

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

**Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão  
em concretos empregados em pisos**

Cristina Vitorino da Silva

Orientadoras: Denise C. C. Dal Molin e Ana Luiza Abitante

Porto Alegre  
2011

Cristina Vitorino da Silva

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO DESGASTE SUPERFICIAL  
POR ABRASÃO EM CONCRETOS EMPREGADOS EM PISOS**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico. Orientação: Prof.a. Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Prof.a. Ana Luiza Abitante.

Porto Alegre

2011

### CIP - Catalogação na Publicação

Vitorino da Silva, Cristina

Contribuição ao estudo do desgaste superficial por  
abrasão em concretos empregados em pisos / Cristina  
Vitorino da Silva. -- 2011.  
179 f.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.  
Coorientadora: Ana Luiza Raabe Abitante.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2011.

1. pisos de concreto. 2. desgaste superficial. 3.  
resistência à abrasão. 4. dureza superficial. I.  
Carpena Coitinho Dal Molin, Denise, orient. II.  
Raabe Abitante, Ana Luiza, coorient. III. Título.

**CRISTINA VITORINO DA SILVA**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO DESGASTE SUPERFICIAL  
POR ABRASÃO EM CONCRETOS EMPREGADOS EM PISOS**

Porto Alegre, 28 de abril de 2011

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

Prof.a. Ana Luiza Abitante  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Coordenador do PPGECC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Cláudio de Souza Kazmierczak (UNISINOS)  
Dr. pela Universidade de São Paulo

Mauricio Mancio (UFRGS)  
Dr. pela Universidade da Califórnia, Berkeley

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)  
Dr. pela Universidade de Leeds

*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 às minhas orientadoras, professoras Denise Dal Molin e Ana Luiza Abitante, pela orientação e por me transmitirem conhecimento, 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 e Gilmar, pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao CIENTEC, em especial, ao laboratorista Nelson, pelo apoio na realização dos experimentos.

À aluna de iniciação científica, Priscila, pelo auxílio durante as moldagens e execução dos experimentos. Aos demais alunos de iniciação científica, Camila, Marlon, Patrícia, João e Amarildo, os quais sempre buscaram auxiliar nas atividades de laboratório.

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

Aos demais colegas do Norie, Juliana, Luciana, Gisele e Franciele, pelo conhecimento e apoio durante a pesquisa.

Agradeço a CAPES e 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. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O desgaste superficial constitui uma das manifestações patológicas mais recorrentes em pisos de concreto. A presença de tal manifestação patológica, proveniente do processo abrasivo, é muito preocupante, uma vez que implica em altos custos para reparar ou substituir este concreto danificado. Portanto, a realização de estudos que buscam avaliar a influência do proporcionamento e tipo de alguns materiais que constituem o traço de concreto, comumente empregado em pisos, é considerada extremamente relevante, no intuito de reduzir a tendência de desgaste dos compósitos. Neste particular, foram avaliados alguns fatores, como o consumo de água (175 l/m<sup>3</sup>; 190 l/m<sup>3</sup>; 205 l/m<sup>3</sup>), o teor de substituição de sílica ativa (0%; 5%; 10%), o teor de adição de microfibras de polipropileno (0 g/m<sup>3</sup>; 600 g/m<sup>3</sup>) e o tipo de cimento (CP IV; CP V-ARI). Os ensaios adotados para esta avaliação foram o de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, dureza superficial por esclerometria, exsudação e resistência à abrasão. Os resultados encontrados mostraram uma influência estatística significativa do tipo de cimento em todas as propriedades avaliadas, sendo que o cimento CP V-ARI apresentou melhor desempenho em comparação ao cimento CP IV, considerando uma mesma relação a/agl (0,53). O fator consumo de água, mantendo-se constante a relação a/agl, mostrou influência significativa na resistência à tração na flexão e na resistência à abrasão dos concretos, e, além disso, foi possível verificar um comportamento semelhante para ambas as propriedades com relação a este parâmetro de controle. Quanto ao teor de substituição de sílica ativa, observa-se que este fator promoveu efeito significativo nas propriedades mecânicas, o que era esperado, na dureza superficial e na exsudação; entretanto, não se verificou influência no desgaste por abrasão dos compósitos cimentícios. Já a adição das microfibras de polipropileno diminuiu significativamente a dureza superficial por esclerometria, sem alterar as demais propriedades analisadas. Os resultados verificados para o desgaste mostraram uma importante relação com as propriedades mecânicas dos concretos. O processo de acabamento como forma de tratamento superficial parece ser efetivo no controle do desgaste por abrasão, uma vez que pode ter minimizado o efeito da exsudação na superfície dos compósitos cimentícios. O consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> mostrou ser o teor mais adequado para os materiais e concretos empregados nesta pesquisa.

**Palavras-chave:** pisos de concreto, desgaste superficial, resistência à abrasão, dureza superficial.



## ABSTRACT

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **Contribution to the study of surface wear by abrasion in concrete used in floors**

Surface wear is one of the most frequent pathologies in concrete floors. The presence of such pathological manifestation from the abrasive process is very disturbing, since it implies high costs to repair or replace the damaged concrete. Therefore, studies that seek to evaluate the influence of the proportioning and type of some materials that constitute the mixture proportions of concrete, commonly used on floors, are considered extremely relevant, in order to reduce the tendency of surface wear of composites. In this study, factors such as water consumption (175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup>, 205 l/m<sup>3</sup>), replacement content of silica fume (0 %, 5 %, 10 %), addition content of polypropylene fibers (0 g/m<sup>3</sup>, 600 g/m<sup>3</sup>) and cement type (CP IV; CP V-ARI) were evaluated. The tests used for this assessment were compressive strength, flexural tensile strength, surface hardness by rebound hammer, bleeding and abrasion resistance. The results showed a significant statistic influence of the cement type on all the properties evaluated, with the cement CP V-ARI presenting a better performance compared to cement CP IV, considering the same w/b ratio (0.53). The water consumption factor, maintaining a constant w/b ratio, showed significant influence on the flexural tensile strength and abrasion resistance of concrete, and, in addition, we could observe a similar behavior for both properties with respect to this parameter of control. Regarding the replacement content of silica fume, it is observed that this factor promoted significant effect on the mechanical properties, which was expected, on the surface hardness and bleeding; however, there was no influence on the abrasion of the cementitious composites. The addition of polypropylene microfibers significantly decrease the surface hardness by rebound hammer, without altering any other property evaluated. The results verified for the wear showed an important relationship with the mechanical properties of concrete. The finishing process as a form of surface treatment seems to be effective in controlling the abrasive wear, since it may have minimized the effect of bleeding on the surface of cementitious composites. The water consumption of 190 l/m<sup>3</sup> showed to be the most appropriate content for the materials and concrete used in this research.

**Keywords:** concrete floors, surface wear, abrasion resistance, surface hardness.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>16</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES .....</b>	<b>18</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>19</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>20</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1 CONTEXTO DA PESQUISA.....	24
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	25
1.3 QUESTÃO DE PESQUISA .....	27
1.4 OBJETIVOS .....	27
1.4.1 Objetivo Principal.....	27
1.4.2 Objetivos Secundários.....	27
1.5 HIPÓTESES .....	27
1.6 LIMITAÇÕES .....	28
1.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	28
1.8 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	30
<b>2 PISOS DE CONCRETO .....</b>	<b>31</b>
<b>3 O FENÔMENO DO DESGASTE SUPERFICIAL .....</b>	<b>36</b>
3.1 ABRASÃO COMO UM PROCESSO DE DESGASTE SUPERFICIAL.....	38
3.1.1 Definições .....	39
3.1.2 Mecanismos Envolvidos no Processo de Abrasão .....	39
3.2 DESGASTE SUPERFICIAL EM CONCRETO .....	40

3.2.1	Desgaste Superficial por Abrasão em Concretos .....	43
3.2.1.1	Influência da relação água/cimento.....	45
3.2.1.2	Influência do consumo de cimento.....	47
3.2.1.3	Influência dos agregados .....	48
3.2.1.4	Influência das adições .....	50
3.2.1.5	Influência da exsudação.....	55
3.2.1.6	Influência do tratamento superficial.....	58
3.2.1.7	Influência das condições de cura .....	60
3.2.2	Métodos de Avaliação do Desgaste Superficial por Abrasão .....	64
3.2.2.1	Método ABNT NBR 12042 .....	64
3.2.2.2	Método Cientec .....	65
3.2.2.3	Método abrasão Los Angeles - ASTM C 131.....	65
3.2.2.4	Métodos ASTM C 779 .....	65
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1</b>	<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>68</b>
4.1.1	Variáveis de Resposta.....	69
4.1.2	Fatores Controláveis .....	69
4.1.3	Matriz Experimental.....	71
<b>4.2</b>	<b>MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>73</b>
4.2.1	Cimento .....	73
4.2.2	Agregados .....	75
4.2.2.1	Agregado miúdo .....	75
4.2.2.2	Agregado graúdo.....	76
4.2.3	Microfibras de Polipropileno .....	77
4.2.4	Sílica Ativa.....	78
4.2.5	Água .....	78
4.2.6	Aditivo.....	79
<b>4.3</b>	<b>DOSAGEM EXPERIMENTAL.....</b>	<b>79</b>
4.3.1	Determinação dos Traços Empregados na Produção dos Concretos.....	81
4.3.2	Produção dos Concretos.....	83
4.3.3	Moldagem dos Concretos .....	84
<b>4.4</b>	<b>REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS .....</b>	<b>85</b>
4.4.1	Resistência à compressão uniaxial.....	85
4.4.2	Resistência à tração na flexão .....	86
4.4.3	Exsudação.....	86
4.4.4	Resistência à Abrasão.....	88

4.4.5	Dureza Superficial por Esclerometria.....	89
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>92</b>
<b>5.1</b>	<b>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL .....</b>	<b>92</b>
5.1.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	94
5.1.2	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa .....	96
5.1.3	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	97
5.1.4	Efeito da Interação entre o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	99
<b>5.2</b>	<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....</b>	<b>101</b>
5.2.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	104
5.2.2	Efeito do Consumo de Água .....	105
5.2.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa .....	106
5.2.4	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Substituição de Sílica Ativa ..	107
5.2.5	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	108
5.2.6	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	110
5.2.7	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	111
<b>5.3</b>	<b>DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA .....</b>	<b>112</b>
5.3.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	114
5.3.2	Efeito do Consumo de Água .....	115
5.3.3	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa .....	116
5.3.4	Efeito do Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno .....	117
5.3.5	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Consumo de Água .....	118
5.3.6	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Substituição de Sílica Ativa ..	120
5.3.7	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	121
5.3.8	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	122
<b>5.4</b>	<b>EXSUDAÇÃO.....</b>	<b>123</b>
5.4.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	130
5.4.2	Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa .....	131
<b>5.5</b>	<b>RESISTÊNCIA À ABRASÃO .....</b>	<b>132</b>
5.5.1	Efeito do Tipo de Cimento.....	135
5.5.2	Efeito do Consumo de Água .....	136

5.5.3	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Consumo de Água .....	138
5.5.4	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa	139
5.5.5	Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	139
5.5.6	Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno.....	140
<b>5.6</b>	<b>CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO COM AS DEMAIS PROPRIEDADES ANALISADAS .....</b>	<b>141</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>150</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	150
6.2	COMENTÁRIOS FINAIS.....	153
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>155</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: delineamento da pesquisa .....	29
Figura 2: causas físicas da deterioração do concreto (adaptado de MEHTA; GERWICK, 1982 apud MEHTA; MONTEIRO, 2006).....	41
Figura 3: processo de perda de material por abrasão com formação de poeira em superfície de concreto (OLIVEIRA; LULA, 2006) .....	44
Figura 4: influência da relação a/c e do tipo de agregado na resistência à abrasão de concretos (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2006) .....	47
Figura 5: representação esquemática da exsudação em concreto recém-lançado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2006) .....	51
Figura 6: amostra laboratorial mostrando endurecedor superficial incorporado ao substrato de concreto (adaptado de GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008) .....	58
Figura 7: superfícies de concreto tratadas com endurecedores superficiais líquidos (OLIVEIRA; LULA, 2006) .....	59
Figura 8: 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).....	62
Figura 9: influência da porosidade na resistência ao desgaste por abrasão de concretos (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009).....	62
Figura 10: influência das condições de cura e da sua duração na resistência à abrasão de concretos (adaptado de DHIR; HEWLETT; CHAN, 1991) .....	63
Figura 11: programa experimental da pesquisa .....	68
Figura 12: diagrama da dosagem experimental - CP IV.....	80
Figura 13: diagrama da dosagem experimental - CP V-ARI.....	81
Figura 14: fôrma cilíndrica de 9,5 x 19 cm .....	85
Figura 15: fôrma prismática de 10 x 10 x 35 cm.....	85
Figura 16: cilindro metálico de 250 mm de diâmetro e 280 mm de altura.....	85
Figura 17: fôrma prismática de 18 x 35 x 10 cm.....	85
Figura 18: ensaio de resistência à tração na flexão .....	86
Figura 19: cilindro inclinado para coleta de água .....	87
Figura 20: coleta de água exsudada .....	87
Figura 21: registro das leituras após pesagem de água exsudada.....	87
Figura 22: desempenadeira metálica para pisos de concreto .....	88
Figura 23: acabamento superficial do concreto.....	88
Figura 24: corpo-de-prova sendo serrado.....	89

Figura 25: faixa central do corpo-de-prova.....	89
Figura 26: corpos-de-prova após serragem .....	89
Figura 27: amostra para execução do ensaio de resistência à abrasão.....	89
Figura 28: ensaio de resistência à abrasão.....	89
Figura 29: corpo-de-prova para o ensaio de esclerometria .....	90
Figura 30: ensaio esclerométrico .....	90
Figura 31: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto .....	95
Figura 32: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à compressão uniaxial do concreto .....	96
Figura 33: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto.....	97
Figura 34: presença de grumos de microfibras de PP em corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão (SENISSE, 2010).....	98
Figura 35: redução da resistência à compressão para os concretos com consumo de água de 205 l/m <sup>3</sup> moldados com microfibras de PP .....	99
Figura 36: efeito da interação entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto.....	100
Figura 37: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à tração na flexão do concreto	104
Figura 38: efeito isolado do consumo de água na resistência à tração na flexão do concreto .....	105
Figura 39: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto.....	106
Figura 40: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto .....	108
Figura 41: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto .....	109
Figura 42: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à tração na flexão do concreto.....	110
Figura 43: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à tração na flexão do concreto.....	111
Figura 44: efeito isolado do tipo de cimento na dureza superficial do concreto .....	115
Figura 45: efeito isolado do consumo de água na dureza superficial do concreto.....	116
Figura 46: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto .....	117

Figura 47: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP na dureza superficial do concreto .....	118
Figura 48: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água na dureza superficial do concreto .....	119
Figura 49: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto.....	120
Figura 50: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto .....	121
Figura 51: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na dureza superficial do concreto .....	122
Figura 52: resultados de exsudação para os concretos produzidos com cimento pozolânico e consumos de água de 175 l/m <sup>3</sup> , 190 l/m <sup>3</sup> e 205 l/m <sup>3</sup> . (a), (c) e (e) quantidade de água exsudada acumulada. (b), (d) e (f) quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto .....	125
Figura 53: resultados de exsudação para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e consumos de água de 175 l/m <sup>3</sup> , 190 l/m <sup>3</sup> e 205 l/m <sup>3</sup> . (a), (c) e (e) quantidade de água exsudada acumulada. (b), (d) e (f) quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto .....	128
Figura 54: efeito isolado do tipo de cimento na exsudação do concreto .....	130
Figura 55: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na exsudação do concreto	131
Figura 56: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à abrasão do concreto .....	135
Figura 57: efeito isolado do consumo de água na resistência à abrasão do concreto .....	137
Figura 58: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água na resistência à abrasão do concreto .....	138
Figura 59: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto .....	139
Figura 60: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à abrasão do concreto .....	140
Figura 61: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à abrasão do concreto .....	141
Figura 62: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à compressão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de substituição de sílica ativa .....	144
Figura 63: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e do consumo de água.....	145
Figura 64: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa.....	146



Figura 65: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa .....	147
Figura 66: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de microfibras de PP.....	148
Figura 67: comportamento da resistência à abrasão dos concretos em função das demais propriedades analisadas .....	149

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: classificação dos pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004).....	32
Tabela 2: teores de cimento recomendados para pisos de concreto, segundo a ACI 302.1R (ACI, 2004).....	48
Tabela 3: especificações usuais de projetos para pisos de concreto (especificações de obras realizadas pelo Wall-Mart).....	70
Tabela 4: matriz experimental da pesquisa.....	72
Tabela 5: número de corpos-de-prova por ensaio.....	72
Tabela 6: composição dos cimentos empregados na pesquisa .....	73
Tabela 7: caracterização mecânica dos cimentos empregados na pesquisa, segundo o fabricante .....	73
Tabela 8: caracterização química dos cimentos empregados na pesquisa .....	74
Tabela 9: caracterização física dos cimentos empregados na pesquisa .....	74
Tabela 10: caracterização agregado miúdo .....	76
Tabela 11: caracterização agregado graúdo.....	77
Tabela 12: caracterização das microfibras de polipropileno .....	78
Tabela 13: caracterização física da sílica ativa .....	78
Tabela 14: caracterização físico-química do aditivo superplastificante, segundo o fabricante .....	79
Tabela 15: resultados da dosagem experimental para o CP IV.....	80
Tabela 16: resultado da dosagem experimental para o CP V-ARI .....	81
Tabela 17: traços dos concretos avaliados na pesquisa .....	83
Tabela 18: resultados médios para o ensaio de resistência à compressão uniaxial .....	93
Tabela 19: análise de variância (ANOVA) - resistência à compressão uniaxial.....	94
Tabela 20: resultados médios para ensaio de resistência à tração na flexão .....	102
Tabela 21: análise de variância (ANOVA) - resistência à tração na flexão.....	103
Tabela 22: resultados médios para o ensaio de dureza superficial por esclerometria .....	113
Tabela 23: análise de variância (ANOVA) - dureza superficial por esclerometria.....	114
Tabela 24: resultados para o ensaio de exsudação .....	124
Tabela 25: análise de variância (ANOVA) - exsudação.....	129
Tabela 26: resultados médios para o ensaio de resistência à abrasão .....	133
Tabela 27: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão .....	134
Tabela 28: resumo comparativo dos resultados obtidos para as variáveis de resposta frente aos fatores controláveis analisados isoladamente.....	142

Tabela 29: 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	143
Tabela 30: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do consumo de água.....	144
Tabela 31: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa.....	145
Tabela 32: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa.....	146
Tabela 33: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de microfibras de PP .....	147

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	87
Equação 2 .....	87
Equação 3 .....	90
Equação 4 .....	91

## 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

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

EPUSP: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LACER: Laboratório de Cerâmica

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

SINDUSCON: Sindicato da Indústria da Construção Civil

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\alpha$ : teor de argamassa

$\gamma$ : grau de hidratação do concreto

$\mu$ : micro ( $10^{-6}$ )

$\mu\text{m}$ : micrometro ( $10^{-6}$  metros)

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

%: porcentagem ou percentagem

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

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 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 ( $\text{l}/\text{m}^3$ )

CaO: óxido de cálcio

CAR: concreto de alta resistência

cm: centímetro

$\text{cm}^2/\text{g}$ : centímetro quadrado/grama

$\text{cm}^3/\text{g}$ : 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

$\text{C}_3\text{A}$ : aluminato tricálcico

$\text{C}_4\text{AF}$ : ferro aluminato tetracálcico

$\text{C}_2\text{S}$ : silicato dicálcico

$C_3S$ : silicato tricálcico

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

CV: coeficiente de variação (%)

$f_{ck}$ : resistência característica à compressão (MPa)

$f_{ctm,k}$ : 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

milhões de fibras/kg: milhões de fibras/kilograma

MgO: óxido de magnésio

MnO: óxido de manganês

MPa: Mega Pascal

min: minuto

m: metro

mm: milímetro

$m^2/kg$ : metro quadrado/kilograma

N: Newton

$Na_2O$ : óxido de sódio

pH: potencial hidrogeniônico

PP: polipropileno

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: pentóxido de difósforo

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação

rpm: rotações por minuto

SiO<sub>2</sub>: óxido de silício ou dióxido de (mono)silício ou anidrido silícico

SO<sub>3</sub>: 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

Tfib: teor de adição de microfibras de polipropileno (g/m<sup>3</sup>)

TiO<sub>2</sub>: 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 tecnológicas no intuito de buscar diretrizes seguras para o emprego e aproveitamento com qualidade deste material cimentício. Como consequência da elevada empregabilidade, o concreto pode enfrentar diferentes condições de utilização, sendo estas responsáveis por 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.

Quando a aplicação se refere a pisos de concreto, devem ser consideradas algumas propriedades, como a dureza superficial e as resistências mecânicas. Entretanto, 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 quais encontram-se o desgaste superficial por abrasão e a fissuração do compósito.

O desgaste superficial é uma das principais causas de degradação do concreto em muitas aplicações, 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 pelo qual a vida útil das estruturas de concreto possa ser prolongada seria de grande interesse para o mercado da construção. Dentro deste contexto, medidas para minimizar o desgaste do concreto podem render 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, carreando material mais frágil para a superfície), do acabamento prematuro, das condições impróprias de cura, entre outros (ACI 302.1R, 2004).

Assim, percebe-se que a presença de desgaste superficial em pisos de concreto pode estar relacionada a diferentes fatores, como as propriedades dos materiais empregados e a composição do traço de concreto. No entanto, cabe ressaltar que técnicas construtivas inadequadas podem contribuir para o aparecimento de tal manifestação patológica.

Seguindo este cenário, esta pesquisa teve como objetivo estudar a tendência de desgaste superficial em decorrência da abrasão em concretos, verificando a influência dos parâmetros constituintes do traço dos concretos empregados em pisos. Parâmetros como o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e adição de microfibras de polipropileno, bem como o tipo de cimento, foram avaliados mediante ensaios relacionados ao fenômeno do desgaste por abrasão. Acredita-se que uma correta dosagem do concreto proporciona não só uma redução das manifestações patológicas como a tendência ao desgaste superficial, mas também possibilita ao compósito cimentício uma adequada trabalhabilidade, propiciando uma melhor execução e um melhor acabamento final da estrutura.

## 1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

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.

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. 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.

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). Mehta e Monteiro (2008) afirmam que 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.

Dentro deste contexto, a principal motivação desta pesquisa veio do interesse em analisar 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 do referido fenômeno. Os parâmetros abordados foram o consumo de água, o teor de adição de sílica ativa (em substituição à massa de cimento), a adição de microfibras de polipropileno e o tipo de cimento.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Os pisos de concreto apresentam um recente desenvolvimento no Brasil, que teve início na década de 90 (BINA; CASTRO; TEIXEIRA, 2002<sup>1</sup> apud 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).

25

<sup>1</sup> BINA, P.; CASTRO, P. R.; TEIXEIRA, A. O. F. **Estado da arte dos pisos industriais e pavimentos: do sistema de damas ao protendido**. Belo Horizonte, MG, 2002. In: REIBRAC-IBRACON, 44, ago. 2002.

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. Grande parte das patologias que ocorrem em pisos de concreto se concentra, basicamente, na preparação, execução e seleção dos materiais, sendo mais raros os problemas estruturais (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007).

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 patologias nessas estruturas, pode-se concluir que existe a necessidade de maiores estudos científicos nessa área. Segundo a Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE, 2006), a presença de lacunas de conhecimento científico e técnico no mercado de pisos é evidente. Desta maneira, o Sinduscon-RS e a Comunidade da Construção apoiaram a realização desta pesquisa, a qual visou a busca das diretrizes necessárias para contribuir com essa área de conhecimento.

Uma das metas principais da pesquisa foi avaliar a influência de alguns materiais constituintes do concreto frente à tendência de desgaste superficial por abrasão, como o tipo de cimento e o consumo de água. Para isso foram avaliados dois tipos de cimento (CP IV e CP V-ARI) e três consumos de água (175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>).

Além disso, buscou-se investigar a influência da adição de sílica ativa no proporcionamento dos materiais constituintes do traço do concreto, uma vez que o uso desta adição minimiza o fenômeno da exsudação, podendo ser a exsudação uma das principais causas da redução da resistência à abrasão dos pisos de concreto. Dessa forma, a avaliação da dosagem de sílica ativa adicionada ao concreto em substituição à massa de cimento, foi considerada importante e, para tanto, foram avaliados dois teores de adição desse material (5 % e 10 %), além da dosagem de referência, sem sílica ativa.

De acordo com especificações de fabricantes, a utilização de microfibras de polipropileno auxilia na redução da exsudação dos compósitos cimentícios e, por conseqüência, na tendência ao desgaste superficial em pisos de concreto. Desta forma, a avaliação do uso destas microfibras adicionadas ao concreto foi considerada relevante; logo, buscou-se avaliar um teor de adição de microfibras de polipropileno considerado ideal pelos fabricantes (600 g/m<sup>3</sup>).

### 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 dos fatores controláveis, constituintes do traço de concreto empregado em pisos, frente ao fenômeno do desgaste superficial por abrasão?

### 1.4 OBJETIVOS

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

#### 1.4.1 Objetivo Principal

O objetivo principal estabelecido para essa pesquisa foi “avaliar a influência dos principais fatores controláveis constituintes do traço do concreto com relação ao fenômeno do desgaste superficial por abrasão, a partir da análise dos resultados de ensaios de parâmetros mecânicos, de dureza superficial, de exsudação e de resistência à abrasão”.

#### 1.4.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa foram:

- a) analisar o efeito do tipo de cimento, da variação do consumo de água, do teor de substituição de sílica ativa e do teor de adição de microfibras de polipropileno sobre a resistência à compressão e à tração na flexão, dos concretos proporcionados para pisos;
- b) analisar o efeito do tipo de cimento, da variação do consumo de água, do teor de substituição de sílica ativa e do teor de adição de microfibras de polipropileno na dureza superficial, na exsudação e na resistência à abrasão, dos concretos proporcionados para pisos;
- c) verificar a existência de correlações entre os resultados dos ensaios mecânicos, de dureza superficial e de exsudação com a resistência à abrasão dos concretos.

### 1.5 HIPÓTESES

Como hipótese testada nesta pesquisa, tem-se que a combinação adequada entre teores de sílica ativa, microfibras de polipropileno e consumo de água, com um determinado tipo de

cimento, irá propiciar uma diminuição na tendência ao desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos.

## 1.6 LIMITAÇÕES

Uma das metas desta pesquisa foi avaliar os impactos dos fatores controláveis (consumo de água, teor de substituição de sílica ativa, teor de adição de microfibras de polipropileno e tipo de cimento) no fenômeno do desgaste superficial por abrasão nos concretos proporcionados para pisos. Entretanto, devido à quantidade de recursos financeiros disponíveis, ao tempo limitado para o desenvolvimento deste estudo, e ao elevado número de fatores controláveis e combinações, julgou-se necessário fixar um destes fatores ou variáveis de controle.

Neste contexto, o fator controlável referente à quantidade de fibras de polipropileno foi fixado em um nível, de forma a possibilitar a redução do número de combinações de variáveis na elaboração da matriz experimental, permitindo avaliar a influência das fibras de polipropileno frente ao fenômeno do desgaste superficial quando adicionadas às combinações de variáveis controláveis propostas nesta pesquisa. A partir desta avaliação, realizou-se um estudo comparativo com os traços sem a adição deste material, verificando, assim, a real contribuição da adição das fibras de polipropileno no combate à abrasão. Da mesma forma, como relatado no item 4.3.1, a relação  $a/agl$  foi fixada em um único valor (0,53) para todos os traços analisados, para os dois tipos de cimentos utilizados.

## 1.7 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.

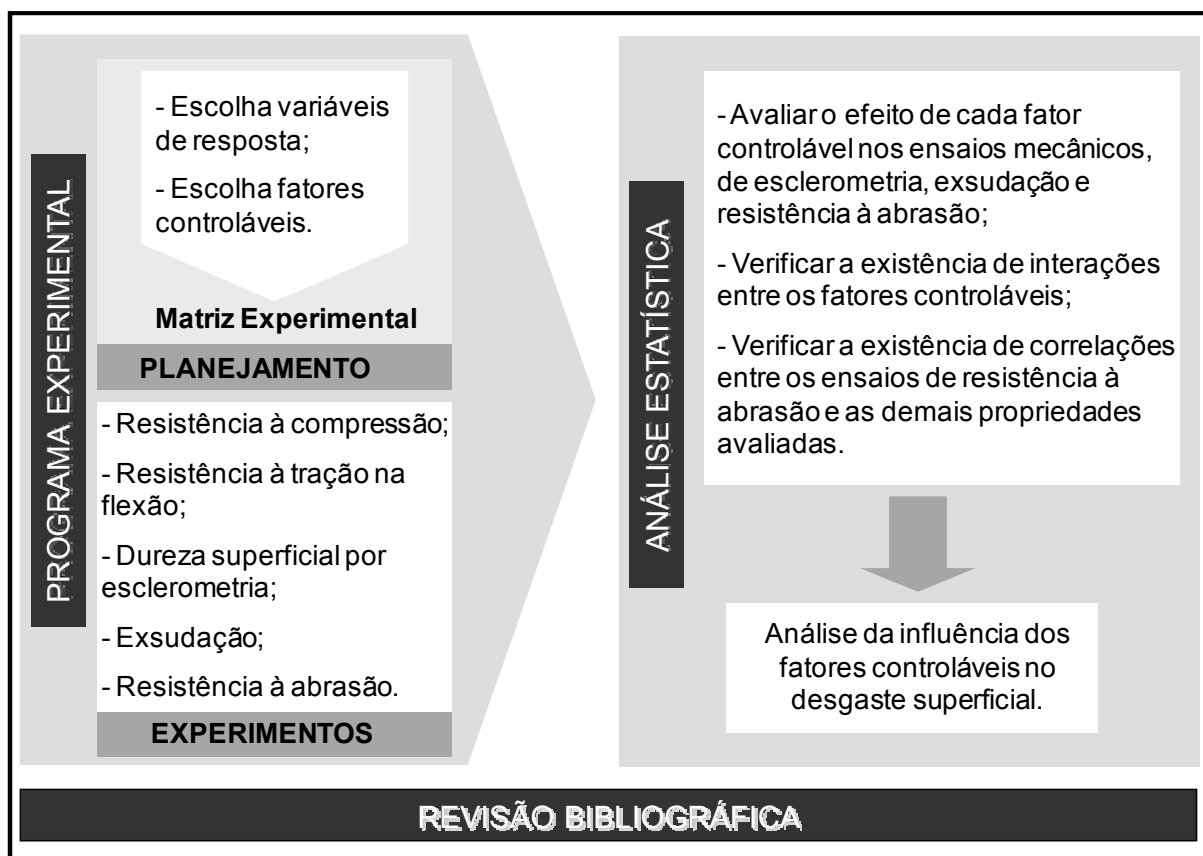


Figura 1: delineamento da pesquisa

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, realizou-se a segunda fase do programa experimental, a qual englobou 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 por esclerometria (item 4.4.5) foram realizados conforme as prescrições das respectivas normas Brasileiras pertinentes.

Com o término da etapa do programa experimental, e através dos ensaios realizados, iniciou-se a segunda grande etapa da pesquisa, a análise estatística 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).

## 1.8 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa está estruturada em cinco 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, as limitações, o delineamento da pesquisa e a estrutura do trabalho foram abordados neste capítulo.

No segundo capítulo – “PISOS DE CONCRETO” – é realizada uma revisão de literatura, onde estão descritos os assuntos de interesse a esta pesquisa, como a classificação dos pisos de concreto e as manifestações indesejáveis de superfície que podem ocorrer neste tipo de estrutura, dando destaque ao desgaste superficial, por ser esse o foco desta dissertação.

No capítulo três – “O FENÔMENO DO DESGASTE SUPERFICIAL” – 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.

O capítulo quatro – “PROGRAMA EXPERIMENTAL” – contempla o planejamento experimental empregado no estudo, a caracterização dos materiais necessários à realização da pesquisa e os métodos de ensaios que foram realizados.

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 discussões dos mesmos.

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



## 2 PISOS DE CONCRETO

O piso constitui uma parte importante da construção e é, freqüentemente, uma das mais vulneráveis e problemáticas (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Por este motivo o desempenho de uma estrutura como um piso de concreto tem extrema importância nas suas diversas áreas de aplicação. 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 as resistências ao desgaste e ao impacto também devem ser consideradas. Atualmente, não existem critérios padronizados de avaliação da resistência ao desgaste de um piso de concreto, e não é possível especificar a qualidade de um concreto em termos da capacidade de resistir ao desgaste. 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.

Para Farny (2001), propriedades como durabilidade, dureza, resistência química, resistência ao impacto e resistência à abrasão são os principais atributos dos pisos de concreto, independente da classificação existente. 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, o deslocamento de equipamentos, além de resistência à abrasão e durabilidade que atendam às necessidades do usuário final (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Para Viecili (2004), o desempenho satisfatório das propriedades 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.

Conforme a ANAPRE (2008<sup>2</sup>, apud SENISSE, 2010), em 2008, dos 35 milhões de m<sup>2</sup> de pisos e pavimentos de concreto produzidos, em torno de 22,5 milhões de m<sup>2</sup> apresentaram

<sup>2</sup> Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho (ANAPRE). Palestra no Concrete Congress, South America 2008, em São Paulo/SP, em agosto de 2008.

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.

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 traço 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, ao impacto de cargas 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 uma estrutura como 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 o desgaste superficial por abrasão é uma patologia muito freqüente em pisos de concreto, se comparada àquelas ocasionadas por recalques ou 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).

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.

### 3 O FENÔMENO DO DESGASTE SUPERFICIAL

O fenômeno do desgaste superficial consiste em um processo de deterioração dos materiais ao longo do tempo. Tal deterioração está diretamente relacionada com a vida útil destes materiais, onde o início do processo ou um nível mais avançado de desgaste denota claramente o término desta vida útil. Sendo assim, o desgaste superficial constitui em um dos aspectos da durabilidade dos materiais (ABITANTE, 2004).

Na medida em que os materiais podem estar expostos a diversas condições de agressividade, sendo estas mais ou menos severas, a ação do tempo pode ser extremamente variável com relação ao processo de deterioração. Quando a manifestação da deterioração de um dado material passa a ser observada após o mesmo ter cumprido de maneira adequada suas funções por um período de tempo considerado satisfatório, sob condições normais de exposição, pode-se dizer que este material passou por um processo de envelhecimento. De qualquer forma, tal deterioração parece estar relacionada a alterações não desejáveis (ABITANTE, 2004).

De acordo com Schackelford (1999) e Abitante (2004), o desgaste configura um dos quatro mecanismos de deterioração dos materiais, sendo os demais o químico, o eletroquímico e o provocado por radiação.

O desgaste consiste na 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<sup>3</sup> apud ABITANTE, 2004; VIECILI, 2004). A definição do fenômeno do desgaste superficial abrange alguns aspectos, os quais estão listados como seguem (SCHACKELFORD, 1999; ABITANTE, 2004):

- a) envolve a remoção de material;
- b) consiste em um processo mecânico;

36

<sup>3</sup> 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.

- 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 desta manifestação patológica. Segundo Ibáñez (1998) apud Abitante (2004), 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)<sup>4</sup>, 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);

37

<sup>4</sup> GROOVER, M. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems**. 1061p. New Jersey, 1996.

- b) fadiga: 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: 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) apud Abitante (2004) denominam 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 3.1, onde são explicitadas as definições existentes, bem como os mecanismos envolvidos e os seus efeitos.

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).

### 3.1 ABRASÃO COMO UM PROCESSO DE DESGASTE SUPERFICIAL

A abrasão consiste em um dos mecanismos através dos quais 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.

### 3.1.1 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 e 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.

### 3.1.2 Mecanismos Envolvidos no Processo de Abrasão

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 apud ABITANTE, 2004). 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 (ABITANTE, 2004).

### 3.2 DESGASTE SUPERFICIAL EM CONCRETO

Em trabalho publicado por Mehta e Gerwick (1982)<sup>5</sup> apud Mehta e Monteiro (2008), 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 classificaram 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 freqüentemente 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, 2006).

---

40

<sup>5</sup> MEHTA, P. K.; GERWICK, Jr, B. C. **Concrete Int.** v. 4, n. 10, pp. 45-51, 1982.

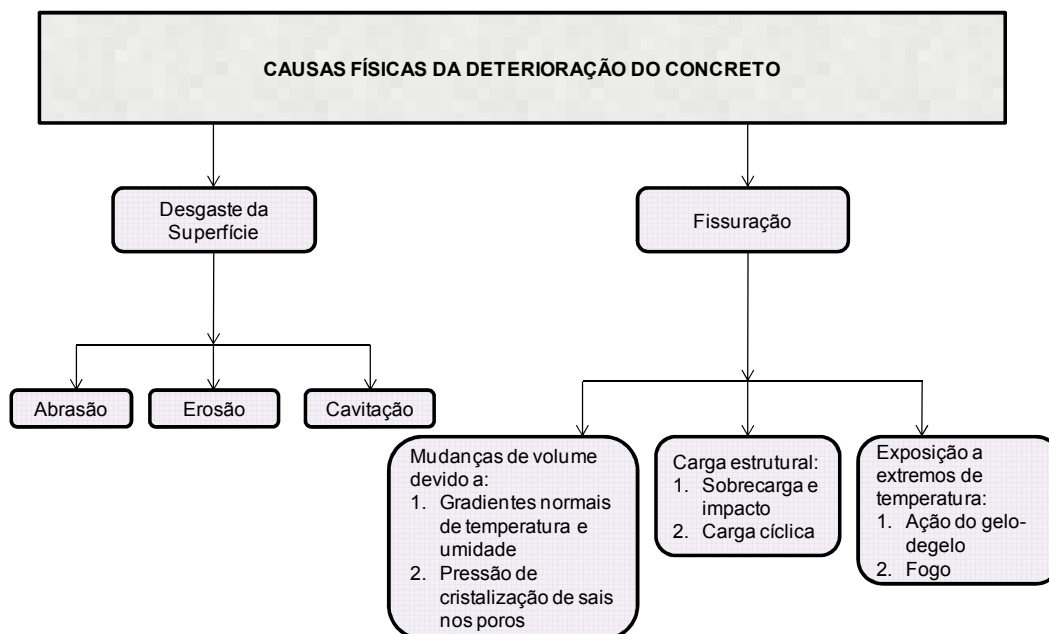


Figura 2: causas físicas da deterioração do concreto (adaptado de MEHTA; GERWICK, 1982 apud MEHTA; MONTEIRO, 2006)

Quando se trata particularmente de desgaste em concretos, os mecanismos que são relatados com maior freqüência na bibliografia como os responsáveis pela ocorrência de tal fenômeno são: abrasão, erosão e cavitação (NEVILLE, 1997; VIECILI, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2006). 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. É conveniente fazer distinção entre erosão por partículas sólidas transportadas pela água e dano devido a perfurações resultantes de água fluindo a altas velocidades (NEVILLE, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para Meng e Ludema (1995) e Abitante (2004), 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 (2008), 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 (2003) inclui, ainda, o consumo de cimento, a relação a/c, a trabalhabilidade e o teor de ar incorporado.

Segundo Sebök e Stráněl (2004), os parâmetros do cimento não exercem muita influência; já a resistência ao desgaste dos agregados tem importância substancial na resistência ao desgaste dos compósitos cimentícios. Estes mesmos autores mencionam que a granulometria dos agregados, principalmente o tamanho máximo do grão, tem um papel extremamente importante; e que somente frações com mais de 3 mm<sup>2</sup> contribuem para a resistência ao desgaste dos concretos.

Yazici e İnan (2006) 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 cinzas volantes, sílica ativa, escória granulada de alto forno e 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; MEHTA; MONTEIRO, 2006; YAZICI; İNAN, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; ROCHER, 2007; TARR; FARNY, 2008; FONSECA, 2009). Este mecanismo de desgaste do concreto será tratado com maior enfoque no item 3.2.1.

### 3.2.1 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; IAZICI; 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 solicitação 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, 1992; 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 ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) 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  $\text{Ca(OH)}_2$ , 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  $\text{Ca(OH)}_2$  ocorre na etapa inicial no processo de perda de material. Desta forma, a pasta passa a ficar mais enfraquecida, fato que está intimamente associado a eventuais poros 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 3 apresenta, de forma ilustrativa, o processo evolutivo do desgaste ocorrido pela abrasão em superfície de concreto.

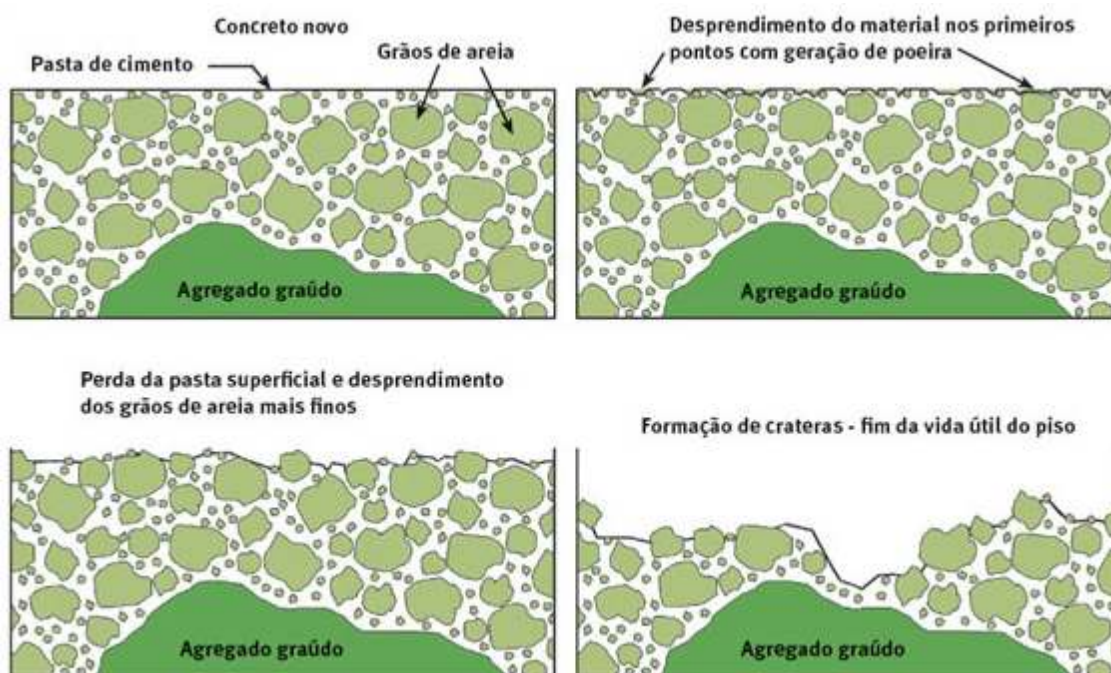


Figura 3: processo de perda de material por abrasão com formação de poeira em superfície de concreto (OLIVEIRA; LULA, 2006)

Em geral, a pasta endurecida tem baixa resistência à abrasão (SIDDIQUE; PRICE; 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; MEHTA; MONTEIRO, 2006; SIDDIQUE; PRICE; KAMALI, 2007).

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.

A seguir serão explicitados alguns destes 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.



### 3.2.1.1 Influência da 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, isto é, para uma melhoria da resistência à abrasão deste material é necessário um aumento da sua resistência característica. 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, tais como cinza volante e pó calcáreo (STACK et al., 2011).

Enquanto algumas medidas para redução da demanda de água das misturas são efetivas, a incorporação de endurecedores superficiais cimentícios e um desempenamento ou acabamento rígido densificam as superfícies de concreto e reduzem a relação a/c da camada de pasta superficial. 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 (2006) citam que, para reduzir 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 desempeno 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 (LI; ZHANG; OU, 2006). 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). Além disso, essa abordagem indica 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). Gjørv, Baerland e Ronning (1990)<sup>6</sup> e Naik, Singh e Hossain (1994)<sup>7</sup>, citados por Li, Zhang e Ou (2006), indicam que a relação

45

<sup>6</sup> GJORV, O. E., BAERLAND, T., RONNING, H.R., Abrasion resistance of high-strength concrete pavements. **Concrete Int.** p. 45-48, jan. 1990.

<sup>7</sup> 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.

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 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, 1989<sup>8</sup> 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, 1992), 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, aumentando sua resistência.

Liu (1981)<sup>9</sup>, citado por Mehta e Monteiro (2006), verificou uma boa correlação existente entre a relação a/c e a resistência do concreto à abrasão. A figura 4 mostra que uma

---

46

<sup>8</sup> NANNI, A. Abrasion resistance of roller-compacted concrete. **ACI Materials Journal**. v. 86, n. 53, p. 559-565, 1989.

<sup>9</sup> LIU, T. C. Abrasion resistance of concrete. **ACI Journal - Proceedings**. v. 78, n. 5, p. 341-350, sep-oct, 1981.



diminuição na relação a/c dos concretos aumenta a resistência ao desgaste e que, além disso, o uso de agregados graúdos de elevada dureza também proporcionam melhores resistências à abrasão.

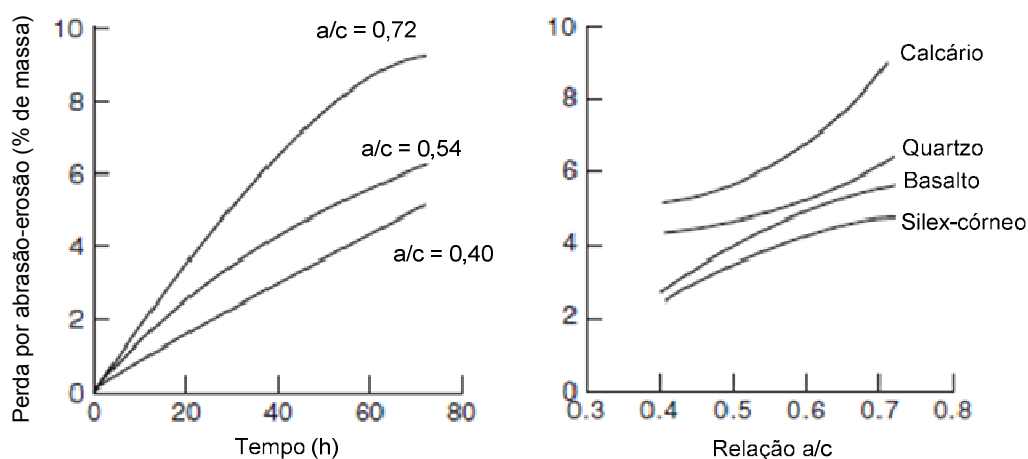


Figura 4: influência da relação a/c e do tipo de agregado na resistência à abrasão de concretos (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2006)

### 3.2.1.2 Influência do consumo de cimento

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

A fixação do consumo mínimo de cimento está associada à resistência superficial dos concretos usualmente empregados em pisos, uma vez que pode proporcionar uma adequada resistência interna do material. Além disso, na fase de acabamento deve haver uma quantidade de pasta suficiente para o fechamento e alisamento superficial. Sem um adequado teor de pasta, as partículas de agregado graúdo podem refletir através da superfície dos concretos, freqüentemente 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 ocasionando, portanto, em uma camada superficial enfraquecida. O fenômeno relacionado à exsudação em superfície de concreto será tratado com maior profundidade no item 3.2.1.5.

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). 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)

<b>Dimensão máxima nominal do agregado, mm</b>	<b>Cimento, * kg/m<sup>3</sup></b>
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

### 3.2.1.3 Influência dos 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 pasta 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).

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 pasta dos concretos

contendo areia natural resiste melhor ao desgaste do que as superfícies dos concretos contendo agregados finos proveniente da britagem de rochas.

Para uma mesma qualidade de pasta, diferentes tipos de agregados graúdos com distintas formas, texturas e mineralogias podem resultar em concretos com diferentes resistências (KILIÇ et al., 2008). É importante ressaltar o estudo proposto por Liu (1981) citado por Mehta e Monteiro (2006), onde o autor verificou que a utilização de agregados com elevada dureza proporcionaram melhores resistências à abrasão para os concretos estudados (ver figura 4).

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 consequência, 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.

Almeida (2000) refere-se ao agregado graúdo como o componente do concreto que protege a argamassa, a qual geralmente é menos resistente ao desgaste. Porém, para o autor, em concretos com resistência à compressão superior a 42 MPa, parece que a influência dos agregados na resistência à abrasão é pequena.

Özturan e Çeçen (1997) estudaram efeitos 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)<sup>10</sup> apud Kiliç et al. (2008). Os autores relatam que o tipo

<sup>10</sup> 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.

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.

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. Além disso, a resistência à compressão aos 91 dias de idade para os concretos constituídos por agregados de origem basáltica, calcária e arenítica foi equivalente à resistência à compressão uniaxial de suas respectivas rochas matriz. No entanto, os concretos feitos com agregados de quartzo e gabro apresentaram menor resistência à compressão, comparados às rochas que os originaram.

#### 3.2.1.4 Influência das adições

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 de concreto. Dentre as mais usadas encontram-se as adições minerais, tais como a sílica ativa, a cinza volante e a escória granulada de alto forno, além do reforço com a adição de fibras, podendo ser estas 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 resultam de dois efeitos: o efeito químico, resultante da rápida reação pozolânica entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e o  $\text{Ca(OH)}_2$  resultante da hidratação do cimento para obtenção do silicato de cálcio hidratado, similar ao produto C-S-H (produto de hidratação das fases  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ , 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 cimento Portland, na interface agregado-pasta, pelas partículas muito menores da sílica (NEVILLE, 1997; HOFFMANN,

2001; ROY; ARJUNAN; SILSBEE, 2001; KORMANN, 2002; MAZLOOM; RAMEZANIANPOUR; BROOKS, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Neville (1997), essa interface entre os agregados e a pasta 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.

Mehta 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 5). 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.

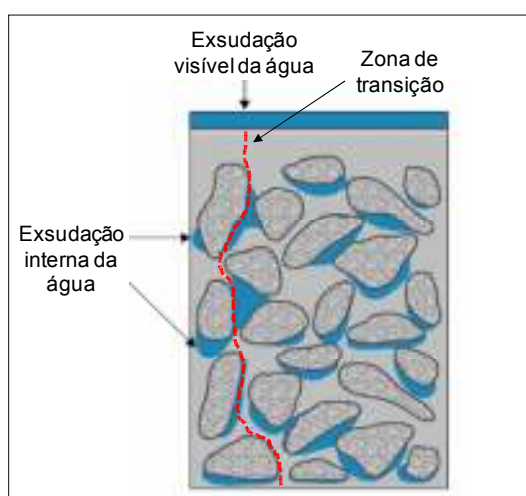


Figura 5: representação esquemática da exsudação em concreto recém-lançado (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2006)

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, 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 %. Acima deste teor a resistência foi substancialmente reduzida. 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.

Liu (2007) realizou um estudo em amostras de concreto, no intuito de verificar e melhorar a resistência à abrasão de concretos para estruturas hidráulicas. Foram preparadas amostras com substituição de cimento por sílica ativa em teores de 5 % e 10 %, a fim de avaliar a resistência à abrasão. Resultados de concretos contendo 5 % e 10 % de adição de sílica ativa (em substituição à massa de cimento), preparadas com relação a/c de 0,38 e 0,40 e curadas 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.

Em estudo realizado por Iazici e İnan (2006), em concretos de alta resistência com adição de sílica ativa e cinza volante, foi verificado que a menor perda de volume frente ao desgaste destes concretos ocorreu nas amostras preparadas apenas com adição de sílica ativa (30 % em relação à massa de cimento), sendo o maior desgaste encontrado nos concretos que foram preparados apenas com a adição de cinza volante (25 % 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 resistência à compressão dos mesmos.

Significativos 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), diversos estudos realizados têm mostrado que concretos contendo altos teores de cinzas apresentaram excelentes características quanto às propriedades de durabilidade e resistência mecânica, fato que diverge dos resultados encontrados no estudo proposto por Iazici e İnan (2006) citados anteriormente.

Ainda, segundo Siddique (2008), com a utilização de cinzas no concreto a qualidade da pasta de cimento é melhorada, e a lixiviabilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  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, 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).

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 em comparação ao módulo de deformação do concreto, o que restringe 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. Conforme estes autores, resultados de estudos realizados por diversos pesquisadores, como Shuan-fa et al. (2001)<sup>11</sup> e Bing-qiang e Qiang (2002)<sup>12</sup>, 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.

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/m<sup>3</sup>, 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/m<sup>3</sup> 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 a cristalização e orientação do Ca(OH)<sub>2</sub> e diminui os microvazios. Especificamente, as fibras de polipropileno, quando dosadas corretamente, criam uma rede que restringe a quantidade e o crescimento do Ca(OH)<sub>2</sub>, reduzindo as microfissuras na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, aumentando a resistência e a durabilidade 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.

#### 3.2.1.5 Influência da 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

55—

<sup>11</sup> SHUAN-FA, C.; DENG-LIANG, Z.; JIE, Z.; FENG, L. The study of the road performance of the polypropylene fiber concrete. **Northeast Highway** (in Chinese). v. 24, n. 2, p. 23-25, 2001.

<sup>12</sup> 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.

ocorrer a sua pega (NEVILLE, 1997; WAINWRIGHT; REY, 2000; TOPÇU; ELGÜN, 2004; MEHTA; MONTEIRO, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). 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, 2006).

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; MEHTA; MONTEIRO, 2006; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). 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, 2008).

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, 2008). 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 (NEVILLE, 1997). Além disso, cimentos com maiores porcentagens de  $C_3A$  e de álcalis, que apresentam grande perda de abatimento, também tendem a reduzir tal fenômeno (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Considerando-se a influência da temperatura, Neville (1997) afirma que em temperaturas mais elevadas, mas dentro de uma faixa normal, a velocidade de exsudação aumenta. 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 para um mesmo teor de cimento 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, 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.

### 3.2.1.6 Influência do 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). Essa formação de pó ou desgaste da camada superficial acaba por diminuir a resistência ao deslizamento de tais estruturas (HOSKING, 1992<sup>13</sup> apud 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 6 (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).

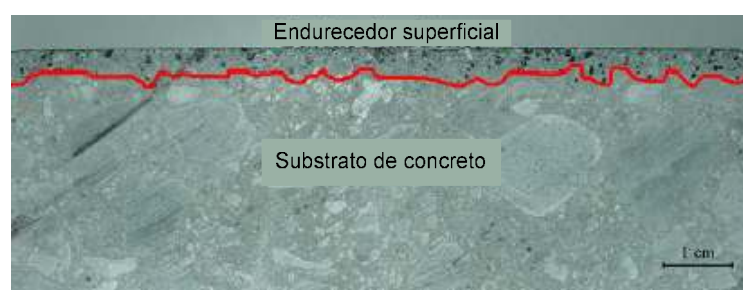


Figura 6: amostra laboratorial mostrando endurecedor superficial incorporado ao substrato de concreto (adaptado de GARCÍA; FRESNO; POLANCO, 2008)

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

<sup>13</sup> HOSKING, R. **Road aggregates and skidding**. London: TRL, 1992.

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  $\text{Ca(OH)}_2$  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 7 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.

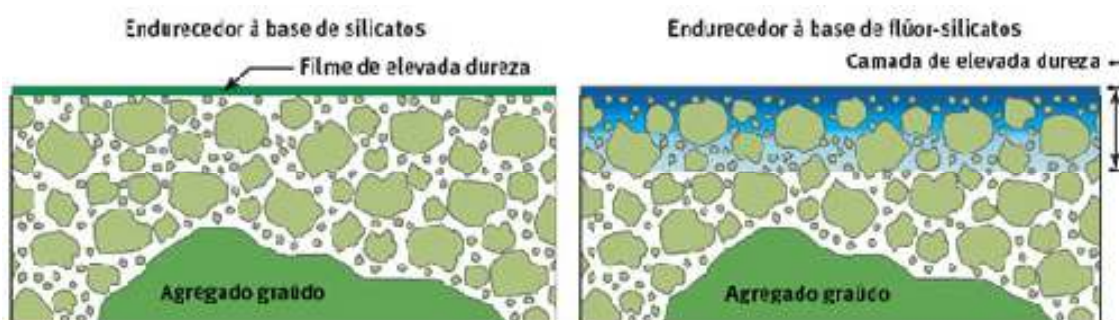


Figura 7: superfícies de concreto tratadas com endurecedores superficiais líquidos (OLIVEIRA; LULA, 2006)

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.

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 projeto recomendam, para a maior parte dos casos, taxas de aplicação do produto entre 4 kg/m<sup>2</sup> e 9 kg/m<sup>2</sup>, sendo 3 kg/m<sup>2</sup> a taxa mínima de aplicação. Já para endurecedores cimentícios com base em agregados metálicos, especificações recomendam taxas de aplicação entre 5 kg/m<sup>2</sup> e 14 kg/m<sup>2</sup>.

#### 3.2.1.7 Influência das condições 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 manual 302.1R-04 (ACI, 2004), 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 ( $\gamma$ ), 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 -  $\text{sup/vol}$ ) (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Tratando-se do grau de hidratação ( $\gamma$ ) e da relação  $a/c$ , a cura terá importância até o momento em que o valor de  $\gamma$  superar o de  $a/c$ . Logo, o período de cura deverá ser mais longo em concretos com elevadas relações  $a/c$ . Em concretos de maiores resistências ou baixas relações  $a/c$ , o  $\gamma$  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 com muita freqüência 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, 2005).

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 elevado ou baixa umidade relativa, os métodos de cura assumem uma importância elevada. Uma cura inadequada tenderá a reduzir a resistência da camada superficial, podendo esta atingir 30 a 50 mm de espessura (NEWMAN; CHOO, 2003<sup>14</sup> apud FONSECA, 2009). Ainda, segundo um estudo feito por Myers e Ramón (1998)<sup>15</sup>, citado por Fonseca (2009), fica evidenciado que o acabamento das superfícies de concreto, comparativamente às condições de cura, possui uma influência preponderante no desenvolvimento da resistência à abrasão (figura 8).

61—

<sup>14</sup> NEWMAN, J.; CHOO, B. *Advanced concrete technology: Concrete properties*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.

<sup>15</sup> 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.

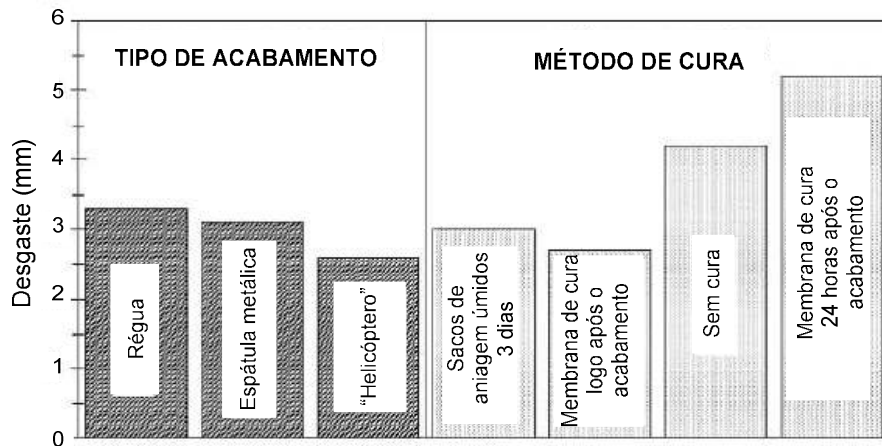


Figura 8: influência das condições de cura e dos métodos de acabamento na resistência à abrasão das superfícies de concreto (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009)

A resistência ao desgaste por abrasão também é afetada pela porosidade do concreto, diminuindo com o aumento desta última (figura 9). 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).

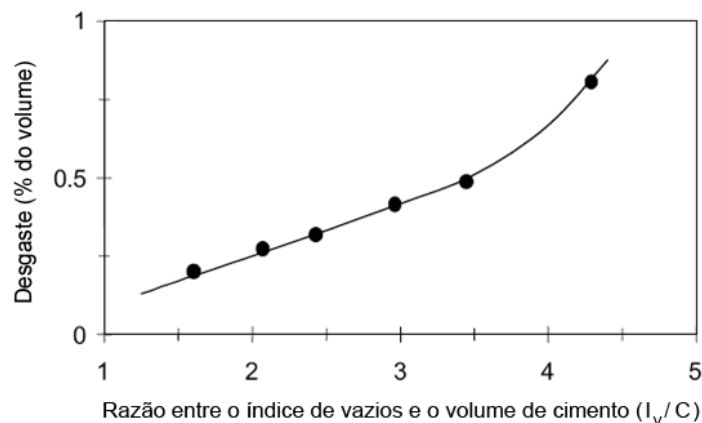


Figura 9: influência da porosidade na resistência ao desgaste por abrasão de concretos (adaptado de MYERS; RAMÓN, 1998 apud FONSECA, 2009)

Dhir, Hewlett e Chan (1991) realizaram um estudo sobre a resistência à abrasão das superfícies de concreto e a influência das condições de cura na mesma. 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 10). Relativamente às diferentes condições de cura, os corpos-de-prova (CP's) de concreto foram mantidos durante 24 horas cobertos



por sacos de anagem 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).

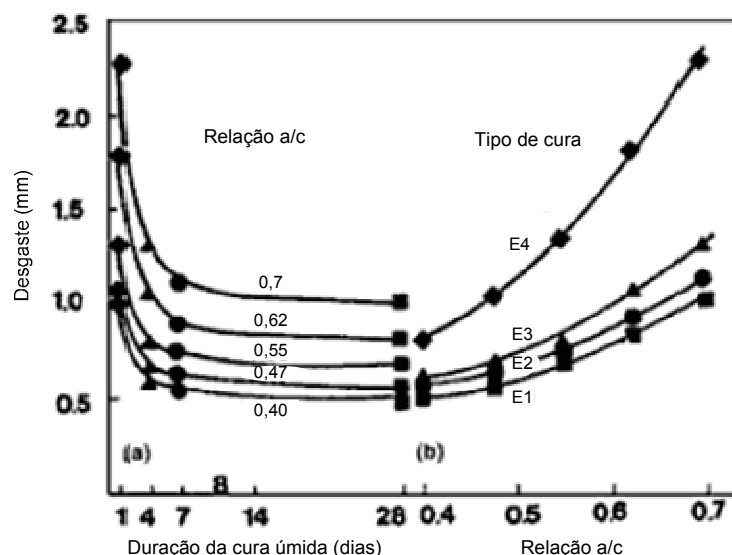


Figura 10: influência das condições de cura e da sua duração na resistência à abrasão de concretos (adaptado de DHIR; HEWLETT; CHAN, 1991)

Como se pode observar, existe uma forte influência da cura nos primeiros 7 dias, após os quais o ganho de resistência à abrasão é mínimo. Verifica-se também 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 deste estudo proposto 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 3.2.1, 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.

Neste sentido, priorizou-se a realização de estudos visando à avaliação da influência de alguns fatores controláveis constituintes do traço do concreto frente ao desgaste abrasivo, a saber, o consumo de água, o teor de adição de sílica ativa e microfibras de polipropileno e o tipo de cimento. Assim, busca-se um maior entendimento da manifestação deste fenômeno, bem como suas conseqüências, nos concretos convencionais comumente empregados em pisos.

### 3.2.2 Métodos de Avaliação do Desgaste Superficial por Abrasão

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, este irá evidenciar ou proporcionar uma capacidade ou habilidade do material.

Segundo Viecili (2004), seria extremamente complexo prever a durabilidade de superfícies solicitadas ao desgaste devido às incertezas dos materiais, processos e ações de desgaste que as mesmas estariam sujeitas por um determinado período de tempo. Ainda, este autor relata que tal previsão de durabilidade seria possível somente com uma grande margem de erro.

Existem vários ensaios desenvolvidos para avaliar o efeito da abrasão em concretos. A seguir estão listados alguns destes ensaios ou métodos, como o da Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - CIENTEC, assim como alguns métodos propostos por normas nacionais e estrangeiras.

#### 3.2.2.1 Método ABNT NBR 12042

O método descrito pela norma brasileira NBR 12042 (1992) 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 seguem 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 (1982). 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.

### 3.2.2.2 Método Cientec

O método CIENTEC de desgaste por abrasão consiste em simular um percurso de 500 m percorridos 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.

### 3.2.2.3 Método abrasão Los Angeles - ASTM C 131

O ensaio de abrasão Los Angeles, proposto pela ASTM C 131 (1996), é empregado para ensaios de resistência à abrasão e ao impacto de 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 711 mm e comprimento de 508 mm, montado na direção horizontal, onde são introduzidas 37 esferas de aço 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).

### 3.2.2.4 Métodos ASTM C 779

A ASTM C 779 (ASTM, 1995) apresenta três procedimentos de ensaio com a finalidade de avaliar a resistência do concreto ao desgaste por abrasão. De acordo com a norma os métodos destinam-se a avaliar os efeitos de resistência à abrasão do concreto, materiais e técnicas de acabamento e cura, e ainda a avaliar produtos e o comportamento de superfícies que são sujeitas ao uso. Tal norma salienta que os métodos descritos não têm a intenção de estabelecer uma previsão de durabilidade.

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.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

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 dissertação foi baseado em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis de controle em diversos níveis e, posteriormente, utilizar ferramentas estatísticas para avaliar 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. A figura 11 demonstra, esquematicamente, o programa experimental realizado nesta pesquisa.



Figura 11: 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 foram:

- a) resistência à compressão;
- b) resistência à tração na flexão;
- c) dureza superficial;
- d) exsudação;
- e) resistência à abrasão.

O trabalho procurou avaliar a influência dos fatores controláveis frente à tendência de desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos, por este motivo estas variáveis de resposta foram as priorizadas na pesquisa. 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 pesquisados. Os ensaios de dureza superficial, exsudação e resistência à abrasão foram realizados para avaliar a tendência de desgaste superficial nos diferentes traços de concretos analisados.

Importante salientar que os parâmetros de qualidade dos concretos estudados não estão limitados a somente essas variáveis de resposta, na medida em que outras variáveis poderiam ter sido avaliadas. Contudo, devido ao tempo e recursos limitados para o desenvolvimento do projeto, optou-se por estudar essas propriedades, as quais podem mostrar resultados coerentes e significativos frente ao problema do desgaste superficial decorrente da abrasão.

### 4.1.2 Fatores Controláveis

Posteriormente, foram 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) consumo de água: 175 l/m<sup>3</sup>; 190 l/m<sup>3</sup>; 205 l/m<sup>3</sup>;
- b) teor de substituição de sílica ativa: 0 %; 5 %; 10 %;
- c) teor de adição de fibras de polipropileno: 0 g/m<sup>3</sup>; 600 g/m<sup>3</sup>;
- d) tipo de cimento: CP IV e CP V-ARI;

A escolha destas variáveis independentes baseou-se no conhecimento relacionado à dosagem de concretos, à tecnologia dos materiais cimentícios e a parâmetros considerados importantes, empiricamente, por projetistas da área, nas especificações de concretos utilizados em pisos. Além disso, cabe salientar que algumas destas variáveis independentes escolhidas foram abordadas em um estudo proposto por Senisse (2010), o qual foi desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE). Tal estudo está relacionado com a especificação e o proporcionamento dos materiais constituintes dos concretos utilizados em pisos frente ao fenômeno da retração por secagem ao longo do tempo. Dentre as variáveis de controle que estão relacionadas ao estudo mencionado, encontram-se o consumo de água, fixado em três níveis, e o tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI). 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.

Usualmente, algumas especificações de projeto mencionam valores fixos para o consumo de água, próximos a 175 l/m<sup>3</sup>, conforme verificado na tabela 3, onde constam especificações de projetos para pisos de concreto de empresas distintas. Por isso, julgou-se interessante avaliar o fator consumo de água, utilizando um intervalo, no qual o valor especificado em projeto estaria contido, sendo este o valor mínimo; os demais valores foram acrescidos em 15 l/m<sup>3</sup>, correspondendo a 190 l/m<sup>3</sup> e a 205 l/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabela 3: especificações usuais de projetos para pisos de concreto (especificações de obras realizadas pelo Wall-Mart)

Especificações de Projeto								
Empresa	Cimento	fck (MPa)	fctm,k (MPa)	$\alpha$ (%)	Consumo de cimento máx. (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de água máx. (l/m <sup>3</sup> )	Teor de adição de fibras de PP (g/m <sup>3</sup> )	Aditivo (%)
1	CP-II E 32	32	4,50	50 a 53	380	-	600	≤ 0,4
2	-	30	-	49 a 52	380	175	600	-



Com relação ao teor de adição de microfibras de polipropileno, especificações de fabricante e de projeto (tabela 3) mencionam valores de 600 g/m<sup>3</sup> para que as microfibras cumpram a função de reduzir a tendência de fissuração. Assim, considerou-se necessário avaliar o comportamento do compósito frente ao desgaste superficial, utilizando este teor de adição de microfibras de polipropileno incorporadas à mistura.

Nesta pesquisa foram empregadas microfibras de polipropileno por serem estas um tipo de fibra comumente utilizada em pisos de concreto, sem fins estruturais. Cabe salientar que a influência de diferentes tipos de fibras não foi avaliada, nem mesmo as características das fibras de polipropileno, como geometria, diâmetro, comprimento e espessura. Este fato inviabilizaria a execução da pesquisa dentro dos prazos estabelecidos.

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 a sua empregabilidade. Logo, neste estudo optou-se por considerar esta variável de controle em três diferentes níveis; sem substituição (0 %), um teor intermediário (5 %) e um teor mais elevado (10 %).

Conforme Dal Molin, Oliveira e Kulakowski (1995), Neville (1997) e Chodounsky e Viecili (2007) a utilização da sílica ativa no concreto tem uma ação benéfica no que diz respeito à resistência à abrasão, pois evita a formação de uma superfície fraca exsudada e melhora a coesão entre a pasta de cimento hidratada e o agregado graúdo. Fato já relatado anteriormente por outros autores (HOFFMANN, 2001; KORMANN, 2002; METHA; MONTEIRO, 2008).

#### 4.1.3 Matriz Experimental

Com a definição das variáveis de resposta e a escolha dos fatores controláveis, elaborou-se a matriz experimental adotada neste estudo. A tabela 4 apresenta a matriz experimental empregada nesta pesquisa e a tabela 5 apresenta o número de corpos-de-prova moldados para cada ensaio proposto.

Tabela 4: matriz experimental da pesquisa

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS				VARIÁVEIS RESPOSTA				
	Consumo de água (l/m³)	Teor de sílica ativa (%)	Teor de fibra (g/m³)	Tipo de cimento	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Exsudação	Dureza superficial	Resistência à abrasão
1 A	175	0	0	CP IV	28 dias	28 dias	Concreto em estado fresco	28 dias	28 dias
2 A	175	0	600						
3 A	175	5	0						
4 A	175	5	600						
5 A	175	10	0						
6 A	175	10	600						
7 A	190	0	0						
8 A	190	0	600						
9 A	190	5	0						
10 A	190	5	600						
11 A	190	10	0						
12 A	190	10	600						
13 A	205	0	0						
14 A	205	0	600						
15 A	205	5	0						
16 A	205	5	600						
17 A	205	10	0						
18 A	205	10	600						
1 B	175	0	0	CP V - ARI	28 dias	28 dias	Concreto em estado fresco	28 dias	28 dias
2 B	175	0	600						
3 B	175	5	0						
4 B	175	5	600						
5 B	175	10	0						
6 B	175	10	600						
7 B	190	0	0						
8 B	190	0	600						
9 B	190	5	0						
10 B	190	5	600						
11 B	190	10	0						
12 B	190	10	600						
13 B	205	0	0						
14 B	205	0	600						
15 B	205	5	0						
16 B	205	5	600						
17 B	205	10	0						
18 B	205	10	600						

Tabela 5: número de corpos-de-prova por ensaio

Ensaio	Normas	Idades de ensaio (dias)	Nº CP's
Resistência à compressão	NBR 5739/07	28	3
Resistência à tração na flexão	NBR 12142/91	28	3
Dureza superficial	NBR 7584/95	28	4
Resistência à abrasão	Método CIENTEC	28	4
Exsudação	NBR 15558/98	estado fresco	1

## 4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram provenientes do estado do Rio Grande do Sul, com exceção das microfibras de polipropileno e da sílica ativa. Na seqüência, está apresentada a caracterização de cada material empregado nesta pesquisa.

### 4.2.1 Cimento

Na região sul do Brasil, normalmente especifica-se o emprego dos cimentos Portland composto (CP II), pozolânico (CP IV) ou de alta resistência inicial (CP V-ARI) em projetos de pisos de concreto. Logo, esta pesquisa buscou empregar dois destes tipos de cimento: CP IV e CP V-ARI. A tabela 6 apresenta um resumo da composição dos cimentos adotados nesta pesquisa, segundo as respectivas normas brasileiras.

Tabela 6: 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 7, 8 e 9 apresentam as características químicas, físicas e mecânicas 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 do NORIE, ambos da UFRGS, e na Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC).

Tabela 7: 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	-	-	28,2	≥ 14,0
	3 dias	19,0	≥ 10,0	42,0	≥ 24,0
	7 dias	23,9	≥ 20,0	46,2	≥ 34,0
	28 dias	38,9	≥ 32,0	51,5	-

Tabela 8: 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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	11,67	-	-	2,36	-
SiO <sub>2</sub>	-	32,51	-	-	13,76	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6,92	-	-	6,00	-
CaO	-	42,13	-	-	72,15	-
MgO	4,39	-	≤ 6,50	3,01	-	≤ 6,50
SO <sub>3</sub>	2,12	2,17	≤ 4,00	4,26	3,37	≤ 4,00
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	-	1,85	-	-	1,00	-
SrO	-	-	-	-	0,52	-
TiO <sub>2</sub>	-	1,25	-	-	0,24	-
MnO	-	0,11	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,09	-	-	0,07	-
Perda ao fogo	3,74	-	≤ 4,50	3,90	-	≤ 4,50
CaO livre	0,80	-	-	-	-	-
Resíduo insolúvel	30,05	-	-	-	-	-
Equivalente alcalino (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )*	-	-	-	-	-	-

\*\* Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> = 0,658 x K<sub>2</sub>O% + Na<sub>2</sub>O%

Tabela 9: caracterização física dos cimentos empregados na pesquisa

Características avaliadas	Tipos de cimento Portland - Resultados							
	CP IV				CP V-ARI			
	Fabricante	NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5736/91	Fabricante	NORIE	CIENTEC	Exigências da NBR 5733/91
Massa específica (cm <sup>3</sup> /g)	2,80	2,60	-	-	3,05	3,03	-	-
Expansão à quente (mm)	0,0	-	-	≤ 5,0	0,0	-	-	≤ 5,0
Tempo de pega (h:min)	Início	04:12	-	≥ 1,0	02:55	-	-	≥ 1,0
	Fim	05:21	-	≤ 12,0	04:35	-	-	≤ 10,0
Consistência normal (%)	34,9	-	-	-	-	-	-	-
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4306	5932	5480	-	4970	5273	5100	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)	1,1	-	-	≤ 8,0	0,16	-	-	≤ 6,0
Resíduo peneira #325µm (%)	5,1	-	-	-	1,44	-	-	-

Através da caracterização física dos cimentos apresentada na tabela 9, nota-se que a finura Blaine do cimento Portland pozolânico é superior à do cimento de alta resistência inicial, comportamento contrário ao esperado. Acredita-se que tal característica esteja relacionada a fabricação do cimento pozolânico, onde o processo de moagem é intensificado, no intuito de acelerar a ocorrência das reações de hidratação do cimento e permitir aumentar a quantidade de pozolana incorporada, tornando-o, desta forma, mais competitivo no mercado, principalmente no caso de processos construtivos que requeiram uma maior velocidade de execução.

## 4.2.2 Agregados

Para o proporcionamento dos concretos foi utilizado agregado 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

O agregado miúdo empregado nesta pesquisa consiste de 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 (NM 45/1996), determinação da absorção de água (NBR NM 30/2001) e determinação de massa específica (NBR NM 52/2002). 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 ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado miúdo estão expressos na tabela 10.

Tabela 10: caracterização agregado miúdo

<b>AGREGADO MIÚDO</b>		
Abertura das peneiras (mm)	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)
4,75	2	2
2,36	5	7
1,18	13	20
600 $\mu\text{m}$	25	45
300 $\mu\text{m}$	37	82
150 $\mu\text{m}$	17	99
0,075	1	100
< 0,075	0	100
Módulo de Finura		2,55
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,75
Massa Unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		1,55
Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )		2,63
Absorção de água (%)		0,87

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

#### 4.2.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado nesta pesquisa consiste de 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 (NM 45/1996), determinação de massa específica, massa específica aparente 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 ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da UFRGS. Os resultados da caracterização física do agregado graúdo estão expressos na tabela 11.

Tabela 11: caracterização agregado graúdo

<b>AGREGADO GRAÚDO</b>		
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 <sup>3</sup> )		2,86
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,55
Absorção de água (%)		0,014

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

#### 4.2.3 Microfibras de Polipropileno

De acordo com o fabricante, as microfibras sintéticas de polipropileno são filamentos extremamente finos obtidos através do processo de extrusão. Estas recebem um adequado tratamento superficial com a finalidade de facilitar a sua dispersão no concreto. A tabela 12 apresenta a caracterização das microfibras de polipropileno, conforme o seu fabricante.

Tabela 12: caracterização das microfibras de polipropileno

<b>GEOMETRIA</b>				
Comprimento (mm)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	Fator de forma	Frequência (milhões de fibras/kg)	Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )
6	12	500	1620	366
<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>				
Densidade relativa				0,91
Deformação na ruptura (%)				25
Ponto de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )				160
Ponto de ignição ( $^{\circ}\text{C}$ )				365

#### 4.2.4 Sílica Ativa

Nesta pesquisa a sílica ativa foi empregada como adição mineral nas misturas de concreto em substituição à massa de cimento, nos teores de 5 % e 10 %, conforme apresentado no programa experimental deste estudo. Esta 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 à laser). A tabela 13 apresenta os resultados da caracterização física desta adição. O ensaio de massa específica da sílica ativa foi realizado no Laboratório do NORIE da UFRGS. Já a granulometria a laser foi realizada no Laboratório de Cerâmica (LACER) da UFRGS e encontra-se no apêndice A.

Tabela 13: caracterização física da sílica ativa

<b>SÍLICA ATIVA</b>	
Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	13,49 *
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	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.

#### 4.2.5 Água

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



#### 4.2.6 Aditivo

O aditivo químico utilizado nas misturas foi um superplastificante para concreto, a base de éter carboxílico. A tabela 14 apresenta as características físico-químicas do aditivo químico empregado na pesquisa, segundo as especificações fornecidas pelo fabricante.

Tabela 14: caracterização físico-química do aditivo superplastificante, segundo o fabricante

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 <sup>3</sup> )	1,067 - 1,107
Solubilidade	Solúvel em água
Viscosidade (cps)	< 150
Teor de sólidos (%)	28,5 - 31,5

A quantidade de aditivo adicionada em cada traço de concreto foi definida durante a confecção dos concretos. O aditivo superplastificante teve como principal função alcançar a trabalhabilidade do concreto, fixada pelo ensaio de abatimento (NBR 7223/92) e, além disso, atuar como um dispersor nas misturas. Cabe salientar que todos os traços de concreto foram dosados com superplastificante, mesmo aqueles sem a adição de sílica ativa e microfibras de polipropileno. Esta medida foi tomada com a finalidade de buscar melhores resultados quanto às propriedades analisadas e uniformizar os materiais para os distintos concretos. Para as misturas com maiores consumos de água e sem a incorporação das adições, a quantidade de aditivo dosado foi mínima, aumentando na medida em que os concretos foram recebendo as adições (sílica ativa e microfibras) e reduzindo o consumo da água de amassamento.

#### 4.3 DOSAGEM EXPERIMENTAL

Para este estudo foi adotado o método de dosagem IPT/EPUSP, proposto por Helene e Terzian (1992), onde os parâmetros utilizados foram a obtenção de um abatimento de tronco de cone de  $100 \pm 20$  mm, definido com base em especificações de projeto para pisos de concreto, e um teor de argamassa ( $\alpha$ ) de 55 %, determinado experimentalmente. Como

nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de cimento, sendo estes os cimentos CP IV e CP V-ARI, a dosagem experimental foi realizada para ambos. A tabela 15 apresenta a dosagem experimental realizada para o cimento pozolânico (CP IV).

Tabela 15: resultados da dosagem experimental para o CP IV

Traço unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência potencial - 28 dias (MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	H (%)	Abatimento (mm)
1 : 3,5	0,43	30,9	486	9,66	80
1 : 5,0	0,53	26,1	370	8,86	80
1 : 6,5	0,67	17,1	295	8,92	100

A figura 12 mostra o diagrama de dosagem para o cimento Portland pozolânico, o qual foi plotado através dos valores obtidos pelo ajuste do traço do concreto. O diagrama de dosagem é constituído por quatro eixos: a resistência à compressão do concreto, aos 28 dias, a relação a/c, o traço unitário e o consumo de cimento. A partir do diagrama de dosagem obtido para o cimento Portland pozolânico foram definidos os traços dos concretos que utilizaram este tipo de cimento.

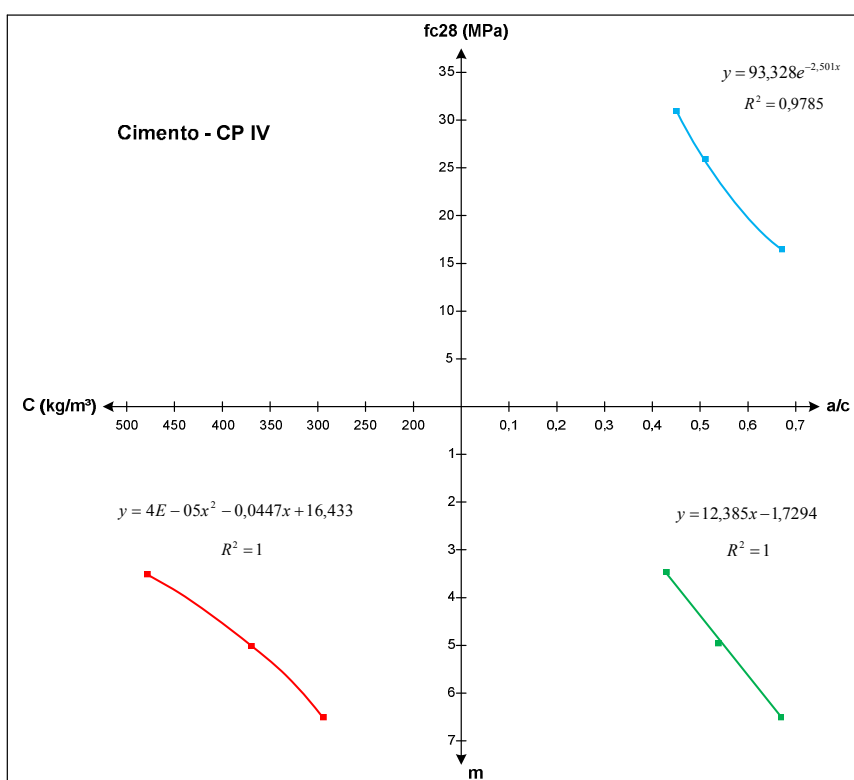


Figura 12: diagrama da dosagem experimental - CP IV

A tabela 16 especifica os valores da dosagem experimental realizada para o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI).

Tabela 16: resultado da dosagem experimental para o CP V-ARI

Traço unitário (1:m)	Relação água/cimento (a/c)	Resistência potencial - 28 dias (MPa)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	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

Igualmente, o diagrama de dosagem para o cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), figura 13, foi plotado com os valores obtidos mediante o ajuste do traço do concreto. Desta forma, com o auxílio do diagrama de dosagem, foi possível definir a composição dos traços que empregaram este tipo de cimento.

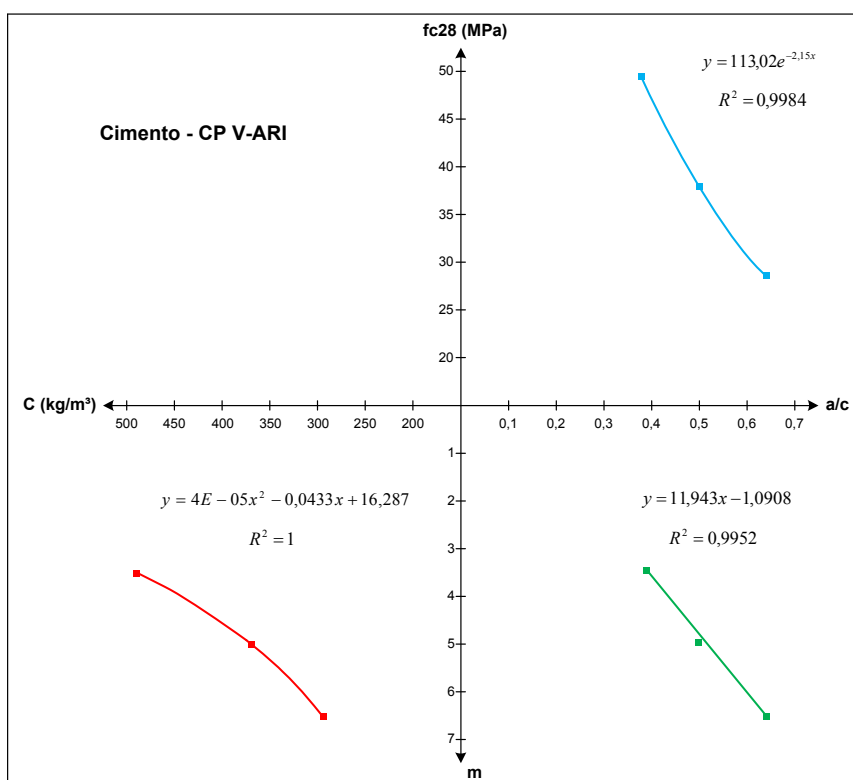


Figura 13: diagrama da dosagem experimental - CP V-ARI

#### 4.3.1 Determinação dos Traços Empregados na Produção dos Concretos

Após a realização da dosagem experimental e com todos os dados obtidos, foram determinados os traços dos concretos empregados nesta pesquisa. Primeiramente, foi fixado o valor referente à relação a/agl, sendo definido como 0,53; relação comumente utilizada em especificações de projetos de pisos de concreto. Assim, para os diversos traços de concretos estudados, o valor correspondente ao consumo de cimento variou de acordo

com a variação do fator controlável consumo de água, mantendo-se o valor da relação  $a/agl$  constante.

Além disso, para todos os traços de concreto estudados, os valores referentes aos seus abatimentos foram fixados em  $100 \pm 20$  mm. Cabe salientar que todos 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; além disso, quando houve a necessidade de aumentar tal propriedade dos concretos, principalmente quando em presença de baixo consumo de água ( $175 \text{ l/m}^3$ ) e elevados teores de substituição de sílica ativa (10 %) conjuntamente à presença de microfibras de polipropileno ( $600 \text{ g/m}^3$ ), foi ajustada a quantidade de aditivo durante o processo de mistura, aumentando-se a dosagem deste no proporcionamento dos compósitos.

Na tabela 17 são apresentadas as características dos concretos estudados, como os fatores controláveis (tipo de cimento, consumo de água, teor de substituição de sílica ativa e teor de adição de microfibras de PP), consumo de cimento, traço unitário e parâmetros relacionados às misturas, como a relação água/materiais secos (H), o teor de argamassa ( $\alpha$ ), o abatimento do concreto e a quantidade de aditivo dosada, em massa, em relação à quantidade de cimento. Salienta-se que a relação  $a/agl$  de 0,53 manteve-se constante para todos os concretos estudados.

Durante a mistura dos materiais e a verificação do abatimento dos concretos, realizada segundo a NBR 7223 (1992), não foi constatado em nenhum dos traços analisados o fenômeno da segregação. No entanto, verificou-se que, para os traços com elevados consumos de água e de cimento, houve um aumento significativo no abatimento, como pode ser verificado nos dados demonstrados na tabela 17.

Logo, para os concretos avaliados com mesma relação  $a/agl$ , porém com diferentes volumes de pasta de cimento, observou-se um aumento no abatimento do concreto, conforme esperado. Este fato propiciou uma redução do atrito entre os grãos dos agregados, melhorando a trabalhabilidade das misturas e, por conseqüência, majorando o abatimento destas.

Tabela 17: traços dos concretos avaliados na pesquisa

TRAÇO	FATORES CONTROLÁVEIS				Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	TRAÇO UNITÁRIO				PARÂMETROS			
	Tipo de cimento	Consumo de água (l/m <sup>3</sup> )	Teor de sílica ativa (%)	Teor de fibra (g/m <sup>3</sup> )		cim	a	p	m	H (%)	α (%)	Abatimento (mm)	Aditivo (%)
1 A	CP IV	175	0	0	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	100	0,16
2 A	CP IV	175	0	600	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	110	0,27
3 A	CP IV	175	5	0	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	110	0,41
4 A	CP IV	175	5	600	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	110	0,63
5 A	CP IV	175	10	0	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	90	0,36
6 A	CP IV	175	10	600	330	1	2,87	3,16	6,03	7,54	55	100	0,44
7 A	CP IV	190	0	0	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	125	0,09
8 A	CP IV	190	0	600	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	90	0,10
9 A	CP IV	190	5	0	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	100	0,08
10 A	CP IV	190	5	600	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	80	0,30
11 A	CP IV	190	10	0	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	125	0,26
12 A	CP IV	190	10	600	358	1	2,60	2,95	5,55	8,09	55	80	0,26
13 A	CP IV	205	0	0	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	170	0,04
14 A	CP IV	205	0	600	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	100	0,06
15 A	CP IV	205	5	0	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	160	0,16
16 A	CP IV	205	5	600	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	100	0,20
17 A	CP IV	205	10	0	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	90	0,16
18 A	CP IV	205	10	600	387	1	2,37	2,76	5,13	8,65	55	105	0,32
1 B	CP V-ARI	175	0	0	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	100	0,03
2 B	CP V-ARI	175	0	600	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	100	0,14
3 B	CP V-ARI	175	5	0	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	80	0,08
4 B	CP V-ARI	175	5	600	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	95	0,26
5 B	CP V-ARI	175	10	0	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	90	0,29
6 B	CP V-ARI	175	10	600	330	1	3,04	3,30	6,34	7,22	55	100	0,38
7 B	CP V-ARI	190	0	0	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	175	0,08
8 B	CP V-ARI	190	0	600	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	90	0,07
9 B	CP V-ARI	190	5	0	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	80	0,04
10 B	CP V-ARI	190	5	600	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	80	0,10
11 B	CP V-ARI	190	10	0	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	100	0,23
12 B	CP V-ARI	190	10	600	358	1	2,79	3,10	5,89	7,69	55	100	0,26
13 B	CP V-ARI	205	0	0	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	165	0,01
14 B	CP V-ARI	205	0	600	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	100	0,05
15 B	CP V-ARI	205	5	0	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	110	0,02
16 B	CP V-ARI	205	5	600	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	110	0,07
17 B	CP V-ARI	205	10	0	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	80	0,06
18 B	CP V-ARI	205	10	600	387	1	2,58	2,93	5,51	8,14	55	80	0,14

#### 4.3.2 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.

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; microfibras de polipropileno (quando presente); e aditivo superplastificante para atingir o abatimento (pré-estabelecido em  $100 \pm 20$  mm) e a dispersão destes materiais no concreto.

### 4.3.3 Moldagem dos Concretos

As moldagens foram feitas com fôrmas metálicas, com o objetivo de minimizar a provável perda de pasta de cimento e de variabilidade dimensional entre os diferentes traços analisados. Os corpos-de-prova referentes a cada traço de concreto 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, onde o adensamento foi manual, com haste de compactação, conforme prescreve a norma NBR 15558/2008.

Para o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739/2007) foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões 9,5 x 19 cm, conforme figura 14. Corpos-de-prova prismáticos, de dimensões 10 x 10 x 35 cm, figura 15, foram utilizados para os ensaios de resistência à tração na flexão (NBR 12142/94). No ensaio de exsudação (NBR 15558/2008) foi utilizado um molde cilíndrico metálico, com diâmetro interno de 250 mm e altura interna de 280 mm, visto na figura 16. Já para os ensaios de dureza superficial (NBR 7584/1995) e resistência à abrasão (Método Cientec) foram utilizadas fôrmas metálicas prismáticas de dimensões 18 x 35 x 10 cm, como se observa na figura 17.



Figura 14: fôrma cilíndrica de 9,5 x 19 cm



Figura 15: fôrma prismática de 10 x 10 x 35 cm



Figura 16: cilindro metálico de 250 mm de diâmetro e 280 mm de altura

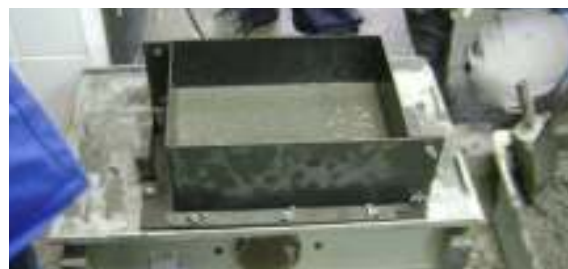


Figura 17: fôrma prismática de 18 x 35 x 10 cm

## 4.4 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

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, capeados com enxofre, de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003). Foram ensaiados três corpos-de-prova à compressão, aos 28 dias, para cada traço de concreto, resultando em um total de 108 corpos-de-prova. 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 úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ) 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 (1991). Conforme a norma, os corpos-de-prova prismáticos (CP's) empregados neste ensaio foram moldados de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003). Foram ensaiados três corpos-de-prova à tração na flexão, aos 28 dias, para cada traço de concreto moldado, totalizando 108 corpos-de-prova. Da mesma maneira como para o ensaio de resistência à compressão, os corpos-de-prova foram revestidos por um plástico, imediatamente após o processo de moldagem, no local em que seriam armazenados durante as primeiras 24 horas. Após a desmoldagem, todos os CP's foram mantidos em cura úmida ( $UR \geq 95\%$  e temperatura de  $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ) até o momento da realização do ensaio. O ensaio de resistência à tração na flexão está apresentado na figura 18.



Figura 18: ensaio de resistência à tração na flexão

#### 4.4.3 Exsudação

O método de ensaio de exsudação seguiu as prescrições da norma brasileira NBR 15558 (2008). Conforme a norma, neste ensaio utilizou-se um cilindro metálico com diâmetro interno de 250 mm e altura interna de 280 mm, o qual foi moldado de acordo com a norma brasileira NBR 5738 (2003), e, posteriormente, compactado segundo a norma brasileira NBR 9833 (2008). Conforme a norma o ensaio foi efetuado no concreto em estado fresco, logo após a moldagem do cilindro, em ambiente com temperatura e umidade controladas ( $UR 60 \pm 10\%$  e temperatura de  $23 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ). As figuras 19, 20 e 21 demonstram a realização do ensaio de exsudação.





Figura 19: cilindro inclinado para coleta de água



Figura 20: coleta de água exsudada



Figura 21: registro das leituras após pesagem de água exsudada

Como no programa experimental tem-se 36 combinações ou traços de concreto, foi ensaiado um total de 36 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 (cm<sup>3</sup>), multiplicado por 1 g/m<sup>3</sup>.

#### 4.4.4 Resistência à Abrasão

Nesta pesquisa foi adotado o método de ensaio desenvolvido pela Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC) para medir a resistência à abrasão. Na execução de cada traço de concreto, duas fôrmas metálicas foram concretadas, resultando em um total de 72 CP's, dos quais foram extraídas as amostras destinadas aos ensaios de abrasão aos 28 dias; sendo duas amostras retiradas de cada corpo-de-prova de concreto, perfazendo um total de 4 amostras para cada combinação. A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada em duas camadas, com adensamento mecânico (mesa vibratória) e posterior regularização da superfície, conforme prescrições da norma brasileira NBR 5738 (2003).

Os CP's moldados receberam acabamento manual com desempenadeira metálica especial para pisos de concreto (figura 22); o acabamento foi realizado em sala climatizada com umidade e temperatura controladas, sendo estas de  $60 \pm 10 \%$  e  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente (figura 23). Cabe salientar que para realização do acabamento superficial esperava-se a evaporação da água exsudada que se formava na superfície dos compósitos. Tal procedimento foi efetuado duas vezes, para todos os concretos moldados, buscando-se uma maior planicidade superficial.



Figura 22: desempenadeira metálica para pisos de concreto



Figura 23: acabamento superficial do concreto

Imediatamente após o processo de acabamento superficial, os corpos-de-prova foram revestidos por um plástico, e mantidos durante as primeiras 24 horas em sala climatizada ( $60 \pm 10 \%$  e  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Após esta etapa, os CP's foram desmoldados e mantidos em cura úmida ( $UR \geq 95 \%$  e temperatura de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) até o momento da realização do ensaio.

Com o término do período de cura úmida para realização do ensaio, todos os corpos-de-prova moldados foram serrados (figura 24), sendo extraída uma faixa da parte central com 5 cm de largura, a qual foi enviada ao CIENTEC para posterior extração das amostras para execução do ensaio de resistência à abrasão (figura 25). As metades restantes dos CP's,

com dimensões de 18 x 15 x 10 cm foram destinadas aos ensaios de dureza superficial por esclerometria, resultando em um total de 4 corpos-de-prova por traço de concreto (figura 26).



Figura 24: corpo-de-prova sendo serrado



Figura 25: faixa central do corpo-de-prova



Figura 26: corpos-de-prova após serragem

O método de ensaio empregado para a análise do desgaste superficial por abrasão (CIENTEC) foi apresentado de forma mais detalhada no item 3.2.2.2. A figura 27 apresenta uma amostra preparada para a execução do ensaio de resistência à abrasão e a figura 28 demonstra o ensaio propriamente dito.



Figura 27: amostra para execução do ensaio de resistência à abrasão



Figura 28: ensaio de resistência à abrasão

#### 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. O 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.

Conforme descrito no item 4.4.4, o ensaio de dureza superficial por esclerometria foi efetuado nos corpos-de-prova de concreto moldados para o ensaio de abrasão. Logo, para cada traço de concreto foram moldados dois corpos-de-prova, nas dimensões de 18 x 35 x 10 cm, dos quais depois de serrada a faixa central destinada à extração das amostras para o ensaio de desgaste, resultaram 4 CP's nas dimensões de 18 x 15 x 10 cm.

A NBR 7584 (1995) recomenda em cada área de ensaio, 9 ou 16 impactos do aparelho. Nesta pesquisa foram adotados 9 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 29 apresenta o corpo-de-prova de concreto que foi destinado ao ensaio de esclerometria nesta pesquisa, com os respectivos pontos para aferição do esclerômetro de reflexão e a figura 30 mostra a execução do referido ensaio.



Figura 29: corpo-de-prova para o ensaio de esclerometria



Figura 30: 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 (1995). Foram registrados 9 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 ( $80 \pm 2$ ).

Segundo a referida norma, mediante as 9 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 (9);

IE<sub>nom</sub> - é o índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante (80);

IE<sub>i</sub> - 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 9 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<sub>ef</sub>), de acordo com a equação 4 .

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

Onde:

IE<sub>ef</sub> - 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<sub>ef</sub> de cada traço de concreto moldado foi dado pela média aritmética dos valores dos IE<sub>ef</sub> dos 4 CP's ensaiados.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, dureza superficial, exsudação e resistência à abrasão. 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

A resistência à compressão uniaxial é uma propriedade de extrema importância na avaliação das estruturas de concreto, uma vez que ela está relacionada com a pasta de cimento endurecida, fornecendo uma boa indicação da qualidade do material. Logo, em projetos estruturais, tal resistência é o parâmetro mais utilizado, pois está relacionado à capacidade do elemento em resistir a esforços sem entrar em colapso.

Os resultados da resistência à compressão uniaxial média para os concretos estudados encontram-se na tabela 18. No apêndice B podem ser encontrados todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 18: resultados médios para o ensaio de resistência à compressão uniaxial

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa) - VALORES MÉDIOS							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)
1A	175-0-0	21,6	4,1	1B	175-0-0	26,8	24,8
2A	175-0-600	19,3	8,5	2B	175-0-600	29,5	5,7
3A	175-5-0	22,8	8,3	3B	175-5-0	30,1	24,5
4A	175-5-600	23,4	12,1	4B	175-5-600	34,9	8,0
5A	175-10-0	24,4	2,8	5B	175-10-0	31,4	12,5
6A	175-10-600	27,1	1,6	6B	175-10-600	43,6	6,2
7A	190-0-0	19,5	18,1	7B	190-0-0	27,3	20,8
8A	190-0-600	22,1	9,7	8B	190-0-600	35,3	9,5
9A	190-5-0	22,1	11,8	9B	190-5-0	32,0	13,0
10A	190-5-600	24,6	7,9	10B	190-5-600	31,5	11,3
11A	190-10-0	24,6	7,2	11B	190-10-0	31,0	38,2
12A	190-10-600	23,1	9,7	12B	190-10-600	41,5	3,3
13A	205-0-0	21,6	4,8	13B	205-0-0	35,0	3,0
14A	205-0-600	20,9	6,4	14B	205-0-600	30,6	2,0
15A	205-5-0	21,7	13,0	15B	205-5-0	39,9	3,0
16A	205-5-600	22,0	10,8	16B	205-5-600	27,9	11,5
17A	205-10-0	22,0	5,7	17B	205-10-0	38,2	23,8
18A	205-10-600	22,4	5,4	18B	205-10-600	37,6	10,1

Os resultados foram analisados estatisticamente através do método de análise de variância (ANOVA). Tal análise buscou avaliar se os fatores de controle (consumo de água, teor de substituição de sílica ativa, teor de adição de microfibras de PP e tipo de cimento) 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 19.

Tabela 19: análise de variância (ANOVA) - resistência à compressão uniaxial

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>p</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
Tipo de cimento (1)	1	3302,52	224,569	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	1,92	0,130	0,878009	NS
Sílica (3)	2	210,50	14,314	0,000006	S
Fibra (4)	1	53,59	3,644	0,060245	NS
Tcim x Cag	2	30,65	2,084	0,131820	NS
Tcim x Tsa	2	33,55	2,281	0,109478	NS
Cag x Tsa	4	15,44	1,050	0,387600	NS
Tcim x Tfib	1	22,49	1,529	0,220273	NS
Cag x Tfib	2	122,68	8,342	0,000551	S
Tsa x Tfib	2	51,23	3,483	0,035971	S
Tcim x Cag x Tsa	4	3,12	0,212	0,931034	NS
Tcim x Cag x Tfib	2	94,15	6,402	0,002759	S
Tcim x Tsa x Tfib	2	63,59	4,324	0,016848	S
Cag x Tsa x Tfib	4	16,02	1,089	0,368329	NS
1 x 2 x 3 x 4	4	5,98	0,406	0,803450	NS
Erro	72	14,71			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática 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 19 é possível verificar que, entre os efeitos isolados dos fatores controláveis, o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa foram significativos na variável de resposta. Para os efeitos de 2ª ordem, tanto a interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP (Cag x Tfib), quanto à interação entre o teor de substituição de sílica ativa e de adição de microfibras de PP (Tsa x Tfib), foram significativos na variável de resposta, tendo este último uma influência muito pequena nos resultados.

Dentre os efeitos de 3ª ordem, ambas as interações, tipo de cimento, consumo de água e teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Cag x Tfib) e tipo de cimento, teor de substituição de sílica ativa e teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Tsa x Tfib), foram significativas na variável de resposta. Já a interação de 4ª ordem não foi significativa na variável em estudo.

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

### 5.1.1 Efeito do Tipo de Cimento

O tipo de cimento empregado na dosagem de um concreto é um fator extremamente importante, pois cada cimento apresenta características distintas. Diversos parâmetros



diferenciam os tipos de cimentos, tais como o ganho de resistência mecânica inicial em função da velocidade das reações de hidratação, a resistência final e o teor de adição de pozolanas, entre outros.

A figura 31 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 28 dias, na análise de variância ANOVA. Como descrito no item 4.3.1, a relação  $a/agl$  foi mantida constante (0,53) para todos os traços.

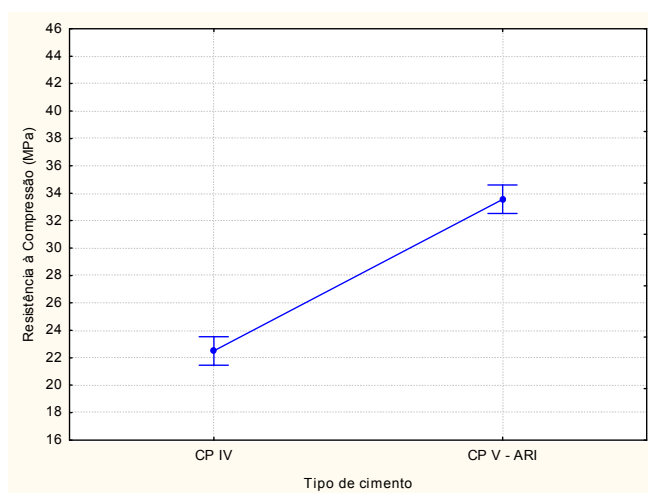


Figura 31: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial do concreto

Através da figura, é possível verificar a influência do tipo de cimento na resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados, para uma mesma relação  $a/agl$ . 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, comportamento esperado e de consenso no meio acadêmico.

A hidratação do cimento pozolânico se dá de forma mais lenta, fato que afeta diretamente a porosidade da matriz cimentícia nas idades mais jovens, e, portanto, a resistência à compressão dos compósitos. Logo, a resistência à compressão dos concretos com cimento pozolânico foi inferior na idade de ensaio, principalmente por conta da velocidade das reações de hidratação, da menor quantidade de clínquer na composição, em função da substituição por pozolanas, e da menor quantidade de  $C_3S$ .

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 o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de polipropileno.

### 5.1.2 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 32 mostra a influência isolada do teor de substituição de sílica ativa 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 28 dias, na análise de variância ANOVA.

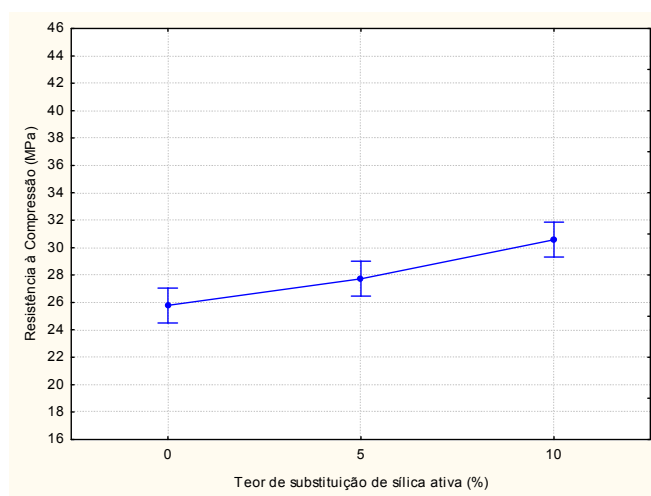


Figura 32: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à compressão uniaxial do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um aumento na resistência à compressão uniaxial dos traços de concreto produzidos com teores de substituição de sílica ativa de 5 % e 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.

O efeito químico promovido pela sílica ativa na matriz de concreto está relacionado à rápida reação pozolânica entre o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$  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 conseqüência aumenta a resistência mecânica do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997).

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).

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 5 % e 10 % de sílica ativa apresentaram diferença significativa para os traços sem substituição (0 %), aumentando a resistência dos concretos em 7,03 % e 15,7 %, respectivamente. Além disso, os resultados para os concretos com a presença de sílica (5 % e 10 %) mostraram-se significativamente diferentes entre si.

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 consumo de água, o tipo de cimento e a adição de microfibras de polipropileno.

### 5.1.3 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

A figura 33 apresenta o efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de polipropileno 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 28 dias, na análise de variância ANOVA, cuja interação mostrou-se significativa.

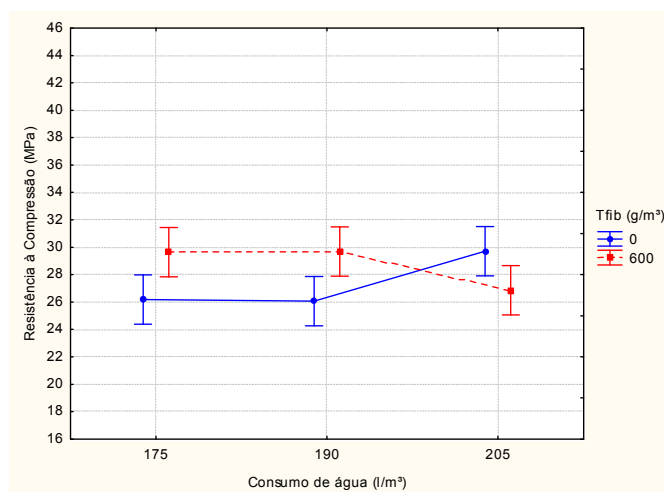


Figura 33: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto

Através da figura observa-se que não existe uma tendência clara de comportamento entre os resultados obtidos no ensaio. No entanto, é possível realizar algumas observações. Para

os concretos produzidos com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e 190 l/m<sup>3</sup>, a adição de microfibras de PP (600 g/m<sup>3</sup>) aumentou a resistência à compressão em 11,7 % e 12,2 %, respectivamente. Contudo, este comportamento não foi observado para os traços com consumo de 205 l/m<sup>3</sup>, onde a adição de microfibras de PP diminuiu a resistência dos concretos. Além disso, para este mesmo consumo de água (205 l/m<sup>3</sup>), os compósitos sem fibras mostraram um acréscimo na propriedade avaliada, fato este não esperado.

Fazendo-se uma análise estatística pelo método do teste de Fisher, verificou-se que os resultados para os concretos produzidos com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e 190 l/m<sup>3</sup> com a presença de microfibras de PP (600 g/m<sup>3</sup>) não foram significativamente diferentes entre si, já os resultados dos concretos com o maior consumo de água (205 l/m<sup>3</sup>) e a incorporação das microfibras mostraram diferença significativa para os anteriores.

A redução nos resultados de resistência para os concretos com consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup> e adição de 600 g/m<sup>3</sup> de microfibras de PP pode ter ocorrido em função de uma possível falha na dispersão destas microfibras, uma vez que a quantidade de aditivo dosado às misturas foi baixa (tabela 17). A falha na dispersão das fibras pode ter propiciado a formação de grumos ou tufo na massa de concreto, reduzindo a resistência. Este comportamento foi encontrado e relatado por Senisse (2010), sendo que a autora verificou que a falta de aditivo nas misturas de concreto contendo microfibras de polipropileno promoveu a aglomeração destas fibras, ocasionando a formação de vazios na matriz cimentícia, reduzindo a resistência do material (figura 34).



Figura 34: presença de grumos de microfibras de PP em corpo-de-prova submetido ao ensaio de resistência à compressão (SENISSE, 2010)

Conjuntamente ao exposto, a figura 35 apresenta com maior detalhe, para ambos os cimentos utilizados neste estudo, a redução da resistência à compressão verificada para os concretos moldados com microfibras de PP e consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup>.

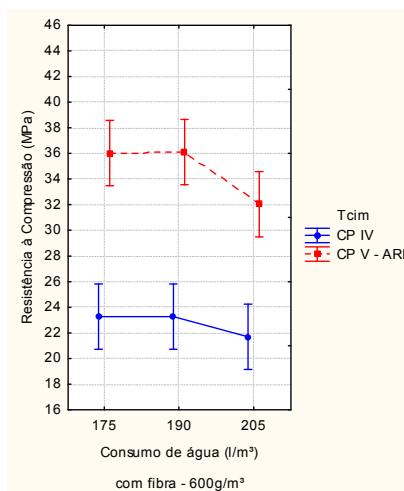


Figura 35: redução da resistência à compressão para os concretos com consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup> moldados com microfibras de PP

Através da figura, evidencia-se que a redução da resistência à compressão foi significativa para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial. Fato que pode estar relacionado, conforme já abordado, à baixa dosagem do aditivo empregado na produção dos concretos com este tipo de cimento e o maior consumo de água (205 l/m<sup>3</sup>). Salienta-se que para o consumo de água mencionado, nos concretos produzidos com cimento CP V-ARI as quantidades de aditivo utilizadas estiveram abaixo das quantidades dosadas nas misturas de concreto com cimento CP IV, sendo estas, em média, de 0,05 % e 0,16%, respectivamente.

#### 5.1.4 Efeito da Interação entre o Teor de Substituição de Sílica Ativa e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

A influência da interação entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP sobre a resistência à compressão uniaxial dos concretos estudados é mostrada na figura 36. A figura foi obtida a partir dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial, de todos os traços avaliados na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA), cuja interação mostrou-se significativa.

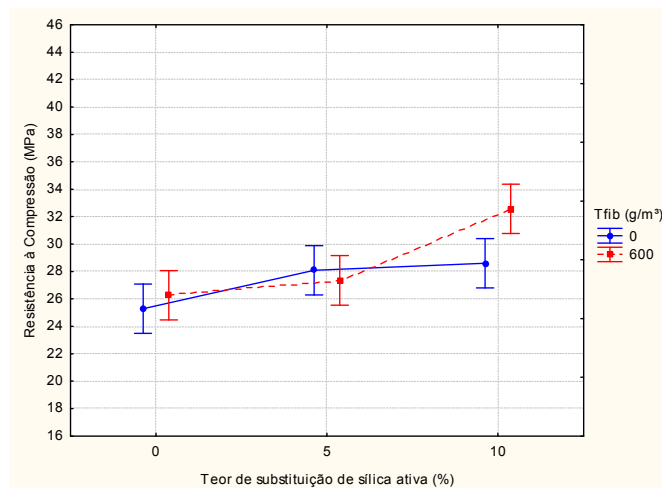


Figura 36: efeito da interação entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à compressão uniaxial do concreto

A partir da análise da figura, observa-se que conforme o teor de sílica ativa presente nos concretos, o efeito das microfibras é diferenciado. Além disso, pode-se dizer que até 5 % de substituição de sílica ativa, as microfibras adicionadas às misturas não alteram a resistência à compressão, contudo para teores de 10 % de sílica ativa, ocorre um aumento significativo desta resistência.

Importante salientar que os traços com substituição de 10 % de sílica ativa e com a adição de microfibras de PP (600 g/m<sup>3</sup>) apresentaram os maiores resultados para a resistência à compressão uniaxial. Este fato pode ser explicado em função da presença das partículas de sílica ativa dentro das misturas, às quais, além de apresentarem o efeito pozolânico e o efeito fíler, podem ter agido como um mecanismo de dispersão. Tal comportamento é atribuído ao formato do grão esférico e ao maior teor de substituição do material, o que além de melhorar a coesão pode ter ajudado na dispersão das microfibras presentes, facilitando a moldagem e majorando a resistência (CARMO; PORTELLA, 2008; NILI; AFROUGHSABET, 2010).

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. Esta melhoria está diretamente relacionada ao menor diâmetro das partículas destas pozolanas, haja vista que 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, 2008). Através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados para estes concretos (10 % de sílica e 600 g/m<sup>3</sup> de fibras) foram significativamente diferentes dos demais.

## 5.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à tração na flexão é uma propriedade de grande importância na avaliação de estruturas como pisos de concreto simples, ou seja, pisos não armados. Tal propriedade indica a qualidade do concreto, uma vez que está diretamente ligada às propriedades da pasta de cimento endurecida. Logo, em projetos estruturais de pisos de concreto simples, esta propriedade é um dos parâmetros mais considerados, pois está relacionado à capacidade do elemento em resistir a esforços de tração sem entrar em colapso.

A tabela 20 apresenta os resultados médios da resistência à tração na flexão de todos os traços estudados, para a idade de 28 dias. No apêndice C encontram-se todos os resultados relacionados a este ensaio.

Tabela 20: resultados médios para ensaio de resistência à tração na flexão

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa) - VALORES MÉDIOS							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)
1A	175-0-0	2,94	9,59	1B	175-0-0	3,73	4,43
2A	175-0-600	3,27	2,54	2B	175-0-600	3,25	1,09
3A	175-5-0	2,96	12,72	3B	175-5-0	3,69	11,32
4A	175-5-600	3,34	13,39	4B	175-5-600	3,73	8,83
5A	175-10-0	3,14	5,22	5B	175-10-0	4,27	11,24
6A	175-10-600	3,13	3,08	6B	175-10-600	5,05	3,85
7A	190-0-0	3,61	6,05	7B	190-0-0	4,10	5,06
8A	190-0-600	3,32	7,51	8B	190-0-600	3,85	4,77
9A	190-5-0	3,34	7,45	9B	190-5-0	4,38	15,17
10A	190-5-600	3,88	7,19	10B	190-5-600	3,49	3,02
11A	190-10-0	3,50	6,37	11B	190-10-0	4,83	12,38
12A	190-10-600	3,03	4,73	12B	190-10-600	4,97	11,01
13A	205-0-0	3,13	8,96	13B	205-0-0	3,55	5,28
14A	205-0-600	3,30	2,53	14B	205-0-600	3,84	1,33
15A	205-5-0	3,26	3,36	15B	205-5-0	5,08	3,44
16A	205-5-600	3,15	10,10	16B	205-5-600	3,57	9,14
17A	205-10-0	2,99	7,35	17B	205-10-0	3,98	10,76
18A	205-10-600	3,16	3,80	18B	205-10-600	3,57	16,52

Todos os resultados encontrados para o ensaio de resistência à tração na flexão foram avaliados estatisticamente. Tal análise buscou avaliar a influência de cada fator controlável e de suas interações na variável de resposta (resistência à tração na flexão) estudada.

Todos os dados experimentais encontrados para este ensaio foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), o qual está apresentado na tabela 21. Nesta análise foram ponderados os efeitos isolados de cada uma das variáveis independentes, bem como as suas interações.



Tabela 21: análise de variância (ANOVA) - resistência à tração na flexão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>p</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
Tipo de cimento (1)	1	17,537	179,78	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	1,166	11,96	0,000033	S
Sílica (3)	2	0,875	8,97	0,000332	S
Fibra (4)	1	0,206	2,11	0,150242	NS
Tcim x Cag	2	0,011	0,12	0,890675	NS
Tcim x Tsa	2	1,648	16,89	0,000001	S
Cag x Tsa	4	0,607	6,22	0,000234	S
Tcim x Tfib	1	0,743	7,62	0,007316	S
Cag x Tfib	2	0,456	4,67	0,012379	S
Tsa x Tfib	2	0,210	2,15	0,123740	NS
Tcim x Cag x Tsa	4	0,647	6,64	0,000133	S
Tcim x Cag x Tfib	2	0,148	1,52	0,226477	NS
Tcim x Tsa x Tfib	2	1,023	10,49	0,000101	S
Cag x Tsa x Tfib	4	0,399	4,09	0,004827	S
1 x 2 x 3 x 4	4	0,375	3,85	0,006894	S
Erro	72	0,098			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática 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 exceção do teor de adição de microfibras de PP, o qual já não havia causado influência significativa na resistência à compressão uniaxial dos traços estudados. Acredita-se que o efeito isolado referente ao teor de adição de microfibras de PP não se mostrou significativo devido às características próprias das fibras, relacionadas às suas dimensões e ao seu baixo módulo de elasticidade.

Com relação aos efeitos de 2ª ordem, as interações mostraram-se significativas, com exceção das combinações entre o tipo de cimento e o consumo de água (Tcim x Cag) e entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP (Tsa x Tfib). Para os efeitos de 3ª e 4ª ordem, todas as interações foram significativas, à exceção da combinação entre o tipo de cimento, o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Cag x Tfib).

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.

### 5.2.1 Efeito do Tipo de Cimento

A figura 37 apresenta o efeito isolado do tipo de cimento sobre a resistência à tração na flexão dos concretos estudados. Esta figura foi obtida a partir dos resultados de resistência à tração na flexão, para todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 4.3.1, foi mantida constante (0,53), para todos os traços analisados.

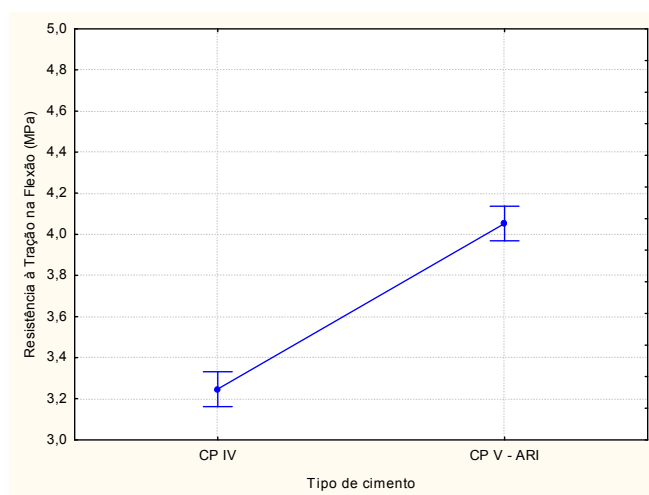


Figura 37: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à tração na flexão do concreto

Através da análise da figura, verifica-se a influência da variável tipo de cimento na resistência à tração na flexão dos concretos estudados, para uma mesma relação  $a/agl$ . 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.

Tal comportamento já era esperado, uma vez que a hidratação do cimento pozolânico se dá de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade da matriz cimentícia, e, conseqüentemente, a resistência à tração na flexão do compósito. Desta forma, a resistência final do concreto tende a ser inferior, principalmente, em função da velocidade das reações de hidratação do cimento, da menor quantidade de clínquer na composição, em função da substituição por pozolanas e da menor quantidade de  $C_3S$ .

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 ou a resistência à compressão, e que existem outros fatores envolvidos, como o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de polipropileno.

### 5.2.2 Efeito do Consumo de Água

O efeito isolado do consumo de água na resistência à tração na flexão dos traços estudados está mostrado na figura 38.

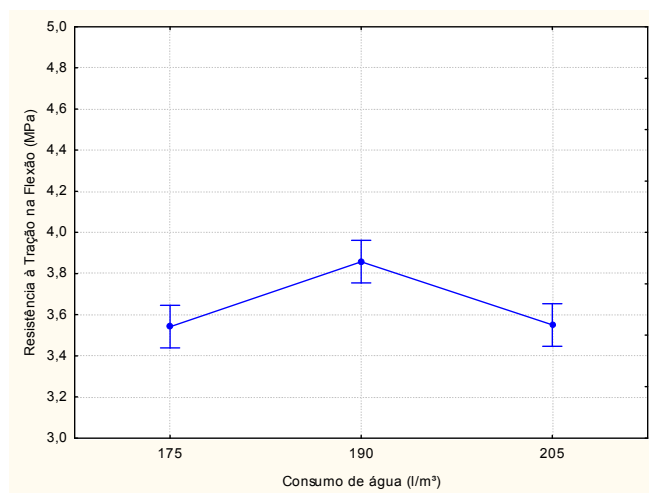


Figura 38: efeito isolado do consumo de água na resistência à tração na flexão do concreto

Observando a figura, verifica-se uma redução na resistência à tração na flexão para os concretos com o menor consumo e com maior consumo de água (175 l/m³ e 205 l/m³). Para o consumo de 175 l/m³, este comportamento não era esperado, e pode ter ocorrido em função da menor coesão das misturas, devido ao menor volume de pasta e conseqüentemente ao maior teor de agregados presentes. Fato que pode ter acarretado em maiores dificuldades durante os processos de moldagem e adensamento destes concretos.

No caso do consumo de água de 205 l/m³, o comportamento era esperado, pois para uma mesma relação a/c (0,53), o concreto com maior consumo de água origina um aumento na porosidade da matriz cimentícia, resultante das reações volumétricas químicas, assim reduzindo a resistência do compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Analisando estatisticamente os resultados obtidos através do teste de Fisher, observa-se uma diferença significativa para os resultados dos traços com consumo de água na mistura de 190 l/m³ em relação aos demais. Assim, considerando esta variável de análise, observou-se que o consumo de água intermediário (190 l/m³) parece ser o mais adequado para os concretos e materiais empregados nesta pesquisa.

Entretanto, é interessante destacar que o efeito isolado do consumo de água não teve influência estatística significativa nos resultados de resistência à compressão uniaxial dos concretos, mas influenciou os resultados de resistência à tração na flexão, fato explicado

pela maior sensibilidade deste ensaio frente à presença de possíveis microfissuras na matriz cimentícia.

Contudo, cabe salientar que os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle consumo de água frente à variável de estudo ou a resistência à tração na flexão, e que existem outros fatores envolvidos, como o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de polipropileno.

### 5.2.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 39 apresenta o efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa frente à resistência à tração na flexão dos concretos estudados. A figura foi obtida através dos resultados para os todos os concretos ensaiados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

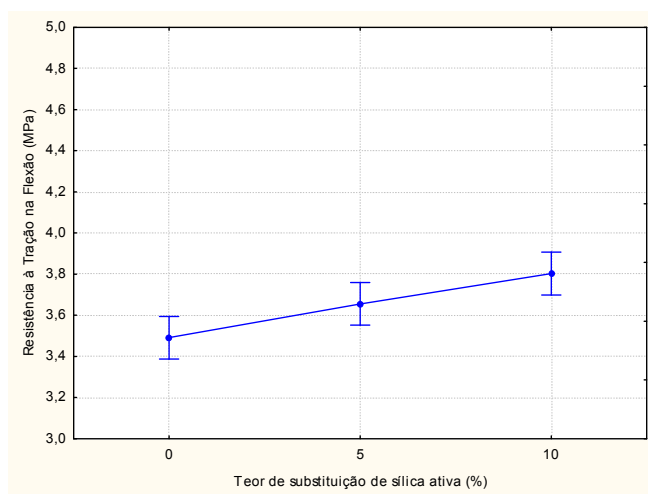


Figura 39: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto

De acordo o gráfico, nota-se um aumento gradual na resistência à tração na flexão dos traços de concreto produzidos com a substituição de sílica ativa por parte do cimento. 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. Isto também foi verificado para a resistência à compressão uniaxial dos concretos, descrito no item 5.1.2.

Com relação ao efeito químico promovido pela sílica ativa na matriz de concreto, sabe-se que este está relacionado à rápida reação pozolânica entre o  $\text{SiO}_2$  e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  resultante da hidratação do cimento, o que resulta em um aumento da resistência da zona de transição e

da pasta. Quando se fala do efeito físico ou microfíler, este promove o preenchimento dos micro vazios existentes na interface agregado-pasta, aumentando a coesão interna da matriz cimentícia e maximizando a resistência mecânica dos concretos.

Somando-se a estes efeitos, a elevada finura da sílica ativa minimiza a exsudação, evitando, desta forma, que a água de amassamento fique sob as partículas de agregado graúdo, o que por sua vez minimiza a porosidade existente na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados. Logo, a resistência e a durabilidade neste local passam a ser significativamente melhoradas.

Através da análise estatística pelo teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 5 % e 10 % de sílica ativa apresentaram diferença significativa para os traços sem substituição (0 %), maximizando a resistência dos concretos em 4,49 % e 8,19 %, respectivamente. Ainda, os resultados para os concretos com a presença de sílica (5 % e 10 %) mostraram-se significativamente diferentes entre si.

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 consumo de água, o tipo de cimento e a adição de microfibras de polipropileno. Por exemplo, analisando por tipo de cimento, os efeitos são diferentes, como discutido a seguir.

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

A influência da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa sobre a resistência à tração na flexão do concreto está apresentada na figura 40. A figura foi obtida com os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão, para os traços estudados, na análise de variância (ANOVA).

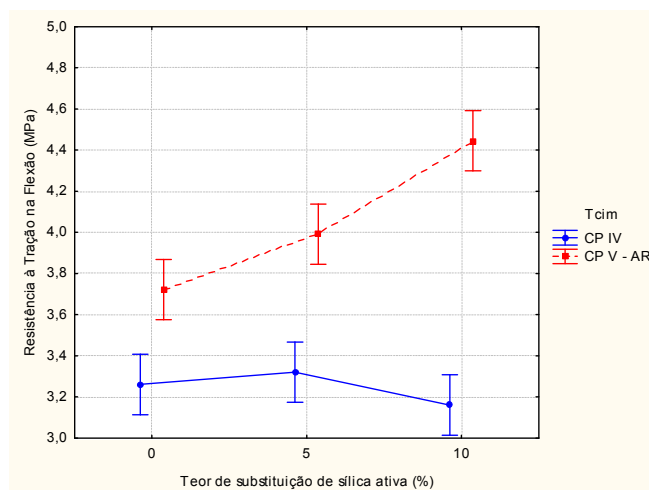


Figura 40: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto

Analisando estatisticamente a figura, nota-se que o efeito da sílica ativa na resistência à tração na flexão é maior para o cimento CP V-ARI comparando-se com o cimento CP IV. Além disso, tal resistência aumenta significativamente com o aumento nos teores de substituição de sílica ativa para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial. Comportamento esperado, uma vez que 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 do efeito pozolânico e dos efeitos microfíler de nucleação e de densificação da zona de transição decorrentes da elevada finura deste material sintetizado, conforme mencionado no item 5.2.3.

Para os concretos produzidos com cimento pozolânico, a resistência à tração na flexão apresentou um pequeno decréscimo com o aumento no teor de substituição de sílica de 10 % nas misturas. Ainda, observa-se que a proporção de 5 % de sílica ativa mostra pouca influencia nos resultados obtidos. Ponderando-se os dados através de uma análise estatística, pelo método do teste de Fisher, verificou-se que não houve diferença significativa entre os concretos com cimento CP IV e diferentes teores de sílica ativa.

### 5.2.5 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A figura 41 demonstra a influência da interação entre o consumo de água e teor de substituição de sílica ativa para os concretos estudados. Tal figura foi obtida através dos resultados encontrados no ensaio de resistência à tração na flexão, para todos os traços analisados, na idade de 28 dias, na análise variância (ANOVA).

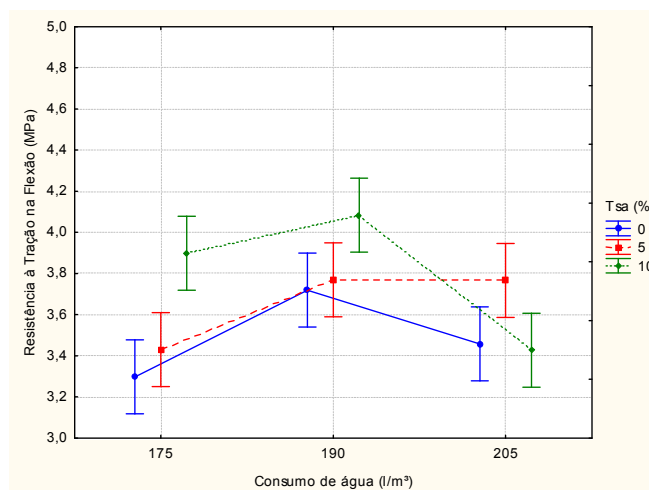


Figura 41: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à tração na flexão do concreto

Através da figura observa-se que não existe uma tendência definida de comportamento entre os resultados obtidos no ensaio. No entanto, algumas considerações podem ser realizadas. Verifica-se novamente a diminuição da resistência à tração na flexão para os concretos com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e de 205 l/m<sup>3</sup>, conforme já relatado no item 5.2.2.

Além disso, constata-se que, para os concretos produzidos com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e 190 l/m<sup>3</sup>, a substituição de parte do cimento por sílica ativa (5 % e 10 %) aumentou a resistência à tração na flexão, comportamento esperado. Contudo, este comportamento não foi observado para os traços com consumo de 205 l/m<sup>3</sup>, onde a substituição de sílica ativa em 10 % provocou uma diminuição da resistência para as misturas. Esta redução pode ter ocorrido em função de uma possível falta de dispersão dos materiais, uma vez que a quantidade de aditivo dosado às misturas foi baixa (tabela 17).

Os traços com consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> e teor de substituição de sílica de 10 % apresentaram maiores resultados nominais de resistência à tração na flexão, para os materiais empregados na pesquisa. Através de uma análise estatística pelo teste de Fisher, entretanto, mostrou-se que não existe uma diferença significativa entre estes e os traços produzidos com 175 l/m<sup>3</sup> de água e com teor de 10 % de sílica. Em relação aos demais concretos, a diferença foi significativa.

### 5.2.6 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

A influência da interação entre o tipo de cimento e teor de adição de microfibras de PP está mostrada na figura 42. Esta foi obtida com os resultados encontrados no ensaio de resistência à tração na flexão, de todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

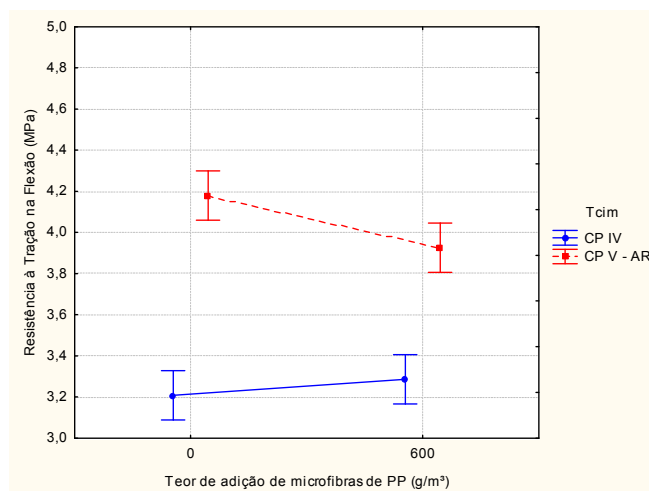


Figura 42: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à tração na flexão do concreto

De acordo com a figura, é possível observar que as microfibras de PP atuam de forma diferenciada de acordo com o tipo de cimento. Para os traços produzidos com cimento CP IV a adição de microfibras de PP em 600 g/m<sup>3</sup> parece aumentar levemente a resistência à tração na flexão, porém de forma não significativa, segundo análise realizada através do teste de Fisher. Este fato pode ser explicado em função da maior facilidade de mistura e moldagem dos concretos confeccionados com este cimento em função do formato esférico do grão da cinza volante presente, a qual pode ter auxiliado na dispersão e mistura dos materiais.

No entanto, para o cimento CP V-ARI a resistência à tração na flexão diminui cerca de 6,06 % com a adição das fibras. Este comportamento pode ser explicado através das características deste cimento, como a forma do grão. Como este é um material que apresenta formato de grão poliédrico, a incorporação de teores elevados de microfibras de PP pode ter dificultado o processo de mistura e homogeneização dos materiais. Desta maneira, sugere-se que os concretos produzidos com este tipo de cimento não suportaram adições de 600 g/m<sup>3</sup>, para os materiais empregados na pesquisa.



Sendo assim, foi possível verificar que o cimento pozolânico apresentou uma maior capacidade de suporte das microfibras de polipropileno nas misturas, para os materiais empregados nesta pesquisa.

### 5.2.7 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

O efeito combinado da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP frente à resistência à tração na flexão dos concretos está mostrado na figura 43. Esta foi obtida através dos resultados de resistência à tração na flexão de todos os traços analisados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

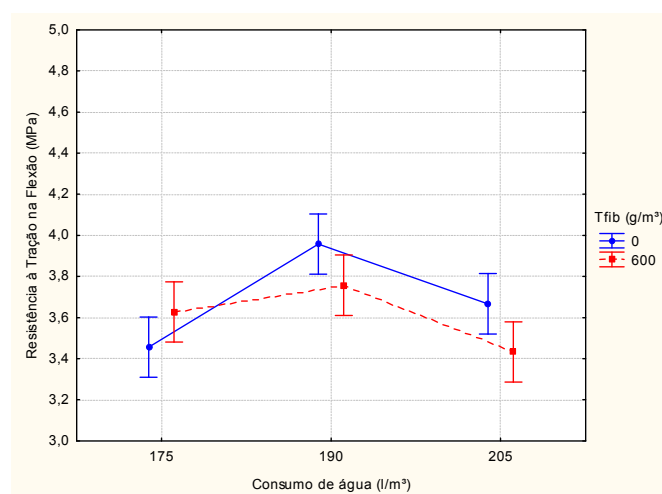


Figura 43: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à tração na flexão do concreto

Através da análise da figura não se observa uma tendência de comportamento para os resultados encontrados, conforme encontrado para o ensaio de resistência à compressão uniaxial no item 5.1.3. Verifica-se, conforme abordado no item 5.2.2, uma redução não esperada da resistência à tração na flexão para os compósitos com 175 l/m³ de água. Conjuntamente, o teor de adição de 600 g/m³ de microfibras de PP, empregado nos concretos estudados, não influenciou de forma significativa a variável de resposta avaliada, quando analisado estatisticamente pelo teste de Fisher.

Além disso, cabe salientar que o tipo de microfibra de polipropileno, empregada na pesquisa, não foi utilizado com o objetivo de melhorar a resistência à tração na flexão das misturas de concreto, uma vez que as características relacionadas com as dimensões da fibra, como o comprimento e o diâmetro, e o seu baixo módulo de elasticidade, comparado com o da matriz cimentícia, não influenciam diretamente na variável avaliada (MEHTA;

MONTEIRO, 2006). Fato que também pode ser constatado devido ao efeito não significativo do teor de adição de microfibras, quando avaliado isoladamente.

### 5.3 DUREZA SUPERFICIAL POR ESCLEROMETRIA

A dureza superficial é uma propriedade de extrema importância para as estruturas de concreto, tais como pisos, uma vez que ela está relacionada com a qualidade da camada mais externa ou da camada superficial do material. Tal propriedade pode ser medida através do ensaio de esclerometria, conforme abordado no item 4.4.5.

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 22. Seguem, no apêndice D, todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 22: resultados médios para o ensaio de dureza superficial por esclerometria

DUREZA SUPERFICIAL - ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO - VALORES MÉDIOS							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)
1A	175-0-0	32,4	1,8	1B	175-0-0	41,1	2,9
2A	175-0-600	28,5	2,8	2B	175-0-600	37,1	3,2
3A	175-5-0	28,6	9,9	3B	175-5-0	40,3	3,7
4A	175-5-600	29,0	3,5	4B	175-5-600	38,2	3,7
5A	175-10-0	32,1	4,2	5B	175-10-0	38,1	2,2
6A	175-10-600	31,9	1,9	6B	175-10-600	42,1	6,4
7A	190-0-0	28,4	2,7	7B	190-0-0	39,5	4,3
8A	190-0-600	29,8	3,1	8B	190-0-600	36,7	1,7
9A	190-5-0	33,1	7,1	9B	190-5-0	40,0	5,7
10A	190-5-600	31,8	2,8	10B	190-5-600	38,4	3,0
11A	190-10-0	29,0	4,1	11B	190-10-0	44,4	4,7
12A	190-10-600	32,0	3,8	12B	190-10-600	37,8	1,2
13A	205-0-0	32,7	5,0	13B	205-0-0	39,4	3,6
14A	205-0-600	31,4	4,2	14B	205-0-600	38,9	2,0
15A	205-5-0	32,4	5,0	15B	205-5-0	39,5	2,2
16A	205-5-600	32,1	3,0	16B	205-5-600	37,0	2,7
17A	205-10-0	33,7	2,6	17B	205-10-0	42,0	5,6
18A	205-10-600	30,8	2,9	18B	205-10-600	38,5	2,6

Os dados experimentais encontrados para este ensaio foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), o qual está apresentado na tabela 23. Nesta análise foram ponderados os efeitos isolados de cada uma das variáveis independentes, bem como as suas interações.

Tabela 23: análise de variância (ANOVA) - dureza superficial por esclerometria

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>p</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
Tipo de cimento (1)	1	1539,8	2492,4	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	4,3	6,9	0,001954	S
Sílica (3)	2	17,1	27,7	0,000000	S
Fibra (4)	1	52,0	84,2	0,000000	S
Tcim x Cag	2	9,4	15,2	0,000005	S
Tcim x Tsa	2	3,8	6,1	0,003823	S
Cag x Tsa	4	6,1	9,8	0,000004	S
Tcim x Tfib	1	14,3	23,1	0,000011	S
Cag x Tfib	2	0,4	0,6	0,526441	NS
Tsa x Tfib	2	1,6	2,6	0,083920	NS
Tcim x Cag x Tsa	4	5,1	8,3	0,000023	S
Tcim x Cag x Tfib	2	22,2	36,0	0,000000	S
Tcim x Tsa x Tfib	2	0,3	0,4	0,642332	NS
Cag x Tsa x Tfib	4	13,4	21,7	0,000000	S
1 x 2 x 3 x 4	4	14,9	24,1	0,000000	S
Erro	59	0,6			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática 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 mostraram-se significativas, com exceção das combinações entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP (Cag x Tfib) e entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP (Tsa x Tfib). Para os efeitos de 3ª e 4ª ordem, todas as interações foram significativas, à exceção da combinação entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP (Tcim x Tsa x Tfib).

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 44 apresenta o efeito isolado do tipo de cimento sobre a dureza superficial dos concretos. Esta figura foi obtida a partir dos resultados do ensaio de esclerometria, para todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 4.3.1, a relação a/agl foi mantida constante (em 0,53), para todos os traços.

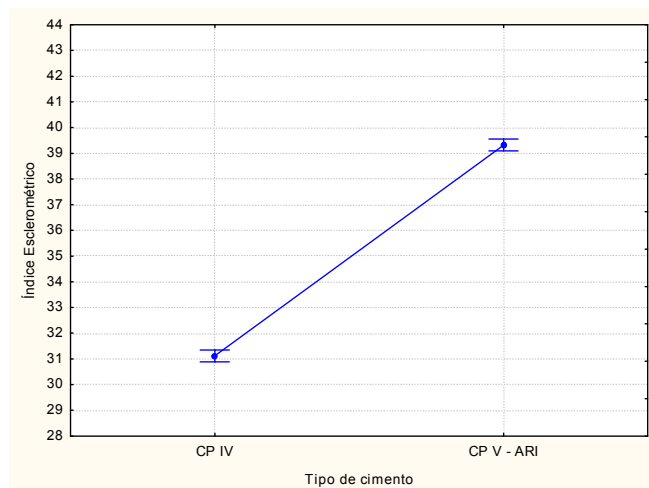


Figura 44: efeito isolado do tipo de cimento na dureza superficial do concreto

Através da análise da figura, verifica-se a grande influência do tipo de cimento na variável de resposta analisada, para uma mesma relação  $a/agl$ , conforme esperado. Os resultados da dureza superficial para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI foram significativamente maiores se comparados com os produzidos com cimento CP IV, conforme mostram os índices esclerométricos analisados estatisticamente pelo método ANOVA. Este comportamento também foi observado para as resistências à compressão e à tração na flexão analisadas nesta pesquisa.

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 nos itens 5.1.1 e 5.2.1. 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 o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP.

### 5.3.2 Efeito do Consumo de Água

O efeito isolado do consumo de água na dureza superficial dos traços estudados é mostrado na figura 45. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de esclerometria, para os concretos avaliados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

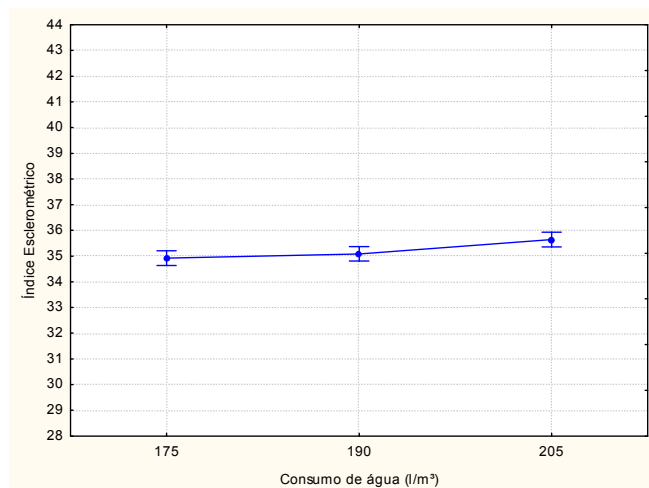


Figura 45: efeito isolado do consumo de água na dureza superficial do concreto

De acordo com análise estatística feita pelo método do teste de Fisher, os resultados verificados não foram significativamente diferentes entre si, embora se note uma breve tendência de aumento na dureza superficial dos concretos com o aumento do consumo de água, ou seja, este fator de controle apresentou pouca influência na variável de estudo. Observa-se que tal tendência de comportamento foi diferente da verificada para o ensaio de resistência à tração na flexão, item 5.2.2, para este mesmo fator controlável. No entanto, não se encontrou uma justificativa técnica para os resultados obtidos neste ensaio.

### 5.3.3 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

O efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa frente à dureza superficial dos concretos estudados está apresentada na figura 46. Esta foi obtida através dos resultados do ensaio de esclerometria de todos os traços avaliados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

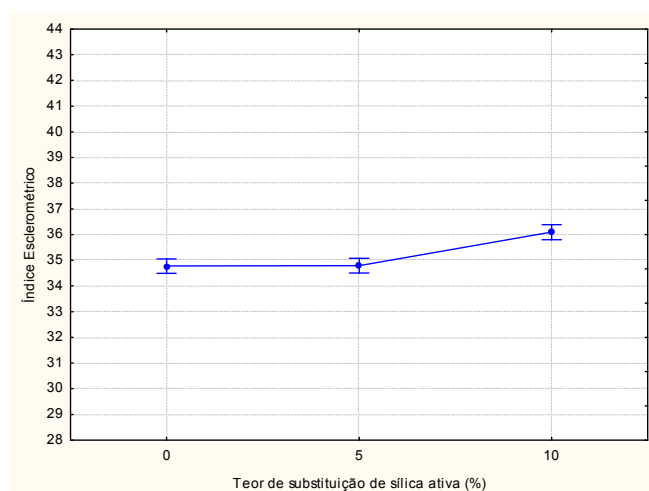


Figura 46: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto

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 ao efeito químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades de resistência dos compósitos, o que por consequência afeta de forma significativa a dureza da camada superficial dos concretos.

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 10 % de sílica ativa apresentaram diferença significativa para os demais traços (0 % e 5 %), aumentando a dureza superficial dos concretos em 4,20 % e 3,39 %, com relação a estes. Cabe salientar que os resultados dos traços com teor de 5 % de sílica ativa contrariam os resultados verificados para as resistências com este mesmo teor, os quais foram de crescimento significativo. Além disso, os resultados para os concretos sem sílica ativa (0 %) e com 5 % de substituição não mostraram diferença estatística significativa entre si.

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 consumo de água, o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de polipropileno.

#### 5.3.4 Efeito do Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

A figura 47 apresenta o efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP sobre a dureza superficial dos concretos. Esta figura foi obtida a partir dos resultados do ensaio de esclerometria, para todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

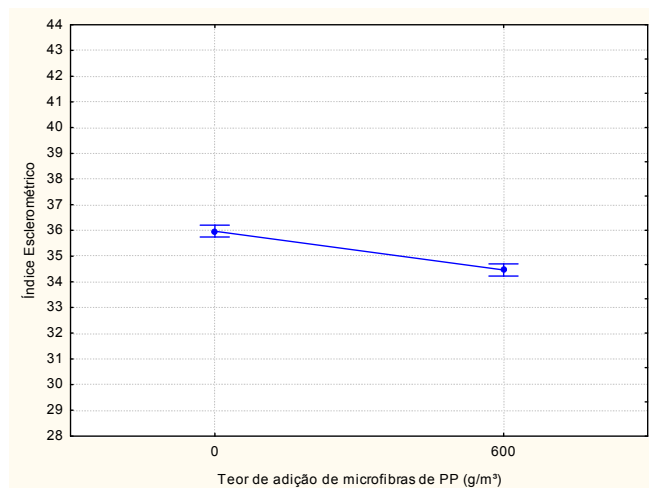


Figura 47: efeito isolado do teor de adição de microfibras de PP na dureza superficial do concreto

Analisando-se a figura, pode-se observar uma diminuição do índice esclerométrico para os concretos produzidos com a adição das microfibras de PP (600 g/m<sup>3</sup>). Tal comportamento pode ter ocorrido em função de uma absorção da energia de percussão através das microfibras de PP.

Os compósitos podem ter sofrido pequenas deformações superficiais durante a execução do ensaio de esclerometria. Logo, a energia remanescente ao impacto do esclerômetro contra a camada externa destes concretos pode ter sido reduzida em função de uma possível deformação da superfície do concreto no momento do ensaio.

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com adição das microfibras de PP (600 g/m<sup>3</sup>) apresentaram diferença significativa para os traços sem adição deste material, reduzindo a dureza superficial dos concretos em 4,05 %. No entanto, cabe lembrar que os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência do comportamento da variável controlável correspondente ao teor de adição de microfibras de PP frente à dureza superficial do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa.

### 5.3.5 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Consumo de Água

O efeito combinado da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água frente à dureza superficial dos concretos está na figura 48. Esta foi obtida através dos resultados de esclerometria de todos os traços analisados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).



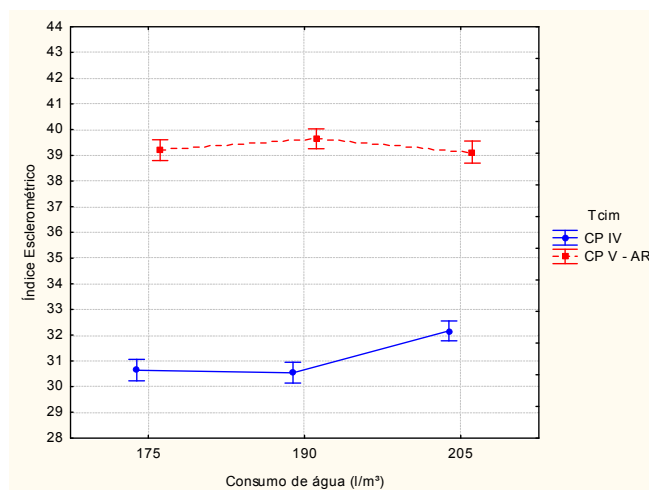


Figura 48: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água na dureza superficial do concreto

Analisando a figura, verificam-se comportamentos diferenciados para os dois cimentos empregados na pesquisa, na avaliação desta interação. Para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI), a dureza superficial apresentou um leve crescimento para o consumo de água na mistura de 190 l/m<sup>3</sup>. No entanto, quando ponderando os dados através de uma análise estatística, pelo método do teste de Fisher, esta diferença mostrou-se não significativa em relação aos demais consumos de água.

Para os concretos produzidos com cimento pozolânico, pode-se observar um leve decréscimo na dureza superficial dos traços produzidos com consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup>, em relação aos com consumo de 175 l/m<sup>3</sup>, efeito este não significativo estatisticamente pelo teste de Fisher. No entanto, para as misturas onde se utilizou consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup> tal propriedade analisada foi majorada.

Cabe salientar que o aumento deste consumo de água (205 l/m<sup>3</sup>), considerando uma mesma relação a/c, teoricamente levaria a um decréscimo nas resistências mecânicas do material, devido a um aumento na porosidade da matriz cimentícia decorrente das reações volumétricas químicas, o que tenderia a uma redução do índice esclerométrico dos compósitos. Entretanto, com o acréscimo no consumo de água (205 l/m<sup>3</sup>), para uma mesma relação a/c, tem-se um aumento no consumo de cimento com redução no teor de agregados, e conseqüentemente uma maior coesão das misturas, fato que levou a uma tendência de redução da exsudação destes concretos, o que pode ter melhorado a superfície e majorado a dureza superficial.

Analisando estatisticamente os resultados obtidos através do teste de Fisher, pode-se observar, para os concretos com cimento pozolânico, uma diferença significativa entre os resultados dos traços com consumo de água na mistura de 205 l/m<sup>3</sup> em relação aos demais.

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

A influência da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa sobre a dureza superficial do concreto está apresentada na figura 49. A figura foi obtida com os resultados do ensaio de esclerometria, para os traços estudados, na análise de variância (ANOVA).

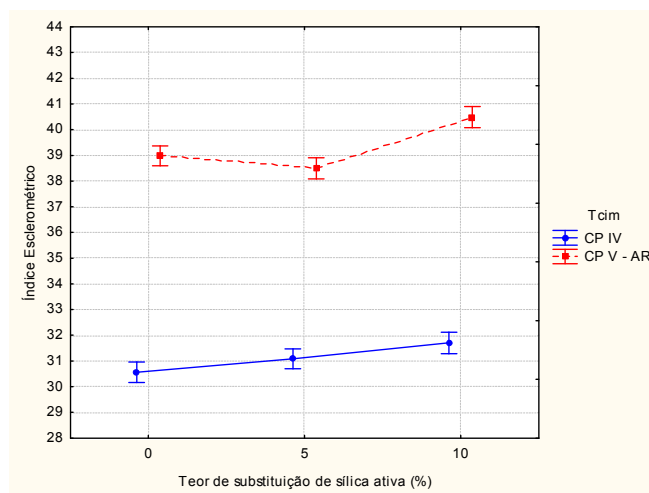


Figura 49: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto

Analisando estatisticamente a figura, observa-se um leve decréscimo, porém não significativo na dureza superficial dos concretos produzidos com cimento CP V-ARI e 5 % de sílica ativa em relação aos concretos de referência, atribuído a ruídos experimentais. Já para os concretos produzidos com o mesmo cimento, porém com um teor mais elevado de substituição de sílica (10 %), a dureza foi significativamente majorada, quando analisada estatisticamente através do método do teste de Fisher. Tal comportamento pode ser explicado devido aos efeitos químico e físico que a sílica ativa proporciona à microestrutura e às propriedades mecânicas dos compósitos, o que por sua vez afetou de forma significativa a dureza superficial dos concretos. Além disso, pode-se observar nas figuras 52 e 53 que a exsudação dos concretos com 10 % de sílica ativa foi inferior para o cimento CP V-ARI comparando-se ao cimento CP IV, o que pode ter melhorado de forma significativa a qualidade da superfície, majorando a dureza superficial dos concretos.

Com relação aos compósitos produzidos com cimento pozolânico, a figura mostra que, com o acréscimo no teor de substituição de sílica ativa, a dureza superficial aumenta. Fato que pode ser explicado mais uma vez através do comportamento pozolânico e da finura de tal adição mineral presente nas misturas de concreto, o que melhora o comportamento da

massa de concreto e reduz a exsudação. Ainda, segundo análise estatística por meio do método do teste de Fisher, fica evidenciada a diferença estatística significativa dos resultados dos concretos com teor de 10 % de substituição de sílica ativa, onde o aumento do índice esclerométrico foi de 3,6 % em relação às misturas de referência (sem sílica).

### 5.3.7 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A influência da interação entre o consumo de água e teor de substituição de sílica ativa sobre a dureza superficial dos concretos está na figura 50. Esta foi obtida com os resultados encontrados no ensaio de esclerometria, de todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

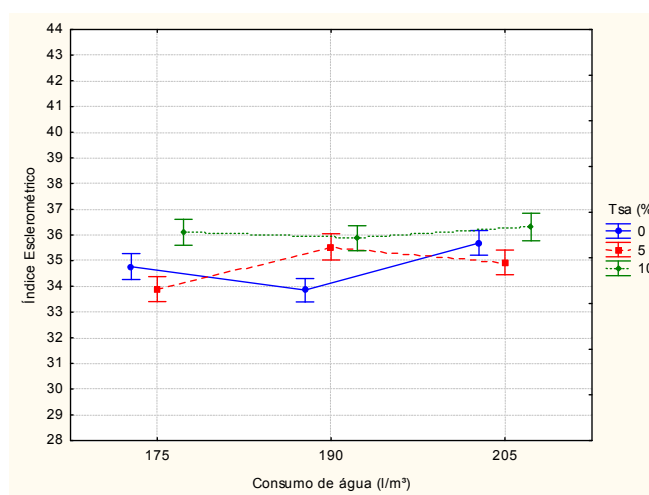


Figura 50: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na dureza superficial do concreto

Através da figura observa-se que não existe uma tendência de comportamento clara entre os resultados obtidos no ensaio. No entanto algumas considerações podem ser feitas. Para os consumos de água estudados, os concretos produzidos com 10 % de substituição de sílica ativa tendem a apresentar os maiores índices esclerométricos.

Este fato sugere que existe uma relação entre esta propriedade com os parâmetros mecânicos e com a exsudação dos concretos avaliados nesta pesquisa, um comportamento esperado. Cabe salientar que, pelo método do teste de Fisher, para os consumos de água testados nesta pesquisa, não houve uma diferença estatística significativa entre os resultados dos concretos produzidos com o teor de substituição de sílica ativa de 10 %.

### 5.3.8 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

O efeito combinado da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP frente à dureza superficial dos concretos está demonstrado na figura 51. Esta foi obtida através dos resultados do ensaio de esclerometria de todos os traços analisados, aos 28 dias, na análise de variância (ANOVA).

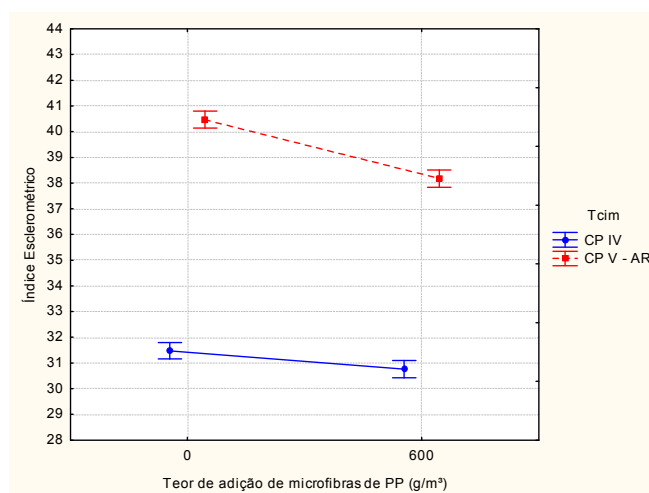


Figura 51: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na dureza superficial do concreto

Através da análise da figura, verifica-se que a influência do teor de adição de microfibras de PP na variável de resposta analisada varia conforme o tipo de cimento utilizado. Observa-se uma diminuição do índice esclerométrico para os concretos produzidos com a adição das microfibras de PP (600 g/m³), o que pode ser explicado em função da microfibras de PP ter absorvido a energia de percussão durante o ensaio. Tal comportamento corrobora com a análise verificada no item 5.3.4.

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com a adição das microfibras de PP, tanto para o cimento CP V-ARI quanto para o cimento CP IV, apresentaram diferença significativa do ponto de vista estatístico em relação aos traços sem adição deste material, reduzindo a dureza superficial dos compósitos em 6,05 % e 2,05 %, respectivamente. Acredita-se que a causa para a maior redução da dureza superficial nos compósitos com cimento CP V-ARI seja a grande diferença do módulo de deformação entre a fibra e a resistência da matriz de concreto.

## 5.4 EXSUDAÇÃO

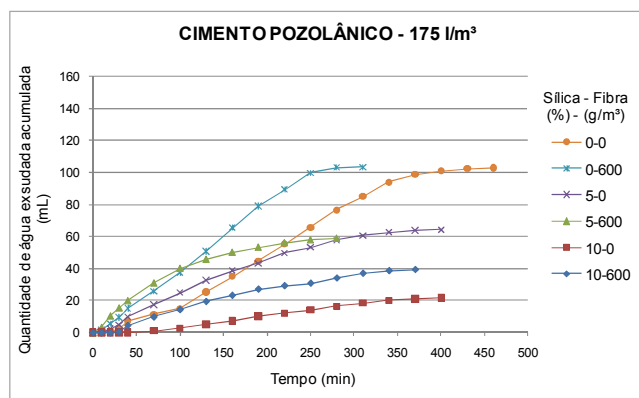
A exsudação é uma propriedade extremamente importante na avaliação do proporcionamento dos compósitos cimentícios, uma vez que exerce influência direta na durabilidade dos materiais. Quando em excesso, leva a um enfraquecimento da ligação entre a matriz de cimento e a superfície dos agregados (zona de transição), reduzindo a resistência do concreto, e, além disso, propicia a formação de vazios capilares, o que compromete a durabilidade do material.

Esta propriedade 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 conseqüência ser fraca e porosa, pode permitir o desgaste acentuado dos concretos. Os resultados do ensaio de exsudação dos concretos estudados encontram-se na tabela 24. Seguem, no apêndice E, todas as leituras realizadas para obtenção dos resultados.

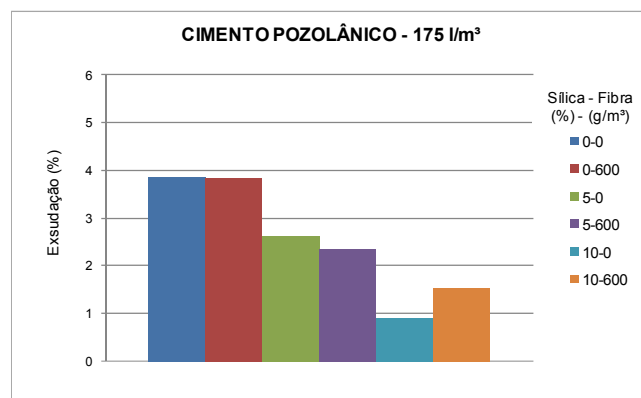
Tabela 24: resultados para o ensaio de exsudação

EXSUDAÇÃO (%)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Exsudação	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Exsudação
1A	175-0-0	3,86	1B	175-0-0	3,70
2A	175-0-600	3,84	2B	175-0-600	3,61
3A	175-5-0	2,60	3B	175-5-0	1,20
4A	175-5-600	2,34	4B	175-5-600	2,08
5A	175-10-0	0,89	5B	175-10-0	0,13
6A	175-10-600	1,53	6B	175-10-600	0,41
7A	190-0-0	4,02	7B	190-0-0	4,07
8A	190-0-600	4,89	8B	190-0-600	2,07
9A	190-5-0	2,28	9B	190-5-0	0,78
10A	190-5-600	1,44	10B	190-5-600	1,77
11A	190-10-0	0,92	11B	190-10-0	0,35
12A	190-10-600	0,21	12B	190-10-600	0,30
13A	205-0-0	3,39	13B	205-0-0	3,53
14A	205-0-600	4,74	14B	205-0-600	2,64
15A	205-5-0	1,58	15B	205-5-0	1,66
16A	205-5-600	0,38	16B	205-5-600	0,84
17A	205-10-0	0,70	17B	205-10-0	0,11
18A	205-10-600	0,48	18B	205-10-600	0,25

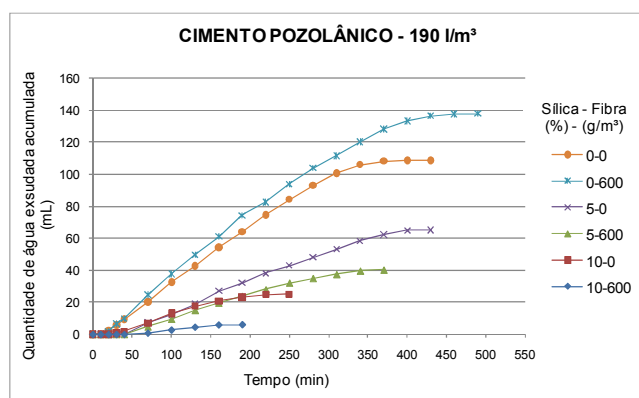
A figura 52 apresenta os resultados da exsudação para os traços de concreto produzidos com cimento pozolânico e consumos de água de 175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>. Com a finalidade de facilitar a visualização dos resultados deste ensaio, foram plotados gráficos agrupando-se os traços com mesmo consumo de água.



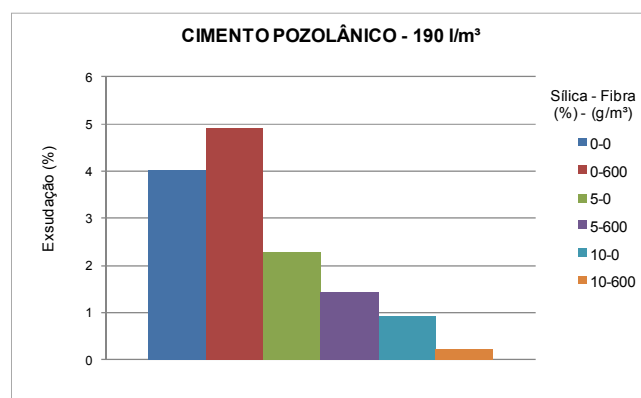
(a)



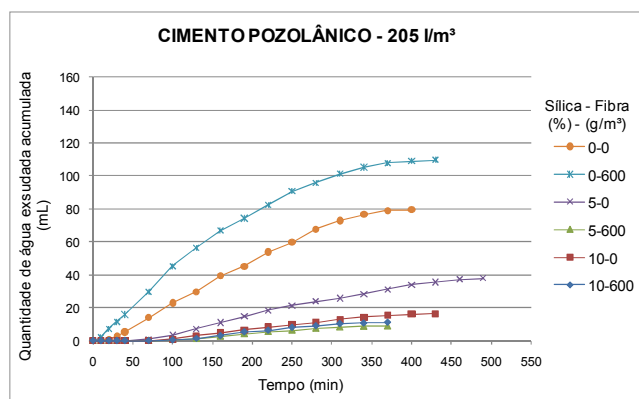
(b)



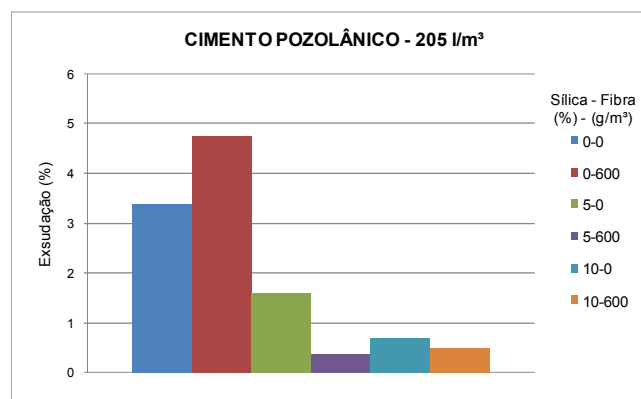
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 52: resultados de exsudação para os concretos produzidos com cimento pozolânico e consumos de água de 175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>. (a), (c) e (e) quantidade de água exsudada acumulada. (b), (d) e (f) quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto

Através das figuras 52 (a), (c) e (e) percebe-se uma tendência de comportamento para os traços de concreto produzidos com cimento pozolânico e consumos de água de 175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>. Imediatamente após o adensamento das misturas, há um período curto de dormência que é seguido por um período em que a taxa de exsudação evolui constantemente, mas logo essa taxa de exsudação decresce, terminando com o

crescimento dos produtos de hidratação ou com o início da pega dos concretos (NEVILLE, 1997).

Analisando a figura 52 (b), pode-se observar a influência da sílica ativa na exsudação dos concretos produzidos com cimento pozolânico e consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup>. O uso desta adição no proporcionamento dos concretos, nos teores de 5 % e 10 % em substituição à massa do cimento (traço 3A - cimento pozolânico, 175 l/m<sup>3</sup> e 5 % de sílica ativa - e traço 5A - cimento pozolânico, 175 l/m<sup>3</sup> e 10 % de sílica ativa), reduziu 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, aumentando a coesão interna do concreto e, por consequência, reduzindo a exsudação (NEVILLE, 1997; ACI 302.1R, 2004; CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Ainda, de acordo com a figura 52 (b), não se verificou uma tendência de comportamento para os traços analisados com a adição das microfibras de PP.

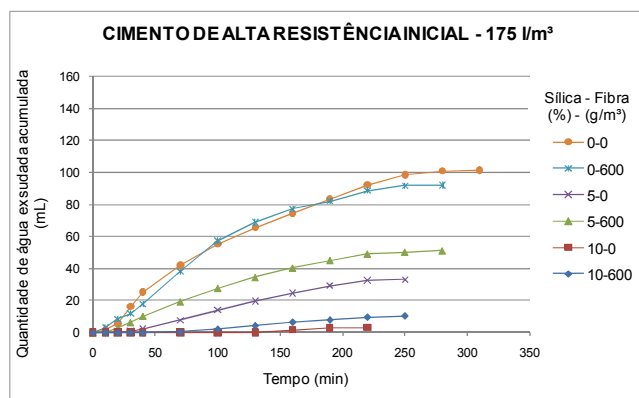
Na figura 52 (d) percebe-se, assim como para o consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> (figura 52 (b)), uma redução significativa nas quantidades de água exsudadas para os traços de concreto produzidos com consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> e com a presença de sílica ativa, comparando-se com o concreto de referência ou sem adição. Além disso, verificou-se uma tendência de redução nas quantidades de água exsudadas, mantendo-se constante a relação a/c, para os traços com consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> em relação aos traços com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup>, com exceção do traço 8A (cimento pozolânico, consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> e adição de microfibras de PP - 600 g/m<sup>3</sup>), onde a porcentagem de água exsudada foi superior ao traço 2A (cimento pozolânico, consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e adição de microfibras de PP - 600 g/m<sup>3</sup>). No entanto, cabe salientar que esta redução não foi significativa, o que foi constatado através de análise estatística apresentada, posteriormente, na tabela 25. Este fato corrobora com estudo realizado por Topçu e Elgün (2004), onde os autores verificaram que o aumento no consumo de água para os traços estudados, considerando uma mesma relação a/c, levou ao mesmo comportamento na exsudação das misturas encontrado nesta pesquisa. Com relação à adição das microfibras de PP, foi observada uma tendência de diminuição da quantidade de água exsudada das misturas avaliadas com cimento pozolânico e consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup>, na presença de 5 % e 10 % de sílica ativa.

Analisando os resultados para os concretos produzidos com consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup> (figura 52 (f)), nota-se a mesma tendência de comportamento verificada anteriormente para o uso da sílica ativa. Além disso, observa-se que a adição das fibras apresentou uma tendência de diminuição da exsudação na presença de 5 % e 10 % de sílica ativa, conforme

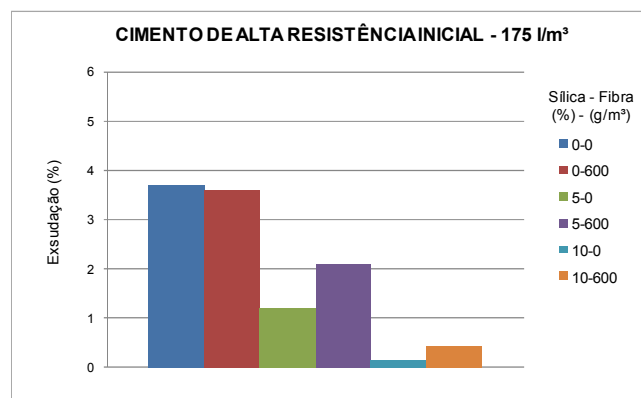


encontrado para os traços com 190 l/m<sup>3</sup> de água e cimento CP IV (figura 52 (d)). Ainda, verificou-se uma tendência de redução nas quantidades de água exsudadas, mantendo-se constante a relação a/c, para os traços com consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup> em relação aos traços com consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> e 190 l/m<sup>3</sup>. Contudo, cabe salientar que esta redução não foi significativa, o que foi constatado através de análise estatística, como já relatado.

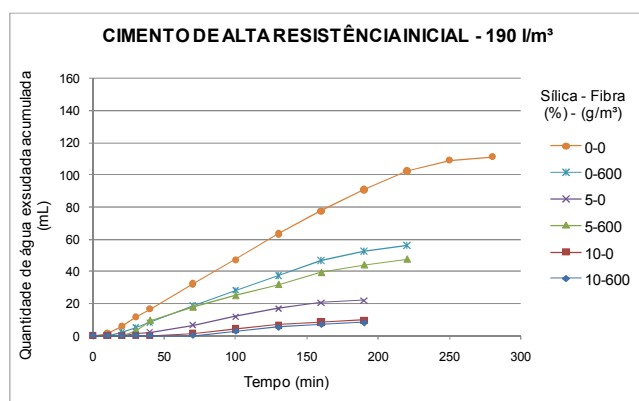
Os resultados de exsudação para os traços produzidos com cimento de alta resistência inicial e consumos de água de 175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup> estão apresentados na figura 53. Igualmente ao realizado para o cimento pozolânico, o critério para o agrupamento dos traços, em cada um dos gráficos, baseou-se na variável consumo de água.



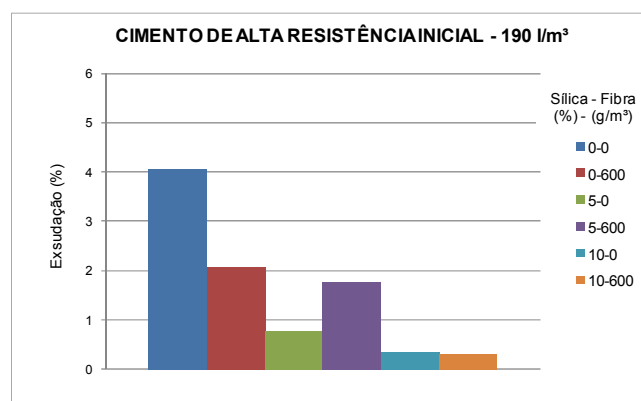
(a)



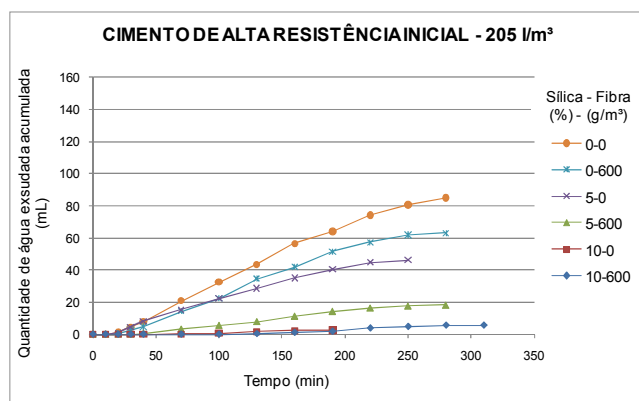
(b)



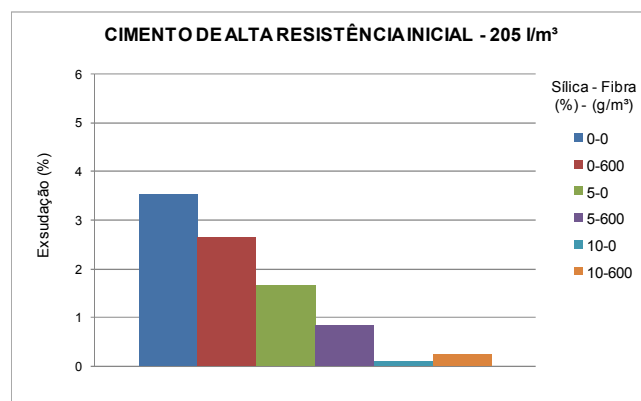
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 53: resultados de exsudação para os concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial e consumos de água de 175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>. (a), (c) e (e) quantidade de água exsudada acumulada. (b), (d) e (f) quantidade de água exsudada acumulada expressa como uma porcentagem da água de mistura do concreto

As figuras 53 (a), (c) e (e) demonstram a mesma tendência de comportamento verificada anteriormente para os traços de concreto produzidos com cimento pozolânico (figuras 52 (a), (c) e (e)).

Observando a figura 53 (b) percebe-se a influência da sílica ativa na redução da exsudação dos concretos feitos com cimento de alta resistência inicial e consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup>.

Tratando-se da presença das microfibras de PP nas misturas de concreto com cimento CP V-ARI e consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup>, não se verificou uma tendência de comportamento para os traços analisados com a adição deste material.

Através da figura 53 (d) percebe-se, assim como para o consumo de água de 175 l/m<sup>3</sup> (figura 53 (b)), uma redução significativa nas quantidades de água exsudadas para os traços com consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> na presença de 5 % e 10 % de sílica ativa. Quanto às microfibras de PP, não foi possível verificar uma influência precisa na redução da exsudação com o uso desta adição. Observa-se também, uma tendência de redução da exsudação para este consumo em relação ao anterior.

Segundo a figura 53 (f), para os concretos produzidos com consumo de água de 205 l/m<sup>3</sup>, a sílica ativa adicionada às misturas levou a uma redução importante da exsudação, conforme observado para as demais misturas avaliadas neste estudo. Além disso, para este caso, a presença da fibra nas misturas mostrou ter influência, reduzindo as quantidades de água exsudadas durante o ensaio. Este fato pode ser explicado através da elevada superfície específica das fibras, o que pode ter levado a uma redução da mobilidade da água, reduzindo a exsudação (RICHARDSON, 2006; CHODOUNSKY E VIECILI, 2007). Ressalta-se que este comportamento das fibras não foi verificado anteriormente.

Os dados experimentais encontrados na tabela 24 foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), o qual está apresentado na tabela 25. Nesta análise foram ponderados os efeitos isolados de cada uma das variáveis independentes.

Tabela 25: análise de variância (ANOVA) - exsudação

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>p</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
Tipo de cimento (1)	1	3,1121	9,8725	0,003846	S
Consumo de água (2)	2	0,7252	2,3004	0,118218	NS
Sílica (3)	2	31,2958	99,2791	0,000000	S
Fibra (4)	1	0,1051	0,3335	0,568086	NS
Erro	29	0,3152			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática 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 é possível verificar que os efeitos isolados dos fatores controláveis tipo de cimento e teor de substituição de sílica ativa foram significativos na variável de resposta. A seguir são analisados os efeitos significativos dos fatores controláveis os quais tiveram uma influência expressiva na análise de variância (ANOVA) realizada.

### 5.4.1 Efeito do Tipo de Cimento

O efeito isolado do tipo de cimento na exsudação dos traços estudados está demonstrado na figura 54. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de exsudação, para os concretos avaliados, na análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 4.3.1, a relação  $a/agl$  foi mantida constante (em 0,53), para todos os traços.

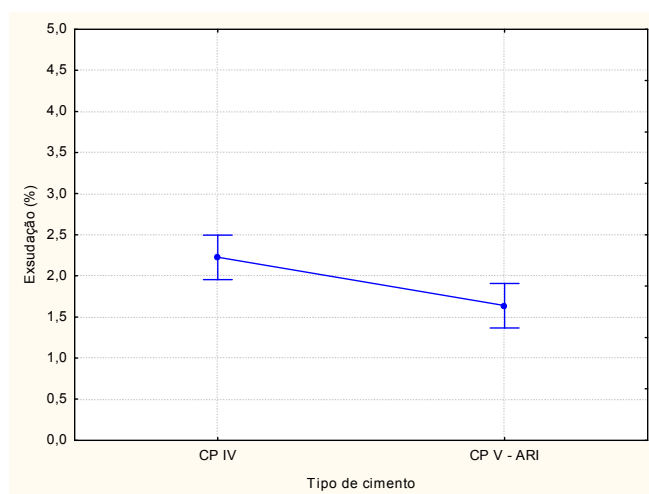


Figura 54: efeito isolado do tipo de cimento na exsudação do concreto

Através da figura, é possível verificar a influência do tipo de cimento na exsudação dos concretos estudados. Os resultados de exsudação dos traços de concreto com cimento de alta resistência inicial apresentaram um importante decréscimo, cerca de 26 % em relação aos demais traços estudados com cimento pozolânico. Como discutido no item 5.1.1, para uma mesma relação  $a/agl$ , a resistência à compressão medida para os concretos confeccionados com cimento CP IV foi inferior. Entretanto, cabe ressaltar que, caso a relação  $a/agl$  destes concretos fosse reduzida para manter-se o mesmo nível de resistência obtido com o cimento CP V, a sua exsudação seria também reduzida.

A redução da exsudação dos concretos produzidos com cimento de alta resistência inicial pode estar relacionada à composição dos cimentos empregados, uma vez que cimentos com maiores porcentagens de  $C_3A$  e de álcalis que apresentam grande perda de abatimento, tendem a reduzir tal fenômeno (MEHTA; MONTEIRO, 2006). Logo, as menores porcentagens de exsudação foram verificadas para o cimento CP V-ARI, mesmo este cimento apresentando menor área superficial específica em comparação ao cimento pozolânico, característica física não esperada (tabela 9).

Tal comportamento também foi evidenciado em pesquisa realizada por Topçu e Elgün (2004), onde os concretos produzidos com cimento contendo maior teor de  $C_3A$ , para uma

mesma quantidade de água de mistura e teor de cimento, mostraram uma redução na exsudação de 25 % em relação aos demais. Os autores atribuem tal comportamento ao elevado teor de  $C_3A$  e de álcalis no cimento. Ainda, segundo os mesmos autores, a redução da exsudação também está relacionada 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.

Os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência de comportamento da variável controlável tipo de cimento frente à exsudação do concreto, uma vez que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP.

#### 5.4.2 Efeito do Teor de Substituição de Sílica Ativa

O efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na exsudação dos traços estudados está demonstrado na figura 55. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de exsudação, para os concretos avaliados, na análise de variância (ANOVA).

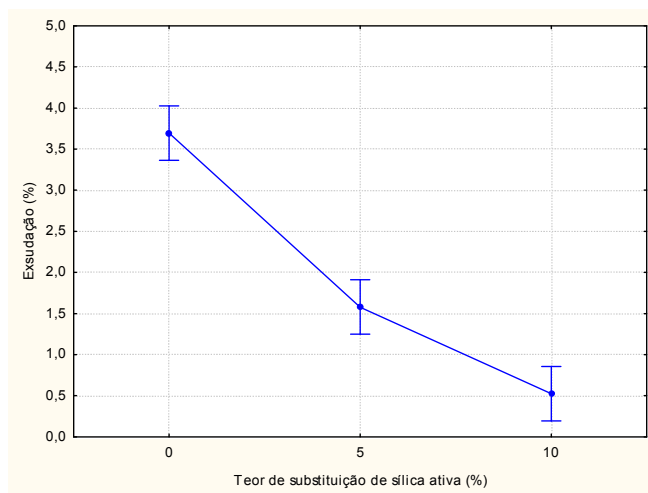


Figura 55: efeito isolado do teor de substituição de sílica ativa na exsudação do concreto

Segundo o gráfico, nota-se um decréscimo acentuado na exsudação dos traços de concreto produzidos com teores de substituição de sílica ativa de 5 % e 10 %. Tal redução pode ser explicada em função da grande finura da sílica ativa, fato que aumenta a coesão das misturas e minimiza a exsudação, o que por sua vez reduz a porosidade na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, trazendo ganhos de resistência e de durabilidade aos compósitos (NEVILLE, 1997).

A partir de uma análise estatística através do teste de Fisher, verificou-se que os resultados dos traços com teor de substituição de 5 % e 10 % de sílica ativa apresentaram diferença significativa para os traços sem substituição (0 %), minimizando a exsudação dos concretos em 57,3 % e 85,8 %, respectivamente. Além disso, os resultados para os concretos com a presença de sílica (5 % e 10 %) mostraram-se significativamente diferentes entre si.

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 exsudação do concreto, e que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o tipo de cimento e a adição de microfibras de polipropileno.

## 5.5 RESISTÊNCIA À ABRASÃO

A resistência à abrasão é considerada um parâmetro extremamente importante na durabilidade de elementos como pisos de concreto, uma vez que está relacionada com a qualidade da camada superficial dos compósitos, e conseqüentemente com a capacidade do material de resistir a perda de massa.

Os resultados de resistência à abrasão média para os concretos estudados encontram-se na tabela 26. Seguem, no apêndice F, todos os resultados obtidos para este ensaio.

Tabela 26: resultados médios para o ensaio de resistência à abrasão

RESISTÊNCIA À ABRASÃO - ÍNDICE DE DESGASTE (mm) - VALORES MÉDIOS							
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)				CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)			
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Médias	CV (%)
1A	175-0-0	7,11	13,78	1B	175-0-0	5,86	5,62
2A	175-0-600	5,62	17,23	2B	175-0-600	5,51	4,01
3A	175-5-0	6,49	7,56	3B	175-5-0	5,42	10,33
4A	175-5-600	6,27	13,77	4B	175-5-600	4,60	8,80
5A	175-10-0	6,31	5,06	5B	175-10-0	5,66	5,37
6A	175-10-600	6,29	8,32	6B	175-10-600	4,59	5,85
7A	190-0-0	4,30	15,30	7B	190-0-0	4,62	18,88
8A	190-0-600	6,53	11,34	8B	190-0-600	5,17	5,00
9A	190-5-0	4,92	10,57	9B	190-5-0	5,68	5,21
10A	190-5-600	5,52	16,28	10B	190-5-600	4,96	13,17
11A	190-10-0	5,09	21,30	11B	190-10-0	5,59	6,43
12A	190-10-600	6,11	3,56	12B	190-10-600	4,95	2,96
13A	205-0-0	6,16	10,85	13B	205-0-0	6,14	7,38
14A	205-0-600	6,27	8,72	14B	205-0-600	4,60	8,79
15A	205-5-0	6,15	6,75	15B	205-5-0	4,82	13,50
16A	205-5-600	6,35	5,56	16B	205-5-600	5,04	10,11
17A	205-10-0	6,18	4,99	17B	205-10-0	5,44	2,94
18A	205-10-600	5,78	25,28	18B	205-10-600	5,75	2,85

Os resultados encontrados para a resistência à abrasão foram avaliados estatisticamente. Tal análise buscou avaliar a influência de cada fator controlável e de suas interações na variável de resposta (resistência à abrasão) estudada.

Os dados experimentais encontrados para este ensaio foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), o qual está apresentado na tabela 27. Nesta análise foram ponderados os efeitos isolados de cada uma das variáveis independentes, bem como as suas interações.

Tabela 27: análise de variância (ANOVA) - resistência à abrasão

	<b>GDL</b>	<b>MQ</b>	<b>F (calc)</b>	<b>p</b>	<b>SIGNIFICÂNCIA</b>
Tipo de cimento (1)	1	11,938	133,37	0,000000	S
Consumo de água (2)	2	3,890	43,46	0,000000	S
Sílica (3)	2	0,179	2,00	0,144500	NS
Fibra (4)	1	0,012	0,13	0,716571	NS
Tcim x Cag	2	2,803	31,31	0,000000	S
Tcim x Tsa	2	0,215	2,40	0,099429	NS
Cag x Tsa	4	0,638	7,13	0,000087	S
Tcim x Tfib	1	1,853	20,70	0,000026	S
Cag x Tfib	2	1,564	17,47	0,000001	S
Tsa x Tfib	2	0,066	0,74	0,480065	NS
Tcim x Cag x Tsa	4	0,649	7,25	0,000074	S
Tcim x Cag x Tfib	2	0,240	2,68	0,076791	NS
Tcim x Tsa x Tfib	2	0,053	0,60	0,554306	NS
Cag x Tsa x Tfib	4	1,583	17,68	0,000000	S
1 x 2 x 3 x 4	4	0,948	10,59	0,000001	S
Erro	62	0,090			

GDL: graus de liberdade (n-1) MQ: média quadrática 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 os efeitos isolados do tipo de cimento e do consumo de água foram significativos na variável de resposta; já os efeitos isolados do teor de substituição de sílica ativa e do teor de adição de microfibras de PP não causaram influência significativa na resistência à abrasão dos traços estudados. O efeito significativo do tipo de cimento era esperado, uma vez que este fator também causou influência direta nas demais propriedades analisadas (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, dureza superficial e exsudação). O efeito significativo do consumo de água mostrou comportamento semelhante ao da resistência à tração na flexão, parâmetro este de extrema relevância no controle da produção dos pisos de concreto. Quanto ao efeito do teor de substituição de sílica ativa, esperava-se que fosse significativo, pois este fator proporcionou aumentos tanto das resistências mecânicas, quanto da dureza superficial, além de ter minimizado drasticamente a exsudação, o que deveria se refletir numa redução do desgaste por abrasão. Com relação ao efeito do teor de adição das microfibras de PP, não era esperado que influenciasse na resistência ao desgaste, pois não altera de forma significativa as resistências mecânicas e não influencia a exsudação de forma sistemática.

Com relação aos efeitos de 2ª ordem, as interações mostraram-se significativas, com exceção das combinações entre o tipo de cimento e o teor de substituição de sílica ativa (Tcim x Tsa) e entre o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP (Tsa x Tfib). Para os efeitos de 3ª e 4ª ordem, apenas as interações entre o tipo de



cimento, o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP ( $T_{cim} \times C_{ag} \times T_{fib}$ ) e entre o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP ( $T_{cim} \times T_{sa} \times T_{fib}$ ) não foram significativos na variável de resposta.

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.

### 5.5.1 Efeito do Tipo de Cimento

A figura 56 apresenta o efeito isolado do tipo de cimento sobre a resistência à abrasão dos concretos estudados. Esta figura foi obtida a partir dos resultados de resistência à abrasão, para todos os traços estudados, na idade de 28 dias, na análise de variância (ANOVA). Como descrito no item 4.3.1, a relação  $a/agl$  foi mantida constante (em 0,53) para todos o traços.

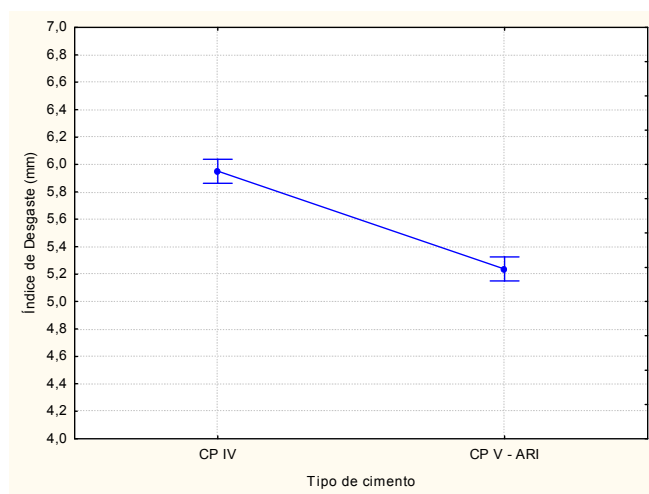


Figura 56: efeito isolado do tipo de cimento na resistência à abrasão do concreto

Através da análise da figura, verifica-se a influência da variável tipo de cimento na resistência à abrasão dos concretos estudados, conforme esperado. Os resultados de desgaste encontrados para os concretos com cimento CP V-ARI foram significativamente menores quando comparados aos concretos com cimento CP IV, para uma mesma relação  $a/agl$ , conforme análise feita pelo método ANOVA.

É importante enfatizar que as demais propriedades estudadas nesta pesquisa também mostraram melhor desempenho para o cimento de alta resistência inicial, visto que a relação  $a/agl$  foi mantida constante para todos os traços (0,53), o que levou a concretos com diferentes níveis de resistência, conforme o tipo de cimento utilizado (ver item 4.3). Tal

resultado verificado 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 para este ensaio já era esperado, uma vez que a hidratação do cimento pozolânico ocorre de forma mais lenta, afetando diretamente a porosidade da matriz cimentícia nas idades mais jovens 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).

Os resultados obtidos nestas análises mostram apenas uma tendência de comportamento da variável controlável tipo de cimento frente à resistência à abrasão do concreto, uma vez que outros fatores também estão envolvidos, como o consumo de água, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de PP. Cabe ressaltar ainda que resistências mais elevadas (e portanto menor abrasão) poderiam ser também facilmente atingidas com cimento CP IV, através da redução da relação  $a/agl$ .

### 5.5.2 Efeito do Consumo de Água

O efeito isolado do consumo de água na resistência à abrasão dos traços estudados está apresentado na figura 57. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de resistência à abrasão para os concretos avaliados na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

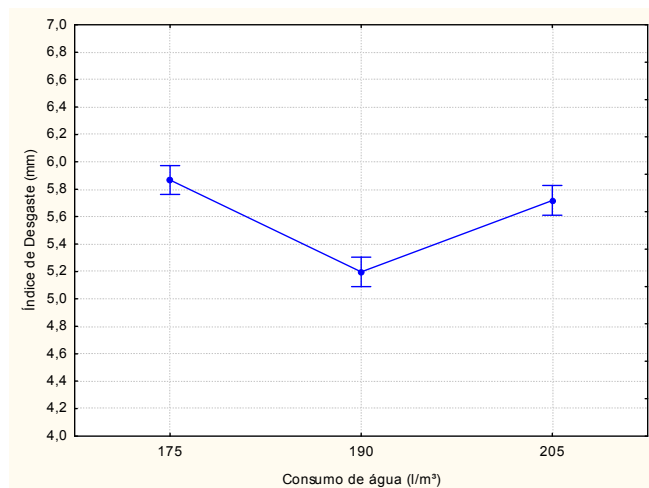


Figura 57: efeito isolado do consumo de água na resistência à abrasão do concreto

Verificando a figura, observa-se um maior desgaste à abrasão para os concretos com o menor consumo e com maior consumo de água (175 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>). Este comportamento não era esperado para o consumo de 175 l/m<sup>3</sup> e pode ter ocorrido em função da menor coesão das misturas, devido ao menor volume de pasta e conseqüentemente ao maior teor de agregados presentes. Fato que pode ter acarretado em maiores dificuldades durante os processos de moldagem e adensamento destes concretos.

Contudo, cabe lembrar que o efeito isolado do consumo de água não teve influência estatística significativa nos resultados de resistência à compressão uniaxial dos concretos, mas influenciou os resultados de resistência à tração na flexão, como mostra a figura 38, corroborando com os resultados encontrados para esta propriedade analisada.

Entretanto, na medida em que o consumo de água passou para o teor mais alto (205 l/m<sup>3</sup>), percebe-se um decréscimo na resistência à abrasão dos concretos. Comportamento 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 conseqüência a resistência ao desgaste superficial (MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Analisando estatisticamente os resultados obtidos através do método do teste de Fisher, observa-se uma diferença significativa para os resultados dos traços com consumo de água na mistura de 190 l/m<sup>3</sup> em relação aos demais. Desta forma, verificou-se que o consumo de água intermediário (190 l/m<sup>3</sup>) parece ser o mais adequado para os concretos e materiais empregados nesta pesquisa, conforme já relatado.

Salienta-se que os resultados destas análises demonstram apenas uma tendência de comportamento para o fator de controle consumo de água 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 teor de adição de microfibras de polipropileno.

### 5.5.3 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Consumo de Água

O efeito combinado da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água frente à resistência à abrasão dos concretos está demonstrado na figura 58. Esta figura foi obtida por meio dos resultados do ensaio de resistência à abrasão para os concretos avaliados na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

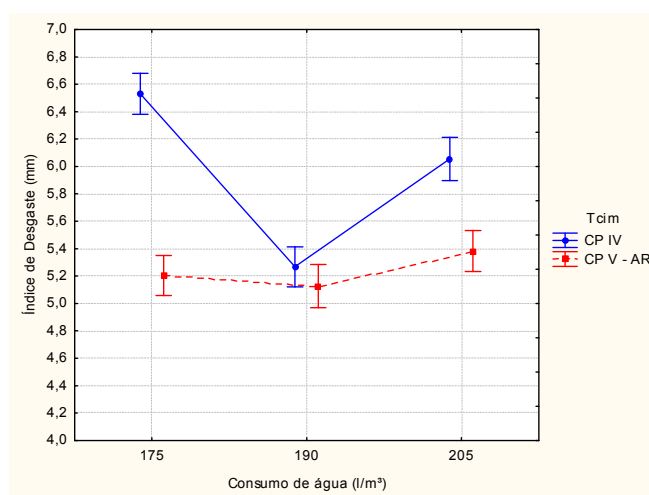


Figura 58: efeito da interação entre o tipo de cimento e o consumo de água na resistência à abrasão do concreto

Através da análise da figura é possível observar que o cimento CP IV foi mais influenciado pela variação do consumo de água do que o cimento CP V-ARI, entretanto, não se encontrou uma justificativa técnica para este fato. Além disso, verifica-se que os concretos moldados com consumo de água de 175 l/m³ e cimento pozolânico mostraram um comportamento inesperado, o qual pode estar relacionado a problemas de moldagem, como relatado anteriormente. Cabe salientar que o maior consumo de água, para ambos os tipos de cimento analisados, também ocasionou em redução da resistência ao desgaste, conforme descrito no item 5.5.2.

#### 5.5.4 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Substituição de Sílica Ativa

A influência da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa sobre a resistência ao desgaste dos concretos está demonstrada na figura 59. A figura foi obtida com os resultados encontrados no ensaio de resistência à abrasão de todos os traços estudados na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

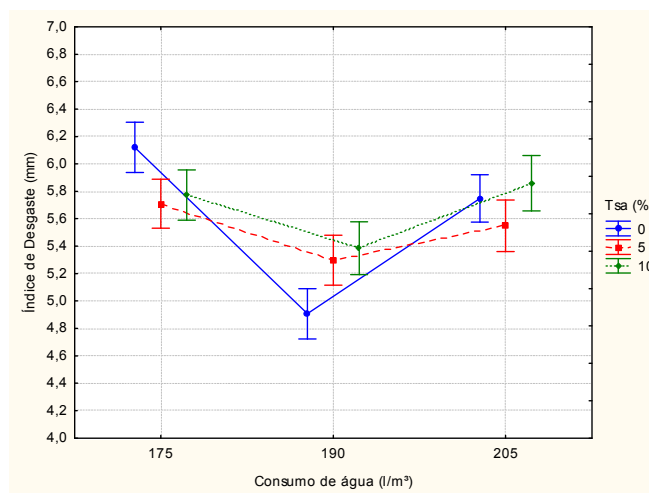


Figura 59: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de substituição de sílica ativa na resistência à abrasão do concreto

Através da figura verifica-se que não existe uma tendência estatisticamente clara de comportamento entre os resultados obtidos no ensaio. Entretanto, algumas considerações podem ser feitas. Evidencia-se que todos os concretos apresentaram uma redução do desgaste por abrasão para o consumo de 190 l/m³ em relação aos demais (175 l/m³ e 205 l/m³), sendo que este efeito foi mais forte para os concretos sem substituição de sílica ativa por parte do cimento. Através de uma análise estatística pelo método do teste de Fisher, verificou-se que existe uma diferença significativa entre estes e os demais concretos. No entanto, não se encontrou uma justificativa técnica para os resultados obtidos neste ensaio.

#### 5.5.5 Efeito da Interação entre o Tipo de Cimento e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

O efeito combinado da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP frente à resistência à abrasão dos concretos está demonstrado na figura 60. Esta foi obtida através dos resultados de todos os traços analisados na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

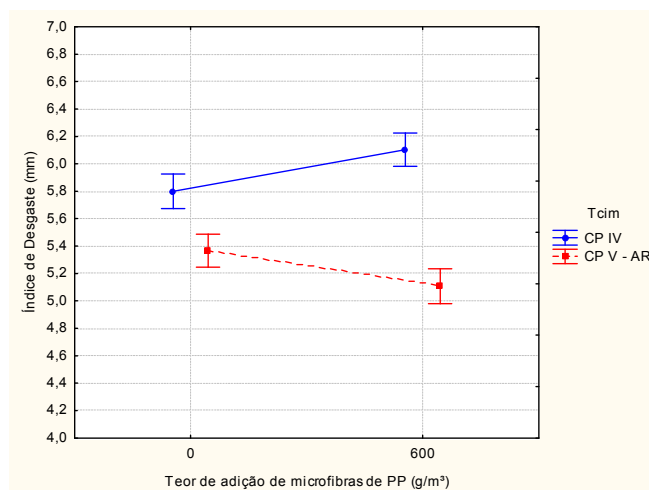


Figura 60: efeito da interação entre o tipo de cimento e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à abrasão do concreto

De acordo com a figura, é possível observar que as fibras atuam de forma diferenciada de acordo com o tipo de cimento. Para os traços produzidos com cimento CP IV a adição de microfibras de PP em 600 g/m<sup>3</sup> reduz a resistência à abrasão; através do teste de Fisher verificou-se que esta redução é estatisticamente significativa. Além disso, analisando-se os resultados de exsudação (figura 52), percebe-se que os concretos produzidos com cimento pozolânico e a presença das fibras mostram ter uma tendência de aumento na quantidade de água exsudada, fato que pode justificar os maiores índices de desgaste encontrados.

Contudo, os resultados de desgaste para os concretos produzidos com cimento CP V-ARI e 600 g/m<sup>3</sup> de microfibras de PP adicionadas às misturas mostraram os menores índices de desgaste. O que pode estar relacionado a uma possível redução da exsudação para estes traços com a adição das fibras (figura 53).

### 5.5.6 Efeito da Interação entre o Consumo de Água e o Teor de Adição de Microfibras de Polipropileno

O efeito combinado da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP frente à resistência à abrasão dos concretos está demonstrado na figura 61. Esta foi obtida através dos resultados de resistência à abrasão de todos os traços analisados na idade de 28 dias, através da análise de variância (ANOVA).

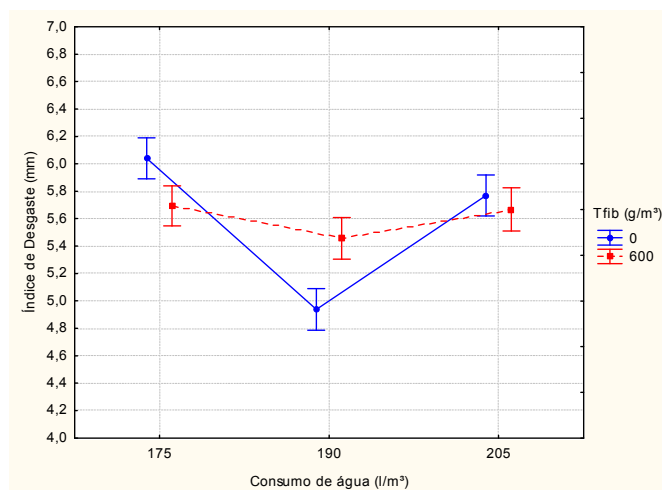


Figura 61: efeito da interação entre o consumo de água e o teor de adição de microfibras de PP na resistência à abrasão do concreto

Analisando a figura não se observa uma tendência linear de comportamento para os resultados encontrados. Evidencia-se, conforme já relatado, uma redução não esperada da resistência à abrasão para os compósitos com 175 l/m³ de água. Conjuntamente, esta tendência de comportamento verificada foi semelhante à obtida para os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos estudados (5.2.7). Este fato evidencia a relação entre a resistência à abrasão dos concretos proporcionados para pisos e a resistência à tração na flexão, propriedade relevante no controle da produção dos pisos de concreto.

## 5.6 CORRELAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO COM AS DEMAIS PROPRIEDADES ANALISADAS

A tabela 28 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 28: 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
Tcim	CP IV	referência	referência	referência	referência	referência
	CP V-ARI	↑ 49	↑ 25	↑ 26	↓ 26	↓ 12
Cag (l/m³)	175	NS	referência	referência	NS	referência
	190		↑ 9	≈ referência		↓ 12
	205		≈ referência	↑ 1		↓ 3
Tsa (%)	0	referência	referência	referência	referência	NS
	5	↑ 8	↑ 5	↑ 1	↓ 57	
	10	↑ 19	↑ 9	↑ 4	↓ 86	
Tfib (g/m³)	0	NS	NS	referência	NS	NS
	600			↓ 4		

NS: efeito não significativo

Analisando a tabela observa-se que, para uma mesma relação a/agl, 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 foi reduzido em média 12 % para este tipo de cimento, em comparação ao cimento pozolânico, enquanto a resistência à compressão foi majorada em 49 %.

Com relação ao consumo de água (Cag), verifica-se tendências de comportamento similares para a resistência à abrasão e a resistência à tração na flexão dos concretos, sendo que o consumo intermediário apresentou os melhores resultados para ambas as propriedades mencionadas, Fato já abordado e discutido nas análises estatísticas (item 5.2.2 e item 5.5.2). Acredita-se que as baixas resistências à tração na flexão e à abrasão verificadas para o menor consumo de água (175 l/m³) estejam relacionadas ao baixo consumo de cimento empregado, uma vez que a falta de cimento (finos) pode ter propiciado misturas menos coesas, dificultando os processos de moldagem e adensamento dos concretos, o que pode justificar a redução das resistências tanto de tração na flexão quanto de abrasão dos concretos. Ainda, conforme recomendações do ACI 302.1R (ACI, 2004) quanto aos consumos de cimento usados em pisos de concreto (tabela 2), para agregados graúdos com dimensão máxima característica de 12,5 mm o consumo de cimento deve estar entre 350 kg/m³ a 405 kg/m³. Como nesta pesquisa se utilizou agregado com dimensão máxima característica na faixa de 12,5 mm a 19 mm, o consumo de cimento adotado para o consumo de água de 175 l/m³ ficou abaixo do especificado, estando na ordem de 330 kg/m³ para ambos os cimentos (CP IV e CP V-ARI).



O fator teor de substituição de sílica ativa (Tsa) teve influência significativa nas propriedades mecânicas, na dureza superficial, e, principalmente, na exsudação dos concretos. Contudo, observa-se que não houve influência da sílica ativa na resistência à abrasão, fato que não era esperado e que pode estar relacionado à existência de variabilidades no ensaio de resistência à abrasão e também ao processo de acabamento superficial utilizado para a preparação das amostras submetidas a este ensaio (como descrito no item 4.4.4). Estes resultados sugerem ainda que a execução de um acabamento superficial adequado pode minimizar problemas de abrasão decorrentes da exsudação.

O teor de adição de microfibras de PP (Tfib) não mostrou influência significativa nas propriedades mecânicas, na exsudação e na abrasão, fato já esperado, uma vez que este tipo de fibra empregado destina-se, principalmente, para melhorar a fissuração por retração dos compósitos cimentícios. Importante salientar que alguns estudos encontrados na bibliografia mencionam a influência das microfibras de PP na exsudação, o que não foi observado nesta pesquisa. No entanto, a dureza superficial dos concretos foi reduzida com o emprego das microfibras, devido principalmente à absorção da energia de percussão por parte deste tipo de fibra, conforme abordado anteriormente (item 5.3.4 e item 5.3.8).

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 e exsudação).

No caso da resistência à compressão uniaxial, como apresentado no item 5.1, apenas o tipo de cimento e o teor de sílica ativa tiveram efeito significativo sobre os resultados obtidos. A tabela 29 apresenta os resultados médios de resistência à compressão em função destes dois fatores, e a sua relação com os índices de desgaste medidos. A figura 62 resume os resultados em forma gráfica.

Tabela 29: 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	20,8	30,8	6,0	5,3
5	22,8	32,7	6,0	5,1
10	23,9	37,2	6,0	5,3
<b>Média</b>	22,5	33,6	6,0	5,2

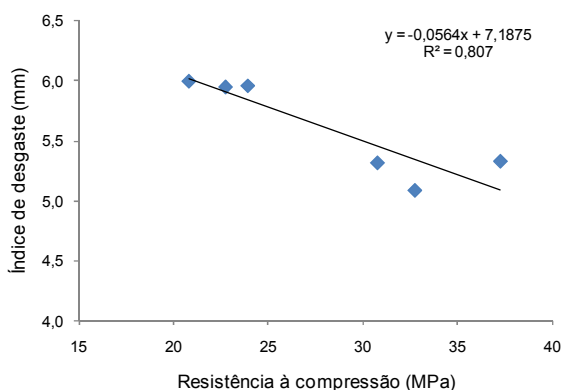


Figura 62: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à compressão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de substituição de sílica ativa

Através da análise da figura verifica-se que existe uma tendência de comportamento entre a resistência à compressão e o desgaste por abrasão dos concretos, considerando os fatores controláveis  $T_{cim}$  e  $T_{sa}$ . 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.

Para a resistência à tração na flexão, conforme apresentado no item 5.2, tanto o tipo de cimento, quanto o consumo de água e o teor de sílica ativa mostraram efeito significativo sobre os resultados obtidos. A tabela 30 apresenta os resultados médios de resistência à tração na flexão em função do tipo de cimento e do consumo de água, bem como a sua relação com os índices de desgaste medidos. A figura 63 resume os resultados de forma gráfica.

Tabela 30: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do consumo de água

Cag (l/m <sup>3</sup> )	Resistência à Tração na Flexão (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
175	3,1	4,0	6,3	5,3
190	3,4	4,3	5,4	5,2
205	3,2	3,9	6,1	5,3
<b>Média</b>	3,2	4,1	6,0	5,2

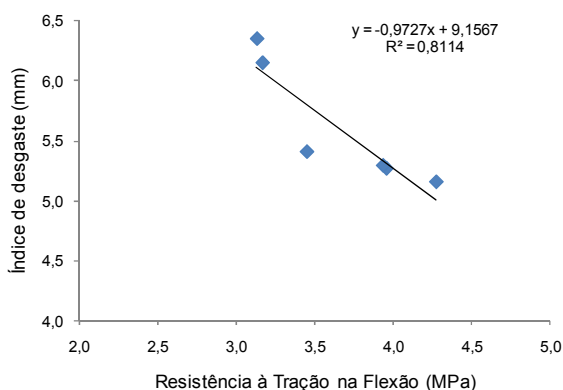


Figura 63: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e do consumo de água

Através da análise da figura pode-se verificar que existe uma tendência de comportamento entre a resistência à tração na flexão e o desgaste por abrasão dos concretos, considerando os fatores controláveis  $T_{cim}$  e  $C_{ag}$ . Destaca-se, além disso, que o consumo de água intermediário ( $190 \text{ l/m}^3$ ), para ambos os tipos de cimento (CP IV; CP V-ARI), mostrou o melhor desempenho nas propriedades analisadas (resistência à tração na flexão e resistência à abrasão), como já relatado. 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 e verificado na figura 62.

A tabela 31 mostra os resultados médios de resistência à tração na flexão em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa, e sua relação com os índices de desgaste. Enquanto que a figura 64 demonstra estes resultados graficamente.

Tabela 31: relação dos resultados médios de resistência à tração na flexão com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

Tsa (%)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0	3,3	3,7	6,0	5,3
5	3,3	4,0	6,0	5,1
10	3,2	4,4	6,0	5,3
<b>Média</b>	3,2	4,1	6,0	5,2

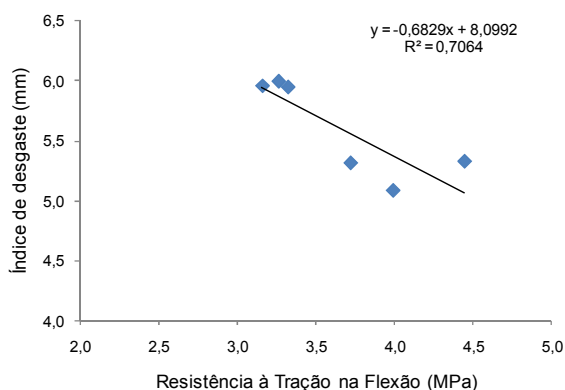


Figura 64: correlação entre a resistência à abrasão e a resistência à tração na flexão do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

Como se pode verificar na figura, existe uma correlação entre o desgaste por abrasão e a resistência à tração na flexão dos concretos, considerando o  $T_{cim}$  e o  $T_{sa}$ . No entanto, tal correlação foi mais baixa comparando-se à realizada na figura 63 para as mesmas variáveis de resposta, a qual foi obtida a partir dos fatores  $T_{cim}$  e  $C_{ag}$ .

Quanto à dureza superficial por esclerometria, como apresentado no item 5.3, todos os fatores controláveis (tipo de cimento, consumo de água, teor de sílica ativa e teor de microfibras de PP) tiveram efeito significativo sobre os resultados obtidos, entretanto, o consumo de água mostrou pouca influência em comparação aos demais, logo não foi abordado nestas análises. A tabela 32 apresenta os resultados médios de dureza superficial em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa, e a sua relação com os índices de desgaste obtidos. A figura 65 resume os resultados graficamente.

Tabela 32: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

Tsa (%)	Índice Esclerométrico		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0	30,5	38,8	6,0	5,3
5	31,2	38,9	6,0	5,1
10	31,6	40,5	6,0	5,3
<b>Média</b>	31,1	39,4	6,0	5,2

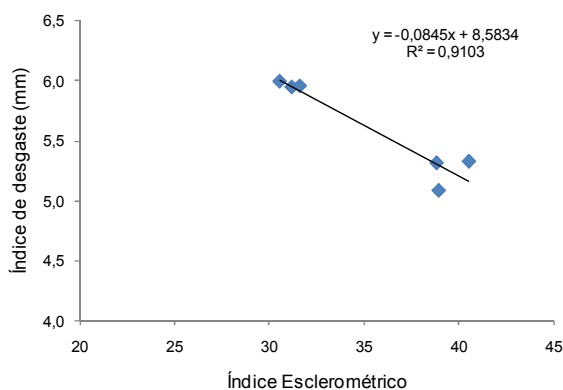


Figura 65: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de sílica ativa

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  $T_{sa}$ . Como se pode observar, o índice de desgaste superficial por abrasão tende a diminuir com o aumento da dureza superficial do concreto, como esperado.

A tabela 33 mostra os resultados médios de dureza superficial em função do tipo de cimento e do teor de microfibras de PP, e sua relação com os índices de desgaste medidos. Enquanto que a figura 66 demonstra estes resultados de forma gráfica.

Tabela 33: relação dos resultados médios de dureza superficial com os índices de desgaste medidos em função do tipo de cimento e do teor de microfibras de PP

Tfib (g/m <sup>3</sup> )	Índice Esclerométrico		Índice de Desgaste (mm)	
	CP IV	CP V-ARI	CP IV	CP V-ARI
0	31,4	40,5	5,9	5,5
600	30,8	38,3	6,1	5,0
<b>Média</b>	31,1	39,4	6,0	5,2

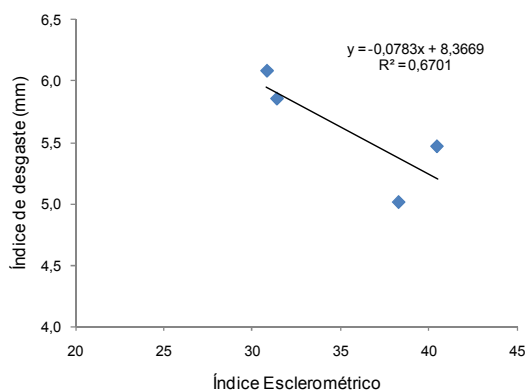


Figura 66: correlação entre a resistência à abrasão e a dureza superficial do concreto em função do tipo de cimento e do teor de microfibras de PP

Analisando a figura não se observa uma tendência clara de comportamento para os resultados encontrados, considerando os fatores  $T_{cim}$  e  $T_{fib}$ . No entanto, verifica-se novamente que o índice de desgaste superficial por abrasão tende a diminuir com o aumento da dureza superficial do concreto, como esperado e mencionado na análise da figura 65.

Para a análise da exsudação, considerando os fatores que foram estatisticamente significativos (tipo de cimento e teor de sílica ativa), não se observou uma tendência de comportamento entre os resultados obtidos com o os índices de desgaste medidos. Logo, não foi possível a obtenção de uma curva de comportamento com um bom coeficiente de correlação. Este fato pode ser explicado em função do efeito proporcionado pelo acabamento superficial dos concretos, o qual pode ter eliminado a camada fraca e porosa decorrente da exsudação, melhorando a qualidade da superfície dos compósitos cimentícios e por conseqüência a resistência à abrasão. Além disso, este procedimento de execução nivelou os diferentes concretos estudados quanto ao efeito da exsudação na análise do desgaste superficial por abrasão.

A figura 67 apresenta o comportamento da resistência à abrasão em função das demais propriedades analisadas. Estas figuras foram obtidas através de todos os resultados de cada ensaio relacionados com os índices de desgaste medidos, considerando o tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI), o consumo de água (175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>), o teor de substituição de sílica ativa (0 %, 5 % e 10 %) e o teor de adição de microfibras de PP (0 g/m<sup>3</sup> e 600 g/m<sup>3</sup>).

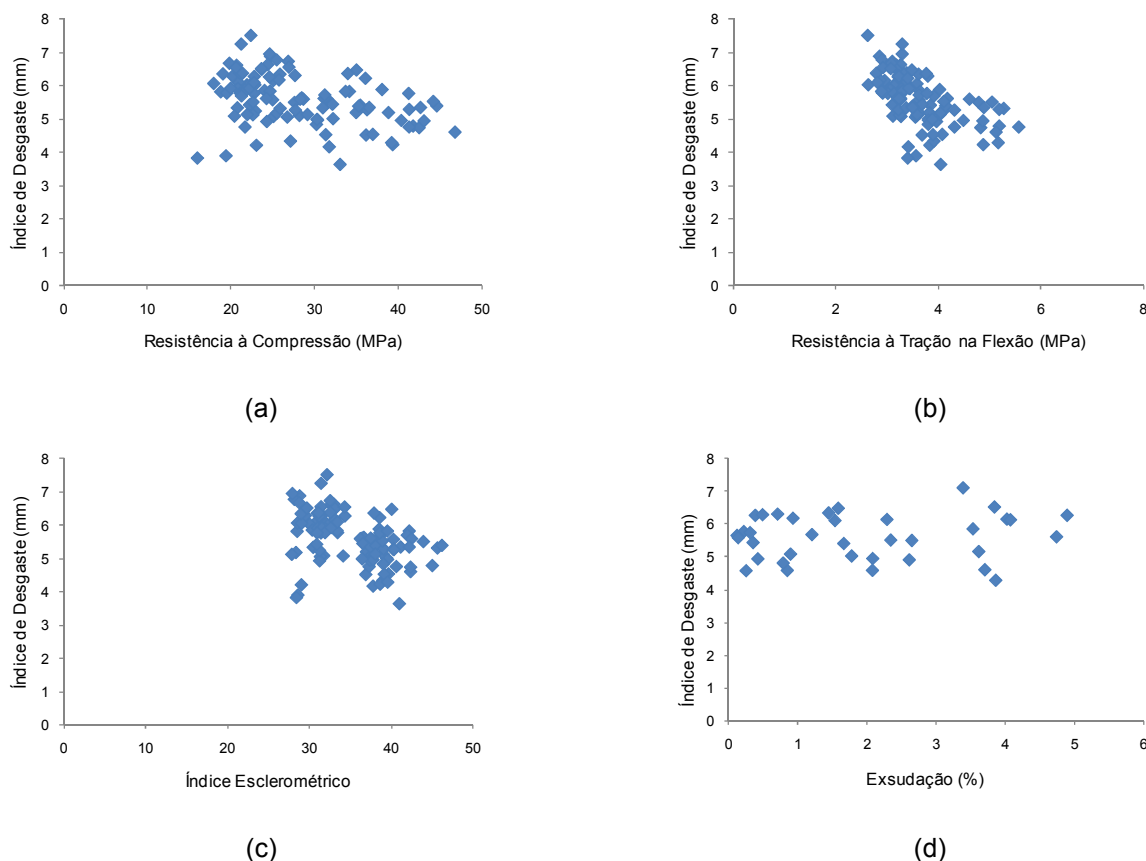


Figura 67: comportamento da resistência à abrasão dos concretos em função das demais propriedades analisadas

Através da figura observa-se que para um dado índice de desgaste há uma grande variação de valores para as demais propriedades, possivelmente em virtude das influências que cada variável independente gera na propriedade avaliada, algumas vezes de forma inversa. Por exemplo, enquanto o aumento do consumo de água, com conseqüente aumento do consumo de cimento para manter constante a relação  $a/agl$ , gera maiores retrações químicas e tendência à redução das propriedades mecânicas da matriz de concreto, também ocorre um aumento de coesão com redução da tendência à exsudação, o que traz uma melhoria da camada superficial, com redução do desgaste por abrasão. No entanto, pode-se verificar que existe uma tendência de comportamento entre a resistência à abrasão com a resistência à tração na flexão (figura 67 (b)) e com a dureza superficial (figura 67 (c)): na medida em que estas diminuem, ocorre uma redução na resistência à abrasão dos concretos (aumento do índice de desgaste). Ainda, cabe salientar, de acordo com a figura 67, a influência do acabamento superficial no efeito da exsudação, o qual ocasionou em um nivelamento dos diferentes concretos quanto à análise do desgaste por abrasão, como já mencionado anteriormente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou estudar e avaliar a influência de alguns parâmetros que constituem o traço de um concreto, os quais são considerados extremamente relevantes no processo de dosagem do compósito cimentício. Foram selecionados para a pesquisa o tipo de cimento (CP IV e CP V-ARI), o consumo de água (175 l/m<sup>3</sup>, 190 l/m<sup>3</sup> e 205 l/m<sup>3</sup>), o teor de substituição de sílica ativa (0 %, 5 % e 10 %) e o teor de adição de microfibras de polipropileno (0 g/m<sup>3</sup> e 600 g/m<sup>3</sup>). Para tal avaliação realizaram-se ensaios de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração na flexão, 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.

### 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 de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, dureza superficial por esclerometria, exsudação e resistência à abrasão estão apresentadas como segue:

- o tipo de cimento empregado na produção dos concretos exerceu influência direta na resistência à compressão uniaxial e na resistência à tração na flexão dos compósitos cimentícios estudados, sendo, os resultados, significativamente maiores para o cimento CP V-ARI (49 % e 25 %, em média, respectivamente), para uma mesma relação a/agl, na idade especificado para o ensaio;



- o consumo de água variável, mantendo-se constante a relação  $a/agl$ , não se mostrou significativo na resistência à compressão uniaxial; no entanto, na resistência à tração na flexão dos concretos avaliados a variação deste fator causou influência, sendo o maior resultado obtido para o consumo de água intermediário ( $190 \text{ l/m}^3$ );
- o teor de substituição de sílica ativa exerceu influência direta na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão, majorando tais parâmetros, conforme esperado;
- devido às características próprias da microfibras de polipropileno empregada, a incorporação da mesma nos concretos não se mostrou significativa na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão do material;
- o tipo de cimento utilizado na produção dos concretos exerceu influência direta na dureza superficial dos compósitos cimentícios estudados, sendo significativamente maior (26 % em média) para o cimento CP V-ARI, para uma mesma relação  $a/agl$ ;
- o consumo de água variável, mantendo-se constante a relação  $a/agl$ , se mostrou significativo na dureza superficial. No entanto, tal influência é pouco expressiva se comparada com os resultados obtidos na análise de variância para o tipo de cimento, o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição de microfibras de polipropileno;
- quanto ao fator teor de substituição de sílica ativa, observou-se que apenas o teor de 10 % exerceu influência na dureza superficial dos concretos, majorando tal parâmetro, conforme esperado;
- a inserção das microfibras de polipropileno nos concretos se mostrou significativa na dureza superficial do material reduzindo, em média, 4 % do índice esclerométrico;
- o tipo de cimento empregado na produção dos concretos influenciou, diretamente, no fenômeno da exsudação, sendo significativamente menor (cerca de 16 %, em média) para o cimento CP V-ARI;
- a variação do consumo de água, mantendo-se constante a relação  $a/agl$ , não se mostrou significativa na exsudação dos concretos avaliados. Tal comportamento pode ser explicado através da relação  $a/agl$  (0,53), a qual foi mantida fixa para todos os traços avaliados neste estudo. Logo, com o aumento do consumo de água tem-se um aumento no consumo de cimento,

o qual pode ter proporcionado uma maior retenção de água dentro das misturas;

- o aumento no teor de substituição de sílica ativa influenciou diretamente na exsudação das misturas, reduzindo de forma significativa as quantidades de água exsudadas durante o ensaio em 57 % e 86 %, para os teores de 5 % e 10 %, respectivamente;
- o efeito isolado das microfibras de polipropileno não causou influência significativa na exsudação dos compósitos;
- o tipo de cimento utilizado na produção dos concretos exerceu influência significativa na resistência à abrasão dos compósitos cimentícios estudados, tendo o cimento CP V-ARI um índice de desgaste significativamente menor (cerca de 12 %, em média), para uma mesma relação a/agl;
- a variação do consumo de água, mantendo-se constante a relação a/agl, se mostrou significativa na resistência à abrasão. Conjuntamente, esta tendência de comportamento verificada corrobora com os resultados de resistência à tração na flexão para os concretos estudados;
- o teor de substituição de sílica ativa e o teor de adição das microfibras de polipropileno não influenciaram diretamente a resistência à abrasão da camada superficial dos concretos;
- os resultados verificados para o desgaste mostram uma importante relação entre estes e os parâmetros de resistência dos concretos proporcionados para pisos, ou ainda, com as propriedades de massa do material, em especial com a resistência à tração na flexão; sendo esta extremamente importante no controle da produção dos pisos de concreto;
- o processo de acabamento como forma de tratamento superficial mostra ter eficiência no controle do desgaste, uma vez que pode ter minimizado o efeito da exsudação na superfície dos compósitos cimentícios;
- o consumo de água de 190 l/m<sup>3</sup> mostrou ser o teor mais adequado para os materiais e concretos avaliados neste estudo;
- para uma mesma relação a/agl (0,53), com diferentes níveis de resistência, o cimento CP V-ARI apresentou melhores resultados para as propriedades estudadas em comparação ao cimento CP IV, na idade especificada para os ensaios (28 dias);

- as microfibras de polipropileno não proporcionaram alterações no desgaste.

## 6.2 COMENTÁRIOS FINAIS

Finalizando, destaca-se que a resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos é influenciada não somente pelas propriedades de massa do material cimentício, mas também pela qualidade da sua camada superficial. Além disso, cabe salientar que os parâmetros estudados influenciam de forma diferente as propriedades analisadas nesta pesquisa, uma vez que nem sempre a menor exsudação vai resultar em maiores resistências mecânicas e vice-versa. Somando-se a isto, a resistência ao desgaste em concretos proporcionados para pisos, além de apresentar forte ligação com os materiais constituintes, é uma propriedade dependente das condições de execução, principalmente das ações de acabamento superficial e das condições de cura. Portanto, mais estudos devem ser realizados, buscando-se entender com maior profundidade o comportamento do fenômeno do desgaste decorrente da abrasão.

## 6.3 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 de diferentes tipos de agregados na resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos;
- avaliar a influência de outros tipos de cimentos, os quais são empregados na construção civil, frente à ocorrência do fenômeno do desgaste por abrasão;
- avaliar a influência da microestrutura dos concretos empregados em pisos na resistência ao desgaste, trabalhando com parâmetros considerados importantes no proporcionamento destes concretos, como o consumo de água e diferentes teores de adições minerais ou sintéticas;
- avaliar a variação do nível de desgaste, ao longo do ensaio de resistência à abrasão, através de análises microscópicas nos concretos proporcionados para pisos;

- verificar a influência do acabamento superficial no fenômeno do desgaste por abrasão em concretos proporcionados para pisos, como o tempo de acabamento;
- avaliar a influência de diferentes tratamentos superficiais na resistência à abrasão dos concretos empregados em pisos.
- avaliar a influência de diferentes níveis de resistência à compressão (e conseqüentemente o efeito de diferentes relações *a/c*) no desgaste superficial por abrasão, tanto para o cimento CP IV quanto para o cimento CP V-ARI.

## 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, 1992.

ACI Committee 301. **ACI 301-05 - Specifications for Structural Concrete**. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan, 2005.

ACI Committee 302. **ACI 302.1R-04 - Guide for 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 131**: Test method for resistance of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine: Pennsylvania, 1996.

\_\_\_\_\_. **ASTM C 779**: Standard test method for abrasion resistance of horizontal concrete surfaces: Pennsylvania, 1995.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1138**: Abrasion resistance of concrete (underwater method): West Conshohocken, 1997.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 45:95**: Agregados – Determinação da massa unitária e dos espaços vazios. [s. l.], 1996.

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 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **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 7223**: Concreto: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 7584**: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **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, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **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](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.

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.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**. v. 54, p. 309-318, 2008.

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, abril 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.

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](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 Carámico, 2000.

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.

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.

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.

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.

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.

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 CO<sub>2</sub> 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.

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.

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: estrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials**. 3. ed. Estados Unidos da América, McGraw-Hill, 2006. Disponível em: <<http://www.docstoc.com/docs/2815799/Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials>>. Acessado em: 12 set. 2009.

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.

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.

NILI, M.; AFROUGHSABET, V. The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**. v. 24, p. 927-933, 2010.

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.

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/UFGRS, 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.

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.

SCHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. 5 ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.

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.

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.

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.

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.

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.; QINWU, X. 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.

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.

YAZICI, Ş.; İNAN, G. An investigation on the wear resistance of high strenght concretes. **Wear**. v. 260, n. 6, p. 615-618, mar. 2006.

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.

## **APÊNDICE A – GRANULOMETRIA À LASER DA SÍLICA ATIVA**

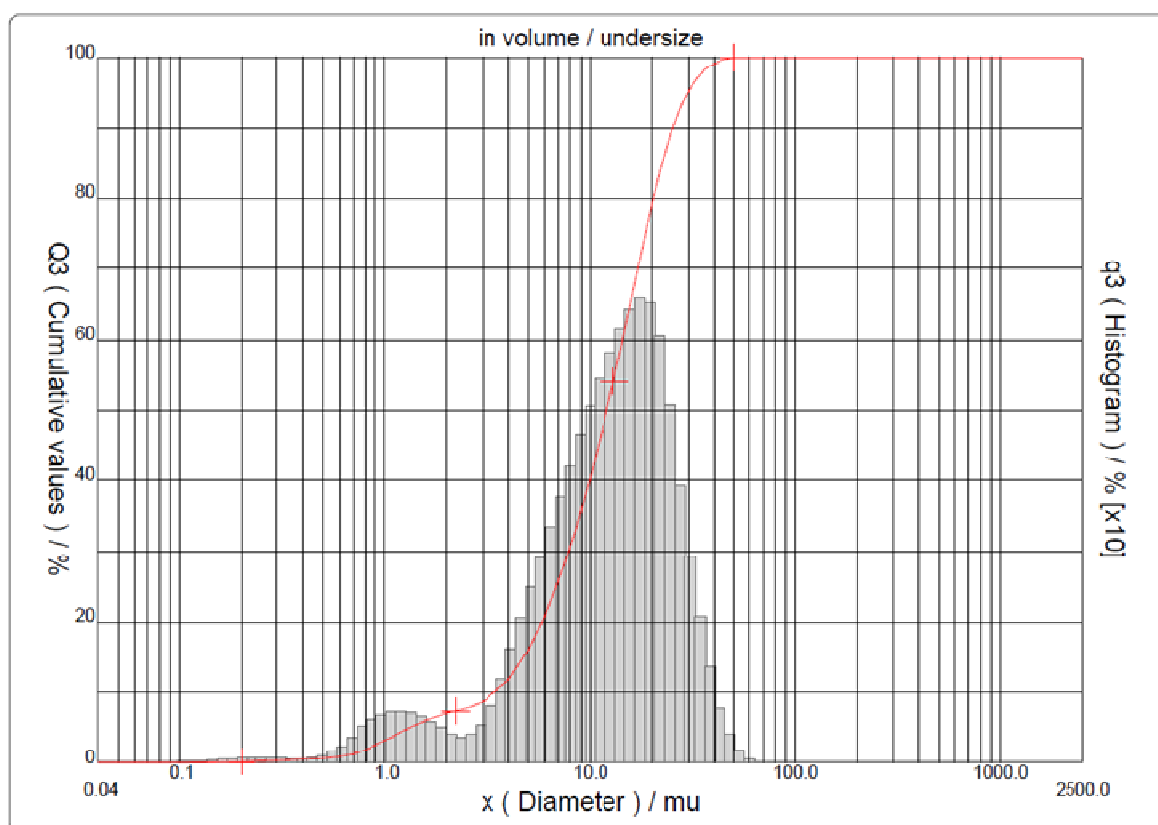


## PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

CILAS 1180 Liquid

Range : 0.04  $\mu$ m - 2500.00  $\mu$ m / 100 Classes

Sample Ref	: Silica 06.07.10	Ultrasounds	: 60 s (+during)
Type produit	: Silica	Concentration	: 155
Client	: NORIE	Diameter at 10%	: 3.41 $\mu$ m
Comments	:	Diameter at 50%	: 12.07 $\mu$ m
Liquid	: Agua	Diameter at 90%	: 25.22 $\mu$ m
Dispersing agent	: Nenhum	Mean diameter	: 13.49 $\mu$ m
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.20.40.20.18hQ-.0.0.0.0/300.0 15.g60.2.16.10.1.10.P7200.24.80.P29.0V 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 /  $\mu$     Q3 : cumulative value / %    q3 : population density / %

## **APÊNDICE B – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)
		28			28
1A	175-0-0	22,37	1B	175-0-0	24,97
		20,66			34,13
		21,89			21,24
2A	175-0-600	18,76	2B	175-0-600	31,43
		17,94			28,44
		21,1			28,63
3A	175-5-0	20,91	3B	175-5-0	32,18
		22,85			21,93
		24,71			36,24
4A	175-5-600	25,44	4B	175-5-600	31,73
		24,61			36,12
		20,17			36,93
5A	175-10-0	25,03	5B	175-10-0	31,11
		24,39			27,58
		23,67			35,44
6A	175-10-600	27,64	6B	175-10-600	41,75
		26,83			46,74
		26,92			42,45
7A	190-0-0	19,4	7B	190-0-0	21,66
		15,99			33,01
		23,03			27,09
8A	190-0-600	19,8	8B	190-0-600	34,95
		22,44			38,8
		24,02			32,12
9A	190-5-0	20,76	9B	190-5-0	36,49
		20,4			28,26
		25,07			31,2
10A	190-5-600	26,72	10B	190-5-600	28,18
		24,27			30,97
		22,9			35,23
11A	190-10-0	25,84	11B	190-10-0	25,86
		25,46			44,56
		22,61			22,62
12A	190-10-600	21,97	12B	190-10-600	41,26
		25,72			43,05
		21,69			40,33
13A	205-0-0	22,75	13B	205-0-0	34,98
		20,83			36,05
		21,09			33,94
14A	205-0-600	21,01	14B	205-0-600	30,34
		22,16			30,2
		19,49			31,31
15A	205-5-0	19,03	15B	205-5-0	39,31
		21,32			39,18
		24,65			41,29
16A	205-5-600	19,96	16B	205-5-600	30,26
		24,58			24,22
		21,38			29,12
17A	205-10-0	22,78	17B	205-10-0	42,63
		20,6			27,69
		22,74			44,16
18A	205-10-600	23,63	18B	205-10-600	38,03
		21,21			41,22
		22,22			33,67



## **APÊNDICE C – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO**

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	Cag-Sa-Fib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)	Traços	Cag-Sa-Fib (l/m <sup>3</sup> -%-g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)
		28			28
1A	175-0-0	2,63	1B	175-0-0	3,63
		3,19			3,65
		2,99			3,92
2A	175-0-600	3,32	2B	175-0-600	3,27
		3,17			3,21
		3,32			3,27
3A	175-5-0	3,37	3B	175-5-0	3,82
		2,64			4,04
		2,86			3,23
4A	175-5-600	2,91	4B	175-5-600	3,42
		3,30			3,69
		3,80			4,08
5A	175-10-0	2,96	5B	175-10-0	4,18
		3,27			4,79
		3,19			3,85
6A	175-10-600	3,23	6B	175-10-600	5,19
		3,11			5,13
		3,05			4,83
7A	190-0-0	3,57	7B	190-0-0	4,32
		3,41			4,05
		3,84			3,92
8A	190-0-600	3,09	8B	190-0-600	3,83
		3,59			4,05
		3,27			3,69
9A	190-5-0	3,61	9B	190-5-0	4,89
		3,12			4,61
		3,28			3,63
10A	190-5-600	3,56	10B	190-5-600	3,59
		3,97			3,38
		4,10			3,50
11A	190-10-0	3,62	11B	190-10-0	5,28
		3,64			4,15
		3,25			5,05
12A	190-10-600	3,15	12B	190-10-600	5,57
		2,87			4,87
		3,07			4,49
13A	205-0-0	3,02	13B	205-0-0	3,49
		3,45			3,41
		2,92			3,77
14A	205-0-600	3,39	14B	205-0-600	3,81
		3,29			3,81
		3,23			3,90
15A	205-5-0	3,34	15B	205-5-0	4,88
		3,14			5,17
		3,31			5,19
16A	205-5-600	3,43	16B	205-5-600	3,89
		3,22			3,24
		2,80			3,59
17A	205-10-0	3,24	17B	205-10-0	3,50
		2,93			4,32
		2,82			4,11
18A	205-10-600	3,08	18B	205-10-600	4,03
		3,30			3,78
		3,11			2,90

## **APÊNDICE D – RESULTADOS DE DUREZA SUPERFICIAL**

DUREZA SUPERFICIAL - ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m³-%g/m³)	Idade (dias)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m³-%g/m³)	Idade (dias)
		28			28
1A	175-0-0	32,23	1B	175-0-0	39,91
		32,69			40,31
		33,04			42,23
		31,66			42,00
2A	175-0-600	27,37	2B	175-0-600	36,52
		28,58			38,88
		28,63			36,72
		29,31			36,29
3A	175-5-0	24,55	3B	175-5-0	39,49
		30,89			39,04
		30,11			42,38
		28,89			40,28
4A	175-5-600	30,07	4B	175-5-600	37,84
		28,24			36,95
		28,01			39,72
		29,57			
5A	175-10-0	31,73	5B	175-10-0	38,41
		33,06			37,33
		33,20			39,20
		30,30			37,59
6A	175-10-600	31,63	6B	175-10-600	45,04
					38,54
		32,62			42,41
		31,50			42,41
7A	190-0-0	28,67	7B	190-0-0	40,66
		27,33			41,03
		28,50			37,37
		29,11			39,02
8A	190-0-600	28,85	8B	190-0-600	37,26
		29,12			37,03
		30,71			36,59
		30,42			35,87
9A	190-5-0	30,54	9B	190-5-0	37,45
		31,82			41,19
		35,75			42,52
		34,19			38,84
10A	190-5-600	31,42	10B	190-5-600	37,67
		31,31			37,54
		33,09			40,02
		31,31			38,17
11A	190-10-0	29,08	11B	190-10-0	45,68
		28,45			46,21
		27,93			43,96
		30,64			41,61
12A	190-10-600	32,31	12B	190-10-600	37,35
		30,30			38,36
		33,18			37,46
		32,07			37,83
13A	205-0-0	31,49	13B	205-0-0	40,11
		34,52			38,63
		31,09			41,03
		33,52			37,94
14A	205-0-600	29,58	14B	205-0-600	39,59
		32,63			37,84
		31,61			39,09
		32,00			39,20
15A	205-5-0	31,02	15B	205-5-0	40,68
		31,02			38,70
		33,45			39,61
		34,07			39,13
16A	205-5-600	33,02	16B	205-5-600	36,52
		32,73			35,83
		31,28			37,54
		31,19			38,09
17A	205-10-0	34,40	17B	205-10-0	42,23
		34,37			44,34
		32,59			38,96
		33,48			40,37
18A	205-10-600		18B	205-10-600	38,58
		29,77			37,11
		31,50			38,66
		30,97			39,57

## **APÊNDICE E – RESULTADOS DE EXSUDAÇÃO**















## **APÊNDICE F – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ABRASÃO**

RESISTÊNCIA À ABRASÃO - ÍNDICE DE DESGASTE (mm)					
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO (A)			CIMENTO DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL (B)		
Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)	Traços	Cag-Tsa-Tfib (l/m <sup>3</sup> -%g/m <sup>3</sup> )	Idade (dias)
		28			28
1A	175-0-0	7,52	1B	175-0-0	5,58
		6,62			5,83
		8,26			6,33
		6,03			5,70
2A	175-0-600	5,82	2B	175-0-600	5,62
		4,20			5,17
		6,07			5,64
		6,37			5,60
3A	175-5-0	6,10	3B	175-5-0	5,01
		6,03			6,24
		6,93			5,14
		6,89			5,28
4A	175-5-600	6,78	4B	175-5-600	4,17
		6,96			4,52
		6,29			4,54
		5,05			5,15
5A	175-10-0	6,16	5B	175-10-0	6,10
		6,64			5,62
		6,50			5,50
		5,94			5,42
6A	175-10-600	6,31	6B	175-10-600	4,79
		6,74			4,20
		5,55			4,61
		6,56			4,74
7A	190-0-0	3,90	7B	190-0-0	4,76
		3,83			3,64
		4,21			5,72
		5,25			4,34
8A	190-0-600	6,68	8B	190-0-600	5,20
		7,51			5,20
		6,06			5,45
		5,86			4,83
9A	190-5-0	5,34	9B	190-5-0	6,06
		5,09			5,35
		4,16			5,60
		5,08			5,73
10A	190-5-600	5,06	10B	190-5-600	4,00
		4,93			5,11
		6,85			5,34
		5,24			5,39
11A	190-10-0	6,35	11B	190-10-0	6,11
		5,18			5,32
		5,13			5,40
		3,70			5,51
12A	190-10-600	6,00	12B	190-10-600	4,76
		6,39			5,12
		6,18			4,95
		5,89			4,96
13A	205-0-0	7,15	13B	205-0-0	6,48
		5,77			5,47
		5,92			6,23
		5,78			6,37
14A	205-0-600	6,39	14B	205-0-600	4,97
		6,99			4,84
		5,92			4,06
		5,78			4,53
15A	205-5-0	6,36	15B	205-5-0	4,23
		6,63			5,47
		5,77			4,29
		5,84			5,29
16A	205-5-600	5,93	16B	205-5-600	4,99
		6,27			4,39
		6,79			5,62
		6,38			5,14
17A	205-10-0	6,28	17B	205-10-0	5,62
		6,55			5,35
		5,81			5,27
		6,10			5,53
18A	205-10-600	6,52	18B	205-10-600	5,51
		7,26			5,89
		5,43			5,77
		3,90			5,83