,36		1,37	
		1,57		1,27	
		1,33		1,25	
		1,74		1,59	
		1,09		1,54	
		1,96		1,61	
1,79		1,59			
1,41	1,58				
1,15	1,29				
1,80					
4A	0,6 - 10 - submersa	0,98	4B	0,6 - 10 - submersa	1,46
		1,38			1,29
		1,64			1,34
		0,90			1,69
		1,61			1,40
		1,64			1,66
		1,09			1,49
	1,43	1,02			
	1,67				
	0,6 - 10 - caixa aquecida	1,41		1,79	
		1,74		1,38	
		1,51		1,13	
		1,63		1,68	
		1,64		1,53	
1,52		1,32			
1,59					

APÊNDICE H - RESULTADOS DE POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 1B - cura submersa							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,06E+03	1,07E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,51	0,40	4,17E+02	5,31E+02	0,0037	0,0017	0,0037	0,0017
0,91	0,63	2,35E+02	3,40E+02	0,0059	0,0032	0,0022	0,0015
1,23	0,88	1,74E+02	2,43E+02	0,0063	0,0037	0,0005	0,0005
1,65	1,14	1,29E+02	1,87E+02	0,0068	0,0044	0,0005	0,0006
2,02	1,42	1,05E+02	1,51E+02	0,0070	0,0047	0,0002	0,0004
2,47	1,84	8,65E+01	1,16E+02	0,0070	0,0049	0,0000	0,0002
2,86	2,15	7,46E+01	9,93E+01	0,0071	0,0050	0,0000	0,0001
3,28	2,50	6,50E+01	8,55E+01	0,0073	0,0052	0,0002	0,0002
3,85	2,98	5,54E+01	7,16E+01	0,0075	0,0053	0,0002	0,0001
4,43	3,38	4,82E+01	6,31E+01	0,0076	0,0053	0,0001	0,0000
5,05	3,82	4,22E+01	5,58E+01	0,0076	0,0054	0,0001	0,0001
5,75	4,30	3,71E+01	4,96E+01	0,0078	0,0057	0,0002	0,0004
6,37	4,79	3,35E+01	4,45E+01	0,0078	0,0058	0,0000	0,0001
7,15	5,32	2,98E+01	4,01E+01	0,0078	0,0058	0,0000	0,0000
8,05	5,87	2,65E+01	3,63E+01	0,0080	0,0060	0,0002	0,0002
8,93	6,43	2,39E+01	3,32E+01	0,0081	0,0061	0,0001	0,0001
9,74	7,02	2,19E+01	3,04E+01	0,0081	0,0061	0,0000	0,0000
10,63	7,77	2,01E+01	2,75E+01	0,0084	0,0061	0,0002	0,0000
11,56	8,51	1,85E+01	2,51E+01	0,0084	0,0064	0,0000	0,0003
12,62	9,28	1,69E+01	2,30E+01	0,0084	0,0064	0,0000	0,0000
13,84	10,16	1,54E+01	2,10E+01	0,0084	0,0064	0,0000	0,0000
15,08	11,18	1,42E+01	1,91E+01	0,0086	0,0064	0,0002	0,0000
16,34	12,27	1,31E+01	1,74E+01	0,0089	0,0064	0,0002	0,0000
17,69	13,38	1,21E+01	1,60E+01	0,0089	0,0066	0,0001	0,0002
19,16	14,54	1,11E+01	1,47E+01	0,0089	0,0067	0,0000	0,0001
20,79	15,76	1,03E+01	1,35E+01	0,0090	0,0069	0,0001	0,0003
22,44	17,04	9,51E+00	1,25E+01	0,0092	0,0070	0,0002	0,0000
24,22	18,41	8,81E+00	1,16E+01	0,0092	0,0070	0,0000	0,0000
26,08	19,89	8,18E+00	1,07E+01	0,0093	0,0070	0,0001	0,0000
28,17	21,28	7,57E+00	1,00E+01	0,0097	0,0071	0,0004	0,0001
30,38	22,75	7,02E+00	9,38E+00	0,0097	0,0072	0,0000	0,0002
32,66	24,20	6,53E+00	8,81E+00	0,0097	0,0072	0,0000	0,0000
35,06	25,68	6,09E+00	8,31E+00	0,0098	0,0072	0,0000	0,0000
37,57	27,40	5,68E+00	7,79E+00	0,0100	0,0075	0,0002	0,0003
40,14	29,45	5,31E+00	7,24E+00	0,0100	0,0075	0,0000	0,0000
42,64	31,78	5,00E+00	6,71E+00	0,0100	0,0075	0,0000	0,0000
45,33	34,00	4,71E+00	6,27E+00	0,0103	0,0075	0,0002	0,0000
49,43	36,45	4,32E+00	5,85E+00	0,0103	0,0075	0,0000	0,0000
97,62	39,08	2,19E+00	5,46E+00	0,0114	0,0075	0,0011	0,0000
368,18	41,66	5,79E-01	5,12E+00	0,0161	0,0075	0,0047	0,0000
1039,11	44,15	2,05E-01	4,83E+00	0,0215	0,0075	0,0054	0,0000
2014,57	47,91	1,06E-01	4,45E+00	0,0251	0,0075	0,0036	0,0000
3177,97	89,86	6,71E-02	2,37E+00	0,0313	0,0086	0,0062	0,0011
4423,01	328,12	4,82E-02	6,50E-01	0,0383	0,0134	0,0070	0,0048
5739,47	961,23	3,72E-02	2,22E-01	0,0431	0,0208	0,0048	0,0074
7118,77	1905,72	3,00E-02	1,12E-01	0,0461	0,0273	0,0030	0,0065
8561,68	3055,13	2,49E-02	6,98E-02	0,0479	0,0358	0,0018	0,0085
10070,44	4294,69	2,12E-02	4,97E-02	0,0492	0,0434	0,0013	0,0076
11642,79	5604,19	1,83E-02	3,81E-02	0,0502	0,0478	0,0010	0,0044
13281,44	6978,21	1,61E-02	3,06E-02	0,0508	0,0503	0,0007	0,0025
14984,15	8416,56	1,42E-02	2,54E-02	0,0514	0,0519	0,0006	0,0016
16743,13	9919,46	1,27E-02	2,15E-02	0,0519	0,0531	0,0005	0,0012
18562,25	11485,11	1,15E-02	1,86E-02	0,0523	0,0536	0,0004	0,0006
20452,85	13117,94	1,04E-02	1,63E-02	0,0527	0,0542	0,0004	0,0005
22411,92	14812,46	9,52E-03	1,44E-02	0,0532	0,0546	0,0004	0,0004
24432,85	16563,28	8,73E-03	1,29E-02	0,0536	0,0549	0,0004	0,0003
26520,73	18367,54	8,04E-03	1,16E-02	0,0541	0,0553	0,0005	0,0004
28679,24	20240,83	7,44E-03	1,05E-02	0,0546	0,0555	0,0005	0,0002
30907,03	22192,09	6,90E-03	9,61E-03	0,0549	0,0555	0,0003	0,0000
33201,55	24204,96	6,43E-03	8,81E-03	0,0552	0,0556	0,0003	0,0001
35540,30	26285,92	6,00E-03	8,12E-03	0,0555	0,0557	0,0003	0,0001
38068,29	28438,12	5,60E-03	7,50E-03	0,0559	0,0559	0,0005	0,0002
40667,22	30659,92	5,25E-03	6,96E-03	0,0567	0,0560	0,0007	0,0001
43255,86	32945,36	4,93E-03	6,48E-03	0,0578	0,0562	0,0011	0,0003
45909,57	35273,52	4,65E-03	6,05E-03	0,0589	0,0565	0,0012	0,0002
48627,82	37731,05	4,39E-03	5,65E-03	0,0603	0,0568	0,0013	0,0003
51416,30	40357,49	4,15E-03	5,29E-03	0,0616	0,0571	0,0013	0,0004
54856,60	42954,70	3,89E-03	4,97E-03	0,0630	0,0576	0,0014	0,0004
	45602,73		4,68E-03		0,0582		0,0006
	48312,68		4,42E-03		0,0589		0,0007
	51085,89		4,18E-03		0,0595		0,0007
	54467,19		3,92E-03		0,0603		0,0007

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 2B - cura submersa							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,07E+03	1,06E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,38	0,40	5,57E+02	5,29E+02	0,0021	0,0020	0,0021	0,0020
0,73	0,76	2,91E+02	2,82E+02	0,0040	0,0045	0,0019	0,0025
1,20	1,16	1,77E+02	1,85E+02	0,0052	0,0058	0,0013	0,0013
1,48	1,53	1,44E+02	1,40E+02	0,0058	0,0061	0,0005	0,0003
1,79	1,97	1,19E+02	1,08E+02	0,0062	0,0063	0,0004	0,0002
2,17	2,29	9,84E+01	9,34E+01	0,0063	0,0064	0,0001	0,0001
2,70	2,68	7,91E+01	7,97E+01	0,0065	0,0065	0,0003	0,0001
3,19	3,06	6,69E+01	6,97E+01	0,0066	0,0066	0,0000	0,0001
3,66	3,42	5,83E+01	6,24E+01	0,0068	0,0069	0,0002	0,0003
4,08	3,80	5,23E+01	5,61E+01	0,0070	0,0069	0,0002	0,0000
4,65	4,21	4,59E+01	5,07E+01	0,0071	0,0069	0,0002	0,0001
5,33	4,66	4,00E+01	4,57E+01	0,0071	0,0070	0,0000	0,0001
6,06	5,24	3,52E+01	4,07E+01	0,0071	0,0070	0,0000	0,0000
6,87	5,84	3,11E+01	3,65E+01	0,0072	0,0072	0,0000	0,0002
7,81	6,57	2,73E+01	3,25E+01	0,0074	0,0074	0,0003	0,0002
8,81	7,29	2,42E+01	2,93E+01	0,0074	0,0074	0,0000	0,0001
9,92	8,06	2,15E+01	2,65E+01	0,0074	0,0074	0,0000	0,0000
11,06	8,86	1,93E+01	2,41E+01	0,0074	0,0074	0,0000	0,0000
12,09	9,77	1,77E+01	2,18E+01	0,0074	0,0075	0,0000	0,0001
13,10	10,69	1,63E+01	2,00E+01	0,0077	0,0077	0,0003	0,0002
14,21	11,61	1,50E+01	1,84E+01	0,0077	0,0078	0,0000	0,0001
15,41	12,73	1,38E+01	1,68E+01	0,0077	0,0078	0,0000	0,0000
16,65	13,99	1,28E+01	1,53E+01	0,0077	0,0078	0,0000	0,0000
18,02	15,25	1,18E+01	1,40E+01	0,0077	0,0080	0,0000	0,0002
19,47	16,60	1,10E+01	1,29E+01	0,0077	0,0080	0,0000	0,0000
20,95	18,12	1,02E+01	1,18E+01	0,0077	0,0080	0,0000	0,0000
22,54	19,76	9,46E+00	1,08E+01	0,0077	0,0081	0,0000	0,0001
24,33	21,50	8,77E+00	9,92E+00	0,0077	0,0082	0,0000	0,0001
26,18	23,32	8,15E+00	9,15E+00	0,0077	0,0082	0,0000	0,0000
28,20	25,23	7,56E+00	8,45E+00	0,0077	0,0083	0,0000	0,0001
30,74	27,46	6,94E+00	7,77E+00	0,0077	0,0083	0,0000	0,0001
33,45	29,82	6,38E+00	7,15E+00	0,0077	0,0083	0,0000	0,0000
35,98	32,10	5,93E+00	6,65E+00	0,0077	0,0085	0,0000	0,0002
38,87	34,49	5,49E+00	6,18E+00	0,0077	0,0087	0,0000	0,0002
41,75	36,92	5,11E+00	5,78E+00	0,0077	0,0087	0,0000	0,0000
44,28	39,50	4,82E+00	5,40E+00	0,0077	0,0087	0,0000	0,0000
50,30	42,01	4,24E+00	5,08E+00	0,0077	0,0087	0,0000	0,0000
120,48	44,57	1,77E+00	4,79E+00	0,0088	0,0087	0,0011	0,0000
466,49	51,01	4,57E-01	4,18E+00	0,0116	0,0087	0,0028	0,0000
1223,18	126,35	1,74E-01	1,69E+00	0,0129	0,0099	0,0013	0,0011
2268,54	485,25	9,40E-02	4,40E-01	0,0138	0,0142	0,0009	0,0044
3478,01	1243,01	6,13E-02	1,72E-01	0,0159	0,0171	0,0021	0,0028
4765,69	2284,05	4,48E-02	9,34E-02	0,0188	0,0182	0,0030	0,0011
6118,18	3482,58	3,49E-02	6,13E-02	0,0209	0,0207	0,0021	0,0025
7534,05	4749,34	2,83E-02	4,49E-02	0,0222	0,0246	0,0012	0,0039
9014,50	6081,36	2,37E-02	3,51E-02	0,0227	0,0277	0,0005	0,0031
10558,67	7475,23	2,02E-02	2,85E-02	0,0229	0,0302	0,0002	0,0025
12167,82	8932,19	1,75E-02	2,39E-02	0,0229	0,0320	0,0000	0,0018
13843,52	10456,59	1,54E-02	2,04E-02	0,0230	0,0333	0,0001	0,0013
15575,94	12045,46	1,37E-02	1,77E-02	0,0231	0,0343	0,0001	0,0010
17364,87	13699,56	1,23E-02	1,56E-02	0,0231	0,0351	0,0000	0,0008
19222,50	15412,83	1,11E-02	1,38E-02	0,0232	0,0358	0,0001	0,0007
21147,48	17185,57	1,01E-02	1,24E-02	0,0233	0,0365	0,0001	0,0007
23144,39	19021,16	9,22E-03	1,12E-02	0,0234	0,0372	0,0001	0,0007
25206,28	20925,66	8,46E-03	1,02E-02	0,0235	0,0378	0,0001	0,0006
27335,45	22898,28	7,80E-03	9,32E-03	0,0237	0,0383	0,0002	0,0005
29529,85	24936,03	7,22E-03	8,56E-03	0,0241	0,0390	0,0004	0,0007
31768,72	27040,53	6,72E-03	7,89E-03	0,0243	0,0398	0,0002	0,0008
34059,07	29214,16	6,26E-03	7,30E-03	0,0246	0,0401	0,0003	0,0003
36293,77	31460,49	5,88E-03	6,78E-03	0,0250	0,0406	0,0004	0,0005
38530,88	33766,91	5,54E-03	6,32E-03	0,0255	0,0412	0,0005	0,0006
40917,57	36121,14	5,21E-03	5,91E-03	0,0260	0,0418	0,0005	0,0005
43516,41	38536,27	4,90E-03	5,54E-03	0,0266	0,0424	0,0006	0,0007
46192,11	41022,92	4,62E-03	5,20E-03	0,0271	0,0432	0,0005	0,0007
48938,19	43618,37	4,36E-03	4,89E-03	0,0276	0,0438	0,0004	0,0006
51750,14	46278,79	4,12E-03	4,61E-03	0,0279	0,0444	0,0004	0,0006
54884,51	49002,56	3,89E-03	4,35E-03	0,0284	0,0453	0,0005	0,0009
59180,41	51837,69	3,61E-03	4,12E-03	0,0292	0,0460	0,0008	0,0007
	55787,13		3,82E-03		0,0470		0,0011

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 3B - cura submersa							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,07E+03	1,07E+03	0,0000	0,0003	0,0000	0,0003
0,45	0,45	4,71E+02	4,71E+02	0,0012	0,0027	0,0012	0,0024
0,83	0,83	2,59E+02	2,59E+02	0,0021	0,0050	0,0008	0,0023
1,11	1,11	1,92E+02	1,92E+02	0,0025	0,0060	0,0004	0,0010
1,52	1,52	1,40E+02	1,40E+02	0,0029	0,0068	0,0004	0,0008
1,86	1,86	1,15E+02	1,15E+02	0,0032	0,0070	0,0003	0,0002
2,28	2,28	9,36E+01	9,36E+01	0,0035	0,0070	0,0002	0,0000
2,74	2,74	7,78E+01	7,78E+01	0,0037	0,0070	0,0002	0,0000
3,20	3,20	6,66E+01	6,66E+01	0,0038	0,0070	0,0001	0,0000
3,79	3,79	5,63E+01	5,63E+01	0,0039	0,0070	0,0001	0,0000
4,37	4,37	4,89E+01	4,89E+01	0,0040	0,0070	0,0001	0,0000
5,02	5,02	4,25E+01	4,25E+01	0,0041	0,0070	0,0001	0,0000
5,67	5,67	3,76E+01	3,76E+01	0,0043	0,0070	0,0002	0,0000
6,36	6,36	3,35E+01	3,35E+01	0,0047	0,0070	0,0004	0,0000
7,20	7,20	2,97E+01	2,97E+01	0,0050	0,0070	0,0003	0,0000
8,00	8,00	2,67E+01	2,67E+01	0,0051	0,0070	0,0002	0,0000
8,93	8,93	2,39E+01	2,39E+01	0,0054	0,0070	0,0002	0,0000
9,88	9,88	2,16E+01	2,16E+01	0,0056	0,0070	0,0002	0,0000
11,01	11,01	1,94E+01	1,94E+01	0,0058	0,0075	0,0002	0,0004
12,18	12,18	1,75E+01	1,75E+01	0,0058	0,0100	0,0000	0,0025
13,27	13,27	1,61E+01	1,61E+01	0,0060	0,0123	0,0001	0,0024
14,47	14,47	1,47E+01	1,47E+01	0,0062	0,0123	0,0002	0,0000
15,76	15,76	1,35E+01	1,35E+01	0,0063	0,0123	0,0002	0,0000
17,14	17,14	1,24E+01	1,24E+01	0,0063	0,0123	0,0000	0,0000
18,61	18,61	1,15E+01	1,15E+01	0,0066	0,0123	0,0002	0,0000
20,17	20,17	1,06E+01	1,06E+01	0,0067	0,0123	0,0001	0,0000
21,82	21,82	9,78E+00	9,78E+00	0,0069	0,0123	0,0002	0,0000
23,53	23,53	9,07E+00	9,07E+00	0,0071	0,0123	0,0002	0,0000
25,50	25,50	8,37E+00	8,37E+00	0,0072	0,0123	0,0002	0,0000
27,60	27,60	7,73E+00	7,73E+00	0,0075	0,0123	0,0002	0,0000
29,84	29,84	7,15E+00	7,15E+00	0,0076	0,0123	0,0001	0,0000
32,34	32,34	6,60E+00	6,60E+00	0,0076	0,0123	0,0000	0,0000
34,91	34,91	6,11E+00	6,11E+00	0,0080	0,0123	0,0003	0,0000
37,35	37,35	5,71E+00	5,71E+00	0,0080	0,0123	0,0000	0,0000
39,81	39,81	5,36E+00	5,36E+00	0,0080	0,0123	0,0000	0,0000
42,30	42,30	5,04E+00	5,04E+00	0,0081	0,0123	0,0002	0,0000
44,92	44,92	4,75E+00	4,75E+00	0,0081	0,0129	0,0000	0,0006
53,21	48,50	4,01E+00	4,40E+00	0,0082	0,0147	0,0001	0,0018
144,89	102,70	1,47E+00	2,08E+00	0,0093	0,0154	0,0011	0,0007
544,64	426,20	3,92E-01	5,01E-01	0,0133	0,0186	0,0040	0,0032
1322,02	1156,72	1,61E-01	1,84E-01	0,0193	0,0231	0,0060	0,0045
2354,17	2170,34	9,06E-02	9,83E-02	0,0277	0,0302	0,0084	0,0071
3536,77	3353,22	6,03E-02	6,36E-02	0,0378	0,0387	0,0101	0,0084
4798,49	4616,09	4,45E-02	4,62E-02	0,0435	0,0444	0,0057	0,0057
6129,92	5947,81	3,48E-02	3,59E-02	0,0467	0,0480	0,0032	0,0037
7525,90	7341,88	2,84E-02	2,91E-02	0,0487	0,0506	0,0020	0,0025
8985,82	8795,38	2,37E-02	2,43E-02	0,0501	0,0523	0,0014	0,0017
10511,05	10316,41	2,03E-02	2,07E-02	0,0512	0,0535	0,0011	0,0012
12101,24	11905,59	1,76E-02	1,79E-02	0,0520	0,0545	0,0008	0,0010
13755,50	13560,26	1,55E-02	1,57E-02	0,0527	0,0554	0,0007	0,0009
15472,77	15278,74	1,38E-02	1,40E-02	0,0534	0,0561	0,0006	0,0006
17250,00	17054,53	1,24E-02	1,25E-02	0,0540	0,0569	0,0006	0,0008
19088,27	18888,52	1,12E-02	1,13E-02	0,0546	0,0577	0,0006	0,0008
20993,53	20792,20	1,02E-02	1,03E-02	0,0551	0,0586	0,0005	0,0009
22967,30	22768,00	9,29E-03	9,37E-03	0,0556	0,0595	0,0005	0,0009
25007,34	24809,91	8,53E-03	8,60E-03	0,0562	0,0601	0,0006	0,0006
27114,67	26917,60	7,87E-03	7,93E-03	0,0567	0,0607	0,0005	0,0007
29293,00	29094,37	7,28E-03	7,33E-03	0,0571	0,0615	0,0005	0,0008
31539,64	31342,34	6,76E-03	6,81E-03	0,0577	0,0621	0,0005	0,0006
33845,04	33658,27	6,30E-03	6,34E-03	0,0582	0,0628	0,0005	0,0006
36189,36	36014,48	5,90E-03	5,92E-03	0,0586	0,0636	0,0005	0,0008
38594,55	38420,06	5,53E-03	5,55E-03	0,0592	0,0644	0,0006	0,0008
41113,26	40923,58	5,19E-03	5,21E-03	0,0597	0,0653	0,0005	0,0009
43707,34	43518,65	4,88E-03	4,90E-03	0,0602	0,0663	0,0005	0,0010
46368,44	46182,55	4,60E-03	4,62E-03	0,0607	0,0671	0,0005	0,0008
49141,90	48976,68	4,34E-03	4,36E-03	0,0613	0,0680	0,0006	0,0009
52133,49	51964,93	4,09E-03	4,11E-03	0,0619	0,0690	0,0006	0,0010
55743,16	55204,13	3,83E-03	3,86E-03	0,0624	0,0699	0,0005	0,0009

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 4B - cura submersa							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,06E+03	1,06E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,48	0,48	4,44E+02	4,44E+02	0,0018	0,0029	0,0018	0,0029
0,83	0,83	2,57E+02	2,57E+02	0,0032	0,0054	0,0013	0,0024
1,15	1,15	1,86E+02	1,86E+02	0,0037	0,0062	0,0005	0,0009
1,52	1,52	1,41E+02	1,41E+02	0,0042	0,0072	0,0005	0,0010
1,91	1,91	1,12E+02	1,12E+02	0,0043	0,0075	0,0000	0,0003
2,28	2,28	9,35E+01	9,35E+01	0,0044	0,0077	0,0001	0,0002
2,75	2,75	7,75E+01	7,75E+01	0,0046	0,0082	0,0002	0,0005
3,13	3,13	6,82E+01	6,82E+01	0,0050	0,0086	0,0004	0,0004
3,62	3,62	5,90E+01	5,90E+01	0,0050	0,0087	0,0000	0,0001
4,18	4,18	5,11E+01	5,11E+01	0,0050	0,0089	0,0000	0,0002
4,79	4,79	4,45E+01	4,45E+01	0,0050	0,0098	0,0000	0,0010
5,47	5,47	3,90E+01	3,90E+01	0,0050	0,0109	0,0000	0,0010
6,19	6,19	3,45E+01	3,45E+01	0,0052	0,0112	0,0002	0,0003
6,84	6,84	3,12E+01	3,12E+01	0,0052	0,0115	0,0000	0,0003
7,54	7,54	2,83E+01	2,83E+01	0,0054	0,0119	0,0002	0,0004
8,42	8,42	2,53E+01	2,53E+01	0,0054	0,0121	0,0001	0,0002
9,31	9,31	2,29E+01	2,29E+01	0,0056	0,0125	0,0002	0,0004
10,38	10,38	2,06E+01	2,06E+01	0,0057	0,0128	0,0001	0,0003
11,49	11,49	1,86E+01	1,86E+01	0,0057	0,0130	0,0000	0,0002
12,53	12,53	1,70E+01	1,70E+01	0,0059	0,0133	0,0002	0,0003
13,68	13,68	1,56E+01	1,56E+01	0,0059	0,0135	0,0000	0,0001
14,93	14,93	1,43E+01	1,43E+01	0,0059	0,0135	0,0000	0,0000
16,34	16,34	1,31E+01	1,31E+01	0,0059	0,0136	0,0000	0,0001
17,75	17,75	1,20E+01	1,20E+01	0,0059	0,0139	0,0000	0,0003
19,23	19,23	1,11E+01	1,11E+01	0,0059	0,0139	0,0000	0,0000
20,78	20,78	1,03E+01	1,03E+01	0,0059	0,0141	0,0000	0,0002
22,42	22,42	9,52E+00	9,52E+00	0,0059	0,0143	0,0000	0,0002
24,19	24,19	8,82E+00	8,82E+00	0,0061	0,0144	0,0002	0,0001
26,37	26,37	8,09E+00	8,09E+00	0,0063	0,0147	0,0002	0,0003
28,60	28,60	7,46E+00	7,46E+00	0,0064	0,0148	0,0001	0,0001
30,65	30,65	6,96E+00	6,96E+00	0,0064	0,0148	0,0000	0,0000
32,55	32,55	6,55E+00	6,55E+00	0,0064	0,0149	0,0000	0,0001
34,56	34,56	6,17E+00	6,17E+00	0,0064	0,0151	0,0000	0,0002
37,03	37,03	5,76E+00	5,76E+00	0,0064	0,0154	0,0000	0,0002
39,73	39,73	5,37E+00	5,37E+00	0,0064	0,0155	0,0000	0,0001
42,32	42,32	5,04E+00	5,04E+00	0,0064	0,0155	0,0000	0,0000
44,89	44,89	4,75E+00	4,75E+00	0,0064	0,0155	0,0000	0,0000
48,95	48,95	4,36E+00	3,98E+00	0,0064	0,0159	0,0000	0,0003
101,04	154,81	2,11E+00	1,38E+00	0,0079	0,0191	0,0015	0,0033
390,20	576,36	5,47E-01	3,70E-01	0,0148	0,0281	0,0069	0,0089
1079,05	1378,36	1,98E-01	1,55E-01	0,0238	0,0351	0,0090	0,0070
2067,66	2440,49	1,03E-01	8,74E-02	0,0301	0,0406	0,0063	0,0055
3237,55	3642,83	6,59E-02	5,86E-02	0,0374	0,0476	0,0074	0,0070
4488,66	4917,19	4,75E-02	4,34E-02	0,0436	0,0532	0,0061	0,0056
5808,62	6260,08	3,67E-02	3,41E-02	0,0475	0,0570	0,0040	0,0038
7192,33	7664,76	2,97E-02	2,78E-02	0,0501	0,0596	0,0026	0,0025
8639,18	9132,10	2,47E-02	2,34E-02	0,0521	0,0614	0,0020	0,0018
10151,05	10665,01	2,10E-02	2,00E-02	0,0535	0,0629	0,0014	0,0015
11728,03	12266,64	1,82E-02	1,74E-02	0,0545	0,0639	0,0011	0,0011
13373,01	13934,96	1,60E-02	1,53E-02	0,0554	0,0649	0,0009	0,0009
15080,05	15664,10	1,42E-02	1,36E-02	0,0561	0,0656	0,0007	0,0008
16845,57	17452,17	1,27E-02	1,22E-02	0,0566	0,0661	0,0005	0,0004
18666,11	19297,98	1,14E-02	1,11E-02	0,0571	0,0667	0,0005	0,0007
20544,09	21212,40	1,04E-02	1,01E-02	0,0575	0,0673	0,0004	0,0006
22497,54	23198,69	9,48E-03	9,20E-03	0,0580	0,0679	0,0004	0,0006
24524,47	25249,53	8,70E-03	8,45E-03	0,0582	0,0683	0,0003	0,0004
26618,12	27365,80	8,01E-03	7,80E-03	0,0584	0,0689	0,0002	0,0006
28780,42	29551,55	7,41E-03	7,22E-03	0,0588	0,0695	0,0004	0,0006
31014,99	31810,28	6,88E-03	6,71E-03	0,0592	0,0699	0,0005	0,0005
33307,53	34116,09	6,41E-03	6,25E-03	0,0596	0,0704	0,0004	0,0005
35648,53	36489,86	5,98E-03	5,85E-03	0,0601	0,0710	0,0005	0,0006
38049,71	38907,75	5,61E-03	5,48E-03	0,0610	0,0717	0,0008	0,0006
40529,38	41429,44	5,26E-03	5,15E-03	0,0619	0,0723	0,0009	0,0006
43113,60	44034,00	4,95E-03	4,84E-03	0,0634	0,0730	0,0015	0,0007
45764,21	46706,50	4,66E-03	4,57E-03	0,0647	0,0737	0,0013	0,0008
48485,39	49478,15	4,40E-03	4,31E-03	0,0661	0,0746	0,0014	0,0009
51448,75	52599,88	4,15E-03	4,06E-03	0,0673	0,0756	0,0013	0,0010
55140,26	56471,00	3,87E-03	3,78E-03	0,0687	0,0766	0,0014	0,0010

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 1B - caixa aquecida							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,06E+03	1,06E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,40	0,51	5,29E+02	4,17E+02	0,0032	0,0031	0,0032	0,0031
0,76	0,91	2,82E+02	2,35E+02	0,0057	0,0056	0,0025	0,0025
1,16	1,23	1,85E+02	1,74E+02	0,0070	0,0066	0,0013	0,0010
1,53	1,65	1,40E+02	1,29E+02	0,0076	0,0074	0,0006	0,0009
1,97	2,02	1,08E+02	1,05E+02	0,0081	0,0078	0,0005	0,0004
2,29	2,47	9,34E+01	8,65E+01	0,0086	0,0078	0,0005	0,0000
2,68	2,86	7,97E+01	7,46E+01	0,0088	0,0080	0,0002	0,0002
3,06	3,28	6,97E+01	6,50E+01	0,0093	0,0083	0,0005	0,0003
3,42	3,85	6,24E+01	5,54E+01	0,0095	0,0085	0,0003	0,0002
3,80	4,43	5,61E+01	4,82E+01	0,0096	0,0086	0,0000	0,0001
4,21	5,05	5,07E+01	4,22E+01	0,0098	0,0087	0,0003	0,0001
4,66	5,75	4,57E+01	3,71E+01	0,0098	0,0089	0,0000	0,0001
5,24	6,37	4,07E+01	3,35E+01	0,0104	0,0090	0,0005	0,0002
5,84	7,15	3,65E+01	2,98E+01	0,0107	0,0091	0,0003	0,0001
6,57	8,05	3,25E+01	2,65E+01	0,0108	0,0091	0,0001	0,0000
7,29	8,93	2,93E+01	2,39E+01	0,0108	0,0093	0,0000	0,0002
8,06	9,74	2,65E+01	2,19E+01	0,0108	0,0094	0,0000	0,0001
8,86	10,63	2,41E+01	2,01E+01	0,0108	0,0094	0,0000	0,0000
9,77	11,56	2,18E+01	1,85E+01	0,0111	0,0094	0,0003	0,0000
10,69	12,62	2,00E+01	1,69E+01	0,0111	0,0095	0,0000	0,0001
11,61	13,84	1,84E+01	1,54E+01	0,0111	0,0096	0,0000	0,0002
12,73	15,08	1,68E+01	1,42E+01	0,0111	0,0096	0,0001	0,0000
13,99	16,34	1,53E+01	1,31E+01	0,0114	0,0098	0,0003	0,0002
15,25	17,69	1,40E+01	1,21E+01	0,0117	0,0099	0,0003	0,0001
16,60	19,16	1,29E+01	1,11E+01	0,0117	0,0099	0,0000	0,0000
18,12	20,79	1,18E+01	1,03E+01	0,0118	0,0099	0,0001	0,0000
19,76	22,44	1,08E+01	9,51E+00	0,0120	0,0099	0,0002	0,0000
21,50	24,22	9,92E+00	8,81E+00	0,0120	0,0099	0,0000	0,0000
23,32	26,08	9,15E+00	8,18E+00	0,0120	0,0100	0,0000	0,0001
25,23	28,17	8,45E+00	7,57E+00	0,0122	0,0102	0,0002	0,0002
27,46	30,38	7,77E+00	7,02E+00	0,0123	0,0102	0,0001	0,0000
29,82	32,66	7,15E+00	6,53E+00	0,0123	0,0102	0,0000	0,0000
32,10	35,06	6,65E+00	6,09E+00	0,0123	0,0102	0,0000	0,0000
34,49	37,57	6,18E+00	5,68E+00	0,0125	0,0102	0,0002	0,0000
36,92	40,14	5,78E+00	5,31E+00	0,0129	0,0102	0,0004	0,0000
39,50	42,64	5,40E+00	5,00E+00	0,0129	0,0104	0,0000	0,0002
42,01	45,33	5,08E+00	4,71E+00	0,0129	0,0104	0,0000	0,0000
44,57	49,64	4,79E+00	4,30E+00	0,0129	0,0104	0,0000	0,0000
52,89	113,29	4,03E+00	1,88E+00	0,0129	0,0119	0,0000	0,0015
146,92	454,79	1,45E+00	4,69E-01	0,0143	0,0192	0,0014	0,0072
554,88	1199,47	3,84E-01	1,78E-01	0,0238	0,0264	0,0096	0,0073
1347,32	2225,35	1,58E-01	9,59E-02	0,0351	0,0300	0,0113	0,0035
2410,32	3418,42	8,85E-02	6,24E-02	0,0396	0,0319	0,0044	0,0019
3622,43	4688,81	5,89E-02	4,55E-02	0,0423	0,0331	0,0027	0,0012
4904,34	6027,62	4,35E-02	3,54E-02	0,0442	0,0339	0,0019	0,0009
6251,76	7426,69	3,41E-02	2,87E-02	0,0456	0,0346	0,0014	0,0006
7661,93	8885,23	2,78E-02	2,40E-02	0,0468	0,0352	0,0012	0,0006
9135,41	10410,17	2,34E-02	2,05E-02	0,0478	0,0357	0,0010	0,0005
10672,00	12002,15	2,00E-02	1,78E-02	0,0488	0,0362	0,0010	0,0005
12274,28	13658,82	1,74E-02	1,56E-02	0,0495	0,0365	0,0008	0,0003
13943,17	15375,95	1,53E-02	1,39E-02	0,0499	0,0368	0,0003	0,0003
15672,97	17145,31	1,36E-02	1,24E-02	0,0504	0,0371	0,0006	0,0003
17457,46	18977,88	1,22E-02	1,12E-02	0,0512	0,0373	0,0007	0,0003
19305,62	20882,95	1,11E-02	1,02E-02	0,0516	0,0377	0,0004	0,0004
21223,13	22854,75	1,01E-02	9,33E-03	0,0516	0,0380	0,0000	0,0003
23210,51	24894,22	9,19E-03	8,57E-03	0,0519	0,0383	0,0003	0,0003
25266,42	26998,53	8,44E-03	7,90E-03	0,0523	0,0387	0,0004	0,0003
27386,58	29171,86	7,79E-03	7,31E-03	0,0528	0,0390	0,0004	0,0003
29577,68	31416,38	7,21E-03	6,79E-03	0,0531	0,0393	0,0003	0,0003
31840,17	33721,21	6,70E-03	6,33E-03	0,0534	0,0397	0,0003	0,0004
34167,11	36081,12	6,24E-03	5,91E-03	0,0539	0,0402	0,0004	0,0006
36539,16	38639,37	5,84E-03	5,52E-03	0,0542	0,0408	0,0004	0,0006
39108,07	41238,12	5,46E-03	5,17E-03	0,0548	0,0413	0,0006	0,0005
41722,11	43840,63	5,11E-03	4,87E-03	0,0554	0,0419	0,0006	0,0005
44342,35	46508,41	4,81E-03	4,59E-03	0,0560	0,0423	0,0006	0,0005
47029,01	49241,90	4,54E-03	4,33E-03	0,0566	0,0429	0,0006	0,0005
49778,66	52044,31	4,29E-03	4,10E-03	0,0572	0,0435	0,0006	0,0006
52595,14	55615,22	4,06E-03	3,84E-03	0,0578	0,0441	0,0005	0,0006
55889,89		3,82E-03		0,0584		0,0007	

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 2B - caixa aquecida							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,07E+03	1,07E+03	0,0000	0,0003	0,0000	0,0003
0,54	0,54	3,93E+02	3,93E+02	0,0047	0,0037	0,0047	0,0035
0,99	0,99	2,17E+02	2,17E+02	0,0096	0,0066	0,0049	0,0029
1,29	1,29	1,65E+02	1,65E+02	0,0109	0,0076	0,0013	0,0010
1,75	1,75	1,22E+02	1,22E+02	0,0120	0,0084	0,0011	0,0008
2,16	2,16	9,88E+01	9,88E+01	0,0122	0,0085	0,0002	0,0001
2,61	2,61	8,17E+01	8,17E+01	0,0125	0,0085	0,0004	0,0001
3,13	3,13	6,81E+01	6,81E+01	0,0127	0,0088	0,0002	0,0003
3,57	3,57	5,98E+01	5,98E+01	0,0133	0,0092	0,0006	0,0004
4,03	4,03	5,29E+01	5,29E+01	0,0135	0,0094	0,0002	0,0002
4,52	4,52	4,72E+01	4,72E+01	0,0135	0,0095	0,0000	0,0001
5,05	5,05	4,22E+01	4,22E+01	0,0135	0,0095	0,0000	0,0000
5,67	5,67	3,76E+01	3,76E+01	0,0137	0,0097	0,0002	0,0001
6,33	6,33	3,37E+01	3,37E+01	0,0141	0,0101	0,0003	0,0005
6,96	6,96	3,07E+01	3,07E+01	0,0142	0,0103	0,0001	0,0002
7,59	7,59	2,81E+01	2,81E+01	0,0143	0,0103	0,0001	0,0000
8,28	8,28	2,58E+01	2,58E+01	0,0143	0,0106	0,0000	0,0002
9,03	9,03	2,36E+01	2,36E+01	0,0143	0,0107	0,0000	0,0002
9,92	9,92	2,15E+01	2,15E+01	0,0146	0,0108	0,0002	0,0001
10,82	10,82	1,97E+01	1,97E+01	0,0149	0,0110	0,0003	0,0001
11,72	11,72	1,82E+01	1,82E+01	0,0149	0,0111	0,0000	0,0001
12,72	12,72	1,68E+01	1,68E+01	0,0149	0,0112	0,0000	0,0001
13,95	13,95	1,53E+01	1,53E+01	0,0150	0,0114	0,0001	0,0001
15,21	15,21	1,40E+01	1,40E+01	0,0151	0,0114	0,0001	0,0000
16,53	16,53	1,29E+01	1,29E+01	0,0152	0,0114	0,0001	0,0000
18,10	18,10	1,18E+01	1,18E+01	0,0157	0,0116	0,0005	0,0002
19,80	19,80	1,08E+01	1,08E+01	0,0157	0,0119	0,0000	0,0002
21,60	21,60	9,88E+00	9,88E+00	0,0158	0,0119	0,0001	0,0000
23,05	23,05	9,25E+00	9,25E+00	0,0160	0,0121	0,0002	0,0002
24,49	24,49	8,71E+00	8,71E+00	0,0160	0,0122	0,0000	0,0000
25,96	25,96	8,22E+00	8,22E+00	0,0160	0,0122	0,0000	0,0000
27,80	27,80	7,67E+00	7,67E+00	0,0161	0,0122	0,0001	0,0000
30,12	30,12	7,08E+00	7,08E+00	0,0162	0,0124	0,0002	0,0002
32,46	32,46	6,57E+00	6,57E+00	0,0164	0,0124	0,0002	0,0000
34,73	34,73	6,14E+00	6,14E+00	0,0165	0,0124	0,0001	0,0000
37,18	37,18	5,74E+00	5,74E+00	0,0165	0,0126	0,0000	0,0002
39,78	39,78	5,36E+00	5,36E+00	0,0165	0,0127	0,0000	0,0001
42,33	42,33	5,04E+00	5,04E+00	0,0165	0,0127	0,0000	0,0000
44,93	44,93	4,75E+00	4,75E+00	0,0167	0,0128	0,0002	0,0001
55,07	61,78	3,87E+00	3,45E+00	0,0169	0,0132	0,0001	0,0004
150,54	198,61	1,42E+00	1,07E+00	0,0183	0,0155	0,0015	0,0023
552,19	689,34	3,86E-01	3,10E-01	0,0253	0,0221	0,0070	0,0067
1337,91	1543,93	1,59E-01	1,38E-01	0,0359	0,0288	0,0105	0,0067
2393,57	2647,95	8,91E-02	8,06E-02	0,0458	0,0348	0,0099	0,0060
3599,32	3870,34	5,93E-02	5,51E-02	0,0513	0,0415	0,0055	0,0067
4879,79	5160,35	4,37E-02	4,13E-02	0,0541	0,0464	0,0028	0,0049
6225,61	6521,63	3,43E-02	3,27E-02	0,0560	0,0495	0,0019	0,0031
7633,53	7941,89	2,80E-02	2,69E-02	0,0571	0,0516	0,0012	0,0021
9104,48	9428,10	2,34E-02	2,26E-02	0,0579	0,0531	0,0008	0,0014
10638,11	10981,37	2,01E-02	1,94E-02	0,0585	0,0541	0,0006	0,0010
12236,15	12602,19	1,74E-02	1,69E-02	0,0589	0,0550	0,0004	0,0009
13901,22	14287,53	1,54E-02	1,49E-02	0,0590	0,0556	0,0001	0,0006
15624,31	16033,35	1,37E-02	1,33E-02	0,0592	0,0563	0,0002	0,0007
17402,59	17835,30	1,23E-02	1,20E-02	0,0592	0,0568	0,0001	0,0005
19236,38	19704,21	1,11E-02	1,08E-02	0,0592	0,0572	0,0000	0,0004
21142,33	21641,62	1,01E-02	9,86E-03	0,0592	0,0576	0,0000	0,0004
23125,46	23645,21	9,23E-03	9,02E-03	0,0592	0,0579	0,0000	0,0003
25174,57	25718,64	8,47E-03	8,29E-03	0,0592	0,0581	0,0000	0,0002
27290,55	27859,48	7,82E-03	7,66E-03	0,0592	0,0584	0,0000	0,0003
29475,86	30069,93	7,24E-03	7,09E-03	0,0592	0,0588	0,0000	0,0004
31733,40	32350,83	6,72E-03	6,59E-03	0,0592	0,0592	0,0000	0,0004
34044,12	34762,33	6,27E-03	6,14E-03	0,0592	0,0597	0,0000	0,0005
36396,54	37295,43	5,86E-03	5,72E-03	0,0592	0,0601	0,0000	0,0004
38814,57	39754,99	5,50E-03	5,37E-03	0,0593	0,0606	0,0001	0,0005
41341,70	42321,56	5,16E-03	5,04E-03	0,0603	0,0613	0,0010	0,0008
43947,00	44963,90	4,85E-03	4,74E-03	0,0616	0,0621	0,0013	0,0007
46617,87	47668,68	4,58E-03	4,48E-03	0,0630	0,0629	0,0014	0,0008
49353,25	50438,18	4,32E-03	4,23E-03	0,0644	0,0637	0,0014	0,0008
52199,52	53395,31	4,09E-03	4,00E-03	0,0659	0,0646	0,0014	0,0009
56042,89	57115,88	3,81E-03	3,74E-03	0,0677	0,0657	0,0018	0,0011

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 3B - caixa aquecida							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,06E+03	1,06E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,48	0,48	4,47E+02	4,47E+02	0,0028	0,0030	0,0028	0,0030
0,82	0,82	2,61E+02	2,61E+02	0,0055	0,0057	0,0027	0,0026
1,14	1,14	1,88E+02	1,88E+02	0,0066	0,0067	0,0011	0,0010
1,51	1,51	1,41E+02	1,41E+02	0,0072	0,0074	0,0006	0,0007
1,93	1,93	1,11E+02	1,11E+02	0,0080	0,0077	0,0008	0,0003
2,32	2,32	9,21E+01	9,21E+01	0,0081	0,0081	0,0001	0,0004
2,80	2,80	7,61E+01	7,61E+01	0,0083	0,0084	0,0002	0,0004
3,29	3,29	6,49E+01	6,49E+01	0,0087	0,0087	0,0003	0,0002
3,82	3,82	5,59E+01	5,59E+01	0,0089	0,0087	0,0003	0,0000
4,41	4,41	4,83E+01	4,83E+01	0,0091	0,0089	0,0002	0,0002
5,09	5,09	4,20E+01	4,20E+01	0,0095	0,0092	0,0004	0,0004
5,67	5,67	3,76E+01	3,76E+01	0,0095	0,0093	0,0000	0,0001
6,40	6,40	3,33E+01	3,33E+01	0,0098	0,0095	0,0003	0,0002
7,22	7,22	2,95E+01	2,95E+01	0,0101	0,0099	0,0003	0,0003
8,14	8,14	2,62E+01	2,62E+01	0,0104	0,0101	0,0003	0,0003
9,02	9,02	2,37E+01	2,37E+01	0,0104	0,0105	0,0000	0,0004
10,07	10,07	2,12E+01	2,12E+01	0,0104	0,0108	0,0000	0,0003
11,17	11,17	1,91E+01	1,91E+01	0,0109	0,0114	0,0005	0,0006
12,17	12,17	1,75E+01	1,75E+01	0,0110	0,0116	0,0001	0,0003
13,32	13,32	1,60E+01	1,60E+01	0,0111	0,0118	0,0001	0,0001
14,51	14,51	1,47E+01	1,47E+01	0,0113	0,0120	0,0002	0,0002
15,79	15,79	1,35E+01	1,35E+01	0,0116	0,0122	0,0003	0,0003
17,14	17,14	1,25E+01	1,25E+01	0,0116	0,0123	0,0000	0,0001
18,58	18,58	1,15E+01	1,15E+01	0,0117	0,0127	0,0001	0,0004
20,11	20,11	1,06E+01	1,06E+01	0,0119	0,0128	0,0002	0,0002
21,73	21,73	9,82E+00	9,82E+00	0,0119	0,0131	0,0000	0,0003
23,41	23,41	9,11E+00	9,11E+00	0,0119	0,0135	0,0001	0,0004
25,24	25,24	8,45E+00	8,45E+00	0,0122	0,0137	0,0002	0,0002
27,38	27,38	7,79E+00	7,79E+00	0,0125	0,0142	0,0003	0,0004
29,36	29,36	7,27E+00	7,27E+00	0,0128	0,0143	0,0003	0,0002
31,31	31,31	6,81E+00	6,81E+00	0,0128	0,0143	0,0000	0,0000
33,22	33,22	6,42E+00	6,42E+00	0,0128	0,0146	0,0000	0,0003
35,45	35,45	6,02E+00	6,02E+00	0,0129	0,0148	0,0001	0,0002
38,01	38,01	5,61E+00	5,61E+00	0,0131	0,0151	0,0002	0,0003
40,83	40,83	5,22E+00	5,22E+00	0,0131	0,0155	0,0000	0,0004
43,37	43,37	4,92E+00	4,92E+00	0,0133	0,0158	0,0002	0,0003
46,31	47,09	4,61E+00	4,53E+00	0,0134	0,0160	0,0001	0,0001
72,95	95,71	2,92E+00	2,23E+00	0,0137	0,0180	0,0003	0,0020
244,74	367,68	8,72E-01	5,80E-01	0,0190	0,0299	0,0053	0,0119
779,54	1031,01	2,74E-01	2,07E-01	0,0364	0,0473	0,0174	0,0174
1666,57	1997,55	1,28E-01	1,07E-01	0,0485	0,0551	0,0121	0,0079
2792,15	3163,62	7,64E-02	6,74E-02	0,0536	0,0595	0,0052	0,0044
4027,38	4417,17	5,30E-02	4,83E-02	0,0571	0,0625	0,0035	0,0030
5329,32	5735,54	4,00E-02	3,72E-02	0,0598	0,0650	0,0027	0,0025
6696,64	7118,40	3,19E-02	3,00E-02	0,0616	0,0667	0,0018	0,0017
8127,55	8559,29	2,63E-02	2,49E-02	0,0626	0,0678	0,0011	0,0011
9623,40	10065,09	2,22E-02	2,12E-02	0,0634	0,0687	0,0008	0,0009
11183,95	11638,66	1,91E-02	1,83E-02	0,0641	0,0691	0,0007	0,0004
12810,36	13280,89	1,67E-02	1,61E-02	0,0644	0,0694	0,0003	0,0003
14497,98	14982,57	1,47E-02	1,42E-02	0,0645	0,0697	0,0001	0,0003
16242,89	16744,02	1,31E-02	1,27E-02	0,0648	0,0700	0,0003	0,0003
18044,28	18562,40	1,18E-02	1,15E-02	0,0652	0,0702	0,0004	0,0002
19903,77	20444,01	1,07E-02	1,04E-02	0,0655	0,0705	0,0004	0,0003
21834,47	22399,51	9,77E-03	9,52E-03	0,0658	0,0707	0,0003	0,0002
23824,17	24420,30	8,95E-03	8,74E-03	0,0662	0,0712	0,0003	0,0005
25882,96	26505,82	8,24E-03	8,05E-03	0,0662	0,0716	0,0001	0,0005
28017,23	28662,45	7,61E-03	7,44E-03	0,0663	0,0720	0,0001	0,0003
30224,56	30890,59	7,06E-03	6,91E-03	0,0666	0,0723	0,0003	0,0004
32494,40	33178,34	6,57E-03	6,43E-03	0,0671	0,0728	0,0005	0,0005
34808,31	35515,45	6,13E-03	6,01E-03	0,0676	0,0732	0,0005	0,0004
37183,62	38025,00	5,74E-03	5,61E-03	0,0677	0,0736	0,0001	0,0004
39623,85	40632,51	5,38E-03	5,25E-03	0,0681	0,0742	0,0004	0,0006
42177,40	43216,72	5,06E-03	4,94E-03	0,0687	0,0749	0,0006	0,0007
44799,25	45864,52	4,76E-03	4,65E-03	0,0694	0,0756	0,0007	0,0007
47480,91	48577,67	4,49E-03	4,39E-03	0,0702	0,0763	0,0008	0,0007
50310,36	51402,64	4,24E-03	4,15E-03	0,0712	0,0770	0,0011	0,0007
53335,93	55330,92	4,00E-03	3,86E-03	0,0722	0,0779	0,0010	0,0009
57287,67		3,72E-03		0,0733		0,0011	

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)							
TRAÇO 4B - caixa aquecida							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,20	0,20	1,07E+03	1,07E+03	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,45	0,45	4,71E+02	4,71E+02	0,0015	0,0018	0,0015	0,0018
0,83	0,83	2,56E+02	2,56E+02	0,0034	0,0032	0,0019	0,0014
1,12	1,12	1,90E+02	1,90E+02	0,0045	0,0038	0,0012	0,0006
1,55	1,55	1,38E+02	1,38E+02	0,0050	0,0043	0,0005	0,0005
1,90	1,90	1,12E+02	1,12E+02	0,0054	0,0047	0,0004	0,0004
2,34	2,34	9,12E+01	9,12E+01	0,0057	0,0047	0,0003	0,0000
2,82	2,82	7,56E+01	7,56E+01	0,0061	0,0049	0,0004	0,0002
3,29	3,29	6,49E+01	6,49E+01	0,0062	0,0050	0,0002	0,0001
3,85	3,85	5,54E+01	5,54E+01	0,0067	0,0053	0,0004	0,0002
4,30	4,30	4,97E+01	4,97E+01	0,0069	0,0055	0,0003	0,0003
4,81	4,81	4,43E+01	4,43E+01	0,0069	0,0056	0,0000	0,0000
5,41	5,41	3,94E+01	3,94E+01	0,0069	0,0056	0,0000	0,0000
6,14	6,14	3,47E+01	3,47E+01	0,0069	0,0056	0,0000	0,0000
6,94	6,94	3,08E+01	3,08E+01	0,0071	0,0056	0,0002	0,0000
7,81	7,81	2,73E+01	2,73E+01	0,0072	0,0058	0,0001	0,0002
8,64	8,64	2,47E+01	2,47E+01	0,0073	0,0060	0,0001	0,0002
9,47	9,47	2,25E+01	2,25E+01	0,0076	0,0062	0,0003	0,0003
10,37	10,37	2,06E+01	2,06E+01	0,0078	0,0062	0,0002	0,0000
11,27	11,27	1,89E+01	1,89E+01	0,0080	0,0062	0,0003	0,0000
12,26	12,26	1,74E+01	1,74E+01	0,0085	0,0062	0,0005	0,0000
13,42	13,42	1,59E+01	1,59E+01	0,0092	0,0064	0,0007	0,0001
14,66	14,66	1,46E+01	1,46E+01	0,0094	0,0065	0,0003	0,0001
15,90	15,90	1,34E+01	1,34E+01	0,0100	0,0065	0,0006	0,0000
17,19	17,19	1,24E+01	1,24E+01	0,0108	0,0067	0,0008	0,0002
18,64	18,64	1,15E+01	1,15E+01	0,0113	0,0067	0,0006	0,0000
20,17	20,17	1,06E+01	1,06E+01	0,0114	0,0067	0,0000	0,0001
21,79	21,79	9,79E+00	9,79E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0002
23,50	23,50	9,08E+00	9,08E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
25,27	25,27	8,44E+00	8,44E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
27,16	27,16	7,86E+00	7,86E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
29,12	29,12	7,33E+00	7,33E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
31,31	31,31	6,81E+00	6,81E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
33,72	33,72	6,33E+00	6,33E+00	0,0114	0,0069	0,0000	0,0000
36,21	36,21	5,89E+00	5,89E+00	0,0114	0,0074	0,0000	0,0005
38,77	38,77	5,50E+00	5,50E+00	0,0115	0,0076	0,0002	0,0002
41,33	41,33	5,16E+00	5,16E+00	0,0116	0,0078	0,0001	0,0002
43,82	43,82	4,87E+00	4,87E+00	0,0118	0,0078	0,0002	0,0000
47,07	52,14	4,53E+00	4,09E+00	0,0119	0,0079	0,0001	0,0001
85,89	152,36	2,48E+00	1,40E+00	0,0131	0,0107	0,0012	0,0028
322,84	568,94	6,61E-01	3,75E-01	0,0232	0,0259	0,0102	0,0152
946,38	1352,64	2,25E-01	1,58E-01	0,0416	0,0428	0,0184	0,0169
1883,95	2408,24	1,13E-01	8,86E-02	0,0512	0,0496	0,0096	0,0068
3037,27	3614,87	7,02E-02	5,90E-02	0,0555	0,0525	0,0042	0,0030
4283,44	4896,56	4,98E-02	4,36E-02	0,0581	0,0541	0,0026	0,0016
5597,79	6243,12	3,81E-02	3,42E-02	0,0602	0,0553	0,0021	0,0012
6974,69	7650,77	3,06E-02	2,79E-02	0,0618	0,0563	0,0016	0,0010
8413,56	9120,77	2,54E-02	2,34E-02	0,0630	0,0568	0,0013	0,0006
9914,86	10657,58	2,15E-02	2,00E-02	0,0643	0,0573	0,0013	0,0005
11483,23	12262,09	1,86E-02	1,74E-02	0,0654	0,0576	0,0010	0,0003
13118,21	13928,61	1,63E-02	1,53E-02	0,0662	0,0580	0,0008	0,0003
14818,27	15658,26	1,44E-02	1,36E-02	0,0670	0,0582	0,0008	0,0002
16575,40	17445,08	1,29E-02	1,22E-02	0,0677	0,0583	0,0007	0,0002
18389,73	19290,85	1,16E-02	1,11E-02	0,0683	0,0585	0,0006	0,0002
20271,90	21208,82	1,05E-02	1,01E-02	0,0688	0,0587	0,0005	0,0002
22225,17	23194,79	9,60E-03	9,20E-03	0,0692	0,0589	0,0004	0,0002
24242,94	25250,21	8,80E-03	8,45E-03	0,0697	0,0592	0,0006	0,0003
26327,97	27369,31	8,10E-03	7,79E-03	0,0703	0,0595	0,0005	0,0002
28479,49	29557,96	7,49E-03	7,22E-03	0,0709	0,0596	0,0006	0,0002
30703,05	31815,56	6,95E-03	6,71E-03	0,0714	0,0600	0,0006	0,0004
32988,02	34129,12	6,47E-03	6,25E-03	0,0719	0,0603	0,0005	0,0003
35313,33	36499,52	6,04E-03	5,85E-03	0,0725	0,0606	0,0006	0,0003
37703,50	38921,07	5,66E-03	5,48E-03	0,0731	0,0612	0,0006	0,0006
40194,85	41444,81	5,31E-03	5,15E-03	0,0737	0,0619	0,0006	0,0007
42767,93	44052,23	4,99E-03	4,84E-03	0,0743	0,0626	0,0006	0,0006
45408,86	46726,95	4,70E-03	4,57E-03	0,0750	0,0632	0,0006	0,0006
48115,75	49466,66	4,43E-03	4,31E-03	0,0756	0,0639	0,0006	0,0008
50922,27	52279,66	4,19E-03	4,08E-03	0,0762	0,0646	0,0007	0,0006
54257,25	55612,65	3,93E-03	3,84E-03	0,0769	0,0652	0,0007	0,0006
59172,90		3,61E-03		0,0776		0,0007	

POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)							
TRAÇO 1A - cura submersa							
Pressão de Intrusão (Psi)		Diâmetro de Poros (µm)		Volume Intrudido Acumulado (cm³/g)		Distribuição do Volume de Intrusão (cm³/g)	
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0,97	0,97	2,20E+02	2,20E+02	0,0028	0,0021	0,0028	0,0021
1,20	1,20	1,77E+02	1,77E+02	0,0036	0,0028	0,0008	0,0006
1,50	1,50	1,42E+02	1,42E+02	0,0042	0,0033	0,0005	0,0005
1,81	1,81	1,18E+02	1,18E+02	0,0047	0,0036	0,0005	0,0004
2,14	2,14	9,97E+01	9,97E+01	0,0048	0,0040	0,0001	0,0003
2,51	2,51	8,50E+01	8,50E+01	0,0050	0,0040	0,0002	0,0001
2,91	2,91	7,34E+01	7,34E+01	0,0051	0,0042	0,0001	0,0002
3,35	3,35	6,37E+01	6,37E+01	0,0053	0,0044	0,0002	0,0002
3,83	3,83	5,58E+01	5,58E+01	0,0053	0,0046	0,0001	0,0002
4,31	4,31	4,95E+01	4,95E+01	0,0056	0,0050	0,0002	0,0004
4,85	4,85	4,40E+01	4,40E+01	0,0056	0,0053	0,0001	0,0002
5,56	5,56	3,84E+01	3,84E+01	0,0058	0,0054	0,0002	0,0001
6,30	6,30	3,39E+01	3,39E+01	0,0059	0,0055	0,0001	0,0001
6,93	6,93	3,08E+01	3,08E+01	0,0059	0,0056	0,0000	0,0001
7,70	7,70	2,77E+01	2,77E+01	0,0059	0,0056	0,0000	0,0000
8,48	8,48	2,52E+01	2,52E+01	0,0061	0,0059	0,0002	0,0002
9,29	9,29	2,30E+01	2,30E+01	0,0063	0,0059	0,0002	0,0000
10,24	10,24	2,08E+01	2,08E+01	0,0065	0,0059	0,0001	0,0000
11,28	11,28	1,89E+01	1,89E+01	0,0065	0,0059	0,0000	0,0000
12,35	12,35	1,73E+01	1,73E+01	0,0065	0,0059	0,0000	0,0000
13,44	13,44	1,59E+01	1,59E+01	0,0065	0,0060	0,0000	0,0000
14,63	14,63	1,46E+01	1,46E+01	0,0065	0,0062	0,0000	0,0002
15,92	15,92	1,34E+01	1,34E+01	0,0066	0,0062	0,0002	0,0000
17,28	17,28	1,24E+01	1,24E+01	0,0068	0,0062	0,0001	0,0000
18,65	18,65	1,14E+01	1,14E+01	0,0069	0,0066	0,0002	0,0004
20,29	20,29	1,05E+01	1,05E+01	0,0070	0,0067	0,0001	0,0001
22,21	22,21	9,61E+00	9,61E+00	0,0070	0,0067	0,0000	0,0000
24,17	24,17	8,83E+00	8,83E+00	0,0072	0,0067	0,0002	0,0000
25,84	25,84	8,26E+00	8,26E+00	0,0073	0,0067	0,0001	0,0000
27,41	27,41	7,78E+00	7,78E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
29,42	29,42	7,25E+00	7,25E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
31,71	31,71	6,73E+00	6,73E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
34,16	34,16	6,25E+00	6,25E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
36,74	36,74	5,81E+00	5,81E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
39,47	39,47	5,41E+00	5,41E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
42,33	42,33	5,04E+00	5,04E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
44,93	44,93	4,75E+00	4,75E+00	0,0073	0,0067	0,0000	0,0000
56,89	52,20	3,75E+00	4,09E+00	0,0073	0,0068	0,0000	0,0000
158,46	154,97	1,35E+00	1,38E+00	0,0078	0,0074	0,0005	0,0006
581,58	593,90	3,67E-01	3,59E-01	0,0128	0,0094	0,0050	0,0021
1391,89	1410,31	1,53E-01	1,51E-01	0,0222	0,0144	0,0094	0,0050
2447,73	2478,22	8,72E-02	8,61E-02	0,0326	0,0230	0,0105	0,0086
3630,17	3680,49	5,88E-02	5,80E-02	0,0444	0,0373	0,0118	0,0142
4877,99	4954,12	4,37E-02	4,31E-02	0,0537	0,0495	0,0094	0,0123
6200,36	6302,93	3,44E-02	3,38E-02	0,0601	0,0567	0,0064	0,0072
7602,64	7718,74	2,81E-02	2,76E-02	0,0642	0,0611	0,0041	0,0044
9075,60	9200,94	2,35E-02	2,32E-02	0,0669	0,0639	0,0027	0,0028
10615,40	10749,19	2,01E-02	1,99E-02	0,0688	0,0663	0,0019	0,0024
12219,64	12363,62	1,75E-02	1,73E-02	0,0703	0,0678	0,0015	0,0015
13884,36	14042,42	1,54E-02	1,52E-02	0,0714	0,0689	0,0011	0,0011
15608,00	15780,86	1,37E-02	1,35E-02	0,0723	0,0696	0,0009	0,0007
17393,57	17575,56	1,23E-02	1,21E-02	0,0728	0,0706	0,0005	0,0009
19248,15	19436,47	1,11E-02	1,10E-02	0,0734	0,0711	0,0007	0,0006
21173,14	21368,45	1,01E-02	9,98E-03	0,0738	0,0718	0,0004	0,0007
23163,88	23369,00	9,21E-03	9,13E-03	0,0743	0,0725	0,0004	0,0006
25221,76	25435,86	8,46E-03	8,39E-03	0,0746	0,0731	0,0004	0,0007
27345,99	27567,78	7,80E-03	7,74E-03	0,0751	0,0738	0,0004	0,0007
29531,68	29769,26	7,22E-03	7,17E-03	0,0758	0,0746	0,0007	0,0008
31793,33	32037,14	6,71E-03	6,66E-03	0,0768	0,0756	0,0010	0,0010
34117,79	34371,69	6,25E-03	6,21E-03	0,0781	0,0768	0,0013	0,0012
36476,27	36885,23	5,85E-03	5,78E-03	0,0791	0,0783	0,0010	0,0014
38938,62	39437,23	5,48E-03	5,41E-03	0,0800	0,0801	0,0009	0,0018
41477,93	41986,92	5,14E-03	5,08E-03	0,0808	0,0815	0,0009	0,0015
44086,65	44605,86	4,84E-03	4,78E-03	0,0819	0,0828	0,0011	0,0012
46764,37	47296,19	4,56E-03	4,51E-03	0,0831	0,0840	0,0012	0,0012
49510,30	50055,13	4,31E-03	4,26E-03	0,0842	0,0853	0,0011	0,0013
52329,50	52884,66	4,08E-03	4,03E-03	0,0851	0,0866	0,0009	0,0013
55633,82	56491,31	3,83E-03	3,78E-03	0,0861	0,0880	0,0010	0,0014

APÊNDICE I - RESULTADOS DE MICRODUREZA POR INDENTAÇÃO

MICRODUREZA POR INDENTAÇÃO (GPa)			
CIMENTO PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	a/agl - Tsa (%) - Posição	Amostras	
		1	2
1B	0,4 - 0 - S	0,65	0,42
		0,57	0,81
		0,57	0,70
		0,53	0,58
		0,70	0,50
			0,75
	0,4 - 0 - M	0,63	0,72
		0,69	0,61
		0,65	0,62
		0,49	0,49
0,56		0,46	
		0,54	
2B	0,4 - 0 - S	0,62	0,69
		0,60	0,63
		0,52	0,69
		0,57	0,60
		0,48	0,55
	0,6 - 0 - M	0,71	0,65
		0,54	0,53
		0,61	0,70
		0,52	0,71
0,52		0,66	
		0,59	
3B	0,6 - 0 - S	0,60	0,48
		0,30	0,44
		0,43	0,43
		0,43	0,43
		0,41	0,45
	0,6 - 0 - M	0,38	0,57
		0,50	0,33
		0,57	0,51
		0,53	0,42
0,42		0,39	
4B	0,6 - 0 - S	0,27	0,44
		0,35	0,36
		0,23	0,40
		0,33	0,33
		0,25	0,39
	0,6 - 0 - M	0,38	0,38
		0,42	0,41
		0,31	0,43
		0,45	0,52
		0,53	

MICRODUREZA POR INDENTAÇÃO (GPa)				
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				
Traços	a/agl - Tsa (%) - Posição	Amostras		
		1	2	3
1A	0,4 - 0 - S	47,17	44,80	52,96
		93,30	50,39	61,11
		60,38	54,43	34,87
		34,76	57,01	32,27
		44,77	47,22	54,29
		37,61	55,69	43,74
	0,4 - 0 - M	47,32	56,77	48,51
		51,33	49,12	34,21
		39,93	47,13	40,61
		54,13	30,96	53,30
		42,47	52,71	35,69
		55,06	36,41	57,36