

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**TESE DE DOUTORADO**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO E COMO  
AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO**

**Washington Almeida Moura**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela**

**Porto Alegre**  
**2000**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO E COMO  
AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO**

**Washington Almeida Moura**

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

**Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

**Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar Faria Vilela**

**Porto Alegre**

**2000**

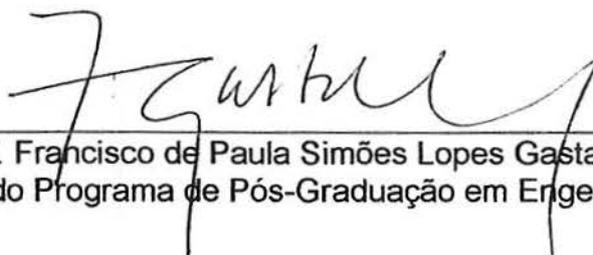
Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador, co-orientador e pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



Prof<sup>a</sup> Denise Carpena Coitirho Dal Molin  
Dr<sup>a</sup> pela Universidade de São Paulo  
Orientadora



Prof. Antonio Cezar Faria Vitela  
Dr. Pela Universidade Técnica Aachen, Alemanha  
Co-orientador



Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**BANCA EXAMINADORA:**

Protásio Ferreira e Castro (UFF)  
Ph.D. pela University of London/UK

Ruy Alberto Cremonini  
Dr. Pela Universidade de São Paulo

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

"talvez um dia, num acaso por aí  
os nossos filhos se encontrem num jardim  
plantando sonhos pela vida  
como eu sempre planejei para mim"  
(Paulinho Tapajós)

À minha mãe e ao meu irmão Valney, *in memóriam*:  
o que eu mais queria, era poder abraçá-los  
para comemorarmos juntos essa nossa vitória.

"é duro ficar sem vocês, vez em quando  
parece que falta um pedaço de mim"  
(Dominguinhos e Nando Cordel)

Ao meu pai, aos meus irmãos e sobrinhos:  
o nosso amor me estimula a transformar sonhos em realidade.

## AGRADECIMENTOS

Nas minhas andanças quilométricas espalho fragmentos da vida porque sei que meu ofício é buscar, conquistar a felicidade e reparti-la com todos que estejam à minha volta. Assim, me fortaleço a cada parada, amparado pelo prazer de sempre ter amigos. Em todas as minhas conquistas sempre tive pessoas que me ajudaram. Cada uma ao seu modo. A minha gratidão a todos que contribuíram para realização desta tese.

A Deus, por tudo. *"O Senhor é minha luz, proteção da minha vida. Porque ter medo de caminhar?"*

À Prof<sup>a</sup> Denise Dal Molin, de quem eu tenho o maior orgulho de ter sido orientado e amigo. O nosso convívio contribuiu muito, sem dúvida, para o meu crescimento profissional e como ser humano.

Ao Prof. Antonio Vilela, pela valiosa contribuição para o meu trabalho.

Aos professores do PPGEC, especialmente aos do NORIE, pelos ensinamentos e convívio durante todos estes anos.

Ao Prof. Ruy Cremonini, pelas contribuições técnicas e computacionais e pela amizade.

À Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS, nos seus diversos segmentos, especialmente aos colegas do Departamento de Tecnologia e dos Colegiados de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil, pelo apoio recebido durante o meu trabalho.

A toda equipe dos Laboratórios de Tecnologia, pelo costumeiro apoio e pela amizade.

Ao meu pai, irmãos, sobrinhos, tios, primos e cunhados pelo incentivo e pelo amor que nos une e fortalece.

A todos os conterrâneos do meu querido Gavião, onde tudo começou. *"Por mais distante que o errante navegante, quem jamais te esqueceria"* (Caetano Veloso).

*"Em vez de moedas ou selos antigos, sou fanático colecionador de amigos"* (Paulinho Tapajós).

À minha amiga Ângela Masuero, com quem tive o grande prazer de trabalhar desde o início do meu doutorado. Com certeza, crescemos muito. A nossa amizade me ajudou muito a superar dificuldades.

À minha pupila Mônica, de quem tenho o maior orgulho de ter sido professor, pela sua capacidade técnica e pela doçura de pessoa que é. Sua amizade me faz muito bem.

Às minhas queridas pombinhas Valéria (Doidinha do Betão) e Thaís, pela amizade e pelo carinho que sempre me dispensaram. Estar com vocês é tão bom!

Ao meu super amigo Roberto (Bob). Valeu companheiro todas as pernoites e fins de semana no NORIE, a paciência que você sempre teve, os cinemas, os xis, o RU, as descidas de ladeira. Você é imprescindível.

Aos cumpadres Marcelo e Jardel, amigos e companheiros de grandes momentos em POA.

Aos amigos Barros Neto, Andréa, Ercília, Antônio Eduardo, Fábio Peixoto, Marcelo Costela, Patrícia Pedroso, Maurício Bernardes, Jairo, Adriane, Carlos Alberto, Keler e Luiz Fernando, cuja convivência, nos dois primeiros anos de curso, ajudou a amenizar a suadade da Bahia.

Ao Formoso e Lisa, pelo apoio, incentivo e, principalmente, pela amizade. Haveremos de caminhar muito, ainda.

À minha amiga Aguida pelos ensinamentos computacionais, pelo apoio efetivo e pela amizade.

Aos amigos Nelson, Adriana Gumieri, Adriana Silveira, Fernanda, Lucília, Rosana, Marlova, Elvira, Tamara, Patrícia Tzortzopoulos, Maki, Nagui, Andréa Kern, Alessandra Brito, Ariane e Graziela, pela oportunidade de compartilhar alegrias.

Ao grande amigo Márcio Barata, pelas importantes discussões sobre assuntos da maior relevância que, felizmente, continuamos tendo. Estamos crescendo sempre.

A todos os auxiliares de pesquisa, especialmente Daniel, Gustavo, Maurício, Alexandre, Luís, Guilherme, Ane, Fabiano, Marcelo, pelo empenho e pela amizade.

Às funcionárias da secretaria do PPGEC, pela atenção que sempre me foi dada.

Aos funcionários do LEME: Fontes, Airtton, Ederson, Teixeira, Flávio e Vanderley, pelo grande apoio e pela amizade.

À Lúcia, funcionária do NORIE, pela atenção e amizade.

Aos meus grandes amigos de todos os momentos Cristóvão, Paulo Peruna, Marcos, Dalma, Alexandre Matias, Humberto, Érico, Arlindo Washington, Kiko, Leonel, Socorro. "*Nossa grande amizade nasceu de uma luz que acendeu aos olhos de abril*"(Djavan).

A todos os meus amigos, de todos os tempos, desde Gavião até Porto Alegre, que sempre contribuíram para que eu pudesse vencer os desafios.

Ao grupo PARANAPANEMA - CARAÍBA METAIS, especialmente ao Devanei, Carlos Duarte, Takashi e José Maria, pelo fornecimento de material e pelas valiosas informações.

À CAPES pelo apoio financeiro para desenvolvimento deste trabalho.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXIV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	3
<b>2 ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS E SUA UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL ...</b>	<b>5</b>
2.1 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO .....	7
<b>2.1.1 Composição química .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2 Utilização da escória de alto-forno na construção civil.....</b>	<b>9</b>
2.1.2.1 Utilização como adição e fabricação do cimento.....	9
2.1.2.2 Utilização como agregado.....	11
2.2 ESCÓRIA DE ACIARIA .....	13
<b>2.2.1 Composição química das escórias de aciaria .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2 Utilização de escória de aciaria na construção civil .....</b>	<b>15</b>
2.2.2.1 Utilização como agregado.....	15
2.2.2.2 Utilização como adição ao concreto.....	17
<b>3 ESCÓRIA DE COBRE.....</b>	<b>18</b>
3.1 GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE .....	18
3.2 PROPRIEDADES DA ESCÓRIA DE COBRE NA FASE LÍQUIDA .....	22

3.3 UTILIZAÇÕES DA ESCÓRIA DE COBRE.....	25
<b>3.3.1 Estudo preliminar da utilização da escória de cobre brasileira como agregado miúdo .....</b>	<b>27</b>
3.3.1.1 Dosagem e fabricação de concreto.....	28
3.3.1.2 Utilização na fabricação de peças pré-moldadas.....	29
3.3.1.3 Utilização em base e sub-base de pavimentação.....	30
3.3.1.4 Utilização como agregado miúdo para asfalto pré-misturado a frio (pmf) ..	31
3.3.1.5 Utilização em misturas com asfalto.....	31
3.3.1.6 Utilização como agregado para colchão drenante .....	32
<b>4 DEFINIÇÃO DAS APLICAÇÕES PARA ESCÓRIA DE COBRE E DOS PARÂMETROS A SEREM AVALIADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE.....	33
<b>4.1.1 Coleta da amostra .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.2 Características químicas e físicas .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.3 Lixiviação e solubilidade .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1.4 Determinação da atividade pozolânica.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1.5 Considerações sobre as possíveis aplicações da escória de cobre a partir da sua caracterização.....</b>	<b>39</b>
4.2 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS PARA AVALIAR A ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO E COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO .....	40
<b>4.2.1 Características do concreto no estado fresco.....</b>	<b>40</b>
4.2.1.1 Trabalhabilidade.....	40
4.2.1.2 Massa Específica .....	41
<b>4.2.2 Características do concreto no estado endurecido .....</b>	<b>42</b>
4.2.2.1 Massa específica.....	42
4.2.2.2 Propriedades mecânicas.....	42
4.2.2.3 Aspectos relativos à durabilidade do concreto.....	44
4.2.2.3.1 Permeabilidade e absorção do concreto .....	45
4.2.2.3.1.1 Fatores que influenciam na permeabilidade.....	46
4.2.2.3.1.2 Métodos de ensaios.....	48
4.2.2.3.2 Carbonatação.....	51
4.2.2.3.2.1 Fatores que influenciam na carbonatação.....	53
4.2.2.3.2.2 Método de ensaio .....	57

4.2.2.3.3	Ataque por sulfato ao concreto.....	59
4.2.2.3.3.1	Fatores que influenciam no ataque por sulfato ao concreto.....	63
4.2.2.3.3.2	Métodos de ensaio.....	66
<b>4.2.3</b>	<b>Resumo dos ensaios para avaliar a escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.....</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO AO CONCRETO, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
5.1	AMOSTRA DA ESCÓRIA DE COBRE.....	72
5.2	PRODUÇÃO DE CONCRETO.....	72
<b>5.2.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>73</b>
5.2.1.1	Cimento.....	73
5.2.1.2	Agregado miúdo.....	73
5.2.1.3	Agregado graúdo.....	74
5.2.1.4	Água.....	74
5.2.1.5	Adição.....	75
5.2.1.5.1	Determinação do tempo de moagem.....	75
5.2.1.5.2	Determinação do teor de adição ao concreto.....	77
<b>5.2.2</b>	<b>Dosagem dos concretos.....</b>	<b>81</b>
5.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	82
<b>5.3.1</b>	<b>Trabalhabilidade.....</b>	<b>83</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Massa específica.....</b>	<b>83</b>
5.4	MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA.....	85
5.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO.....	86
<b>5.5.1</b>	<b>Massa específica.....</b>	<b>86</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Propriedades mecânicas.....</b>	<b>89</b>
5.5.2.1	Resistência à compressão axial.....	89
5.5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	95
5.5.2.3	Resistência à tração na flexão.....	99
<b>5.5.3</b>	<b>Aspectos relativos à durabilidade do concreto.....</b>	<b>104</b>

5.5.3.1	Absorção por imersão .....	104
5.5.3.2	Absorção por sucção capilar .....	107
5.5.3.3	Carbonatação .....	118
5.5.3.4	Ataque por sulfato ao concreto .....	125
<b>6 ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS ...</b>		<b>133</b>
6.1	COLETA DE AMOSTRAS .....	133
6.2	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	133
<b>6.2.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>133</b>
6.2.1.1	Agregado miúdo .....	134
6.2.1.1.1	Arcia .....	134
6.2.1.1.2	Escória de cobre .....	134
<b>6.2.2</b>	<b>Dosagem .....</b>	<b>136</b>
6.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO .....	137
<b>6.3.1</b>	<b>Trabalhabilidade .....</b>	<b>137</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Massa específica .....</b>	<b>139</b>
6.4	MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA .....	141
6.5	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO ..	141
<b>6.5.1</b>	<b>Massa específica .....</b>	<b>142</b>
<b>6.5.2</b>	<b>Propriedades mecânicas .....</b>	<b>143</b>
6.5.2.1	Resistência à compressão axial .....	144
6.5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	148
6.5.2.3	Resistência à tração na flexão .....	154
<b>6.5.3</b>	<b>Absorção por imersão .....</b>	<b>159</b>
6.5.3.1	Absorção por sucção capilar .....	161
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>169</b>
7.1	COM RELAÇÃO À CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE .....	169

7.2 COM RELAÇÃO À UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO AO CONCRETO.....	170
7.2.1 Quanto às características do concreto no estado fresco.....	170
7.2.2 Quanto às características do concreto no estado endurecido .....	170
7.3 COM RELAÇÃO À UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO .....	172
7.3.1 Quanto às características do concreto no estado fresco.....	172
7.3.2 Quanto às características do concreto no estado endurecido .....	173
7.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	175
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>177</b>
<b>A N E X O S.....</b>	<b>191</b>
ANEXO 1: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA DE COBRE MOÍDA UTILIZADA NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA ...	192
ANEXO 2: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CORPOS-DE-PROVA DE ARGAMASSA PARA DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DA ESCÓRIA DE COBRE .....	195
ANEXO 3: COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA DE COBRE MOÍDA EM DIFERENTES TEMPOS: 40 MINUTOS (E 40), 60 MINUTOS (E 60), 80 MINUTOS (E 80) E 100 MINUTOS (E 100) .....	197
ANEXO 4: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DOS CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS .....	206

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Maiores geradores de escória de cobre, no mundo (SINDICEL, 1999) ..	19
<b>Figura 2</b>	Geração de escória de cobre no Brasil .....	19
<b>Figura 3</b>	Fluxograma da produção de cobre metálico (BITTENCOURT, 1992) ....	23
<b>Figura 4</b>	Aspecto da área de granulação da escória de cobre .....	24
<b>Figura 5</b>	Difratograma da escória de cobre utilizada por ARIÑO e MOBASHER (1999).....	26
<b>Figura 6</b>	Elementos pré-moldados fabricados com utilização de escória de cobre como agregado miúdo .....	30
<b>Figura 7</b>	Difratograma da escória de Cobre .....	35
<b>Figura 8</b>	Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória de cobre: (a) – um grão original (ampliação 104x); (b) – vários grãos após moagem (ampliação 208x).....	36
<b>Figura 9</b>	Relação entre a resistência à compressão e a porosidade, calculada a partir do volume de poros com diâmetro superior a 20nm (SERSALE et al., citados por NEVILLE, 1997).....	43
<b>Figura 10</b>	Relação entre permeabilidade e porosidade capilar de pastas de cimento hidratadas (NEVILLE, 1997) .....	46
<b>Figura 11</b>	Relação entre coeficiente permeabilidade e relação água/cimento de pastas de cimento hidratadas (NEVILLE, 1997) .....	47
<b>Figura 12</b>	Esquema do ensaio de absorção capilar (KELHAM, 1988) .....	49
<b>Figura 13</b>	Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão de corpos-de-prova, após dois anos (NEVILLE, 1997).....	57

<b>Figura 14</b>	Fluxograma dos ensaios realizados no estudo da utilização de escória de cobre como adição.....	70
<b>Figura 15</b>	Fluxograma dos ensaios realizados no estudo da utilização de escória de cobre como agregado miúdo .....	71
<b>Figura 16</b>	Resultados de resistência à compressão de argamassa com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos .....	77
<b>Figura 17</b>	Resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de adição de escória de cobre. ....	78
<b>Figura 18</b>	Comportamento das argamassas em função da resistência à compressão axial: (a) com o teor de adição de escória; (b) com o traço. ....	80
<b>Figura 19</b>	Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e o traço da argamassa .....	80
<b>Figura 20</b>	Diagrama de dosagem dos concretos.....	82
<b>Figura 21</b>	Comportamento dos concretos no estado fresco, com relação à sua massa específica para: (a) teor de adição; (b) relação a/c .....	85
<b>Figura 22</b>	Comportamento dos concretos no estado endurecido, com relação à sua massa específica: (a) teor de adição; (b) relação a/c.....	88
<b>Figura 23</b>	Massa específica do concreto no estado endurecido, em função da interação entre o teor de adição e a relação a/c.....	88
<b>Figura 24</b>	Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 7 dias	90
<b>Figura 25</b>	Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias .....	91
<b>Figura 26</b>	Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 91 dias .....	91
<b>Figura 27</b>	Comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade.....	93

<b>Figura 28</b>	Resistência à compressão axial do concreto em função da interação o teor de adição e a relação a/c.....	94
<b>Figura 29</b>	Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 7 dias .....	96
<b>Figura 30</b>	Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias .....	96
<b>Figura 31</b>	Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias .....	96
<b>Figura 32</b>	Comportamento dos concretos quanto à resistência à tração por compressão diametral, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade .....	98
<b>Figura 33</b>	Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 7 dias	100
<b>Figura 34</b>	Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias .....	101
<b>Figura 35</b>	Comportamento dos concretos quanto à resistência à tração na flexão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade.....	103
<b>Figura 36</b>	Resistência à tração na flexão, em função da interação entre a relação a/c e o teor de adição.....	103
<b>Figura 37</b>	Comportamento do concreto quanto à absorção por imersão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c .....	106
<b>Figura 38</b>	Absorção, em função da interação entre a relação a/c e o teor de adição. ....	106
<b>Figura 39</b>	Aspecto da pesagem dos corpos-de-prova durante a absorção.....	109
<b>Figura 40</b>	Aspecto dos corpos-de-prova após a saturação .....	109
<b>Figura 41</b>	Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,40: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2 .....	110

<b>Figura 42</b> Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,50: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2 .....	111
<b>Figura 43</b> Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,60: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2 .....	112
<b>Figura 44</b> Resultados da taxa de absorção em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c. ....	114
<b>Figura 45</b> Resultados de resistência capilar em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c. ....	117
<b>Figura 46</b> Esquema da câmara de carbonatação para ensaio acelerado (JOHN, 1995).....	118
<b>Figura 47</b> Aspecto da câmara de sazramento .....	119
<b>Figura 48</b> Aspecto da câmara de carbonatação com os corpos-de-prova .....	120
<b>Figura 49</b> Comportamento dos concretos quanto à carbonatação em função: a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade.....	123
<b>Figura 50</b> Profundidade de carbonatação dos concretos em função das interações: (a) entre o teor de adição e a relação a/c; (b) entre a idade e a relação a/c .....	124
<b>Figura 51</b> Aspecto de corpos-de-prova após 450 dias de imersão em água saturada com cal.....	126
<b>Figura 52</b> Aspecto de corpos-de-prova após 450 dias de imersão em solução de sulfato de sódio.....	127
<b>Figura 53</b> Resistência à tração na flexão dos concretos atacados por sulfato, em função da interação entre a relação a/c e do teor de adição .....	129
<b>Figura 54</b> Resultados de índice de resistência química "R" em função da interação entre a relação a/c e teor de adição.....	129
<b>Figura 55</b> Microscopia Eletrônica de Varredura por elétrons secundários (3.500x) em concreto: (a) sem escória, a/c = 0,40; (b) 20% de escória de cobre,	

	a/c = 0,41; (c) sem escória, a/c = 0,50; (d) 20% de escória de cobre, a/c = 0,50; (e) sem escória, a/c = 0,60; (e) 20% de escória de cobre, a/c = 0,60 .....	131
<b>Figura 56</b>	Perda de massa da escória na ciclagem água-estufa.....	135
<b>Figura 57</b>	Diagrama de dosagem para os concretos.....	139
<b>Figura 58</b>	Comportamento dos concretos, com relação à sua massa específica no estado fresco, em função da interação entre o teor de substituição e a relação a/c .....	141
<b>Figura 59</b>	Comportamento dos concretos no estado endurecido, com relação à sua massa específica, para os diferentes teores de substituição e diferentes traços .....	143
<b>Figura 60</b>	Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 7 dias .....	145
<b>Figura 61</b>	Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias ...	145
<b>Figura 62</b>	Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 91 dias ...	146
<b>Figura 63</b>	Resultados de resistência à compressão dos concretos, em função da interação entre o teor de substituição, a relação a/c e a idade .....	147
<b>Figura 64</b>	Aspecto da seção de corpos-de-prova de concreto com diferentes teores de escória de cobre, como agregado miúdo: (a) 30%; (b) 40%; (c) 50% .....	148
<b>Figura 65</b>	Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 7 dias .....	150
<b>Figura 66</b>	Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias .....	150
<b>Figura 67</b>	Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias .....	151

- Figura 68** Comportamento do concreto quanto à resistência à tração por compressão diametral função: (a) teor de substituição; (b) relação a/c; (c) idade ..... 153
- Figura 69** Resultados de resistência à tração por compressão diametral em função da interação entre a relação a/c e a idade ..... 153
- Figura 70** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 7 dias 156
- Figura 71** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias ..... 156
- Figura 72** Comportamento do concreto quanto à resistência à tração na flexão, em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c; (c) idade ..... 158
- Figura 73** Comportamento do concreto quanto à absorção por imersão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c ..... 161
- Figura 74** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,41 ..... 162
- Figura 75** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,50 ..... 162
- Figura 76** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,64 ..... 163
- Figura 77** Resultados da taxa de absorção em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c ..... 165
- Figura 78** Taxa de absorção capilar em função da interação entre a relação a/c e teor de substituição de areia ..... 165
- Figura 79** Resultados de resistência capilar em função: (a) teor de adição e (b) relação a/c ..... 167
- Figura 80** Resistência capilar em função da interação entre a relação a/c e o teor de substituição de areia ..... 168

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Composição de escórias de alto-forno (BATTAGIN, citado por CINCOTTO et al. 1994) .....	9
<b>Tabela 2</b>	Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países (LIMA, 1999) .....	14
<b>Tabela 3</b>	Composição química básica das escórias de aciaria de forno elétrico geradas em alguns países (GEYER et al., 1994) .....	14
<b>Tabela 4</b>	Composição média dos elementos principais no Forno Flash (BITTENCOURT, 1992) .....	20
<b>Tabela 5</b>	Características da escória de cobre bruta.....	27
<b>Tabela 6</b>	Características do concreto.....	29
<b>Tabela 7</b>	Composição química da escória de cobre brasileira.....	34
<b>Tabela 8</b>	Características da escória de cobre bruta.....	35
<b>Tabela 9</b>	Resultados dos ensaios de lixiviação.....	36
<b>Tabela 10</b>	Resultados dos ensaios de solubilidade .....	37
<b>Tabela 11</b>	Exigências químicas para materiais pozolânicos (NBR 12653, 1992) ....	38
<b>Tabela 12</b>	Resultados do ensaio de atividade pozolânica da escória de cobre com cimento Portland .....	39
<b>Tabela 13</b>	Resultados do ensaio de determinação da pozolanicidade da escória de cobre (NBR 5753, 1991) .....	39
<b>Tabela 14</b>	Tempo de exposição, profundidade de carbonatação e diferentes concentração de CO <sub>2</sub> , utilizados por vários pesquisadores (ISAIA, 1995). .....	58

<b>Tabela 15</b> Concentrações de sulfato no solo e na água, adotadas nos Estados Unidos (DJANIKIAN, 1980).....	61
<b>Tabela 16</b> Características dos principais tipos de sais (SILVA FILHO, 1994).....	62
<b>Tabela 17</b> Classificação da agressividade do meio, em função da concentração de sulfatos, adotada por algumas normas (SILVEIRA, 1996).....	63
<b>Tabela 18</b> Características do cimento CP I S 32.....	73
<b>Tabela 19</b> Distribuição granulométrica e características físicas da areia.....	74
<b>Tabela 20</b> Distribuição granulométrica e características físicas do agregado graúdo .....	74
<b>Tabela 21</b> Tamanho médio dos grãos e traços (em massa) de argamassa para os diferentes tempos de moagem.....	75
<b>Tabela 22</b> Resultados de resistência média à compressão, em MPa, das argamassas com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos .....	76
<b>Tabela 23</b> Resultados da ANOVA dos tempos de moagem da escória de cobre e do traço na resistência à compressão da argamassa.....	76
<b>Tabela 24</b> Traços (em massa) de argamassa para os diferentes teores de adição de escória de cobre .....	78
<b>Tabela 25</b> Resultados de resistência média à compressão das argamassas com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos.....	78
<b>Tabela 26</b> Resultados da ANOVA do teor de adição de escória nas argamassas...	79
<b>Tabela 27</b> Traços em massa utilizados para produção dos concretos.....	81
<b>Tabela 28</b> Abatimentos obtidos nos traços dos concretos .....	83
<b>Tabela 29</b> Massa específica do concreto no estado fresco .....	83
<b>Tabela 30</b> Resultados da ANOVA da influência teor de adição de escória de cobre na massa específica dos concretos no estado fresco.....	84

<b>Tabela 31</b>	Massa específica do concreto no estado endurecido .....	86
<b>Tabela 32</b>	Resultados da ANOVA da influência teor de adição de escória de cobre e relação a/c, na massa específica dos concretos no estado endurecido	87
<b>Tabela 33</b>	Resultados de resistência à compressão axial dos concretos .....	90
<b>Tabela 34</b>	Resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial dos concretos .....	92
<b>Tabela 35</b>	Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos .....	95
<b>Tabela 36</b>	Resultados da ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos .....	97
<b>Tabela 37</b>	Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos.....	100
<b>Tabela 38</b>	Resultados da ANOVA para a resistência à tração na flexão dos concretos .....	101
<b>Tabela 39</b>	Resultados do ensaio de absorção por imersão do concreto.....	104
<b>Tabela 40</b>	Resultados da ANOVA para absorção por imersão dos concretos.....	105
<b>Tabela 41</b>	Resultados de taxa de absorção e resistência capilar dos concretos...	113
<b>Tabela 42</b>	Resultados da ANOVA quanto à taxa de absorção dos concretos .....	113
<b>Tabela 43</b>	Resultados da ANOVA quanto à resistência capilar dos concretos .....	116
<b>Tabela 44</b>	Resultados dos ensaios de carbonatação.....	120
<b>Tabela 45</b>	Resultados da ANOVA da profundidade de carbonatação dos concretos .....	121
<b>Tabela 46</b>	Resultados de médias resistência à tração na flexão, índice de resistência química "R" e variação de massa dos corpos-de-prova imersos em água com cal e em solução de sulfato de sódio .....	127
<b>Tabela 47</b>	Resultados da ANOVA do ataque por sulfato dos concretos, para "R".	128

<b>Tabela 48</b> Características da areia .....	134
<b>Tabela 49</b> Traços utilizados para produção dos concretos .....	137
<b>Tabela 50</b> Abatimentos obtidos nos traços dos concretos .....	138
<b>Tabela 51</b> Massa específica do concreto no estado fresco .....	139
<b>Tabela 52</b> Resultados da ANOVA da influência da relação a/c e dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica dos concretos no estado fresco .....	140
<b>Tabela 53</b> Massa específica do concreto no estado endurecido .....	142
<b>Tabela 54</b> Resultados da ANOVA da influência dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica dos concretos no estado endurecido.....	142
<b>Tabela 55</b> Resultados de resistência à compressão axial dos concretos .....	144
<b>Tabela 56</b> Resultados da ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos .....	146
<b>Tabela 57</b> Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos .....	149
<b>Tabela 58</b> Resultados da ANOVA da resistência à tração por compressão diametral dos concretos.....	151
<b>Tabela 59</b> Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos.....	155
<b>Tabela 60</b> Resultados da ANOVA para resistência à tração na flexão dos concretos .....	157
<b>Tabela 61</b> Resultados de absorção por imersão do concreto .....	159
<b>Tabela 62</b> Resultados da ANOVA para absorção por imersão dos concretos.....	160
<b>Tabela 63</b> Resultados de taxa de absorção e resistência capilar dos concretos ...	163

<b>Tabela 64</b> Resultados da ANOVA quanto à taxa de absorção dos concretos, e suas interações .....	164
<b>Tabela 65</b> Resultados da ANOVA quanto à resistência capilar dos concretos .....	166

# UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO E COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO

**Washington Almeida Moura**

## RESUMO

A preocupação com o grave problema da geração de resíduos vem, cada vez mais, despertando na sociedade a conscientização da necessidade de realização de estudos com vistas a melhorar o ciclo de produção e adequar a destinação dos resíduos gerados. Neste sentido, a reciclagem se apresenta como uma grande alternativa. Nesta pesquisa, é estudada a possibilidade de reciclagem da escória de cobre, partindo-se da hipótese que é viável sua utilização como adição e como agregado miúdo para concreto. Inicialmente foi constatado, através de ensaios de lixiviação e solubilização, que a escória não apresenta risco ambiental. É estudada a influência da adição de escória de cobre sobre as características do concreto no estado fresco (trabalhabilidade e massa específica) e no estado endurecido (massa específica, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, absorção por imersão, absorção por sucção capilar, carbonatação e resistência ao ataque por sulfato). Estuda-se, também, a influência da utilização de diferentes teores de escória de cobre granulada, como agregado miúdo, nas características do concreto no estado fresco e no estado endurecido. A análise dos resultados permite concluir que a adição de 20% de escória de cobre ao concreto proporciona melhor desempenho em relação a todas as características estudadas. É possível concluir, ainda, que a utilização de escória de cobre como agregado miúdo, até 40% em volume, melhora o desempenho do concreto, quanto às características estudadas.

# **COPPER SLAG UTILIZATION AS MINERAL ADMIXTURE AND AS FINE AGGREGATE TO CONCRETE PRODUCTION**

**Washington Almeida Moura**

## **ABSTRACT**

The worry about waste generation problems has led to a higher social consciousness to improve researches on production lifecycle and more profitable waste use. In this way, recycling process appears as a great alternative to minimize waste dumping. Therefore, this research deals with the viability study of copper slag utilization as mineral admixture, and, as fine aggregate to concrete production. Since the beginning it was proved that copper slag does not arise any environmental risk, from the solubility and leaching point of view. The influence of copper slag as mineral admixture was studied in fresh concrete properties (specific gravity and workability), and in hardened concrete properties (specific gravity, compressive strength, flexural and split tensile strength, water absorption by immersion, water absorption by capillary suction, carbonation rate and sulfate attack resistance). Also, different proportions of copper slag as fine aggregate were evaluated in fresh concrete properties and in hardened concrete properties. Finally, the analysis of results showed that all concrete properties improved when 20 % of copper slag admixture was used. In addition, the use of copper slag as fine aggregate, at a rate of 40 % of substitution, by volume, all concrete properties were also improved.

## 1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental vem sendo amplamente discutida nos foros nacionais e internacionais, nos últimos anos, tendo mobilizado a opinião pública e assumindo um papel preponderante nas comunidades.

O conceito de sustentabilidade como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental. A proteção do solo e água, a limitação de geração de resíduos e a sua reutilização são os itens chave no conceito do chamado "Desenvolvimento Sustentável". Este conceito foi criado, em março de 1991, pela European Commission Directive 91/156/EEC (PERA, 1996).

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos. Não só porque os resíduos provocam impactos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico.

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo com SJOSTROM, citado por JOHN (2000), a construção civil consome entre 14% a 50% dos recursos naturais que são extraídos na terra.

Segundo estimativa feita por JOHN (2000), o consumo de agregado para concreto e argamassa, no Brasil, é em torno de 210 milhões de toneladas por ano. Por outro lado, as atividades relacionadas à construção civil são grandes geradoras de poluição ambiental. Na produção de 1 tonelada cimento Portland, por exemplo, é lançada 1 tonelada de CO<sub>2</sub> na atmosfera, sendo este gás um dos maiores responsáveis pelo efeito estufa (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Outro aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha provocar danos significativos ao meio ambiente. Muitos países têm, cada vez mais, exigido das indústrias, de um modo geral, uma adequação dos processos produtivos às diretrizes básicas do controle ambiental. A Comunidade Econômica Européia, conjuntamente com

importantes organizações não governamentais e renomadas instituições científicas, vêm procedendo a elaboração de mecanismos de certificação da qualidade ambiental dos produtos comercializados na Europa. Deste modo, cabe aos países aprimorarem suas práticas de gestão ambiental, de modo a garantir a certificação de seus produtos e serviços junto às normas internacionais consolidadas na ISO 14000, que pretende harmonizar os procedimentos aplicáveis mundialmente, com vistas ao estabelecimento dos requisitos fundamentais das boas práticas de gerenciamento ambiental.

Muitos especialistas consideram a legislação brasileira das melhores e mais modernas do mundo. Mais recentemente foi criado, no âmbito da ABNT, o GRUPO DE APOIO À NORMALIZAÇÃO AMBIENTAL - GANA (1994), formado por profissionais das diversas áreas, cujo objetivo é avaliar os impactos da ISO 14000 sobre as atividades brasileiras e propor alternativas que atendam aos interesses nacionais, preservando os preceitos de conservação e recuperação ambiental (BARROSO, 1995).

A redução de emissão de resíduos é uma meta. Mas existe, em vários processos produtivos, apesar do grande esforço das indústrias, a impossibilidade de eliminá-los totalmente.

Uma alternativa para o problema de geração de resíduos seria a sua reciclagem, que possibilita a conservação de recursos naturais e permite uma economia de energia, sobretudo na área de construção civil, que como já foi dito é o setor que mais consome recursos naturais. Para se ter uma idéia, a substituição de parte do clínquer por cinzas volantes e escórias possibilitou uma redução de 28% no consumo de combustível na indústria cimenteira (YAMAMOTO et al., citados por JOHN, 2000).

Muitas instituições públicas e privadas, no mundo inteiro, têm desenvolvido estudos com vistas à utilização de resíduos. Cada vez mais vem crescendo o número de conferências, seminários e *workshop*, cuja temática principal é a reciclagem de resíduos, a exemplo da "International Conference on Solid Waste Technology and Management", na sua 16ª edição, nos Estados Unidos; "International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology", no Canadá; "Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil", na sua 3ª edição, em São Paulo; dentre outros. Tem se verificado,

inclusive, um grande número de artigos sobre este tema, publicados em periódicos de circulação internacional, como ACI Materials Journal, Cement and Concrete Research; Magazine of Concrete Research, dentre outros. Dentro deste contexto foi desenvolvido, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como tese de doutorado, um estudo da utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto. A escória de cobre estudada é um resíduo do processo de produção do cobre eletrolítico, na Bahia. Em nível mundial, são geradas cerca de 13 milhões de toneladas. No Brasil gera-se, em média, 230 mil toneladas por ano, que são depositadas no pátio da metalúrgica. Daí a relevância desta pesquisa.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade técnica da utilização da escória de cobre na construção civil.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- caracterizar a escória de cobre, com vistas a definir possíveis aplicações na construção civil;
- definir as aplicações a serem estudadas para escória de cobre, levando em consideração potencialidades do ponto de vista do impacto ambiental, e possibilidades de maior valor agregado no tipo de uso a ser dado;
- definir e realizar os ensaios que possam avaliar o material no qual será utilizada a escória de cobre, no que se refere às características mecânicas e de durabilidade.

## 1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi estruturada em sete capítulos, descritos a seguir.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema, contextualizando-o sob o aspecto ambiental para evidenciar a sua relevância. São apresentados, também, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

No segundo capítulo é feita, através de revisão bibliográfica, uma abordagem sobre as escórias siderúrgicas que vêm sendo estudadas para utilização na construção civil. São tratados os aspectos relativos ao processo de geração, volume gerado, características principais, e formas de aplicação na construção civil.

O terceiro capítulo dá destaque à escória de cobre. São apresentados os volumes gerados em nível mundial e nacional, o processo de geração e forma de destinação final e os estudos que vêm sendo desenvolvidos com vistas à sua utilização na construção.

No quarto capítulo são discutidos os aspectos que irão definir as formas de utilização da escória de cobre, com base na sua caracterização. São discutidas também as características do concreto que serão avaliadas na parte experimental: trabalhabilidade, massa específica do concreto no estado fresco e endurecido, resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração na flexão, absorção por imersão e por sucção capilar, carbonatação, e resistência ao ataque por sulfato. Essa discussão foi feita com base na revisão bibliográfica.

O quinto capítulo trata da parte experimental no que se refere ao estudo da utilização da escória de cobre como adição ao concreto. São apresentados a metodologia de cada ensaio, os resultados e a análise dos mesmos.

No sexto capítulo é abordado o estudo da utilização da escória de cobre como agregado miúdo para concreto. São apresentados a metodologia adotada para cada ensaio, os resultados e a análise dos mesmos.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões tiradas do estudo da utilização da escória de cobre tanto como adição quanto como agregado para concreto. São também feitas algumas sugestões para outros estudos do aproveitamento deste resíduo.

## 2 ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS E SUA UTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A inexistência de um padrão e de critérios de testes para avaliar a potencialidade de aplicação dos resíduos são causas que restringem a sua aplicação. Além de ser necessário uma amostragem cuidadosa para determinar a variabilidade envolvida na geração dos resíduos.

É consenso, no meio técnico, de que a construção civil se revela como o setor com maior potencial para utilização de resíduos, principalmente pelo grande volume de matéria-prima que consome, independente da região. Por sua vez, os materiais convencionais de construção civil consomem significativo volume de energia, consomem recursos já em escassez e geram grandes volumes de resíduos. Daí a importância de se buscar a utilização de resíduos que possibilitem a redução do consumo de combustível no processo de obtenção de novos produtos. Além desta vantagem ecológica, os materiais alternativos poderão viabilizar, como consequência, construções com menor custo (CASTILHO, 1996). Entretanto a viabilidade de reciclagem de um resíduo depende de alguns fatores, tais como:

- proximidade da instalação de processamento;
- custo de transporte dos resíduos;
- volume de resíduos disponível para o reprocessamento;
- custo de estocagem do resíduo no local de geração ou afastado da origem.

Deste modo, a viabilidade técnica e econômica da utilização de um resíduo como subproduto está condicionada, também, a que o custo de reciclagem seja igual ou inferior ao custo total para descartá-lo adequadamente.

O estudo da viabilidade técnica da reciclagem de um determinado resíduo pressupõe basicamente as seguintes etapas:

- levantamento de dados sobre a disponibilidade do resíduo;
- caracterização quanto à sua composição química;
- identificação das propriedades físicas e mecânicas;
- seleção de possíveis aplicações;
- identificação das propriedades do produto final.

Atualmente, existem no Brasil e no mundo muitos centros de pesquisa que estudam possíveis utilizações para resíduos ainda não consagrados e outros parâmetros que envolvem os produtos derivados de resíduos cujo uso já está consagrado.

Estudos desenvolvidos pela OECD - Organization for Economic Cooperation and Development e RILEM - Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux estabeleceram uma proposta de critério geral de avaliação do resíduo para uso na construção civil (CINCOTTO, 1988):

- a) a quantidade de resíduo disponível deve ser suficientemente grande para justificar o desenvolvimento de sistemas de manuseio, processamento e transporte;
- b) as distâncias de transporte envolvidas devem ser compatíveis com as dos materiais convencionais;
- c) o material não deve ser potencialmente nocivo durante a construção ou posteriormente à sua incorporação ao produto final.

A OECD propõe uma classificação dos resíduos em cinco grupos, que é utilizada internacionalmente (CINCOTTO, 1988):

- grupo 1 - Resíduos e subprodutos de mineração;
- grupo 2 - Resíduos e subprodutos metalúrgicos;
- grupo 3 - Resíduos e subprodutos industriais;
- grupo 4 - Resíduos e subprodutos municipais;
- grupo 5 - Resíduos e subprodutos agrícolas e florestais.

De acordo com estes critérios e verificadas as compatibilidades técnicas, os materiais poderiam ser distribuídos em quatro classes de acordo com a potencialidade de sua aplicação na construção civil (CINCOTTO, 1988):

- classe 1 - materiais com potencial de aplicação máxima;
- classe 2 - materiais com bom potencial de aplicação, mas inferior aos da classe 1;
- classe 3 - materiais com baixo potencial de aplicação;
- classe 4 - materiais com muito pouco potencial de aplicação.

Já a NBR 10004 (1987) classifica os resíduos de acordo com o risco que oferecem em:

- classe I - Resíduos perigosos;
- classe II - Resíduos não inertes;
- classe III - Inertes

As escórias siderúrgicas apresentam-se como resíduos dos que em maior volume são gerados no mundo. Destes, as escórias de alto-forno e de aciaria constituem um pouco mais da metade de todos os outros resíduos metalúrgicos gerados (MASUERO et al., 1998).

A seguir, será feita uma abordagem sobre estas escórias, destacando a sua potencialidade de uso na construção civil.

## 2.1 ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

Escória é uma fase líquida homogênea, formada por um ou mais compostos químicos, de vários óxidos, presente nos processos pirometalúrgicos, que se separa da fase metálica por ser insolúvel e de menor densidade (BITTENCOURT, 1992).

As escórias desempenham uma grande variedade de funções químicas e físicas, sendo desde receptoras de parte de metais e óxidos não reduzidos numa extração primária, até reservatório e absorvedor de impurezas extraídas em processo de refino pirometalúrgico (GALDEANO, 1994). Elas também protegem o metal da oxidação e diminuem as perdas de calor. Em fornos elétricos são, também, frequentemente usadas como resistência para aquecimento (LENZI, 1986).

As escórias de alto-forno são geradas no processo de fabricação do ferro-gusa.

A proporção, em altos-fornos a coque, entre a geração e produção de ferro-gusa é de 0,30 a 0,40 tonelada de escória por tonelada de ferro, dependendo da concentração de ferro do minério. STEEL INDUSTRY AND THE ENVIROMENT (1997) cita 0,324 toneladas de escória por tonelada de ferro.

De acordo com MASUERO et al. (1998), a geração mundial de escória de alto-forno é estimada em 120 milhões de toneladas para uma produção anual de 700 milhões de toneladas de aço.

Dados do IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia (1999), informam que no Brasil são gerados em torno de 5,7 milhões de toneladas de escória de alto-forno por ano.

Dependendo da forma de resfriamento obtém-se o resíduo com características diferentes:

#### **a) Resfriamento brusco em água**

A escória, ao sair do forno, passa por um recipiente onde a água é injetada, depois é vertida num reservatório contendo água. Ela também pode ser pelletizada através de uma canaleta onde circula uma corrente de água. Daí sua forma vítrea com aproximadamente 0,2 mm de diâmetro. Essa escória é comumente chamada de escória granulada (LOUZADA, 1991).

No Brasil, cerca de 88% das escórias de alto-forno são resfriadas de forma granulada. Destas, em torno de 5 milhões de toneladas são utilizados na fabricação do cimento.

#### **b) Resfriamento ao ar**

A escória é vertida em potes e depois lançada em fossas. Dessa forma ela cristaliza-se devido ao resfriamento lento. Após o resfriamento é procedido a britagem em granulometrias variadas.

#### **c) Resfriamento na água ou a vapor**

A escória é vertida num lastro de concreto poroso e saturado, onde é submetida a vários jatos de água sob pressão. Esse processo faz com que a escória incorpore ar e expanda, formando uma estrutura alveolar. Posteriormente é britada e separada em variadas classes granulométricas. A massa específica desta escória varia entre 0,6 a 0,9 kg/dm<sup>3</sup>, sendo, portanto, equivalente a um agregado leve (LOUZADA, 1991).

### **2.1.1 Composição química**

A composição química e a estrutura física das escórias de alto-forno podem variar de acordo com a eficiência de operação do forno, do teor de minérios utilizados e do método de resfriamento.

Na Tabela 1 estão apresentadas as faixas de variação dos elementos químicos que constituem as escórias de alto-forno brasileiras e as faixas citadas na literatura.

**Tabela 1** Composição de escórias de alto-forno (BATTAGIN, citado por CINCOTTO et al. 1994)

Constituintes	Teores citados na literatura (%)	Teores das escórias brasileiras (%)
SiO <sub>2</sub>	23 - 55	30 - 35
CaO	27 - 55	40 - 45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 55	11 - 18
MgO	2 - 12	2,5 - 9
MnO	0,5 - 3	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0 - 2
FeO	0,5 - 2	0 - 2
S	0,4 - 1,2	0,5 - 1,5

### 2.1.2 Utilização da escória de alto-forno na construção civil

A escória de alto-forno pode ter variadas aplicações como matéria-prima para fabricação do cimento, como adição na execução de concreto, como agregado para fabricação de concreto, pré-moldados e pavimentação, como agregado leve na fabricação de concreto e lã de escória para isolamentos térmicos (KRUGER, 1995).

#### 2.1.2.1 Utilização como adição e fabricação do cimento

É atribuído a Lorient a primeira referência do valor hidráulico de uma escória, em 1774. Em 1865 foi lançado, na Alemanha, um ligante hidráulico constituído por uma mistura de cal e escória. Em 1882, também na Alemanha, Prussing possibilitou a fabricação industrial do cimento Portland adicionado com escória. Porém, entre 1880 e 1890 é que as propriedades deste novo produto ficaram mais conhecidas. Entretanto, encontrou muita resistência no meio técnico e por parte dos fabricantes de cimento (COUTINHO, 1997).

A reatividade da escória de alto-forno é a principal propriedade que possibilita a sua utilização como adição. Por sua vez, a reatividade depende da composição química, do teor da fase vítrea e da finura. Busca-se avaliar esta reatividade de maneiras variadas. A NBR 5735 (1991) estabeleceu um critério baseado na seguinte relação:

$$H = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2) > 1 \quad (1)$$

H - índice de hidraulicidade

De acordo com TAYLOR, citado por BAUER (1995), ao entrar em contato com a água é formada em torno do grão da escória uma camada envoltória que é pouco permeável, e para que aconteçam novas reações faz-se necessário que haja dissolução desta camada e dos íons Si e Al da fase vítrea da escória. Isso só é possível em pH elevado. A fase aquosa da hidratação do cimento Portland é um meio bastante apropriado, já que os hidróxidos  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  suprem íons  $\text{OH}^-$  que são necessários para quebra das ligações Si - O e Al - O da fase vítrea.

A escória reage com os hidróxidos alcalinos, em seguida com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento Portland, formando-se C-S-H (NEVILLE, 1997).

A adição de escória de alto-forno pode provocar muitas melhorias nas características do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A mistura é mais coesiva e a fluidez é aumentada, devido a melhor distribuição das partículas de escória e à superfície lisa destas partículas, que absorvem pouca água. A adição de escória proporciona um desprendimento de calor mais lento, devido à velocidade das reações de hidratação. A microestrutura da pasta de cimento hidratada é mais densa, devido a maior formação de C-S-H, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade a longo prazo (NEVILLE, 1997).

A maior densidade da matriz proporcionada pela escória de alto-forno aumenta a resistência do concreto à penetração de cloretos e ao ataque por sulfatos. Também permite maior controle da reação álcali-sílica, devido à redução na mobilidade dos álcalis.

Por outro lado, no que se refere à carbonatação do concreto, alguns estudos mostram que a adição de escória alto-forno aumenta a profundidade de carbonatação. A redução da reserva alcalina é preponderante ao efeito do refinamento dos poros (BAUER, 1995; CEUKELAIRE e NIEUWENBURG, 1993; LITVAN e MEYER, 1986; OSBORNE, 1986).

A escória de alto-forno pode ser moída separada do cimento, à finura adequada e posteriormente misturada em proporções que variam entre 36% e 70%, para formar o cimento Portland de Alto-Forno (CP III), NBR 5735 (1991). Também

pode ser moída em conjunto com o clínquer Portland, em proporções que variam entre 15% e 35% para formar o cimento Portland composto com escória (CPII E), NBR 11578 (1991).

Outro aspecto importante que dá relevância à adição de escória de alto-forno no cimento é o ambiental. De acordo com JOHN (1995), a adição de 65% de escória reduz a energia gasta na produção do cimento de 3,53G J/t para 1,67G J/t, incluindo a energia para secagem e moagem da escória.

Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos com vistas à utilização de escória granulada de alto-forno, moída a uma finura adequada, como material cimentício. Como a escória tem uma hidratação muito lenta, faz-se necessária a adição de um ativador. A ativação consiste na aceleração da dissolução da escória, seguida da precipitação dos produtos hidratados. Os ativadores reagem com os íons solubilizados da escória e modificam a composição química dos produtos hidratados. A velocidade de dissolução depende da área de contato com a solução. Daí a importância da eficiência de moagem da escória (CINCOTTO et al., 1994).

No Brasil, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, foram realizadas algumas pesquisas utilizando escória moída em diversas finuras e a cal hidratada, a soda cáustica e a gipsita, como ativadores. Os resultados indicaram boas possibilidades, desde que se encontre os teores adequados de ativadores (CINCOTTO, 1990).

JOHN (1995) realizou estudos para produção de cimento de escória ativada por silicatos de sódio. Neste estudo foi feita uma profunda avaliação da influência da ativação da escória granulada de alto-forno sobre indicadores de desempenho do cimento. O autor conclui que os cimentos de escória apresentam boas possibilidades de mercado, principalmente em aplicações em que não é recomendável o uso de cimento Portland, por exemplo, em matrizes de baixa alcalinidade para reforço com fibras sensíveis à alcalinidade.

#### 2.1.2.2 Utilização como agregado

As escórias de alto-forno podem ser moídas e graduadas para uso como agregado miúdo ou britadas para serem utilizadas como agregado graúdo. As escórias mais utilizadas para este fim são as de resfriamento lento.

As propriedades do agregado variam com a sua composição e a velocidade de resfriamento. As escórias de resfriamento lento apresentam uma estrutura vesicular ou celular, de massa específica entre 2,0 e 2,8 kg/dm<sup>3</sup> e massa unitária entre 1,12 e 1,36 kg/dm<sup>3</sup>. Situam-se, portanto, na faixa entre o agregado normal e o leve estrutural (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Estes autores chamam à atenção para o fato da escória poder apresentar um teor excessivo de sulfeto de ferro, que poderá ocasionar problemas de manchamento e afetar a durabilidade do concreto. O sulfeto pode se converter em sulfato e possibilitar o ataque ao concreto. Daí as especificações das normas, como as britânicas, por exemplo, que limitam o teor de SO<sub>3</sub> solúvel e de enxofre total como sulfeto nas escórias, em 0,7% e 2%, respectivamente.

Na França, a escória de alto-forno é utilizada como agregado para enrijecimento das camadas de base de pavimentos de estradas e auto-estradas. É utilizado agregado natural, de 5% a 20% de escória granulada e 1% de cal (VENUAT, citado por LOUZADA, 1991).

De acordo com LIMA (1999), algumas das características da escória, como agregado miúdo, já estão normalizadas na França.

CINCOTTO et al. (1994) realizaram estudos com escória resfriada ao ar e britada, como agregado graúdo, utilizando-a, inclusive, em concreto armado na construção de um edifício. Os pesquisadores, relatam que os estudos não avançaram.

SILVA e ALMEIDA (1986) realizaram estudos utilizando escória granulada de alto-forno como agregado miúdo para argamassa e concreto. Os resultados indicaram que o desempenho da escória é compatível com o da areia.

SCANDIUZZI e BATTAGIN, citados por CINCOTTO (1994), desenvolveram estudos utilizando escória de alto-forno granulada, como agregado miúdo, para produção de argamassa, em comparação com argamassas produzidas com areia natural e com areia normal brasileira, NBR 7214 (1982). Os resultados mostraram que a argamassa com escória apresenta resistência menor nas primeiras idades. Porém ao longo do tempo, esta diferença vai diminuindo. Esse comportamento é explicado devido a maior demanda de água por parte da argamassa com escória. Os autores constataram, também, que a aderência pasta-agregado é maior na

argamassa com escória, em idades mais avançadas. Entretanto, não especificaram estas idades.

Os agregados graúdos de escória são utilizados na construção de lastros de estradas de ferro e base de rodovias, aterros para fabricação de concreto asfáltico e concreto mediamente refratário.

Os agregados de escória de alto-forno são também utilizados na produção de pré-moldados de concreto e argamassa, tais como blocos de alvenaria, pisos intertravados, mourões, canais, entre outros.

As escórias resfriadas sob vapor d'água, que dão origem a agregados leves, que são utilizados para fabricação de concreto leve e enchimento em pavimentações.

As escórias ricas em sílica podem ser refundidas com adição de calcário, dolomita ou cascalho e areia, e resfriadas rapidamente para obtenção de lâ de vidro, utilizada como isolante térmico e acústico (LOUZADA, 1991).

## 2.2 ESCÓRIA DE ACIARIA

As escórias de aciaria são geradas no processo de fabricação do aço, podendo ser oriundas de diferentes processos. Destacam-se as geradas nos conversores a oxigênio (LD) e em fornos elétricos a arco.

As escórias de conversores LD - as iniciais referem-se às aciarias austríacas Linz e Donawitz, que utilizaram pela primeira vez este processo em escala industrial no mundo - são formadas durante as operações de refino do ferro-gusa (RUBIO e CARRETERO, citados por LIMA, 1999).

### 2.2.1 Composição química das escórias de aciaria

As escórias de aciaria LD geralmente são formadas predominantemente por óxidos de cálcio, silício e ferro. Mas sua composição varia em função do tipo de forno, das matérias-primas utilizadas, e tipos de aço fabricados.

Na Tabela 2 está apresentada a composição química básica das escórias de LD que são geradas em alguns países do mundo.

**Tabela 2** Composição química básica das escórias LD geradas em alguns países (LIMA, 1999)

Composto	Brasil (%)	Austrália(%)	China (%)	Espanha (%)	França (%)
CaO	6 - 45	> 35	45	48	47
SiO <sub>2</sub>	7 - 16	<20	10,5	16	13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 - 4	< 5	2,7	1,2	1
FeO	8 - 30	< 25	35	16	25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	Traços	1,05	0,5	2

As escórias de aciarias elétricas são geradas na fusão da sucata, em fornos elétricos a arco e nas operações de refino do aço na metalurgia da panela. Essas escórias geralmente são mais homogêneas e possuem menor quantidade de cal livre, em relação às escórias de conversores.

Na Tabela 3 está apresentada a composição química básica das escórias de aciarias de forno elétrico que são geradas em alguns países do mundo.

Em nível mundial, a geração de escória de aciaria é em torno de 84 milhões de toneladas por ano (MASUERO et al., 1998).

No Brasil, a geração de escória de aciaria, em 1997, foi de 3,2 milhões de toneladas, sendo 68% deste total proveniente do processo LD (GUMIERI, 2000).

**Tabela 3** Composição química básica das escórias de aciaria de forno elétrico geradas em alguns países (GEYER et al., 1994)

Composto	Brasil (%)	EUA (%)	Japão (%)	Itália (%)	Alemanha (%)
CaO	33	41	40	41	32
SiO <sub>2</sub>	18	17	25	14	15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	8	5	7	4
FeO	30	18	19	20	31
MgO	10	10	4	8	10
MnO	5	4	7	6	4
S	-	0,2	0,06	0,1	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,6	-	0,9	1,4

De acordo com ASSIS et al. (1997), são geradas de 70 a 170kg de escória por tonelada de aço líquido.

## 2.2.2 Utilização de escória de aciaria na construção civil

As escórias de aciaria são utilizadas geralmente como agregado, embora alguns estudos têm sido desenvolvidos com vistas a sua utilização como adição ao concreto.

### 2.2.2.1 Utilização como agregado

A escória de aciaria na forma líquida é lançada numa baia para resfriamento. Assim ela se resfria lentamente, solidificando-se de forma cristalina. Em seguida, geralmente, ela é britada para retirada da fração metálica, através de eletro-imã. Após este processo ela é empilhada para ser usada como agregado graúdo.

Devido às suas características mecânicas, as escórias de aciaria vêm sendo empregadas como agregado graúdo para concreto asfáltico, base e sub-base de rodovias, lastro de ferrovias e estabilização de solos. Estas aplicações já são consagradas em vários países. Levantamentos realizados nos Estados Unidos mostram que 77% da escória de aciaria gerada é utilizada em rodovias, estabilização de solos, aterros, lastro de ferrovias e pavimentação asfáltica. No Aeroporto Internacional de Pittsburg, por exemplo, foram utilizadas 600 m<sup>3</sup> de escória de aciaria como agregado para concreto asfáltico à quente (LOUZADA, 1991).

De acordo com publicação do Ministério dos Transportes (1988), em alguns países, a exemplo dos Estados Unidos, Polônia, Inglaterra, França e Rússia, já existem normas sobre o uso de escórias de aciaria.

Dentre as vantagens que as escórias de aciaria apresentam com relação aos agregados convencionais, GUMIERI (2000) destaca menor custo, maior resistência ao desgaste, maior peso próprio, forma dos grãos, conferindo melhor consistência e adesividade às misturas asfálticas, por exemplo.

GUMIERI (2000) cita vários trechos de rodovia em Minas Gerais em que foi utilizada escória de aciaria como base e sub-base.

No Rio de Janeiro, empresas de consultoria de diversas prefeituras no estado têm recomendado a utilização da escória de aciaria para misturas asfálticas à quente, base e sub-base de pavimentação, e como material drenante. Apesar destas recomendações serem acatadas por algumas das prefeituras, de acordo com o Instituto Brasileiro de Siderurgia, a utilização da escória de aciaria ainda é pequena.

Há que se considerar, na utilização da escória de aciaria, o fenômeno da expansão que a mesma apresenta, devido ao teor de óxidos de cálcio e magnésio livres. Estes óxidos, ao hidratarem, formam compostos expansivos.

De acordo com MONTGOMERY e WANG, citados por GUMIERI (2000), a principal causa do aumento de volume verificado na escória de aciaria é o excesso de CaO livre, principalmente na presença de solução sólida contendo pequenas quantidades de FeO (wustita).

MASUERO (1998) apresenta casos de obras, tanto de concreto de cimento Portland como concreto asfáltico, em que se verificou problemas devido à expansão provocada pela escória de aciaria. GUMIERI (2000) também apresenta exemplos de obras que apresentaram problemas de expansão provocados pela escória de aciaria.

Uma recomendação prática que se faz para evitar o problema da expansão da escória de aciaria é submetê-la a um tratamento denominado de envelhecimento. Neste tratamento, a escória é empilhada e exposta ao meio ambiente, durante pelo menos 6 meses, para que os óxidos de cálcio e magnésio possam hidratar-se previamente.

Um grupo de pesquisa vem desenvolvendo, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, no Núcleo Orientado para Inovação da Edificação - NORIE, estudos aprofundados a respeito do fenômeno de expansão. Uma das alternativas que se tem buscado é a alteração do processo de resfriamento, que passaria a ser igual ao executado nas escórias granuladas. Resultados preliminares de estudos desenvolvidos por MASUERO (1998) têm apontado boas perspectivas para sanar o problema da expansão destas escórias, através deste processo.

LIMA (1999) realizou, na Espanha, estudos utilizando escória de aciaria de forno elétrico, como agregado miúdo e graúdo para concreto. Os resultados mostraram um melhor desempenho, quanto às resistências mecânicas, dos concretos com agregado de escória em relação ao agregado convencional. Foram realizados ensaios de durabilidade: ataque por sulfatos, carbonatação, efeitos da água do mar e reação álcali-agregado. Os concretos com agregado de escória apresentaram bom desempenho frente a estes ensaios.

LOUZADA (1991) estudou a utilização de escória de aciaria como agregado na produção de blocos de concreto para alvenaria de vedação. Foram estudadas

várias misturas, com diferentes proporções de escória de aciaria e escória de alto-forno. Os melhores resultados foram alcançados para mistura de 62% de escória de aciaria e 32% de escória de alto-forno. Os resultados obtidos foram compatíveis com as especificações das normas brasileiras.

#### 2.2.2.2 Utilização como adição ao concreto

MURPHY et al., citado por GUMIERI (2000), dizem que apesar de algumas escórias de aciaria possuírem os mesmos elementos do cimento Portland, a variabilidade na sua composição química dificulta o seu uso como adição ao cimento. Segundo estes autores, as escórias vítreas, obtidas através do resfriamento brusco, possuem boas propriedades cimentícias quando hidratadas. Vários outros pesquisadores (MONTGOMERY e WANG, 1991; DUDA e BAUWESEN, 1987; GUTT e NIXON, 1972; dentre outros) estudaram as propriedades cimentícias das escórias de aciaria.

No Brasil, MASUERO (1998) vem estudando a escória de aciaria de forno elétrico como adição ao concreto. Os resultados preliminares mostram um bom desempenho dos concretos com adição, quanto às propriedades mecânicas (MOURA et al., 1999).

GEYER et al. (1997) estudaram a influência nas propriedades do concreto da substituição de 5% de cimento por escória de aciaria de forno elétrico. Foi verificado um bom desempenho quanto à resistência à compressão. Aos 28 dias, a resistência do concreto com adição de escória chegou a ser 24% superior à do concreto sem adição.

Na UFRGS - NORIE, alguns pesquisadores vêm desenvolvendo estudos sistemáticos com vistas à utilização de escória de aciaria de forno elétrico e de conversores, como adição ao concreto. Nestes estudos, os aspectos relativos à durabilidade estão sendo contemplados.

Vale salientar que a possível heterogeneidade da escória, devido ao processo de geração, justifica que não sejam feitas generalizações a respeito de seu uso, necessitando que sejam realizados estudo de suas características antes da aplicação.

### 3 ESCÓRIA DE COBRE

Acredita-se que o cobre foi o primeiro metal a ser utilizado pelo homem, por volta de 13.000 a. C. Foi utilizado como ferramenta, arma e objeto de decoração. As pesquisas relatam que as primeiras descobertas importantes do cobre aconteceram na região entre os rios Tigre e Eufrates, ao Norte do Golfo Pérsico (PROCOBREBRASIL, 2000).

A primeira designação dada pelos Romanos para o cobre foi "Aes Cyprium", fazendo uma alusão à primeira fonte do metal ("Cyprus – Chipre"). Depois o nome passou para "Cuprum", com o símbolo "Cu".

As maiores minas de cobre do mundo estão localizadas no Chile, Estados Unidos, Canadá, Rússia e Zâmbia. (PROCOBREBRASIL, 2000).

No Brasil, a primeira mina foi descoberta em 1874, em Caraíba, sertão da Bahia. O cobre eletrolítico passou a ser produzido em 1982, pela Caraíba Metais, em Dias D'Ávila, na Bahia.

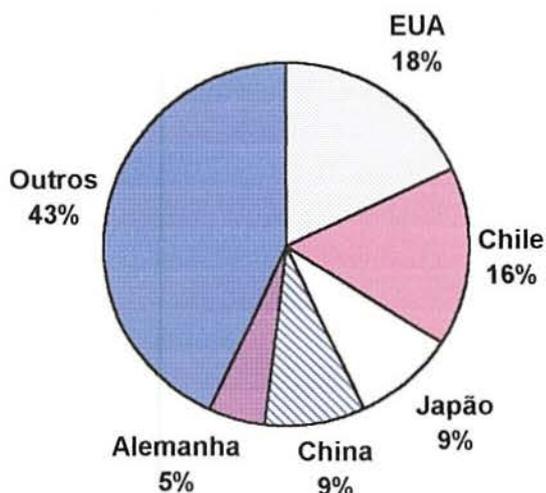
O cobre metálico tem sido um dos elementos mais utilizados desde a idade do bronze. Atualmente o cobre se destaca como sendo uma das três maiores demandas metálicas mundiais, juntamente com o aço e o alumínio.

A atividade de produção do cobre gera volumes significativos de escória durante o processo de transformação das matérias-primas em produtos acabados. Neste capítulo será discutido o processo de geração da escória, a destinação que é dada a este resíduo e os estudos que vêm sendo desenvolvidos para utilização da escória de cobre.

#### 3.1 GERAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE

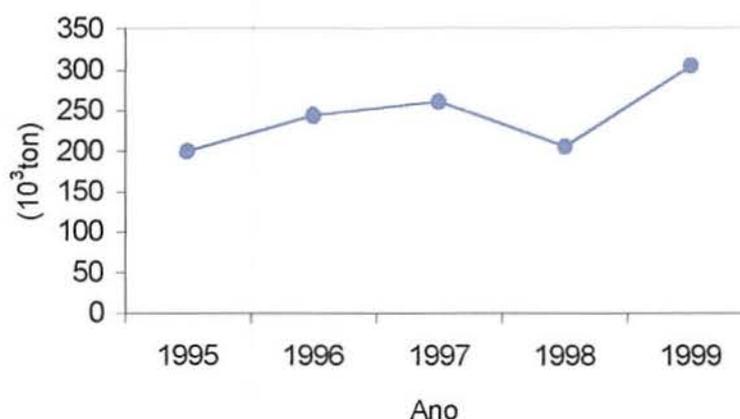
Em nível mundial, estima-se que a geração anual de escória de cobre é em torno de 13.000.000 toneladas (PROCOBREBRASIL, 2000). Deste total, cerca de 2,5 milhões de toneladas são geradas anualmente na América do Sul.

Nos Estados Unidos é gerado mais de 1 milhão de toneladas (ARIÑO e MOBASHER, 1999). Na Figura 1 está apresentado o gráfico com os maiores geradores de escória no mundo (SINDICEL, 2000).



**Figura 1** Maiores geradores de escória de cobre, no mundo (SINDICEL, 2000)

No Brasil, o beneficiamento do cobre é realizado pela CARAÍBA METAIS, empresa situada no Polo Petroquímico de Camaçari, na Bahia. A Figura 2 ilustra as quantidades de escória de cobre geradas no Brasil, nos últimos 5 anos.



**Figura 2** Geração de escória de cobre no Brasil<sup>1</sup>

Estima-se que a quantidade depositada no pátio da metalúrgica é em torno de 4 milhões de toneladas.

O minério extraído contém entre 1% a 2% de cobre. Após a extração, britagem e moagem, o minério passa por células de flotação que separam a parte rica em cobre (cerca de 30%). A matéria-prima básica é o concentrado sulfetado de

<sup>1</sup> Dados fornecidos por técnicos da CARAÍBA METAIS

cobre, que sempre está associado a outros minerais sulfetados de elementos como: chumbo, zinco, ferro, arsênio (PROCOBREBRASIL, 2000).

A matéria-prima na Caraíba Metais é estocada separadamente em baias e depois transportada para silos para proceder a mistura entre os diferentes concentrados. A quantidade de cada concentrado é definida com vistas a se alcançar uma composição média de elementos principais, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4** Composição média dos elementos principais no Forno Flash (BITTENCOURT, 1992)

<b>ELEMENTO/COMPOSTO</b>	<b>PORCENTAGEM</b>
Cobre - Cu	27 – 32
Ferro - Fe	20 – 24
Enxofre - S	25 – 28
Sílica - SiO <sub>2</sub>	10 – 15
Óxido Cálcio - CaO	0,6 - 1,5
Alumina - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2 - 2,5
Magnésia - MgO	0,5 - 1,2

De acordo com BITTENCOURT (1992), o processo de geração da escória de cobre se dá da seguinte maneira:

- a) juntamente com os concentrados é adicionado o fundente (sílica), cuja finalidade é estabilizar a escória, evitando que esta volte a ser solubilizada;
- b) a mistura dos concentrados e do fundente ("blend") possui uma umidade elevada (em torno de 8%), sendo necessária a sua secagem para facilitar a homogeneização e evitar gastos de energia térmica no forno. A secagem se dá num forno rotativo a uma temperatura de 600 °C, reduzindo a umidade a 0,2%;
- c) o "blend", após a secagem, é injetado no forno "Flash Smelter". A injeção se dá sob alta pressão por aspersor (queimador lateral de óleo BPF), com ar enriquecido (39 a 65% de oxigênio). A finalidade da queima do óleo é suprir perdas térmicas do processo;
- d) no forno "Flash Smelter" as reações se dão a uma temperatura de 1350°C. Os sulfetados são oxidados parcialmente, dando origem às fases "mate" e escória. A escória é uma fase composta por óxidos refratários (oriundos

dos concentrados, conforme mostra a Tabela 4, óxido de silício (adicionado como fundente) e óxidos das impurezas oxidadas (ferro, zinco, chumbo, arsênio). O "mate" é uma fase composta predominantemente por sulfetos de cobre e ferro (não oxidados), níquel, cobalto, bismuto, chumbo e zinco;

- e) o "mate" é conduzido, através de vazamento, para conversores que também recebem "mate" do forno elétrico. Os conversores são divididos em duas fases: sopro de escória e sopro de cobre. Nos conversores, o restante das impurezas e do ferro da fase "mate" se oxidam, indo para a fase escória. A nova escória formada é vazada e transportada para o forno elétrico, enquanto o "cobre blister" é transportado para o forno de refino;
- f) o forno elétrico foi introduzido para retirar o máximo possível de cobre da escória. O forno elétrico utiliza a redução de pressão parcial de oxigênio da escória, com a adição de redutores como: carbono (coque, carvão, grafite), sulfetos (piritas, concentrado), óleo. Na Caraíba, o redutor utilizado é o coque. No forno elétrico acontecem as duas fases: escória e "mate". Os sulfetos constituem a fase mate, enquanto que os óxidos e silicatos formam a escória. O principal constituinte da escória é o ostosilicato, conhecido como faialita, formado pela reação do óxido de ferro (wustita) com o fundente (sílica), de acordo com a equação 2.



A sílica estabiliza o íon ferroso, daí a formação da faialita, que é bastante estável até 1300 °C (ELLIOTT e LURASCHI, citados por BITTENCOURT, 1992).

Após as reações se processarem com a ajuda de um redutor, e a agitação produzida por indução em volta dos eletrodos, as furas (bicas) de vazamento são abertas e o forno é esvaziado. A escória, ao fluir pela calha, recebe um fluxo de água sob pressão e é resfriada rapidamente, solidificando-se em forma de pequenas esferas irregulares e de dimensões variadas.

A escória, após a granulação, passa por um peneiramento para retirada de grãos de dimensões superiores a 6,3 mm.

Existem, ainda, as unidades auxiliares no processo de produção do cobre:

- Caldeira - tem a função de resfriar os gases que saem do "Up Take" ("Flash Smelter"), reduzindo a sua temperatura de 1300 °C a 350 °C. Na caldeira, os gases, ao saírem do "Up Take", têm a sua velocidade reduzida, fazendo com que as partículas arrastadas pelo fluxo de gás se precipitem. As partículas são transportadas para os silos, para reprocessamento;
- Unidade de Ácido Sulfúrico - incorporado ao sistema para manter o dióxido de enxofre, nos gases lançados à atmosfera, dentro dos padrões permitidos pela legislação ambiental.

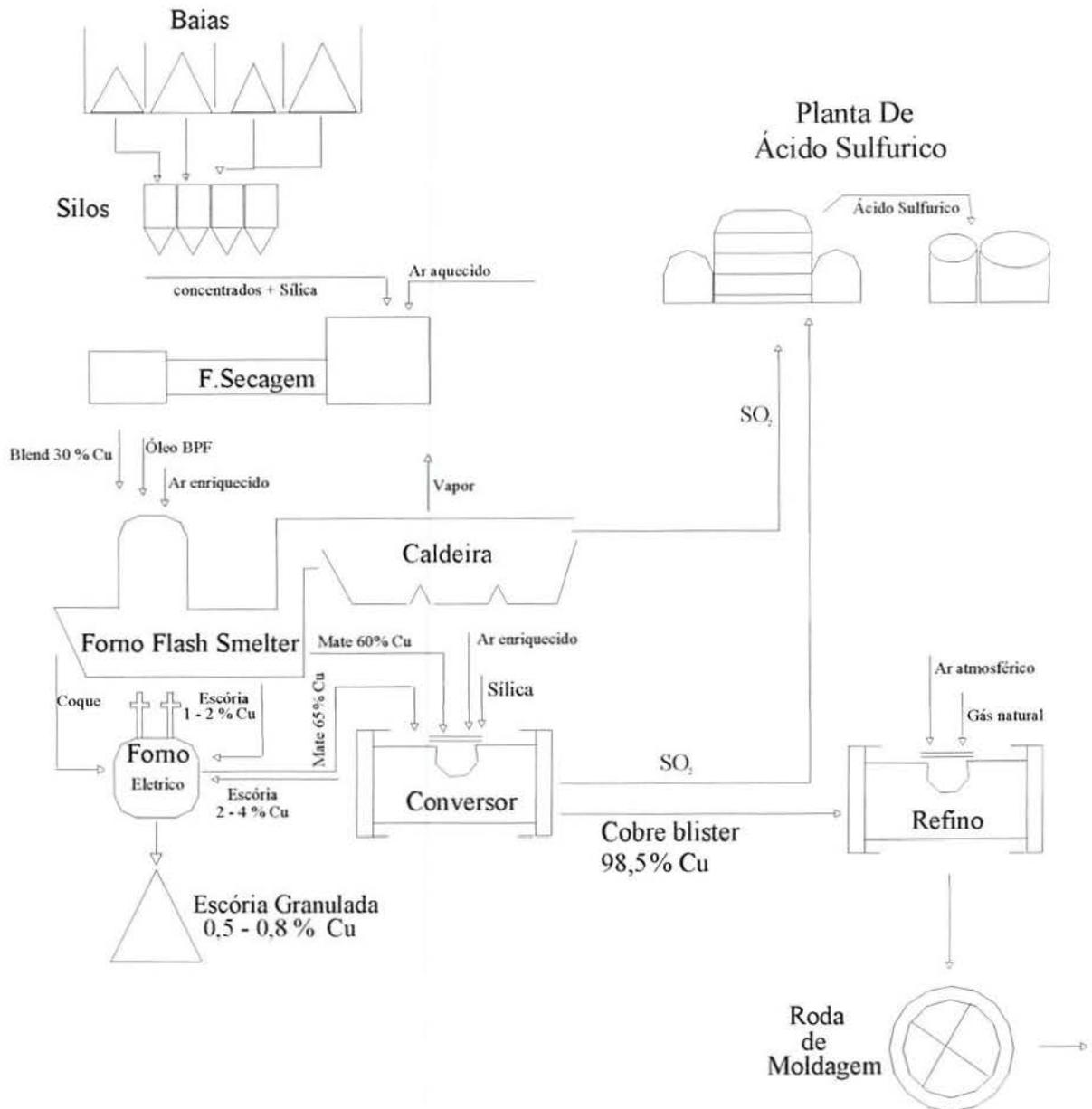
A Figura 3 ilustra o fluxograma de produção do cobre metálico e geração da escória de cobre.

### 3.2 PROPRIEDADES DA ESCÓRIA DE COBRE NA FASE LÍQUIDA

SEHNALEK, citado por BITTENCOURT (1992), relata que o óxido de ferro (FeO), formado na reação dos sulfetos é miscível (principalmente com o FeS), logo é bastante solúvel. A solubilidade é reduzida com a adição de um fundente, dentre eles a sílica, o óxido de cálcio e carbonatos de sódio, bário e lítio. Os fundentes formam as escórias ferríticas, exceto a sílica.

Na escória, as ligações são predominantemente iônicas, imiscíveis e de baixa solubilidade com os sulfetos. A massa específica da escória, a 1300 °C, é 3,6 g/cm<sup>3</sup>, enquanto a massa específica do "mate" é de 4,5 g/cm<sup>3</sup>. Daí a separação por decantação entre as duas fases imiscíveis (YAZAWA, citado por BITTENCOURT, 1992).

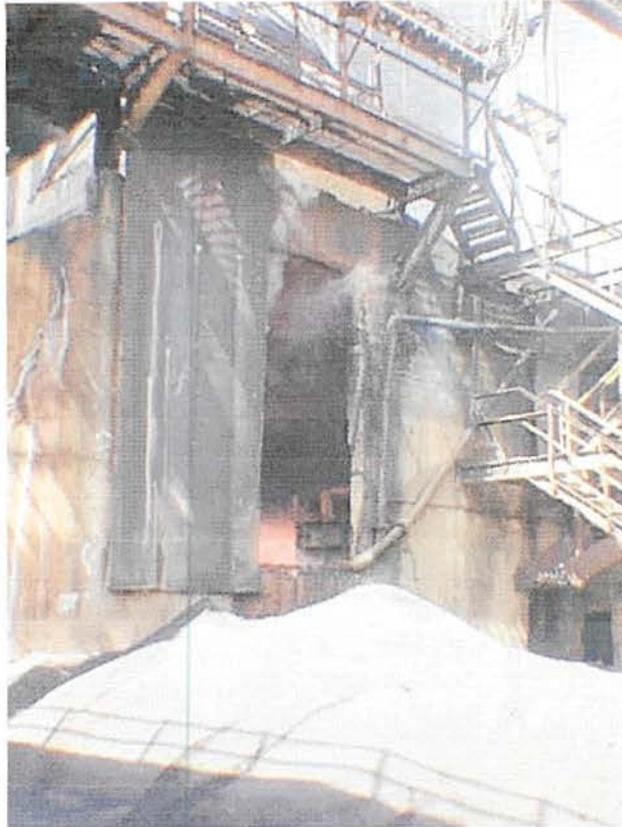
A propriedade mais importante da escória na fase líquida é a viscosidade. Uma escória muito viscosa tem dificuldade de ser vazada e a separação da fase "mate" é demorada. Por outro lado, uma escória muito fluida apresenta problemas no momento do fechamento das furas (bicas). A viscosidade é influenciada pela temperatura e composição do teor de óxidos ácidos formadores de rede (silício, fósforo, boro e alumínio) e dos óxidos básicos modificadores de rede (sódio, lítio, bário, ferro, cálcio, magnésio e manganês). Uma escória muito ácida não tem boa fluidez. Quanto maior a temperatura, menor a viscosidade (TOGURI, citado por BITTENCOURT, 1992).



**Figura 3** Fluxograma da produção de cobre metálico (BITTENCOURT, 1992)

A Figura 4 mostra um aspecto da unidade onde a escória é granulada.

Segundo MACKAY e MASSON, citados por BITTENCOURT (1992), “a escória gerada no processo da Caraíba Metais é formada por silicatos fundidos com ligações entre cátions e oxigênio, formando uma rede tridimensional polimerizada. Os cátions ficam dispersos na rede e sofrem uma forte repulsão mútua. Esta rede silicatada tridimensional é bastante rígida, provocando uma forte viscosidade à temperatura de trabalho. Os óxidos refratários básicos presentes nos concentrados (Tabela 4) têm a propriedade de quebrar as ligações rígidas da rede de silicatos, formando metasilicatos ( $\text{CaSiO}_2$ ,  $\text{MgSiO}_2$ ) e deixando a escória mais fluida”.



**Figura 4** Aspecto da área de granulação da escória de cobre

A difusão dos elementos na fase escória é 10 vezes mais lenta do que na fase "mate". Quando as reações se processam entre as fases "mate" e escória, a etapa controladora é a difusão na fase escória.

De acordo com estudos realizados por BITTENCOURT (1992), uma boa escória, do ponto de vista metalúrgico, deve ter as seguintes características:

- boa fluidez;
- baixa solubilidade de "mate" e cobre;
- boa tolerância à faixa de variação do processo;
- dar boa estabilidade às impurezas;
- ser formada a temperaturas próximas das de trabalho;
- não deve exigir pressão parcial de oxigênio além da requerida pelo sistema;
- estar líquida à temperatura de trabalho do "mate" ou do metal.

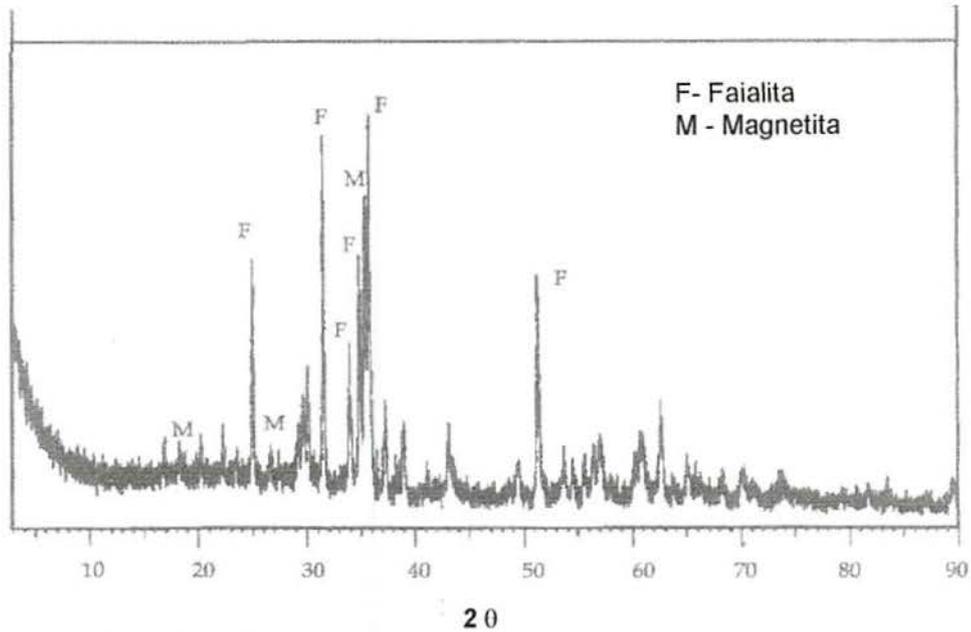
A presença de cobre na escória de descarte é bastante considerável (em torno de 1%). De acordo com estudos realizados por BITTENCOURT (1992), através de consulta bibliográfica, em escórias temperadas com resfriamento lento, a presença de cobre pode cair para 0,5% e com resfriamento bastante lento cai para até 0,1%. Verificou-se, também, que a adição controlada de óxido de cálcio melhora a fluidez das escórias ferríticas, minimiza a perda de cobre incluso pela queda da viscosidade, e do cobre solubilizado.

### 3.3 UTILIZAÇÕES DA ESCÓRIA DE COBRE

Através de levantamento bibliográfico realizado, verificou-se que são muito poucos os trabalhos publicados a respeito da utilização de escória de cobre. Foi feita uma consulta através do PROCOBREBRASIL (2000), e a informação que se tem é que praticamente todo volume de escória gerado é depositado nos pátios das metalúrgicas geradoras. Uma pequena quantidade vem sendo utilizada como abrasivo em alguns países como Singapura e Tailândia (PAN ABRASIVES, 2000). Também no Chile, que é o segundo maior produtor de cobre do mundo, a escória vem sendo depositada a céu aberto e um pequeno volume vem sendo comercializada como abrasivo (TECNOLOGICAL CENTER, 2000).

No Canadá, 45% do uso de escória é como base para construção, lastro de ferrovias e aterros (ARIÑO et al., 1996).

Nos Estados Unidos, que é o maior produtor mundial de cobre, a escória praticamente não é utilizada. Muito pouco é reciclado em base de rodovias. Entretanto, alguns estudos vêm sendo realizados no sentido de viabilizar a sua utilização (ASU BARZIN MOBASHER, 1999). BRAJA et al. (1983) estudaram as propriedades geotécnicas e a toxicidade para água subterrânea da escória de cobre procedente do Texas. Os resultados mostraram que as características físicas da escória são compatíveis com as de uma areia média, inclusive, sem riscos do ponto de vista da toxicidade da água. ARIÑO e MOBASHER (1999) pesquisaram, na Universidade Estadual do Arizona, a utilização de escória de cobre como substituição de parte do cimento para argamassa e concreto. Na Figura 5 está apresentado um difratograma da escória utilizada pelos referidos pesquisadores.



**Figura 5** Difratograma da escória de cobre utilizada por ARIÑO e MOBASHER (1999)

Observa-se que a estrutura da escória é, tipicamente, cristalina, com a presença de cristais de faialita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) e magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Nos seus estudos, ARIÑO e MOBASHER produziram concretos com 5%, 10% e 15% de escória em substituição ao cimento, em massa. A relação água/(cimento+escória) utilizada foi 0,40. Os autores concluíram que o teor de 15% de substituição, aumentou a resistência à compressão axial do concreto em 8,7%.

No Brasil, praticamente todo o volume gerado é depositado numa área da Caraíba Metais, formando imensas pilhas de escória. Apenas uma pequena quantidade é transportada para o Rio de Janeiro onde é utilizada em estaleiros, como abrasivo, para jateamento de chapas metálicas, o que implica num alto custo, devido ao transporte (MOURA et al., 1995).

SILVA (1994) desenvolveu uma pesquisa utilizando os resíduos da escória empregada como abrasivo no jateamento de estaleiros no Rio de Janeiro, como agregado miúdo para argamassa e concreto e pré-moldados. Os resultados mostraram que as argamassas produzidas com a utilização de escória de cobre como agregado miúdo apresentaram um melhor desempenho em relação às convencionais, chegando a aumentar em 7% a resistência à compressão axial. O desempenho deste resíduo no concreto também foi comparável ao da areia. No que se refere à utilização desta escória na fabricação de pré-moldados, os resultados

foram satisfatórios, levando em consideração as especificações das normas brasileiras.

Em 1993 foi iniciado, na Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS, com o apoio da Caraíba Metais, um estudo com o objetivo de verificar possíveis aplicações da escória de cobre na construção civil. Foram realizados ensaios de caracterização da escória de cobre e misturas com vistas a sua utilização como agregado miúdo para concreto e argamassa, mistura betuminosa pré-misturada a frio, base para pavimentação e colchão drenante. Entretanto, devido a algumas limitações dos laboratórios da UEFS, naquele período, o estudo ficou restrito a características físicas e mecânicas (MOURA et al., 1995). Os resultados deste estudo serão apresentados, a seguir, no sub-item 3.3.1.

### **3.3.1 Estudo preliminar da utilização da escória de cobre brasileira como agregado miúdo**

Para realização dos ensaios foi constituído como sendo um lote, o volume de 6 m<sup>3</sup> de escória de cobre bruta enviada pela Caraíba Metais aos Laboratórios de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana. A escória de cobre enviada foi devidamente acondicionada em silos cobertos para evitar a contaminação por outro material.

As amostras para realização de ensaios foram coletadas do lote de acordo com a NBR 7216 (1987) e NBR 9941 (1987).

Inicialmente foram realizados os ensaios de caracterização da escória de cobre com vistas a sua utilização como agregado para argamassas, concretos, pré-misturado a frio, escória-asfalto, base para pavimentação e colchão drenante. Em seguida foram elaboradas misturas com escória de cobre e realizados os ensaios para avaliar o comportamento das mesmas.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização.

**Tabela 5** Características da escória de cobre bruta

<b>Característica</b>	<b>Resultado</b>
Dmáx (mm)	4,8
Módulo de Finura	3,48
Material pulverulento (%)	0,47
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	3,864
Massa Unitária (kg/m <sup>3</sup> )	2,23

Os resultados indicaram que as características da escória são compatíveis com as de uma areia grossa, excetuando as suas massas específica e unitária que são muito mais elevadas.

### **Qualidade do agregado miúdo**

Apesar da escória de cobre satisfazer todas as exigências da NBR 7211 (1983), foram realizados também ensaios comparativos de resistência à compressão axial de corpos-de-prova de argamassa, para avaliar o desempenho da escória de cobre como agregado. Estes ensaios foram realizados de acordo com a NBR 7221 (1987).

Foram elaborados dois traços de argamassa: um traço 1:3,0, em massa, com relação a/c 0,48, utilizando areia padrão (produzida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT/SP) e outro traço equivalente em volume, utilizando a escória de cobre bruta em substituição à areia. A resistência à compressão da argamassa com utilização de escória de cobre chegou a ser 25% superior à da argamassa com areia padrão.

#### **3.3.1.1 Dosagem e fabricação de concreto**

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização da escória de cobre, foi elaborado um traço de concreto com a utilização da escória de cobre como agregado miúdo, para avaliar o seu desempenho. O concreto foi dosado com base na método da ABCP, para atender um fck de 18 MPa, que é um valor comumente utilizado na Região de Feira de Santana.

Durante a fabricação do concreto com escória de cobre como agregado miúdo, observou-se que a mesma provocava segregação, devido à sua massa específica. Para minimizar esse efeito foi utilizado aditivo incorporador de ar.

Depois de executadas várias misturas, definiu-se que o traço que apresentou melhores resultados foi 1:3,400:3,891 (cimento, escória de cobre, brita 19 mm), relação a/c 0,50 e teor de incorporador de ar 0,04%. A trabalhabilidade, foi definida através do ensaio de abatimento, fixado em  $70 \pm 10$  mm. Na Tabela 6 estão apresentadas as características do concreto produzido.

**Tabela 6** Características do concreto

Característica	Concreto no estado fresco	Concreto no estado endurecido
Slump (mm)	70	-
Ar incorporado (%)	9	-
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	2,70	2,66
Resist. compressão - 7 dias (MPa)	-	17,1
Resist. compressão - 28 dias (MPa)	-	24,8

O resultado de resistência à compressão aos 28 dias atendeu à especificação. Por outro lado, a massa específica do concreto com escória de cobre é superior a do concreto com areia.

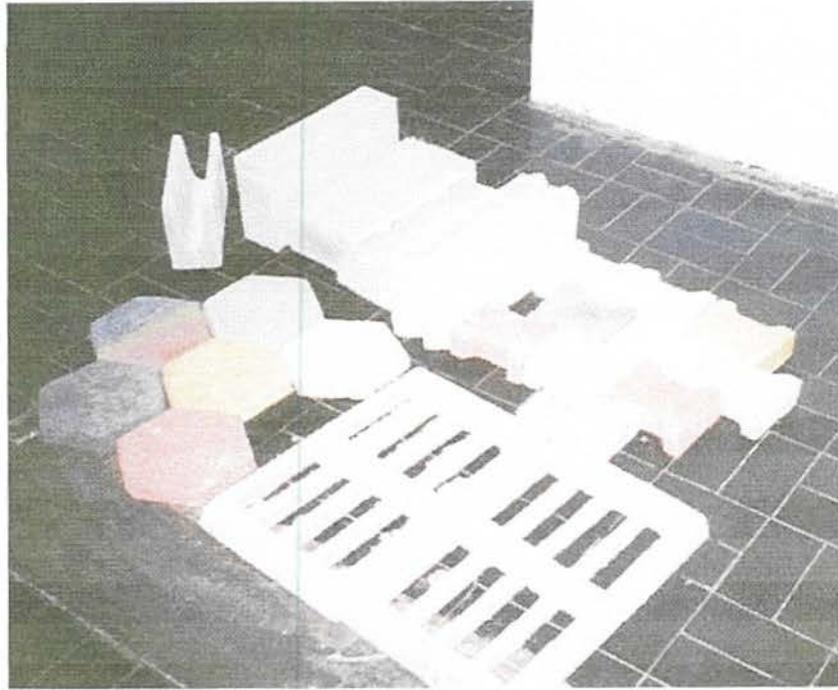
### 3.3.1.2 Utilização na fabricação de peças pré-moldadas

Com base na prática dos fabricantes de pré-moldados, foram desenvolvidos diversos traços de argamassa e concreto com escória. Após vários ajustes, o traço de argamassa que apresentou melhores resultados foi 1:5,0 (cimento, escória de cobre) e relação a/c 0,37. Este traço apresentou um bom aspecto e facilidade de desmoldagem. A resistência à compressão média da argamassa aos 7 dias foi de 28,5 MPa e aos 28 dias foi de 32,2 MPa. Foram fabricados com argamassa, blocos para alvenaria, blocos calha, elementos vazados, blocos para lajes pré-moldadas, lajotas e pisos articulados.

O traço de concreto com escória de cobre que apresentou melhores resultados foi 1:3,647:4,05 (cimento, escória de cobre, brita 19 mm) e relação a/c 0,53. A resistência à compressão média dos corpos-de-prova de concreto aos 7 dias foi de 24,6 MPa e aos 28 dias foi de 29,1 MPa. Foram fabricados com este concreto, estacas, placas (50x50)cm, lajotas e pisos articulados.

Além do bom desempenho da argamassa e concreto com relação à resistência à compressão, as peças pré-moldadas apresentaram um ótimo aspecto.

A Figura 6 mostra alguns elementos pré-moldados, fabricados com a utilização de escória de cobre como agregado.



**Figura 6** Elementos pré-moldados fabricados com utilização de escória de cobre como agregado miúdo

### 3.3.1.3 Utilização em base e sub-base de pavimentação

Foram realizados ensaios com escória de cobre, caracterizando-a para utilização em base e sub-base de rodovias.

Os resultados encontrados nos ensaios de análise granulométrica via úmida, realizados na escória de cobre são bastante semelhantes aos encontrados pelo método definido na NBR 7217 (1987). Estes resultados indicam que, para muitas aplicações, deverão ser feitos ajustes na granulometria.

Pelo método do picnômetro a escória de cobre apresentou massa específica de  $3,86 \text{ kg/dm}^3$ .

Com base nos resultados de caracterização, foram realizados ensaios de compactação na escória de cobre bruta. Verificou-se que a água exsudava facilmente, e como não havia adesão entre grãos, tornava-se inviável sua aplicação como base sem uma mistura com solo. Foram realizadas misturas de escória de cobre e solo areno-argiloso, que é o tipo de solo comum na região da metalúrgica. As misturas foram feitas em variadas proporções, para avaliação da massa específica aparente máxima e a correspondente umidade ótima, através do ensaio

de compactação, pelo método do Próctor Intermediário (NBR 7182, 1986). Verificou-se, a partir destes resultados, qual o Índice de Suporte, de cada uma das misturas.

A mistura que apresentou o maior índice de suporte foi 65% de escória de cobre e 35% de solo areno-argiloso. Esta mistura apresentou o suporte de 74%, superior ao estabelecido pelo DNER (DNER - ME50, 1979) que admite o suporte mínimo de 40% para base de pavimentação.

O índice de suporte da mistura de brita, escória de cobre e solo areno-argiloso foi de 77%, considerado um excelente suporte para base de pavimentação.

#### 3.3.1.4 Utilização como agregado miúdo para asfalto pré-misturado a frio (pmf)

Foram realizados diversos traços de pré-misturado a frio com a utilização de escória de cobre para avaliar o seu desempenho.

As misturas, embora atingissem resultados que atendem às especificações do DNER, apresentaram segregação devido à elevada massa específica da escória de cobre. Para minimizar o efeito da segregação da escória de cobre, foram elaboradas misturas com a utilização de escória de ferro-cromo como agregado graúdo, já que as duas possuem massa específica próximas. Foram utilizados também dois tipos de emulsão: ruptura lenta (RL-1C) e ruptura média (RM-1C).

Embora as duas misturas atendessem as recomendações do DNER, a que apresentou melhores resultados foi a mistura com (RL-1C). Nas duas misturas não houve segregação. A escória de cobre foi submetida ao ensaio de adesividade (DNER - ME59, 1979) e os resultados foram satisfatórios.

#### 3.3.1.5 Utilização em misturas com asfalto

A mistura areia-asfalto é comumente empregada em alguns casos de tratamento de vias de acesso com volume de tráfego pequeno.

Foi verificada, também, a possibilidade de aplicação da escória de cobre misturada com emulsão com diversas proporções. Embora a escória apresentasse uma ótima adesividade não foi possível realizar ensaios Marshall (DNER - ME107, 1979) nas misturas, uma vez que os corpos-de-prova desagregaram a 60°C.

### 3.3.1.6 Utilização como agregado para colchão drenante

A permeabilidade é uma característica muito importante para definir a utilização do solo em várias aplicações, como por exemplo em camada drenante.

Foram realizados ensaios de permeabilidade na escória de cobre e o resultado do coeficiente de permeabilidade médio foi de 0,038 cm/s. Este resultado, associado à massa específica da escória, aponta para um bom desempenho como colchão drenante e camada estabilizadora em pavimentos de paralelepípedo.

Através de convênio com a Secretaria Municipal de Obras de Feira de Santana - Ba, foi aplicada a escória de cobre como colchão drenante de pavimento de paralelepípedo, num trecho experimental de 70 m de extensão, em uma das principais avenidas da cidade (Getúlio Vargas). O trecho experimental foi executado em dezembro de 1993, e deveria ficar em observação ao longo dos anos. Entretanto, após 4 anos, foram feitas intervenções no trecho, inviabilizando a observação a longo prazo. Até aquele momento, o trecho apresentava um bom desempenho.

As partes envolvidas no convênio para estudo da utilização de escória de cobre consideraram satisfatórios os resultados, já que apontaram possibilidades de aplicação em várias áreas da construção civil. Entretanto, o uso da escória como agregado, em substituição total da areia, no concreto e argamassa implicaria num aumento no custo de produção devido ao aditivo incorporador de ar, utilizado para minimizar o efeito da segregação.

Vale salientar que a avaliação da utilização de escória de cobre como agregado miúdo para concreto foi feita com base, apenas, nos resultados de resistência à compressão axial.

## **4 DEFINIÇÃO DAS APLICAÇÕES PARA ESCÓRIA DE COBRE E DOS PARÂMETROS A SEREM AVALIADOS NO PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Um resíduo pode apresentar possibilidade de aplicação em várias áreas. Entretanto, deve-se escolher as que se apresentam mais viáveis do ponto de vista técnico, ambiental e econômico. Neste sentido, a escolha do tipo de aplicação que poderá ser dada ao resíduo deverá levar em consideração as suas características físico-químicas, de maneira que possam ser utilizadas da melhor forma possível.

Dentre as variadas possibilidades de aplicação de resíduos na construção, as mais frequentes são como agregado e como adição ao concreto. A primeira por requerer dos resíduos apenas características mais comuns, e a segunda por proporcionar maior valor agregado ao material.

Para definição da possível aplicação da escória de cobre, foi realizada a sua caracterização do ponto de vista químico, físico e ambiental, conforme apresentado a seguir.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE**

#### **4.1.1 Coleta da amostra**

Do volume de escória gerado ao longo da semana na Caraíba Metais foi coletada uma amostra, de acordo com a NBR 10007 (1987), de 2500 kg de escória granulada. Depois da coleta, a amostra foi acondicionada em recipientes plásticos, que foram enviados para os laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A escória utilizada em todos os ensaios deste estudo foi retirada desta amostra.

#### **4.1.2 Características químicas e físicas**

O conhecimento da composição química da escória é de fundamental importância para um melhor entendimento das reações que acontecerão a partir da sua utilização. A determinação da composição química da escória foi realizada nos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

A caracterização da escória bruta foi feita através dos ensaios de determinação da composição granulométrica (NBR 7217, 1987), determinação do teor de materiais pulverulentos (NBR 7219, 1987), determinação da massa unitária

(NBR 7251, 1982) e determinação da massa específica (NBR 9776, 1987). Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 7** Composição química da escória de cobre brasileira

Composição Química (%)	Escória de Cobre
SiO <sub>2</sub>	26,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55,0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	7,0
CaO	2,0
MgO	2,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,3
Na <sub>2</sub> O	1,1
K <sub>2</sub> O	0,6
TiO <sub>2</sub>	0,5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
MnO	0,1
CuO	1,4
ZnO	1,0
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1
SnO <sub>2</sub>	0,1
MoO <sub>3</sub>	0,4
PbO	0,1

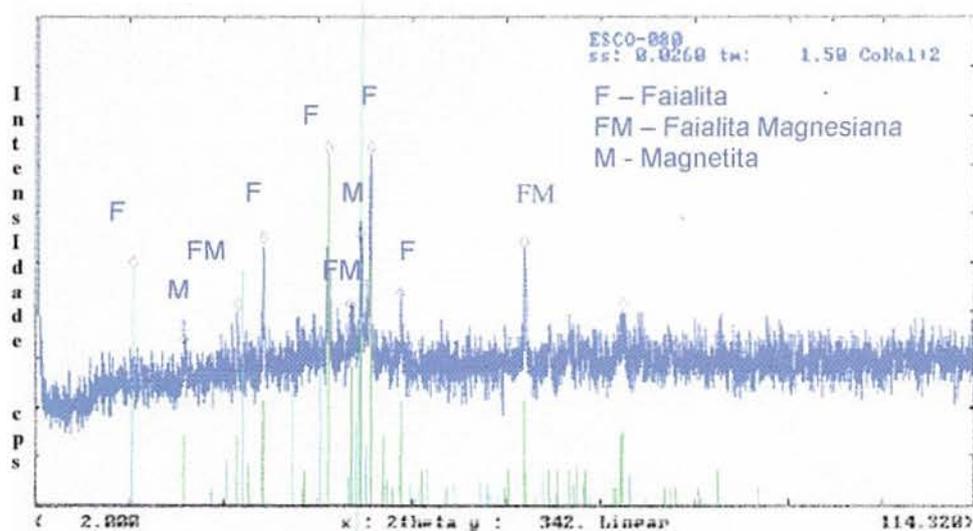
A massa específica da escória foi, também, determinada de acordo com a NBR 9937 (1987), cujo o resultado foi 3,870 g/cm<sup>3</sup>, confirmando o resultado obtido pelo método da NBR 9776 (1987).

Para identificação da estrutura do material, utilizou-se a técnica de análise de difração de raio X (DRX). Este ensaio foi realizado nos laboratórios de Geociências da UFRGS. A Figura 7 apresenta o difratograma de raio X de uma amostra de escória de cobre. Observa-se uma grande incidência de picos, o que indica que a estrutura da escória é, predominantemente, cristalina, embora apresente um discreto halo de amorfização. O difratograma mostra a presença de compostos do grupo das olivinas (Faialita e Faialita Magnésiana) e a magnetita. De acordo com BITTENCOURT (1992), a escória de cobre é composta por silicatos muito estáveis, formados em altas temperaturas, principalmente a Faialita (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), Faialita Magnésiana ((FeMg)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) e Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), conforme discutido no capítulo 3. Observa-se que este difratograma é bastante semelhante ao da escória estudada por ARIÑO e MOBASHER (1999), apresentado na Figura 5, capítulo 3.

**Tabela 8** Características da escória de cobre bruta

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
9,5	-
6,3	1
4,8	3
2,4	18
1,2	51
0,6	84
0,3	92
0,15	96
< 0,15	100
Dimensão máxima característica (mm)	4,8
Módulo de finura	3,4
Material Pulverulento (%)	0,51
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	2,25
Massa específica - estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	3,870

Foram realizadas análises através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons secundários para avaliar a morfologia das partículas que compõem a escória de cobre. Os ensaios de microscopia foram realizados no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS. Na Figura 8 (a) e (b) são apresentadas duas imagens de microscopia da escória. Observa-se que os grãos, originalmente, possuem a forma esférica, com superfície lisa e sem poros. A imagem (b) mostra que, após a moagem, muitas partículas permanecem com a forma esférica.

**Figura 7** Difratograma da escória de Cobre



**Figura 8** Micrografia eletrônica de varredura por elétrons secundários da escória de cobre: (a) – um grão original (ampliação 104x); (b) – vários grãos após moagem (ampliação 208x)

#### 4.1.3 Lixiviação e solubilidade

É de fundamental importância a avaliação do impacto que o resíduo possa provocar no meio ambiente (CAVALCANTE e CHERIAF, 1996). Para classificação da escória quanto ao aspecto ambiental, foram realizados ensaios de lixiviação (NBR 10005, 1987) e solubilidade (NBR 10006, 1987), de acordo com as prescrições da NBR 10004 (1987).

Os ensaios de lixiviação e solubilidade foram realizados nos laboratórios da FEEMA - RJ, cujos resultados estão apresentados na Tabela 9 e na Tabela 10, respectivamente.

**Tabela 9** Resultados dos ensaios de lixiviação

Elemento	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Fenóis (mg/l)*	0,05	-
Fluoreto (mg/l)*	0,16	150,0
Arsênio (mg/l)*	< 0,002	5,0
Cádmio (mg/l)*	< 0,01	0,5
Chumbo (mg/l)*	< 0,01	5,0
Cobre (mg/l)	0,69	-
Cromo total (mg/l)*	< 0,05	5,0
Mercúrio (mg/l)*	< 0,0001	0,1
Prata (mg/l)	< 0,05	5,0
Vanádio (mg/l)	0,04	-
pH inicial	5,6	-
pH final	5,0	-

\* Substância considerada tóxica

**Tabela 10** Resultados dos ensaios de solubilidade

Elemento	Quantidade	Limite (NBR 10004, 1987)
Cloreto (mg/l)*	< 1	250
Nitrogênio nitrato (mg/l)	0,05	10
Cianeto (mg/l)*	< 0,01	0,1
Dureza (mgCaCC3/l)	16	500
Fenóis (mg/l)*	< 0,001	0,001
Fluoreto (mg/l)*	0,22	1,5
Sulfato (mg/l)	11	400
Alumínio (mg/l)	< 1	0,2
Arsênio (mg/l)*	< 0,002	0,05
Bário (mg/l)*	<1	1,0
Cádmio (mg/l)*	< 0,001	0,005
Chumbo (mg/l)*	< 0,01	0,05
Cobre (mg/l)	0,5	1,0
Cromo total (mg/l)*	< 0,05	0,05
Ferro (mg/l)	0,75	0,3
Mercúrio (mg/l)*	< 0,0001	0,001
Manganês	< 0,05	0,1
Zinco (mg/l)	0,62	5
Prata*	< 0,05	0,05

\* Substância considerada tóxica

Pode-se observar que não foi lixiviado nem solubilizado, acima dos limites da norma, nenhuma substância considerada tóxica. Como foi solubilizado teor de ferro acima dos limites da norma, o resíduo pode ser classificado como Classe II – não inerte.

A partir da análise das características químicas e físicas da escória bruta, pode-se vislumbrar duas possíveis aplicações:

- como agregado miúdo para concreto;
- como adição para concreto, considerando que praticamente 90% da composição química é resultante do somatório Si + Fe + Al, podendo a escória ser considerada potencialmente pozolânica. Tal propriedade deve ser avaliada através de ensaios específicos, uma vez que o difratograma de raio X apresenta estrutura predominantemente cristalina.

As características da escória bruta são compatíveis com as de um agregado miúdo para concreto.

#### 4.1.4 Determinação da atividade pozolânica

Para definir a possível aplicação da escória como adição ao concreto foi levado, em consideração a sua composição química, que aponta como sendo um material pozolânico. A avaliação da possível influência da escória de cobre nas reações de hidratação da pasta de cimento foi feita através do ensaio de determinação de atividade pozolânica, de acordo com as prescrições da NBR 5752 (1992). Optou-se pela determinação da atividade pozolânica com cimento Portland por ser mais realista, segundo ZAMPIERRI (1989); MASSAZA e COSTA (1997).

As especificações da NBR 12653 (1992), do ponto de vista das características químicas para materiais pozolânicos, estão apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11** Exigências químicas para materiais pozolânicos (NBR 12653, 1992)

Característica exigida	NBR 12653	Escória de cobre
(SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) – mín. (%)	70	84,3
SO <sub>3</sub> – máx. (%)	5	0
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O – máx. (%)	1,5	1,1
Perda ao fogo	6,0	
Umidade – máx. (%)	3,0	0,2

A atividade pozolânica é determinada a partir da relação entre resistência média à compressão axial, aos 28 dias, de corpos-de-prova de uma argamassa com 35% de substituição em relação ao volume absoluto do cimento pelo material supostamente pozolânico e a resistência média à compressão axial de corpos-de-prova de uma argamassa sem substituição. O cimento utilizado foi o Portland CP I S 32.

A escória foi moída em moinho de bolas horizontal, em jarro de 1000 ml. A carga foi de 780 g de bolas de alumina para 780 g de amostra. Depois de 60 minutos de moagem, a escória foi peneirada na peneira # 0,075 mm. Adotou-se este tempo com base num trabalho anterior em que se verificou que os grãos da escória apresentaram tamanho inferior a 75µm.

A granulometria da escória, após peneiramento, foi determinada num granulômetro a difração laser, modelo 1064, no laboratório de Processamento de Minerais da UFRGS. O diâmetro médio foi de 27,2 µm. A incidência de grãos com diâmetro inferior a 45 µm foi de 68%. A NBR 12653 (1992) estabelece um limite mínimo de 66%.

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados do ensaio de determinação da atividade pozolânica da escória de cobre com cimento Portland.

**Tabela 12** Resultados do ensaio de atividade pozolânica da escória de cobre com cimento Portland

Argamassa	Água requerida (%)	Consistência (mm)	a/(c+esc)	Resistência Média (MPa)	Índice de Atividade (%)
65% CP I S + 35% escória cobre	98	227	0,45	31,2	87
CP I S	100	226	0,50	35,8	100
Especificações NBR 12653 (1992)	< 110	225 ± 5		-	≥ 75

Os resultados dos ensaios indicam que a escória de cobre atende às especificações de uma pozolana classe E, de acordo com a NBR 12653 (1992).

Foi realizado, também, o ensaio de determinação da pozolanicidade baseado no método químico de determinação da pozolanicidade de cimento pozolânico, NBR 5753 (1991), cujos resultados estão apresentados na Tabela 13. Este ensaio foi realizado nos laboratórios da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC.

**Tabela 13** Resultados do ensaio de determinação da pozolanicidade da escória de cobre (NBR 5753, 1991)

Amostra	Milimoles (OH <sup>-</sup> /L)	Milimoles (CaO/L)	Pozolanicidade
45% CP I S + 55% esc. Cobre	40,3	8,3	SIM
100% CP I S	53,7	10,2	NÃO

Os resultados do ensaio confirmam que a escória de cobre possui atividade pozolânica.

#### 4.1.5 Considerações sobre as possíveis aplicações da escória de cobre a partir da sua caracterização

As características da escória bruta (granulometria, forma e textura dos grãos) apontam boas perspectivas para sua utilização como agregado miúdo para concreto. Essa aplicação pode se constituir numa vantagem técnica, uma vez que na região onde a escória é gerada, se utiliza uma areia muito fina (módulo de finura igual a

1,78), o que implica em maior consumo de água. Além disso, a granulometria e a forma esférica dos grãos de escória de cobre podem proporcionar uma maior trabalhabilidade dos concretos e argamassas, possibilitando redução na porosidade, aumentando, conseqüentemente, a durabilidade. Por outro lado, as características químicas sugerem a sua utilização como adição mineral para o concreto. Porém, é importante avaliar a influência da escória de cobre, quer seja como adição, quer seja como agregado miúdo, face às propriedades do concreto. Neste sentido serão discutidas, a seguir, as características a serem avaliados no estudo experimental.

## 4.2 DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS PARA AVALIAR A ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO E COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO

### 4.2.1 Características do concreto no estado fresco

É importante destacar que a resistência do concreto é influenciada por aspectos relativos ao processo de produção (mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura), principalmente no que se refere a maior possibilidade de reduzir o volume de vazios. Neste sentido, é fundamental avaliar a trabalhabilidade e massa específica do concreto no estado fresco.

#### 4.2.1.1 Trabalhabilidade

O ACI 116R-90 define trabalhabilidade como sendo “a propriedade do concreto ou da argamassa recém-misturados, que determina a facilidade e a homogeneidade com a qual podem ser misturados, lançados, adensados e acabados” (NEVILLE, 1997). Portanto, a trabalhabilidade é um dos parâmetros mais importantes para definição da dosagem do concreto.

A trabalhabilidade é afetada, principalmente, pelo teor de água da mistura. Entretanto, outros fatores também influenciam, como a dimensão máxima característica, granulometria, forma e textura do agregado. A influência da granulometria está associada à quantidade de água da mistura. Ou seja, existe uma quantidade de água de mistura mais apropriada, para uma determinada granulometria do agregado, para se produzir um concreto mais trabalhável. No que se refere à forma dos grãos, a trabalhabilidade aumenta quando a forma tende à esférica. Já agregados de superfícies lisas, principalmente o miúdo, deslizam mais

facilmente no interior do concreto fresco, melhorando a trabalhabilidade (NEVILLE, 1997).

As adições minerais podem, também, influenciar na trabalhabilidade do concreto. Este efeito pode estar associado ao aumento do volume de material, requerendo parte da água da mistura. Entretanto, a forma das partículas pode anular esta demanda se o teor de adição for pequeno. Teores de 2 a 3% de sílica ativa podem melhorar a trabalhabilidade (MEHTA, 1989). Teores mais elevados reduzem a trabalhabilidade (DAL MOLIN, 1995).

No estudo da utilização de escória de cobre, tanto como adição quanto como agregado, o método de determinação da trabalhabilidade adotado foi o de abatimento do tronco de cone, normalizado pela NBR 7223 (1992), por ser o mais utilizado nos canteiros.

#### 4.2.1.2 Massa Específica

A massa específica pode ser definida como sendo a relação entre a massa do sólido e o volume que ele ocupa, incluindo os poros impermeáveis.

Embora esta característica não seja qualitativa, pode ter uma grande importância, quando os valores extrapolam a faixa usual. Principalmente no que se refere ao transporte e lançamento do concreto e ao dimensionamento de formas e cimbramentos da estrutura.

A massa específica do concreto está diretamente relacionada à massa específica de cada um dos seus componentes e suas proporções na mistura.

Outras características também podem influenciar na massa específica, como a granulometria, forma e textura dos grãos dos agregados. Estas podem proporcionar uma maior ocupação de sólidos no concreto no estado fresco, aumentando, desta forma, a sua massa específica. Portanto, a determinação desta característica tem maior importância quando um dos materiais apresenta massa específica bastante superior aos convencionais, como é o caso da escória de cobre.

Neste estudo, a massa específica do concreto no estado fresco foi determinada de acordo com a NBR 9833 (1987).

## 4.2.2 Características do concreto no estado endurecido

O estudo da utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo para o concreto foi desenvolvido levando em consideração a influência na massa específica, nas propriedades mecânicas e em aspectos relacionados com a durabilidade do concreto. A seguir serão discutidas estas características.

### 4.2.2.1 Massa específica

No concreto no estado endurecido, a sua massa específica tem grande relevância, principalmente para o dimensionamento dos elementos estruturais.

Assim como no concreto no estado fresco, a massa específica do concreto no estado endurecido é influenciada pela massa específica dos seus componentes e as proporções na mistura. A granulometria, forma e textura dos grãos também podem influenciar, já que podem proporcionar uma melhor distribuição, ocupando o máximo de espaço no interior do concreto, reduzindo a porosidade e, conseqüentemente, aumentando a massa específica.

Neste estudo a massa específica foi determinada de acordo com a NBR 9778 (1987).

### 4.2.2.2 Propriedades mecânicas

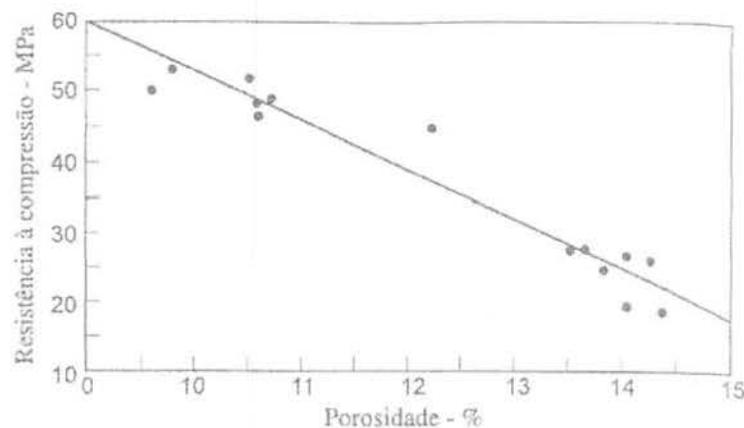
O desenvolvimento da resistência do concreto está normalmente associado às reações de hidratação da pasta.

A resistência do concreto geralmente é considerada como sendo o parâmetro mais importante. No projeto estrutural do concreto o valor da resistência à compressão, aos 28 dias, é mundialmente aceito como um índice da resistência (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Isso se deve, provavelmente, a maior facilidade em aferir esta propriedade.

Considerando o concreto em iguais condições de mistura, lançamento, adensamento, cura e condições de ensaio, a sua resistência é influenciada por: relação  $a/c$ ; relação agregado/cimento; granulometria, forma, textura superficial, resistência e rigidez dos grãos do agregado e dimensão máxima característica do agregado, sendo a relação  $a/c$  um dos principais fatores (GILKEY, citado por NEVILLE, 1997).

NEVILLE (1997) explica que a resistência, para qualquer relação a/c, depende das propriedades físicas e químicas e do grau de hidratação do cimento, da temperatura do ambiente durante a hidratação, do teor de ar no concreto, das variações da relação a/c efetiva, da fissuração devido à exsudação. Influenciam, também, o consumo de cimento na mistura e as condições da interface agregado-pasta de cimento.

MEHTA e MONTEIRO (1994) comentam que a resistência do concreto é influenciada pelo volume e dimensões dos vazios e sua distribuição no interior do concreto, incluindo o ar aprisionado, os poros capilares e os poros do gel. A Figura 9 mostra a relação entre a resistência da argamassa e a porosidade, com base no volume de poros com diâmetro superior a 20nm.



**Figura 9** Relação entre a resistência à compressão e a porosidade, calculada a partir do volume de poros com diâmetro superior a 20nm (SERSALE et al., citados por NEVILLE, 1997)

As adições minerais têm influência bastante significativa na resistência do concreto. Esta influência se dá por ação química e física. Estes materiais podem reagir quimicamente e desenvolver produtos de hidratação, estabelecendo uma maior ligação entre os inertes e ocupando espaços vazios. Por outro lado, as adições minerais, através do efeito fíler, podem contribuir para maior densificação da matriz e da zona de interface agregado-pasta (MALHOTRA e ZHANG, 1996; WEE et al., 1995; NEBASAR e CARETTE, 1986).

Vários pesquisadores têm estudado o efeito de adições minerais nas propriedades mecânicas do concreto (GUMIERI, 2000; ABREU, 1998; IRASSAR et

al., 1988; MEHTA e MALHOTRA, 1996; DAL MOLIN, 1995; ISAIA, 1995; MALHOTRA, 1993; AITCIN, 1992; GJORV, 1988; dentre outros). Os resultados destes estudos têm demonstrado que há influência das adições minerais sobre a resistência do concreto.

ARRIÑO e MOBASHER (1999) utilizaram a substituição de 15% do cimento por escória de cobre no concreto e verificaram que houve um aumento de 8,7% na resistência à compressão axial. Eles atribuíram este desempenho a maior densificação na zona de interface e à atividade pozolânica da escória, verificada através de difração de raio X.

No que se refere ao agregado miúdo, a sua influência na resistência está relacionada, principalmente, à sua granulometria, forma e textura dos grãos. Estas características têm efeito significativo sobre a demanda de água. A textura dos grãos influencia na aderência pasta-agregado. Superfícies mais ásperas desenvolvem maior aderência. Entretanto, este efeito é mais marcante no agregado graúdo (COUTINHO, 1997).

No estudo da utilização da escória de cobre tanto como adição quanto como agregado, foram determinadas as seguintes propriedades mecânicas:

- resistência à compressão, determinada de acordo com NBR 5739 (1994);
- resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 (1994);
- resistência à tração na flexão, determinada de acordo com a NBR 12142 (1991).

#### 4.2.2.3 Aspectos relativos à durabilidade do concreto

Em condições normais de uso e ambientes não agressivos, o concreto tem um longo período de vida útil. Entretanto, o ingresso de agentes deletérios como cloretos, sulfatos e  $\text{CO}_2$  pode provocar a sua deterioração. A adição de subprodutos industriais, tais como cinzas volantes, escórias de alto-forno, sílica ativa, dentre outros, pode influenciar significativamente nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no endurecido.

Além das propriedades mecânicas, é de fundamental importância avaliar o desempenho do concreto no que se refere à sua durabilidade. O comportamento do

concreto quanto à durabilidade pode ser avaliado de acordo com algumas características. Estas características podem ser determinadas através de ensaios. Para definir a possível utilização de escória de cobre, como adição e como agregado miúdo para concreto, foram avaliadas algumas destas características, que serão abordadas a seguir.

#### 4.2.2.3.1 Permeabilidade e absorção do concreto

O concreto apresenta poros de diferentes tipos e tamanhos, distribuídos aleatoriamente na microestrutura. Esta porosidade tem implicação nas propriedades mecânicas e possibilita o ingresso de fluidos capazes de provocar a degradação do concreto. Logo, a facilidade que um determinado fluido tem em penetrar e se deslocar no interior do concreto influi na sua durabilidade.

A penetração de líquidos através de um sólido poroso pode se processar pela ação de pressão diferencial externa (permeabilidade) ou interna (absorção capilar), por gradientes de concentração (difusão) ou pelo efeito de campos elétricos (migração) (HELENE, 1993).

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Logo, é principalmente a porosidade do concreto que controla a circulação da água no seu interior e a taxa de concentração de íons. A água, ao percolar e se difundir através dos poros, carregando os íons agressivos, é quem controla os processos físicos, químicos ou físico-químicos da degradação do concreto.

A estanqueidade e durabilidade dos materiais de construção devem ser avaliadas na estrutura que está em contato com a água para que seja reduzida a possibilidade de penetração de substâncias que ataquem o concreto armado. A permeabilidade do concreto está relacionada com a sua porosidade. Entretanto, a permeabilidade depende do tamanho e da distribuição dos poros e da sua interconexão.

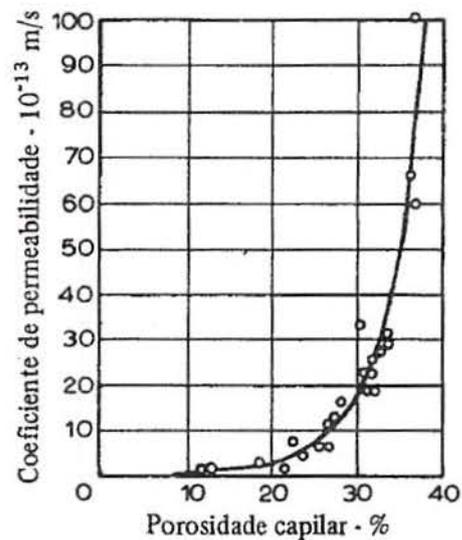
LARRARD e MALIER (1992) colocam que a maioria dos mecanismos físico-químicos que governam a deterioração do concreto são amenizados quando se utiliza concreto com menor permeabilidade à água e ao ar. O que implica em menor mobilidade de íons cloreto, alta resistividade elétrica, menor profundidade de carbonatação, menor fissuração por retração, entre outros. Portanto, para melhorar a

durabilidade do concreto, deve-se reduzir a sua porosidade, para limitar os movimentos da água, íons e gases para seu interior.

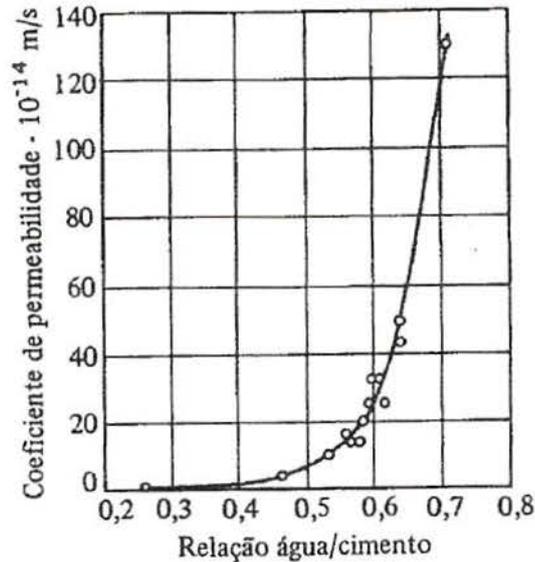
#### 4.2.2.3.1.1 Fatores que influenciam na permeabilidade

A porosidade do concreto é influenciada principalmente pela relação a/c, pela composição química e finura do cimento, pelo grau de hidratação e pelo tipo e teor de adição mineral (OZYILDIRIM, 1994; RASHEEDUZZAFAR, 1992; ZHANG e GJORV, 1991; SOONGSWANG et al., 1991; PLANTE e BILODEAU, 1989).

A relação a/c e o grau de hidratação são os principais fatores que influenciam na maior ou menor facilidade de transporte de líquidos ou gases pelo concreto (porosidade capilar). Assim, a permeabilidade da pasta de cimento é controlada pela porosidade capilar (NEVILLE, 1997). A Figura 10 mostra esta influência. A Figura 11 mostra a influência da relação a/c. Altas relações a/c e baixo grau de hidratação implicam numa alta porosidade capilar da pasta, devido à perda da água evaporável. A saída da água gera um volume de poros conectados, aumentando a permeabilidade do concreto. Por outro lado, com o aumento da hidratação da pasta de cimento, o volume de gel gerado vai ocupando os espaços, ocupados anteriormente pela água, reduzindo a permeabilidade.



**Figura 10** Relação entre permeabilidade e porosidade capilar de pastas de cimento hidratadas (NEVILLE, 1997)



**Figura 11** Relação entre coeficiente permeabilidade e relação água/cimento de pastas de cimento hidratadas (NEVILLE, 1997)

Estudos mostram que as adições minerais têm grande influência na permeabilidade do concreto (FERREIRA, 1999; BUTLER, 1997; NEVILLE, 1997; OZYILDIRIM, 1994; MEHTA e MONTEIRO, 1994; MASSAZZA e COSTA, 1993; BANTHIA, 1989; LUDIRDJA et al., 1989, dentre outros).

De acordo com NEVILLE (1997), a adição de escória de alto-forno ao concreto reduz bastante a permeabilidade do concreto à água, bem como a difusividade, principalmente a íons cloreto. Estes efeitos são atribuídos à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada, devido ao preenchimento dos poros por C-S-H. Por outro lado, BAUER (1995) concluiu que a adição de escória de alto-forno no concreto aumenta a absorção.

BARATA (1998) comprovou que a adição, tanto de sílica ativa quanto de metacaulim, reduz a permeabilidade do concreto.

FERREIRA (1999) concluiu que a adição cinza de casca de arroz aumenta a absorção por sucção capilar.

No que se refere ao agregado, geralmente a sua permeabilidade é menor do que a da pasta. Logo, a permeabilidade do concreto é pouco influenciada pelo agregado. Entretanto, alguns agregados, apesar de apresentarem menor porosidade, possuem maior permeabilidade do que a pasta. Isso pode ser explicado porque além dos poros estarem interconectados, o tamanho destes poros capilares

é bem maior do que os poros da pasta. Outro aspecto interessante é que a permeabilidade é maior quanto maior for o tamanho dos grãos do agregado, devido as características da zona de interface agregado-pasta. Neste sentido, a influência do agregado miúdo está relacionada à sua capacidade de ocupar maior espaço no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

BALL (1998) afirma que o agregado pode ter influência significativa sobre a permeabilidade. Esta influência está associada à possibilidade de reduzir o consumo de água na mistura. Portanto, a granulometria, forma e textura dos grãos do agregado influem na permeabilidade do concreto.

A cura afeta sensivelmente a porosidade, uma vez que se a superfície do concreto secar prematuramente, cria um gradiente de dessecação interna, enquanto as reações não estiverem suficientemente adiantadas. A influência da cura aumenta com a relação a/c e diminui com o teor de cimento (ISAIA, 1995).

#### *4.2.2.3.1.2 Métodos de ensaios*

Os métodos de determinação da permeabilidade à água sofrem restrições quando o concreto apresenta um baixo teor de poros capilares (PERRATRON et al., 1992). Por outro lado, NEVILLE (1997) destaca que os ensaios de permeabilidade avaliam o comportamento do concreto sob pressão, que geralmente não é a força que impulsiona os fluidos no concreto. Daí a necessidade de se aplicar outros métodos de avaliação, relacionados a outros mecanismos de transporte, como a absorção por sucção capilar e a difusão, por exemplo.

De acordo com PARROT (1992), a avaliação da velocidade com que a água é absorvida, por sucção capilar, pelo concreto, pode contribuir para se chegar à durabilidade requerida. GOPALAN (1996) também destaca que a medida da absorção é de grande importância para definir a durabilidade do concreto.

Alguns pesquisadores desenvolveram métodos de ensaio que contemplam a avaliação do fluxo nos poros, ao longo de um período de tempo (McCARTER et al., 1992; HALL, 1989; LEWIS, 1987; HO et al., 1986; FAGERLUND, 1982).

HALL (1989) desenvolveu experimentos e concluiu que a determinação da absorção ao longo de um período de tempo de observação é mais interessante do que expressar a absorção total. Ele concluiu que existe uma relação entre a taxa de absorção e a raiz quadrada do tempo, conforme expressa a equação 3.

$$i = st^{1/2} \quad (3)$$

sendo:

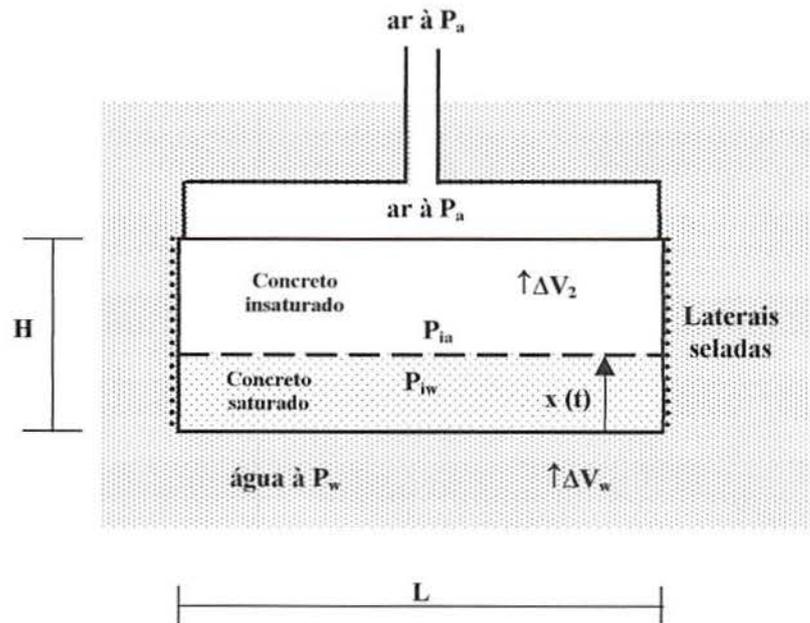
$i$  = absorção acumulada de água por unidade de área da seção transversal, em contato com a água ( $\text{kg/m}^2$  ou  $\text{g/cm}^2$ );

$s$  = taxa de absorção por sucção capilar ( $\text{mm/h}^{1/2}$ );

$t$  = tempo medido no momento da determinação da massa (h, min ou seg).

HO et al. (1986) desenvolveram um ensaio que determina a taxa de absorção capilar a partir do tempo necessário para que a água penetre numa determinada espessura de concreto. A profundidade de penetração é medida na superfície do corpo-de-prova, fraturado à compressão.

KELHAM (1988), para estudar o efeito da cura sobre a taxa de absorção de misturas de concreto, desenvolveu um método que se baseia no princípio de ganho de massa ao longo do tempo. Foram utilizados corpos-de-prova de 50mm de espessura, impermeabilizados nas superfícies laterais e fixada uma placa de PVC com um tubo de plástico na extremidade superior do corpo-de-prova. A finalidade do tubo é fazer o contato com a pressão atmosférica. A Figura 12 mostra o esquema do corpo-de-prova em ensaio.



**Figura 12** Esquema do ensaio de absorção capilar (KELHAM, 1988)

Mede-se o acúmulo de massa do corpo-de-prova submerso, ao longo do tempo. Plota-se, então, os pontos de ganho de massa em função da raiz quadrada do tempo. Depois são traçadas duas retas, a partir destes pontos: uma referente ao período de absorção inicial e a outra no trecho de saturação, quando se observa uma redução no incremento de massa. O ponto de interseção entre estas duas retas, denominado *nick point*, corresponde ao início da saturação do corpo-de-prova. A taxa de absorção é dada pela relação entre a inclinação da reta de absorção inicial e a área da seção transversal do corpo-de-prova.

GOPALAN (1996) sugere que a espessura do corpo-de-prova seja reduzida para 25 mm. Desta forma, pode-se reduzir o tempo de ensaio. GJORV (1994) sugere espessura entre 20 e 30 mm.

No ensaio de absorção por sucção capilar, além da taxa de absorção, é determinada a resistência capilar, que é calculada segundo a equação 4 (GJORV, 1994):

$$R = (\sqrt{t_{\text{cap}}}/e)^2 \quad (4)$$

sendo:

R = resistência capilar (s/m<sup>2</sup>)

$\sqrt{t_{\text{cap}}}$  = valor correspondente ao "nick point" no eixo das abcissas

e = espessura do corpo-de-prova (m)

No Brasil, a absorção do concreto pode ser avaliada através de dois métodos de ensaio normalizados: por imersão, segundo a NBR 9778 (1990); e por capilaridade, de acordo com a NBR 9779 (1990).

Na pesquisa de utilização de escória de cobre, tanto como adição quanto como agregado miúdo para concreto, foram realizados dois métodos de ensaio:

- a) absorção por imersão, de acordo com a NBR 9778 (1990), que avalia o volume de poros total;
- b) absorção por sucção capilar, com base no método de KELHAN (1988), adaptado por GOPALAN (1996), que avalia o fluxo de líquidos através do concreto.

#### 4.2.2.3.2 Carbonatação

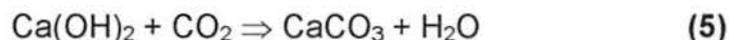
Nas condições de alcalinidade que é conferida ao concreto pelos compostos alcalinos  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{KOH}$ , forma-se uma película protetora de óxidos compacta e contínua, que passiva as armaduras do concreto armado, protegendo-as da corrosão.

Segundo HELENE (1993), pode haver uma despassivação das armaduras devido à ação de elementos agressivos que atuam sobre o concreto, reduzindo a alcalinidade ou quebrando a película protetora.

De acordo com FIGUEIREDO (1993), a carbonatação é uma das principais causas da corrosão das armaduras.

A carbonatação é um fenômeno físico-químico decorrente da reação de gases ácidos ( $\text{CO}_2$ ), ( $\text{SO}_2$ ) e ( $\text{H}_2\text{S}$ ) presentes na atmosfera, com compostos alcalinos ( $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{Ca(OH)}_2$ ), provenientes das reações de hidratação do cimento, principalmente  $\text{Ca(OH)}_2$ , que é gerado em maior quantidade. Entretanto, para que haja a carbonatação, os compostos devem estar dissolvidos (XU et al., 1996).

O fenômeno da carbonatação no concreto gera reações bastante complexas, que envolvem o  $\text{Ca(OH)}_2$  e a decomposição do C-S-H, dos aluminatos e da etringita (KOBAYASHI et al., 1993). A principal reação de carbonatação se dá com o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio, conforme apresentado na equação 5:



A formação do  $\text{CaCO}_3$  pode reduzir o pH do concreto da faixa de 12,6 a 13,5 para a faixa de 8,3 a 9, alterando as condições de estabilidade química que protege as barras de aço do concreto armado.

PARROT (1992) coloca que valores de pH inferiores a 11 já são suficientes para despassivar a armadura.

A carbonatação se dá a partir da superfície, formando uma frente de carbonatação, evidenciando duas zonas de pH: uma com pH superior a 12 e outra com pH inferior a 9. Essa frente avança para o interior do concreto e, ao atingir a armadura, provoca a sua despassivação.

De acordo com PAPADAKIS et al. (1991), a carbonatação envolve os seguintes processos:

- o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que é produzido no processo de hidratação do cimento, é solubilizado pela água existente nos poros, e se difunde para outras regiões de menor alcalinidade;
- o  $\text{CO}_2$ , proveniente da atmosfera, penetra através dos poros do concreto e reage com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e com outros compostos da pasta de cimento solubilizados, na fase aquosa capilar, gerando a carbonatação.

De acordo com TUUTI (1982), no processo de carbonatação tanto o  $\text{NaOH}$  quanto o  $\text{KOH}$  carbonatam-se primeiro e aumentam a solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , facilitando a carbonatação.

Apesar da carbonatação do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ser a que mais interessa, quando se esgota o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , pode haver uma reação secundária, por exemplo, com a sílica das pozolanas e com o C-S-H. Neste caso, além do  $\text{CaCO}_3$ , forma-se também, simultaneamente, o gel de sílica com poros grandes (maiores do que 100 nm), o que facilita a carbonatação subsequente (BIER, citado por NEVILLE, 1997).

A difusão dos íons  $\text{CO}_2$  na pasta de cimento hidratada é o principal fator que controla a carbonatação. Por sua vez, a difusividade é função da estrutura de poros da pasta de cimento durante o período em que ocorre a difusão do  $\text{CO}_2$  (NEVILLE, 1997).

Existem vários modelos que tentam expressar a velocidade de carbonatação no concreto. A equação 6 apresenta um modelo matemático clássico que tem sido adotado para representar e prever o avanço da frente de carbonatação no tempo (HELENE, 1993):

$$e_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2} t^{1/2} \quad (6)$$

sendo:

$e_{\text{CO}_2}$  – espessura da camada carbonatada (mm);

$k_{\text{CO}_2}$  – coeficiente que depende do coeficiente de difusividade, do gradiente de concentração do  $\text{CO}_2$ , e da quantidade de  $\text{CO}_2$  retida ( $\text{mm/ano}^{1/2}$ );

$t$  – tempo de exposição ao  $\text{CO}_2$ , geralmente expresso em anos.

#### 4.2.2.3.2.1 Fatores que influenciam na carbonatação

Os fatores que determinam a carbonatação estão relacionados com as condições de exposição da estrutura, composição química do cimento, composição e execução do concreto. Serão discutidos, a seguir, alguns destes aspectos:

##### **Concentração de CO<sub>2</sub>**

A ação do CO<sub>2</sub> ocorre mesmo com pequenas concentrações. A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera normalmente varia entre 0,03% a 1%, em volume, dependendo do ambiente (SIMS, 1994).

Considerando a lei de Fick, quanto maior for o gradiente de concentração de CO<sub>2</sub>, entre o meio externo e o interior do concreto, maior será a velocidade de penetração da frente de carbonatação.

Vários pesquisadores afirmam que a velocidade de carbonatação aumenta com o teor de CO<sub>2</sub> (LOO et al., 1994; CAHYADI e UOMOTO, 1993, entre outros), principalmente para altas relações água/cimento (KERSNER et al., 1996; UOMOTO e TAKADA, 1993).

MEHTA e MONTEIRO (1994) chamam à atenção de que altas concentrações de CO<sub>2</sub> podem provocar alterações na microestrutura da pasta hidratada, gerando reações indesejáveis. Pode haver, por exemplo, a formação do bicarbonato de cálcio solúvel, ao invés do carbonato de cálcio, como é frequente.

##### **Umidade relativa**

A difusão de CO<sub>2</sub> em meios líquidos é mais lenta do que em meios gasosos. Por outro lado, é fundamental que haja a dissolução do Ca(OH)<sub>2</sub> e do CO<sub>2</sub> para que ocorra a reação de carbonatação. Se não existe, no concreto, o meio aquoso para favorecer esta dissolução, não haverá a carbonatação. Quando a umidade nos poros é muito alta, o CO<sub>2</sub> irá dissolver-se na fase aquosa, antes de difundir-se pelos poros capilares. Porém, a difusão do CO<sub>2</sub> na fase aquosa é tão lenta, que as reações da carbonatação praticamente não afetarão a durabilidade da estrutura. Por outro lado, com umidade muito baixa nos poros capilares, dificilmente haverá dissolução do Ca(OH)<sub>2</sub> sólido e do CO<sub>2</sub>, o que dificulta as reações de carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995).

De acordo com HELENE (1993), as maiores velocidades de carbonatação ocorrem em umidades relativas entre 60 e 85 %. Já para o ACI – COMMITTEE REPORT 201 (1991), este intervalo é entre 50 e 75%. Segundo CEUKELAIRE e NIEUWENBURG (1993), a maior velocidade de carbonatação observada tem sido na umidade relativa de 50%.

### **Temperatura**

Embora se saiba que o aumento da temperatura acelera a velocidade das reações químicas, existem controvérsias quanto ao efeito da temperatura sobre a carbonatação do concreto. ROY et al. (1993) explicam que a temperatura pode influenciar significativamente na profundidade de carbonatação. Segundo estudos desenvolvidos por estes pesquisadores, em ambientes com temperaturas mais elevadas, a profundidade de carbonatação é maior. Este efeito é mais significativo para relações *a/c* maiores (UOMOTO e TAKADA, 1993). Porém, estudos desenvolvidos por LOO et al. (1994), em temperaturas entre 20 e 40°C, a profundidade de carbonatação não é influenciada tão significativamente quanto pela concentração de CO<sub>2</sub>. PAPADAKIS et al. (1991); THOMAS e MATTHEWS, citados por KAZMIERCZAK (1995), também observaram que variações na temperatura entre 20 e 45° C não influenciam significativamente a velocidade de carbonatação.

### **Adições Minerais**

A influência da composição química do cimento na carbonatação do concreto deve-se ao teor de álcalis disponível para a reação de carbonatação, ou seja, a reserva alcalina. Segundo HELENE (1993), quanto maior a concentração de hidróxido de cálcio na solução intersticial dos poros, menor será a velocidade de penetração de CO<sub>2</sub>.

Existe muita polêmica a respeito da influência das adições minerais sobre a carbonatação: se por um lado reduz o pH, por outro densifica a matriz, dificultando a penetração de CO<sub>2</sub>. Alguns pesquisadores, utilizando altos teores de sílica ativa, verificaram que há um aumento na profundidade de carbonatação (GJORV e SAKAI, 1995; TORII et al. 1994). JAWED et al., citados por ISAIA (1995), concluíram que a adição de cinza volante aumenta a profundidade de carbonatação.

Concretos com adição de pozolanas apresentam maior profundidade de carbonatação do que concretos de cimento Portland comum, já que ocorre a redução da alcalinidade, devido à reação da sílica com o Ca(OH)<sub>2</sub>. A adição de sílica

ativa em argamassas aumenta a velocidade e profundidade da frente de carbonatação (PARROT, 1996).

COSTA et al. (1992) destacam que o emprego de escória de alto-forno reduz a permeabilidade ao ar e a difusão, aumentando a durabilidade. Por outro lado, OSBORNE (1986) afirma que teores superiores a 50% de adição de escória de alto-forno aumentam a profundidade de carbonatação. TORII et al. (1994) coloca esta afirmação: os concretos com 50% de adição de escória de alto-forno apresentaram maior profundidade de carbonatação do que os de referência. BAUER (1995) realizou ensaios e embora tenha constatado que a adição de escória de alto-forno provoca um refinamento dos poros, observou um aumento na profundidade de carbonatação. LITVAN e MEYER (1986) também realizaram estudos e concluíram que o aumento da profundidade de carbonatação é, principalmente, devido à redução da reserva alcalina.

De fato, a adição de pozolanas, como a sílica ativa, por exemplo, em teores que não sejam elevados, proporciona redução da porosidade do concreto, dificultando a difusão do  $\text{CO}_2$ . Porém, altos teores de adição deve aumentar a espessura da camada carbonatada, devido à redução da reserva alcalina na pasta. Portanto, existe um limite do teor de adição, abaixo do qual, o efeito da densificação da matriz é preponderante sobre a redução da alcalinidade, diminuindo, desta forma, a espessura da camada carbonatada.

### **Composição do Concreto**

A composição do concreto determina a sua porosidade, a difusividade, a absorção bem como a permeabilidade da pasta endurecida. Logo, influencia na carbonatação (KAZMIERCZAK, 1995).

Segundo LOO et al. (1994), na composição do concreto a relação  $a/c$  tem maior influência na profundidade de carbonatação do que o consumo de cimento. Baixas relações  $a/c$  reduzem a porosidade e dificultam a penetração do  $\text{CO}_2$ . Alguns estudiosos dizem que a carbonatação é função da resistência do concreto. Por outro lado, NEVILLE (1997) afirma que, nem a relação  $a/c$  nem a resistência do concreto proporcionam informações quanto à microestrutura da pasta de cimento endurecida na região da superfície do concreto enquanto está se processando a difusão do  $\text{CO}_2$ . Realmente, para determinados níveis de resistência, é muito mais complexo entender a microestrutura do concreto. Por outro lado, a relação  $a/c$  pode dar uma

idéia bastante razoável. Quanto maior for a relação  $a/c$ , maior será a porosidade do concreto e, conseqüentemente, maior a difusão do  $\text{CO}_2$ .

HELENE (1993) afirma que o consumo de cimento por  $\text{m}^3$  de concreto não influencia na profundidade de carbonatação, já que o teor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na solução dos poros é que governa a passagem de  $\text{CO}_2$ . A concentração de hidróxido de cálcio na solução intersticial dos poros depende principalmente do tipo de cimento, da relação água/cimento e do grau de hidratação do cimento.

De acordo com PAPADAKIS et al. (1991), diferentes teores de agregados num concreto não influenciam significativamente na velocidade de penetração da frente de carbonatação.

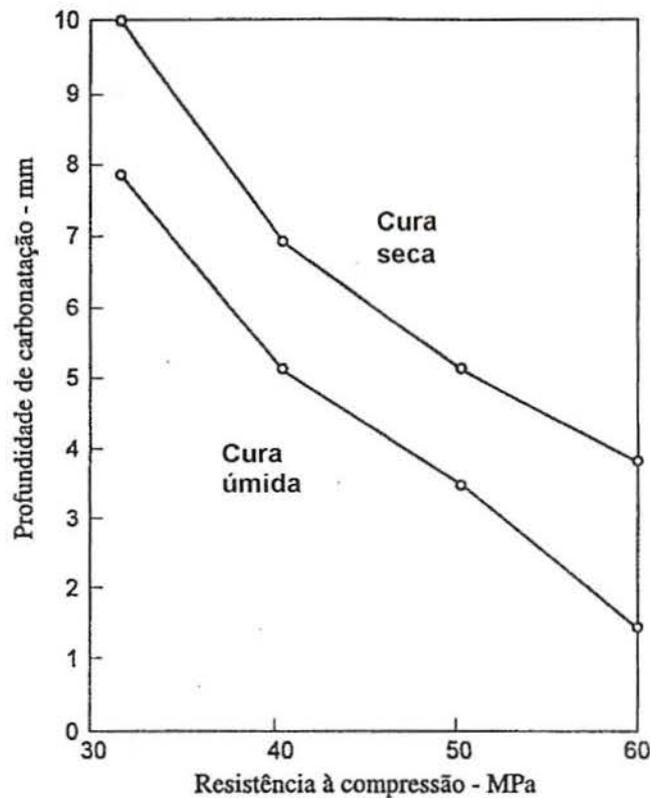
### **Execução**

Dentre os aspectos relativos à execução do concreto, o adensamento e a cura são os principais fatores de influência na propagação da frente de carbonatação. A compactação pode alterar sensivelmente a porosidade do concreto, a partir das falhas, excesso de ar aprisionado e ninhos de concretagem, que facilitam a propagação da frente de carbonatação.

A cura tem efeito marcante sobre a carbonatação do concreto. BASSAT et al., citados por NEVILLE (1997), estudaram o efeito da cura sobre a carbonatação do concreto, em corpos-de-prova cúbicos com resistência entre 30 e 60 MPa, curados durante 28 dias. Os resultados estão representados na Figura 13.

De acordo com HELENE (1993), a suposta desvantagem dos cimentos com adições que possuem menores reservas alcalinas pode ser minimizada com uma boa e prolongada cura úmida.

Outro fator que também influencia na carbonatação é a idade do concreto. Diversos pesquisadores constataram que a profundidade de carbonatação aumenta com o tempo de exposição do concreto (ROY et al., 1993; LOO et al., 1994; PAPADAKIS et al., 1991; MEYER, 1969).



**Figura 13** Relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão de corpos-de-prova, após dois anos (NEVILLE, 1997).

#### 4.2.2.3.2.2 Método de ensaio

Para avaliar a profundidade da frente de carbonatação, alguns estudiosos expõem o material ao ambiente natural. Outros mantêm o material em condições de temperatura, umidade relativa e concentração de  $\text{CO}_2$  controlados. Geralmente, a concentração de  $\text{CO}_2$  é bastante superior à dos ambientes naturais, para que seja acelerado o processo. CEUKELAIRE e VAN NIEUWENBURG (1993) empregaram uma concentração de  $\text{CO}_2$  de 10%, em temperatura de 20 °C e umidade relativa registrada entre 40 e 90 %. KAZMIERCZAK (1995) empregou uma concentração de 100% a uma temperatura de  $20 \pm 2$  °C. Nos seus estudos, ISAIA (1995) utilizou uma concentração de 10% em volume, em condições de umidade relativa de 60 e 70 % e temperatura entre 24 e 28 °C. JOHN (1995) utilizou uma concentração de 5%, em ambiente com temperatura de  $21,5 \pm 1,5$  °C e umidade relativa registrada.

Nos ensaios acelerados para determinação da carbonatação no concreto vários pesquisadores têm utilizado diferentes períodos de exposição dos corpos-de-prova, conforme apresentado na Tabela 14.

Dentre as técnicas laboratoriais que podem ser utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação estão a análise química, difração de raio X, espectrometria por infravermelho, análise térmica diferencial e termogravimétrica e diferença de massa. Entretanto, pode-se determinar a profundidade de carbonatação através de uma técnica de observação visual, a partir da aspersão de indicadores químicos (fenolftaleína, timolftaleína e ácido para-nitrobenzenoazo-salicítico) sobre a superfície recém rompida do concreto. O indicador mais comumente utilizado é a fenolftaleína ( $C_6H_4COOC(C_6H_4OH)_2$ ). Ao serem aspergidas com solução de fenolftaleína, as regiões de pH muito alcalino (acima de 10) apresentam cor vermelho carmim enquanto nas regiões onde houve redução de pH, devido à carbonatação, a solução se mantém incolor (BASSET et al., 1981). A medição da espessura da camada carbonatada deve ser feita alguns minutos após a aspersão da fenolftaleína e com precisão de 0,5 mm. O RILEM, CPC-18 (1988) prescreve este método.

**Tabela 14** Tempo de exposição, profundidade de carbonatação e diferentes concentração de  $CO_2$ , utilizados por vários pesquisadores (ISAIA, 1995).

Autores	Ano	a/c	Cura (dias)	$CO_2$ (%)	U.R. (%)	t ( $^{\circ}C$ )	Tempo de Exposição (semanas)	$e_c$ (mm)
Ho, Lewis	1983	0,53	7	4	50	20	8	7,1
Ho, Lewis	1987	0,50	7	4	50	23	1 e 16	2,8 e 11,2
Dhir et al.	1989	0,50	6	4	50	20	20	11,2
Ohga, Nagataki	1989	0,50	7	7	50	40	1, 4 e 9	4,9; 9,5 e 13,8
Kobayashi, Uno	1990	0,50	7	10	60	20	2, 4, 8 e 16	6,1; 7,7; 10,3 e 12,7
Papadakis et al.	1991	0,50	90	50	65	30	0,1; 0,4; 0,7; 1,4; 2,1 e 2,9	3,0; 5,0; 8,0; 10,0; 12,0 e 15,0
Roper, Baweja	1991	0,49	1	12	50	-	4,3	6,0
Branca et al.	1992	0,50	7	30	75	20	4,3; 8,6 e 17,15	12,5; 19,3 e 25,8
Levy	1992	0,51	2	10	50-70	-	5,14	8,3
Nagataki, Ohga	1992	0,50	7	7	50	40	1; 2; 4; 8 e 20	3,2; 4,1; 5,5; 7,2 e 13,4
Isaia	1994	0,50	7	10	60-70	24-28	4; 8; 12 e 16	7,1; 10; 13,5 e 16,5

No presente trabalho foi utilizado o ensaio de carbonatação acelerada em câmara de concentração controlada de 5% de  $CO_2$ , em ambiente climatizado com

umidade relativa  $68 \pm 2\%$  e temperatura de  $21 \pm 2$  °C. A camada carbonatada foi determinada através do indicador químico fenolftaleína. Este ensaio foi determinado apenas no estudo da escória de cobre como adição ao concreto.

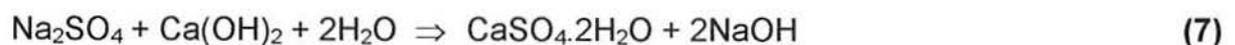
#### 4.2.2.3.3 Ataque por sulfato ao concreto

A água, quando não contém substâncias nocivas, é de grande importância para o concreto, principalmente na fase de cura. Porém, quando contém algumas substâncias químicas, pode reagir com constituintes da pasta de cimento, formando compostos expansivos que geram tensões internas, podendo provocar a fissuração e desagregação, reduzindo significativamente a resistência e rigidez do concreto. Se a ação do ataque for suficientemente forte, poderá comprometer mesmo o concreto de melhor qualidade ao longo do tempo.

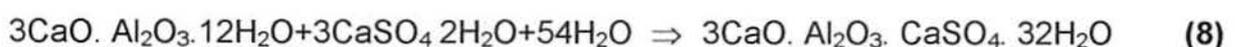
O ataque por sulfatos é uma das principais causas de deterioração. Os sulfatos de magnésio, sódio, potássio, amônia e outros reagem tanto com a cal liberada na hidratação do cimento quanto com os hidratos de aluminato de cálcio. O sulfato de magnésio, além das reações com o hidróxido de cálcio e com os aluminatos, tem uma ação mais intensa que os outros sulfatos e decompõe os silicatos hidratados. A formação de sulfoaluminato de cálcio é característica das reações entre o  $C_3A$  hidratado e as soluções de  $Na_2SO_4$ , para qualquer concentração de  $MgSO_4$  no  $C_3A$  hidratado (DJANIKIAN, 1980, SCHNEIDER e PIASTA, 1991).

As principais reações envolvidas no ataque por sulfatos ao concreto são (COLLEPARDI, 1996):

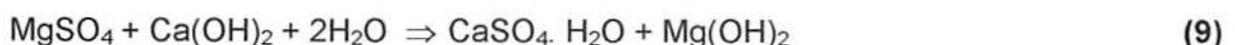
- Ataque do sulfato de sódio ao  $Ca(OH)_2$



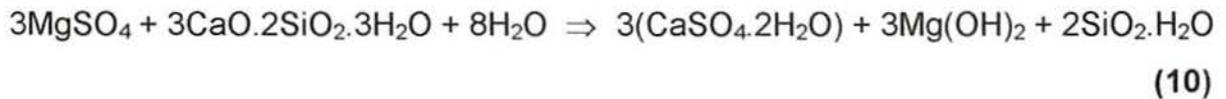
- Reação do sulfato de cálcio com  $C_3A$  formando a etringita



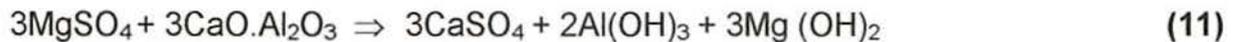
- Ataque do sulfato de magnésio ao  $Ca(OH)_2$



- Ataque do sulfato de magnésio ao C-S-H



- Ataque do sulfato de magnésio ao C<sub>3</sub>A



Nos cimentos com teor de C<sub>3</sub>A variando entre 6% e 12% a etringita é formada em dois períodos: nos primeiros estágios de hidratação (antes de 24 horas), devido ao gesso adicionado ao clínquer; e quando os íons provenientes do meio penetram no concreto e combinam-se com íons cálcio, alumina, sulfato e hidroxila, presentes na solução dos poros. O processo de cristalização da etringita formada neste segundo período pode provocar ações deletérias no concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Ainda de acordo com estes pesquisadores, a etringita pode ser classificada, do ponto de vista da expansão, em dois tipos:

- tipo 1 – são formadas quando as concentrações de íons hidroxila são baixas. Possuem formas alongadas (de 10 a 100 micra de comprimento), e estreita. Sua formação provoca expansões, podendo, também, aumentar a resistência;
- tipo 2 – formadas quando há altas concentrações de íons hidroxila. São caracterizadas por pequenos cristais de 1 a 2 micra de comprimento.

A formação do trissulfatoaluminato (etringita) a partir da combinação do gesso com o C<sub>3</sub>A pode gerar expansões elevadas, provocando a fissuração, fragilização e lascamento das camadas externas, até a completa deterioração do concreto ou argamassa.

MOUKWA (1990) explica que no início do ataque a etringita formada ocupa os espaços na rede de poros capilares, densificando a matriz, sem provocar expansões, podendo aumentar a resistência do concreto. Com a continuidade do ataque, mais etringita é formada e os espaços já não são suficientes para acomodar o aumento de volume. Desta forma, as tensões são geradas e provocam fissuras e, posteriormente, a completa deterioração do concreto.

Os sulfatos geralmente estão presentes na água do mar, em águas subterrâneas, poços de mineração, chuvas ácidas, água de esgoto (ácido sulfúrico),

industriais (ácido sulfúrico) e em águas de drenagem de solos fertilizados (sulfato de amônia).

Os sais sólidos não atacam o concreto; entretanto, quando dissolvidos, podem reagir com a pasta do cimento hidratada.

De acordo com SILVEIRA (1996), o concreto exposto ao ambiente marinho pode sofrer efeitos combinados da ação química dos constituintes da água do mar sobre os compostos hidratados do cimento, da pressão de cristalização dos sais, ação física das ondas, ciclos de molhagem e secagem, ação do congelamento em climas frios e corrosão das armaduras. A combinação destes efeitos provoca deterioração do concreto de maneira mais intensa e mais rápida.

De acordo com COLLEPARDI (1996), geralmente o ataque por sulfatos se dá concomitantemente com outras ações como gelo-degelo, álcali-agregado, ataque por cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), microfissuras térmicas e por retração e cristalização de sais.

Em várias partes do mundo tem-se verificado sérios problemas de ataque por sulfato originados do solo. TUTHILL (1988) cita um caso que ocorreu em 10000 unidades habitacionais na Califórnia, em que o ataque por sulfato, oriundo do solo, foi bastante severo.

Em alguns países, a agressividade do meio é definida em concentrações de sulfatos. Nos Estados Unidos, esta concentração é expressa em ppm de  $\text{SO}_4$  na água ou porcentagem de  $\text{SO}_4$  no solo. Na Tabela 15 estão apresentados os níveis de agressividade fixados.

No Brasil, a norma que trata do projeto e execução de obras de concreto armado (NBR 6118, 1980), embora faça referência a níveis de agressividade, não estabelece uma classificação.

**Tabela 15** Concentrações de sulfato no solo e na água, adotadas nos Estados Unidos (DJANIKIAN, 1980)

Níveis de agressão	Porcentagem de $\text{SO}_4$ solúvel na água nas amostras de solo	ppm de $\text{SO}_4$ nas amostras de água
Desprezível	0 a 0,10	0 a 150
Positivo	0,10 a 0,20	150 a 1000
Grande	0,20 a 0,50	1000 a 2000
Severo	Acima de 0,50	acima de 2000

SILVA FILHO (1994) estabeleceu, com base na literatura, uma classificação dos níveis de agressividade em função das características dos tipos de sais salinitos, conforme apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16** Características dos principais tipos de sais (SILVA FILHO, 1994)

Tipo	Cátion	Cor	Solubilidade	Origem	Agressividade
$K_2SO_4$	Potássio	branca	baixa	água do mar ou subterrânea	Elevada
$NH_4SO_4$	Amônia	branca	alta	fábrica de explosivos, coque indústria químicas	Elevada
$Na_2SO_4$	Sódio	branca	alta	ind. química, leite e água do mar	Elevada
$CaSO_4$	Cálcio	branca	baixa	água subterrânea, escória	Elevada
$MgSO_4$	Magnésio	branca	alta	água do mar e subterrânea	Elevada
$CuSO_4$	Cobre	branca	alta	conservação de madeira, galvanotecnia	Elevada
$FeSO_4$	Ferro	verde	alta	desinfetante, tinturaria	Elevada
$Fe_2(SO_4)$	Ferro	branca	alta	tratamento de água	Elevada
$ZnSO_4$	Zinco	branca	baixa	tinturarias, indústrias químicas	Média
$KAlSO_4$	Potássio	branca	baixa	indústrias químicas	Média
$PbSO_4$	chumbo	branca	muito baixa	indústrias químicas	Reduzida
$CoSO_4$	cobalto	Verme-lha	baixa	-	Reduzida
$NiSO_4$	níquel	verde	baixa	Indústrias químicas	Reduzida

SILVEIRA (1996) também apresentou uma classificação da agressividade do meio em função da concentração de sulfatos, conforme mostrado na Tabela 17, com base nos dados levantados na sua revisão bibliográfica.

**Tabela 17** Classificação da agressividade do meio, em função da concentração de sulfatos, adotada por algumas normas (SILVEIRA, 1996).

Norma	Unidade de SO <sub>4</sub>	Agressividade				
		Nula (a)	Fraca (b)	Média	Forte (c)	Muito Forte (d)
Bureau of Reclamation (1975) <sup>4</sup>	% no solo	0 a 0,10	0,10 a 0,20	-	0,20 a 2,00	2,00 ou mais
	ppm na água	0 a 150	150 a 1500	-	1500 a 10000	10000 ou mais
Cemberau (1978) <sup>5</sup>	mg/l na água do solo	<400	400 a 600	600 a 3000	3000 a 6000	>6000
BRE Digest 250 (1986) <sup>6</sup>	mg/kg no solo	0 a 2400	2400 a 6000	6000 a 12000	12000 a 24000	>24000
	mg/l na água do solo	0 a 360	360 a 1440	1440 a 3000	3000 a 6000	>6000
CETESB L 1 007 (1988) <sup>7</sup>	mg/l na água	*<200	200-350	350-600	600-1200	>1200
		**<250	250-400	400-700	700-1500	>1500
		***<100	100-200	200-350	350-600	>600
CEB (1992)	mg/l na água	<200	200 a 600	600 a 3000	3000 a 6000	>6000

<sup>4</sup> SOBRAL (1990); <sup>5</sup> LAWRENCE (1990); <sup>6</sup> LAWRENCE (1990); <sup>7</sup> SILVA FILHO (1994)

A ação das águas que contenham um teor de sulfato elevado poderá ser controlada por concretos executados com cimentos Portland de Resistência a Sulfatos, de Alto-forno com elevado teor de escórias, Pozolânicos, Aluminosos, Supersulfatados ou, ainda, com cimentos especiais com variados teores de escórias de alto-forno e clínquer isento ou pobre de aluminato tricálcico (DJANKIAN, 1980). Entretanto, ainda que o cimento resistente a sulfatos não contenha C<sub>3</sub>A suficiente para a formação de etringita expansiva, o Ca(OH)<sub>2</sub> e possivelmente o C-S-H são susceptíveis ao ataque tipo ácido pelos sulfatos (NEVILLE, 1997).

#### 4.2.2.3.3.1 Fatores que influenciam no ataque por sulfato ao concreto

Algumas medidas preventivas podem ser tomadas contra os ataques dos sulfatos ao concreto. A qualidade do concreto é a melhor proteção contra o ataque. A espessura adequada da camada de concreto, alto consumo de cimento, baixa relação a/c, compactação e cura adequadas do concreto estão entre os fatores mais importantes (COLLEPARDI, 1996). Corroborando com este ponto de vista, IRASSAR

(1990) afirma que a difusão do íon sulfato através do concreto é controlada pela porosidade e permeabilidade.

De acordo com NEVILLE (1997), a limitação do teor de  $C_3A$  e a redução na quantidade de  $Ca(OH)_2$  da pasta de cimento hidratada são duas medidas preventivas das mais eficientes. Por outro lado, CÄNOVAS (1988) destaca que a ausência de  $C_3A$  produz concretos permeáveis e vulneráveis ao ataque dos cloretos às armaduras.

Existem vários fatores que influenciam na resistência ao ataque do concreto por sulfatos. De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), os fatores são: a quantidade e a natureza do sulfato presente; o nível da água e a sua variação sazonal; o fluxo da água subterrânea e porosidade do solo; a forma da construção e a qualidade do concreto. A seguir serão discutidos alguns fatores.

### **Tipo de Cimento**

Na presença de sulfatos, a existência de altos teores de  $C_3A$  no cimento reduz a durabilidade do concreto. Quanto aos limites destes teores há variações. CÄNOVAS (1988) recomenda entre 6 e 8%. Já LAWRENCE (1990) indica um teor de  $C_3A$  variando entre 3 e 5% para os cimentos resistentes a sulfatos. MEHTA e MONTEIRO (1994) sugerem 5% em condições moderadas de ataque. Daí o surgimento dos cimentos resistentes ao sulfato, fabricados com teor de  $C_3A$  limitado. Entretanto, em condições severas (acima de 1500 ppm), o teor de  $C_3A$  deverá ser o menor possível, mas o seu controle, apenas, não é o suficiente. Já que, embora não haja no cimento uma quantidade de  $C_3A$  para formar etringita expansiva, o  $Ca(OH)_2$  e o C-S-H podem ser susceptíveis ao ataque por sulfatos. Portanto, outra forma eficiente de reduzir o ataque do concreto por sulfatos é a redução de  $Ca(OH)_2$  na hidratação do cimento.

Vários estudos têm mostrado que o uso de pozolanas e escórias de alto-forno tem efeito benéfico, melhorando a resistência ao ataque por sulfatos (BRETANHA, 2000; GHAFoori e ZHANG, 1998; NEVILLE, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 1994; AL-AMOUDI et al., 1994; AKMAN e OZKAN, 1993; entre outros). SILVA FILHO (1994) concluiu que a adição de sílica ativa aumenta a resistência ao ataque por sulfato, para relações a/c abaixo de 0,67. Porém, nem todas as pozolanas contribuem para esta melhoria, pois devem conter um baixo teor de óxido de cálcio. IRASSAR et al. (1988), utilizando cinza volante de baixo teor de óxido de cálcio no

concreto, concluíram que aumenta significativamente a resistência ao ataque por sulfatos. Por outro lado, as cinzas volantes classe C (com teor de CaO entre 10% e 30%) diminuem a resistência ao ataque por sulfato (NEVILLE, 1997).

SILVEIRA (1996) constatou que a adição de 10% de cinza de casca de arroz melhora o desempenho do concreto frente ao ataque por sulfatos. Nos seus experimentos foi verificado que os corpos-de-prova de concreto com adição de cinza de casca de arroz, imersos em solução com 5% de  $\text{NaSO}_4$ , apresentaram resistência à tração por flexão até 28% superior aos de referência.

BRETANHA (2000) utilizou adição de 5 e 10% de cinza de casca de arroz no concreto e constatou que houve um aumento significativo na resistência ao ataque por sulfatos em relação ao concreto sem adição.

Cimentos Portland de alto-forno contendo mais de 70% de escória, cimentos Portland pozolânicos contendo pelo menos 25% de pozolana, e cimento com alto teor de alumina melhoram o desempenho do concreto frente ao ataque por sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

BATTAGIN e ESPER, citados por MARCIANO (1993), colocam que cimentos com escória de alto-forno possuem alta resistência ao sulfato por apresentar baixo teor de  $\text{C}_3\text{A}$  e pequena liberação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Além disso, a baixa permeabilidade da pasta diminui a difusividade iônica dos sulfatos.

### **Dosagem e cura do concreto**

A permeabilidade do concreto é um parâmetro importante para o controle do ataque por sulfatos. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o consumo de cimento e a relação  $a/c$  influenciam muito mais na resistência ao ataque por sulfato do que o teor de  $\text{C}_3\text{A}$ . Portanto, é fundamental especificar a relação  $a/c$  e o consumo mínimo de cimento para se obter um concreto compacto. Quanto maior a relação  $a/c$ , menor a resistência ao ataque.

A cura é outro fator que pode influenciar na resistência ao sulfato. Independentemente do concreto ser produzido com cimento resistente a sulfatos ou com cimento Portland comum, a cura eficiente pode aumentar a resistência ao ataque devido a menor possibilidade de fissuração e uma maior densificação da matriz.

### **Concentração da solução agressiva**

Quanto maior for a quantidade de sulfatos dissolvidos na solução, maior será o nível de agressividade. Porém, existe limite de concentração que é estabelecido pela quantidade de compostos hidratados do concreto disponíveis para reagir. A intensidade do ataque por sulfatos cresce com o aumento da concentração. A rapidez do ataque depende, também, da concentração de sulfato e da velocidade com que é feita a reposição do sulfato removido pela reação com os compostos do cimento.

### **Temperatura da solução**

A temperatura da solução, embora muitas vezes negligenciada, tem influência no nível de ataque do concreto por sulfatos. Segundo LAWRENCE (1990), estudos realizados comprovam que a expansão do concreto, pelo  $\text{Ca(OH)}_2$ , geralmente se reduz com o aumento da temperatura. Isso pode ser explicado devido, provavelmente, ao maior poder de dissolução da água.

#### *4.2.2.3.3.2 Métodos de ensaio*

Como a ação da natureza, no que se refere ao ataque por sulfatos ao concreto, é lenta, muitos pesquisadores têm desenvolvido ensaios acelerados para estudar este fenômeno. Entretanto existem críticas a cada um deles. A ASTM, em todos os seus métodos (C 1012/89; C 452/89), prescreve que os ensaios sejam feitos com argamassa, uma vez que leva muito mais em consideração a resistência química do cimento do que a estrutura física da pasta de cimento endurecida nos concretos. Outro aspecto relevante, destacado por KAYYALI (1989), é que nas argamassas não existem as interfaces pasta/agregado graúdo, que são tão vulneráveis à degradação.

De maneira geral, nos trabalhos de pesquisa a respeito do ataque por sulfatos são avaliados os seguintes parâmetros: variação das resistências mecânicas, variações dimensionais, variação de massa, alterações na estrutura dos poros, alterações no módulo de elasticidade dinâmico e no aspecto visual. São também realizados exames de microscopia eletrônica e difração de raio X para se obter informações adicionais (BRETANHA, 2000; TOUTANJI e EL-KORCHI, 1995; TALERO et al., 1994; MARCIANO, 1993; HARRISON, 1990).

Dentre os diversos métodos para avaliar a resistência ao ataque dos sulfatos estão: LE CHATELIER - ANSTETT com modificações sugeridas por BLONDIAU; ASTM C452/68; MEHTA TEST e o de KOCH e STEINEGGER.

O método de LE CHATELIER - ANSTETT -BLONDIAU (JASPERS, citado por DJANIKIAN, 1980) incorpora 50%, em massa, de sulfato de cálcio ao cimento, e mede o aumento no diâmetro de corpos-de-prova da pasta (diâmetro de 80mm e altura de 30mm) aos 28 e 90 dias. O aumento máximo permitido é 1,25%, sem que haja fissuras.

Pelo método ASTM C 452 (1989), incorpora-se o sulfato de cálcio ao cimento anidro e se mede o alongamento dos corpos-de-prova prismáticos (25x25x285) mm, moldados com argamassa no traço 1:2,75 e relação a/c 0,485. Os prismas, após a desmoldagem, são curados em água a 23 °C até 14 dias de idade, quando são medidos. A expansão máxima admissível é de 0,04%.

O método ASTM C 1012 (1987) estabelece a avaliação através da produção de prismas (25x25x285) mm de argamassa, cujo traço é 1:2,75 e relação a/c 0,485. Os prismas são curados em água, até a argamassa atingir resistência à compressão de 20 MPa (determinada em corpos-de-prova cúbicos, com a mesma idade). Após esta data os prismas são colocados numa solução com 5% de sulfato de sódio e pH entre 6 e 8. São medidas as variações dimensionais em diversas idades, chegando até 12 meses.

O MEHTA TEST (MEHTA e GJORV, 1974) utiliza corpos-de-prova cúbicos de pastas com relação a/c igual a 0,5, colocados em solução de sulfato de sódio a 4%. Neste método a avaliação é feita através da comparação da média de resistência à compressão de 8 corpos-de-prova após cura em água com outros expostos à solução de NaSO<sub>4</sub>. Considera-se o cimento como sendo resistente ao ataque de sulfato se a queda de resistência, aos 28 dias de imersão, for inferior a 20%.

Pelo método de KOCH e STEINEGGER (1960), são confeccionados prismas de argamassa de 1x1x16 cm e imersos em solução agressiva. A resistência ao ataque por sulfatos é determinada por comparação entre as resistências médias à tração na flexão, dos corpos-de-prova imersos em solução agressiva e dos corpos-de-prova imersos em água destilada. As resistências são determinadas em intervalos de 21, 35, 56 e 120 dias.

JASPERS, citado por DJANIKIAN (1980), realizou um estudo comparativo entre estes métodos e concluiu que o de KOCH e STEINEGGER é o que mais se aproxima da prática, além de fazer uso de uma solução agressiva qualquer, sem se prender ao sulfato de sódio. Ele sugere que seja feita a neutralização da solução agressiva, para que as mesmas condições sejam mantidas durante todo o ensaio.

Os parâmetros de resistências expressam melhor o comportamento do concreto frente ao ataque por sulfato, do que os de expansão, uma vez que a resistência é mais sensível à fissuração/expansão. De acordo com MEHTA e GJORV (1974), a resistência à tração por flexão expressa melhor a susceptibilidade do ataque do concreto por agentes deletérios do que a resistência à compressão.

COHEN e MATHER (1991) demonstraram que os resultados de ensaios de ataque por sulfato em pasta não podem ser diretamente correlacionados com o concreto, devido ao efeito da zona de transição pasta-agregado.

Os ensaios de resistência a sulfatos podem ser realizados em concretos desde que em períodos maiores de agressão. SILVA FILHO (1994) propõe um período superior a 180 dias. Entretanto, outros pesquisadores adotaram períodos menores, como JOSHI, citado por SILVEIRA (1996), que adotou 120 dias. SILVEIRA (1996) realizou ensaios de resistência a sulfatos em corpos-de-prova de argamassa e de concreto, com base nas metodologias propostas por KOCH e STEINEGGER (1960) e IRASSAR (1990). Os corpos-de-prova de concreto tinham dimensões 4x4x16 cm e foram imersos durante 148 dias numa solução de sulfato de sódio a 5%. Os ensaios em concreto apresentaram boa correlação com os realizados em argamassa.

BRETANHA (2000) realizou os seus ensaios em concreto para avaliar a influência da adição de cinza de casca de arroz, e de diferentes tipos de cimento, quanto à resistência ao ataque por sulfato de sódio. O método adotado foi o de KOCH e STEINEGGER. Foram avaliadas a expansão linear, perda de massa e resistência à tração na flexão de corpos-de-prova de concreto imersos em solução com 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , durante 180 dias. Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência à flexão foi o parâmetro que permitiu uma análise mais conclusiva. De acordo com os resultados, o cimento pozolânico foi o que apresentou maior resistência ao ataque por sulfatos.

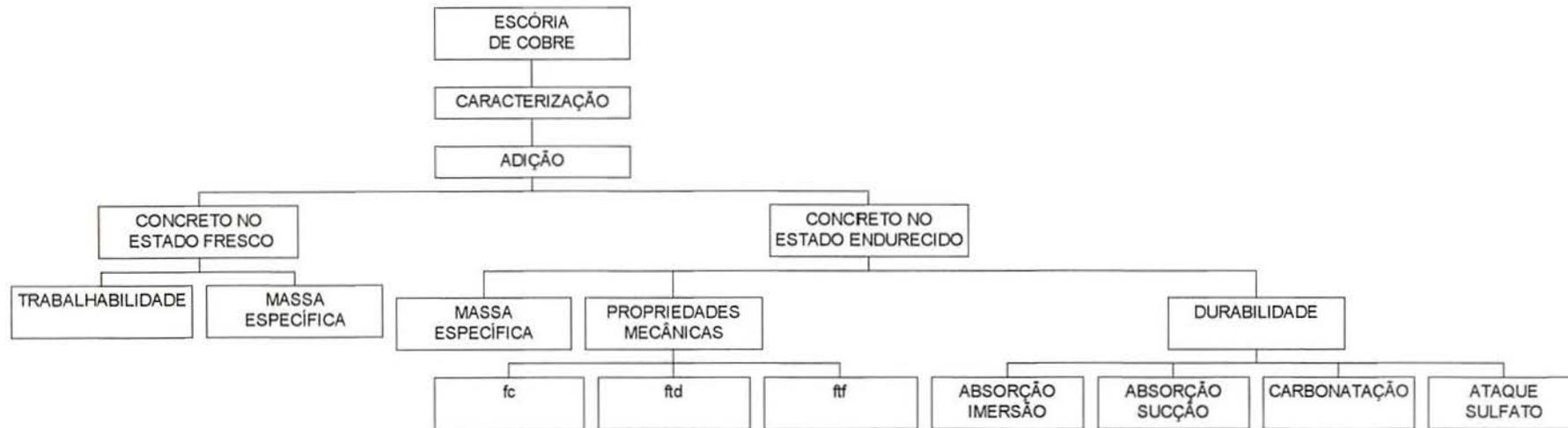
O Canadian Metallurgical Research Institute-CANMET realizou ensaios de ataque por sulfatos em prismas de concreto, para avaliar a influência da adição de cinza volante no concreto. Após 28 dias de cura, os corpos-de-prova foram imersos em solução com 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , durante 7 anos. Não houve expansão nos corpos-de-prova de concreto com adição de cinza volante (BILODEAU e MALHOTRA, 2000).

Para avaliar a resistência do concreto com adição de escória de cobre frente ao ataque por sulfato, foi adotada a metodologia de KOCH e STEINEGGER (1960), adaptada por IRASSAR (1990).

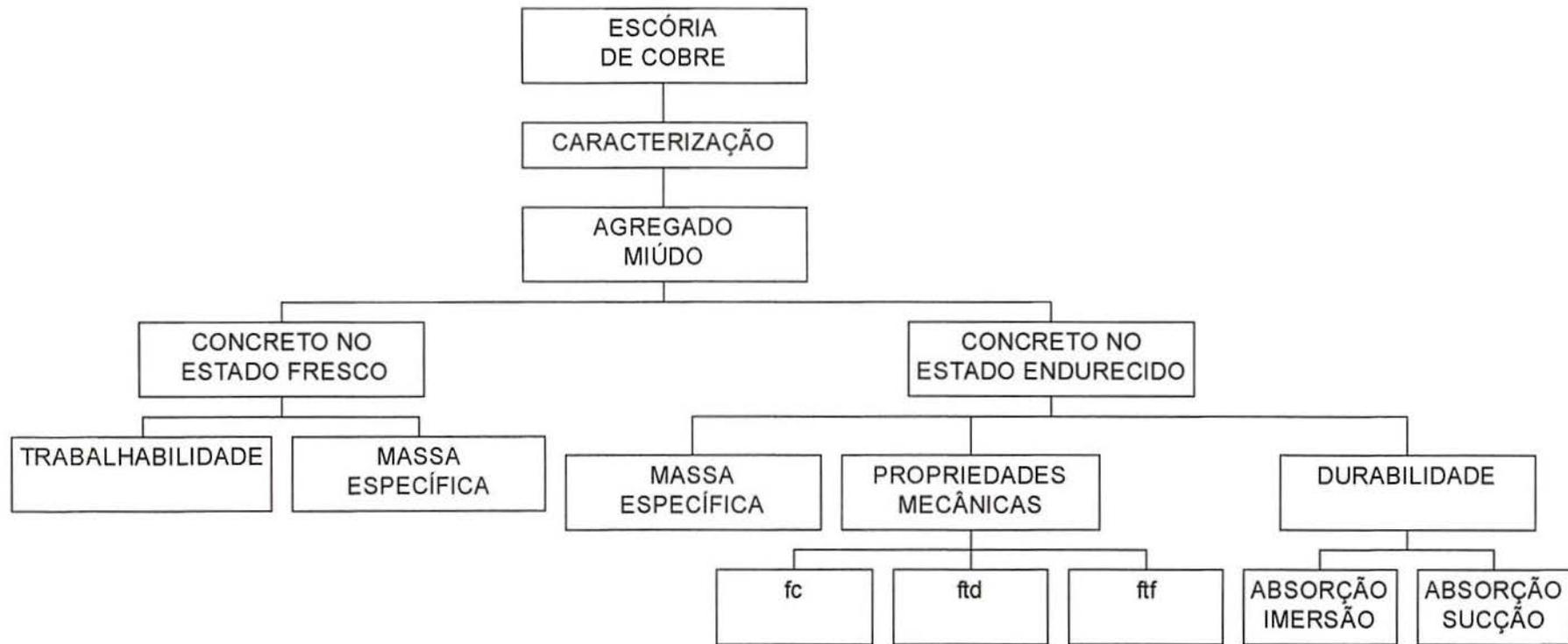
Não foi realizado o ensaio de ataque por sulfato no estudo da utilização de escória de cobre como agregado miúdo para concreto.

#### **4.2.3 Resumo dos ensaios para avaliar a escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**

O resumo dos ensaios que serão realizados no estudo da utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto, está apresentado nos fluxogramas da Figura 14 e da Figura 15, respectivamente. A apresentação e análise dos resultados serão tratados nos capítulos 5 e 6.



**Figura 14** Fluxograma dos ensaios realizados no estudo da utilização de escória de cobre como adição



**Figura 15** Fluxograma dos ensaios realizados no estudo da utilização de escória de cobre como agregado miúdo

## 5 ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO AO CONCRETO, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta pesquisa a influência da adição de escória de cobre no concreto foi avaliada a partir da determinação de propriedades no estado fresco e endurecido, que serão apresentadas a seguir.

Os resultados dos ensaios foram analisados com base na análise estatística, para respaldar as conclusões obtidas. A análise foi feita para cada tipo de ensaio, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, bem como a existência de possíveis interações entre estas variáveis. Foi verificada a significância estatística do efeito de cada uma das variáveis, através da análise de variância (ANOVA). Esta técnica permite comparar grupos de observações, através da comparação da variabilidade das médias entre grupos e a variabilidade das observações dentro de cada grupo (NANNI e RIBEIRO, 1992). O efeito de um determinado fator sobre uma variável de resposta analisada é determinado através de um teste de comparação entre valores calculados ( $F_{\text{calculado}}$ ) e os tabelados ( $F_{\text{tabelado}}$ ) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores de ( $F_{\text{tabelado}}$ ) são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se ( $F_{\text{calculado}}$ ) for maior do que ( $F_{\text{tabelado}}$ ). O nível de significância adotado nas análises foi de 5%, que é comumente utilizado na área de engenharia civil.

A ANOVA foi realizada através do *software statistica*.

### 5.1 AMOSTRA DA ESCÓRIA DE COBRE

A escória utilizada para realização de todos os ensaios foi retirada da amostra total, conforme descrito no item 4.1.1.

### 5.2 PRODUÇÃO DE CONCRETO

Uma vez confirmada a atividade pozolânica da escória, item 4.1.4, partiu-se para avaliar o seu desempenho como adição, na produção de concreto, conforme apresentado a seguir.

## 5.2.1 Materiais

Os materiais utilizados na produção do concreto são provenientes da região de Porto Alegre, com exceção da escória de cobre, utilizada como adição, que é proveniente da Bahia.

### 5.2.1.1 Cimento

Foi utilizado cimento Portland Comum (CPI S), classe 32, já que este tipo de cimento apresenta no máximo 5% de adição. Assim a influência dos possíveis efeitos fíler e pozolânico da escória de cobre foram preservados. As características do cimento empregado estão apresentadas na Tabela 18, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 18** Características do cimento CP I S 32

Compostos	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	20,12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,54
CaO	61,24
MgO	5,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50
SO <sub>3</sub>	2,44
Perda ao Fogo	3,23
CaO Livre	1,67
Res. Insolúvel	0,59
C <sub>3</sub> A	7,64
Eq. Alc.	0,74
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,119
Finura – peneira nº 200 (%)	1,60
Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	307,21
Tempo de início de pega	3h 27min
Tempo de fim de pega	5h 04min
Resist. Comp. 1 dia (MPa)	13,6
Resist. Comp. 3 dias (MPa)	26,9
Resist. Comp. 7 dias (MPa)	32,0
Resist. Comp. 28 dias (MPa)	38,7

### 5.2.1.2 Agregado miúdo

Trata-se de uma areia quartzosa, procedente do Rio Jacuí/RS, cujas características estão apresentadas na Tabela 19.

**Tabela 19** Distribuição granulométrica e características físicas da areia

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
4,8	0
2,4	5
1,2	17
0,6	41
0,3	83
0,15	99
< 0,15	100
Dimensão máxima característica (mm)	2,4
Módulo de finura	2,45
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,624
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,51

#### 5.2.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi de origem basáltica, classificado de acordo com a sua granulometria como sendo brita 1, com dimensão máxima característica de 25 mm (NBR 7211, 1983). A distribuição granulométrica, bem como suas características físicas, estão apresentadas na Tabela 20.

**Tabela 20** Distribuição granulométrica e características físicas do agregado graúdo

Abertura Peneira (mm)	% Retida Acumulada
25	0
19,0	8
12,5	57
9,5	82
6,3	96
4,8	99
< 4,8	100
Dimensão máxima característica (mm)	25
Módulo de finura	6,89
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,060
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,50

#### 5.2.1.4 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento local.

### 5.2.1.5 Adição

Foi utilizada como adição, escória de cobre, moída em moinho de bolas horizontal, em jarros com capacidade de 1000 ml, cujas características foram apresentadas no capítulo 4.

#### 5.2.1.5.1 Determinação do tempo de moagem

O tempo de moagem foi definido com base no tamanho médio dos grãos e nos resultados de resistência à compressão de corpos-de-prova de argamassas produzidos com adição de 20% de escória de cobre. Foram escolhidos 4 diferentes tempos de moagem (40, 60, 80 e 100 minutos). Para cada tempo de moagem, foi determinada a granulometria a laser da escória moída. Na Tabela 21 estão apresentados os tamanhos médios dos grãos de escória.

Para verificar a influência do tempo de moagem na resistência das argamassas foram definidos 3 traços, conforme Tabela 21. Estabeleceu-se como consistência padrão para todas as argamassas,  $260 \pm 10$  mm, determinada na *flow table* (NBR 13276, 1990), por ser uma faixa comumente utilizada em pesquisas.

**Tabela 21** Tamanho médio dos grãos e traços (em massa) de argamassa para os diferentes tempos de moagem

Tempo de moagem (min)	Tamanho médio dos grãos ( $\mu\text{m}$ )	Traços		
		1:1,5 a/c 0,35	1:3,0 a/c 0,48	1:4,5 a/c 0,66
40	61,0	1:1,5 a/c 0,35	1:3,0 a/c 0,48	1:4,5 a/c 0,66
60	43,0	1:1,5 a/c 0,35	1:3,0 a/c 0,48	1:4,5 a/c 0,66
80	33,7	1:1,5 a/c 0,36	1:3,0 a/c 0,48	1:4,5 a/c 0,67
100	24,2	1:1,5 a/c 0,36	1:3,0 a/c 0,49	1:4,5 a/c 0,67

Para cada traço de argamassa foram moldados 4 corpos-de-prova  $5 \times 10$  mm, que foram rompidos à compressão axial aos 28 dias, cujos resultados estão apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22** Resultados de resistência média à compressão, em MPa, das argamassas com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos

Tempo de moagem (min)	Traços		
	1:1,5	1:3,0	1:4,5
40	52,9	33,9	14,5
60	53,9	35,3	16,2
80	56,4	35,9	16,7
100	57,2	37,2	18,6

A influência do tempo de moagem da escória de cobre e do traço na resistência à compressão das argamassas foi verificada através da ANOVA, cujos resultados estão apresentados na Tabela 23.

**Tabela 23** Resultados da ANOVA dos tempos de moagem da escória de cobre e do traço na resistência à compressão da argamassa

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – tempo de moagem	3	32,231	3,77	2,60	S
B – traço	2	5763,290	673,49	3,28	S
AB	6	7,760	0,91	2,39	NS
ERRO	36	8,557			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

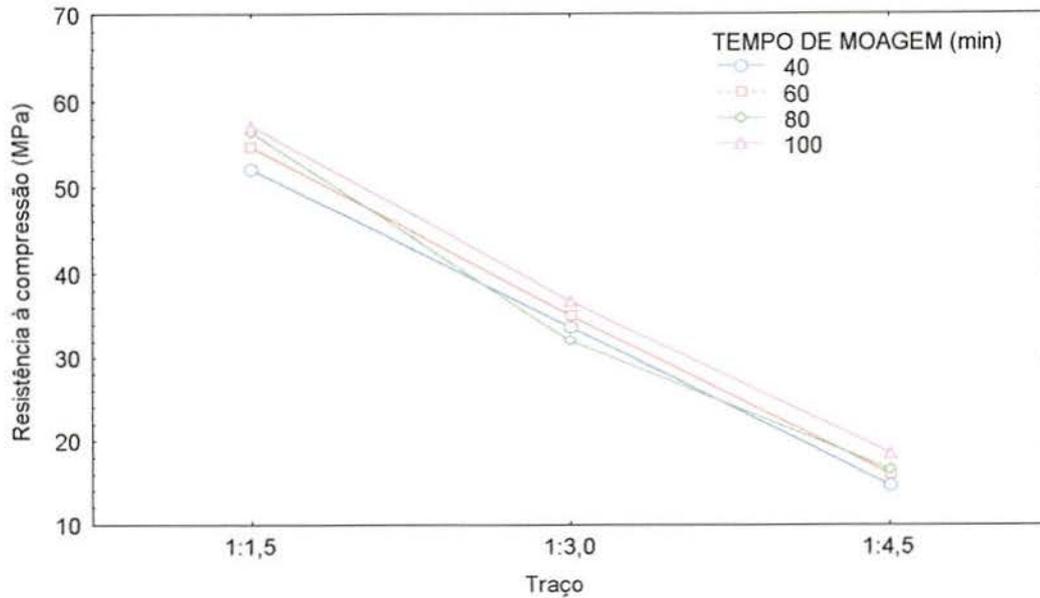
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

NS – Não Significativo

A Figura 16 mostra o comportamento das argamassas para os diferentes tempos de moagem com base nos resultados.

Observa-se que o tamanho médio dos grãos diminui com o aumento no tempo de moagem, enquanto que a resistência à compressão axial aumenta. Analisando-se este comportamento, optou-se pelo tempo de moagem da escória de cobre a ser utilizada como adição ao concreto, de 60 minutos. Esta escolha levou em consideração, principalmente, porque com este tempo de moagem o tamanho médio dos grãos é inferior a 45  $\mu\text{m}$  (tamanho referência para atividade pozolânica). Além disso o aumento verificado na resistência à compressão axial das argamassas é muito pequeno e não justificaria o aumento no custo de produção, com maior tempo de moagem.



**Figura 16** Resultados de resistência à compressão de argamassa com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos

Definido o tempo de moagem, foi preparada uma amostra de 40 kg da escória moída e homogeneizada, para utilização nos concretos e realização de todos os ensaios necessários.

#### 5.2.1.5.2 Determinação do teor de adição ao concreto

O teor de escória a ser adicionado ao concreto foi definido a partir de um estudo em argamassa. Foram elaborados três traços de argamassa (pobre, médio, rico) e adicionados teores de escória de cobre variando de 10% em relação à massa do cimento, até o teor em que houve queda de resistência da argamassa. Foi definido como fator de controle a consistência da argamassa de  $260 \pm 10$  mm, medida através do “flow table”. Foram moldados 4 corpos-de-prova para cada traço, que foram rompidos com idade de 28 dias. Na Tabela 24 e na Tabela 25 estão apresentados os traços de argamassa e os resultados de resistência média à compressão axial, respectivamente.

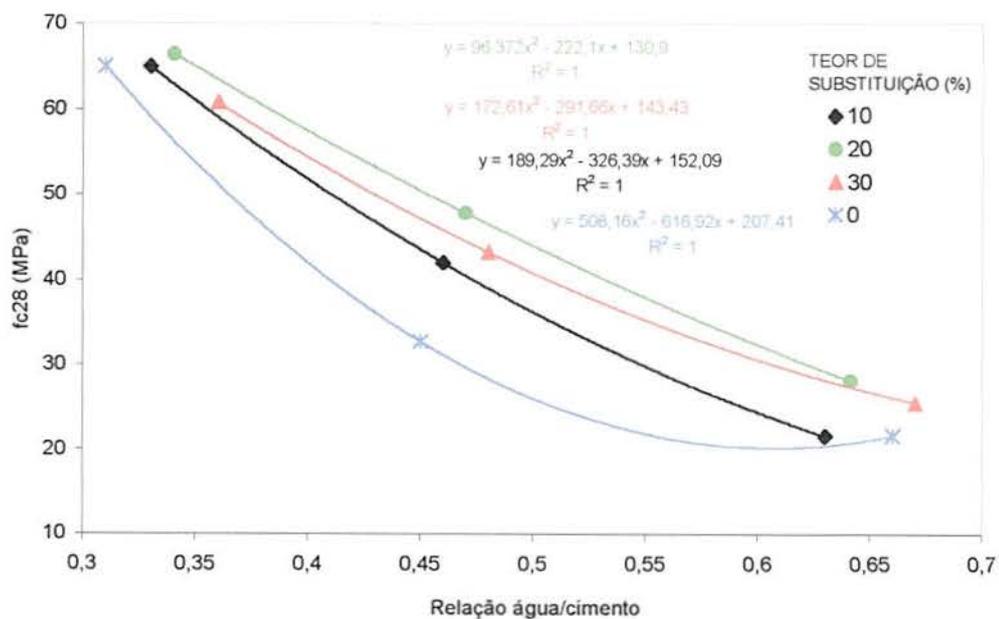
**Tabela 24** Traços (em massa) de argamassa para os diferentes teores de adição de escória de cobre

Teores de adição de escória	Traços		
0	1:1,5 a/c 0,31	1:3,0 a/c 0,45	1:4,5 a/c 0,66
10	1:1,5 a/c 0,33	1:3,0 a/c 0,46	1:4,5 a/c 0,63
20	1:1,5 a/c 0,34	1:3,0 a/c 0,47	1:4,5 a/c 0,64
30	1:1,5 a/c 0,36	1:3,0 a/c 0,48	1:4,5 a/c 0,66

**Tabela 25** Resultados de resistência média à compressão das argamassas com adição de escória de cobre moída em diferentes tempos

Teores de adição de escória	Traços		
	1:1,5	1:3,0	1:4,5
0	65,0	32,7	21,6
10	65,0	42,0	23,3
20	66,4	47,8	28,1
30	60,8	43,2	25,5

A Figura 17 mostra as curvas de resistência média à compressão das argamassas.



**Figura 17** Resultados de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de adição de escória de cobre.

Para verificar se é significativa a influência do teor de adição de escória em diferentes traços, nos resultados de resistência à compressão das argamassas, foi realizado a ANOVA. Os resultados estão apresentados na Tabela 26. Foi verificado, também, se há interação entre estas variáveis.

**Tabela 26** Resultados da ANOVA do teor de adição de escória nas argamassas

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Adição	3	117,301	26,98	2,60	S
B – traço	2	6335,009	1456,86	3,28	S
AB	6	49,135	11,30	2,39	S
ERRO	36	4,348403			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

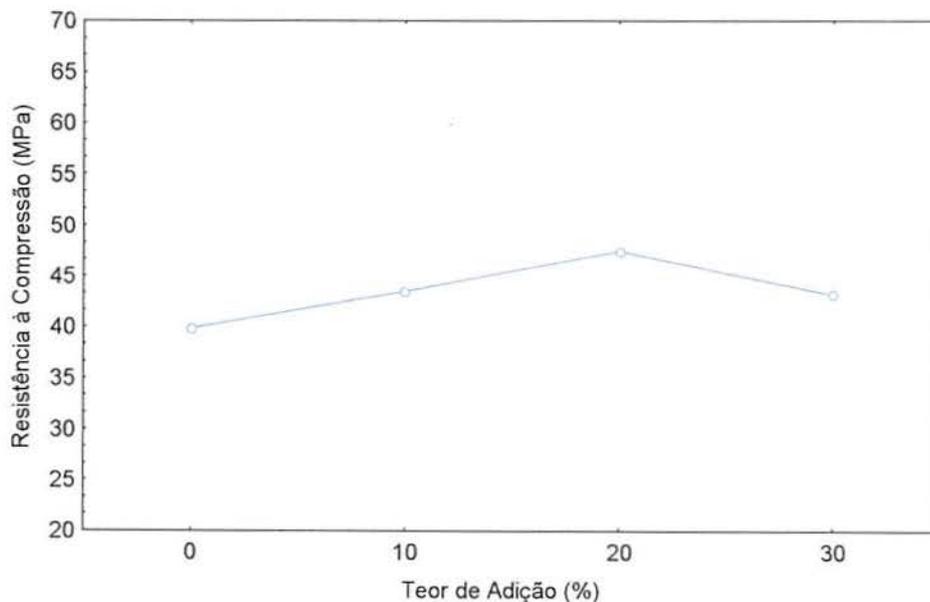
Fcalculado – Valor calculado de F

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

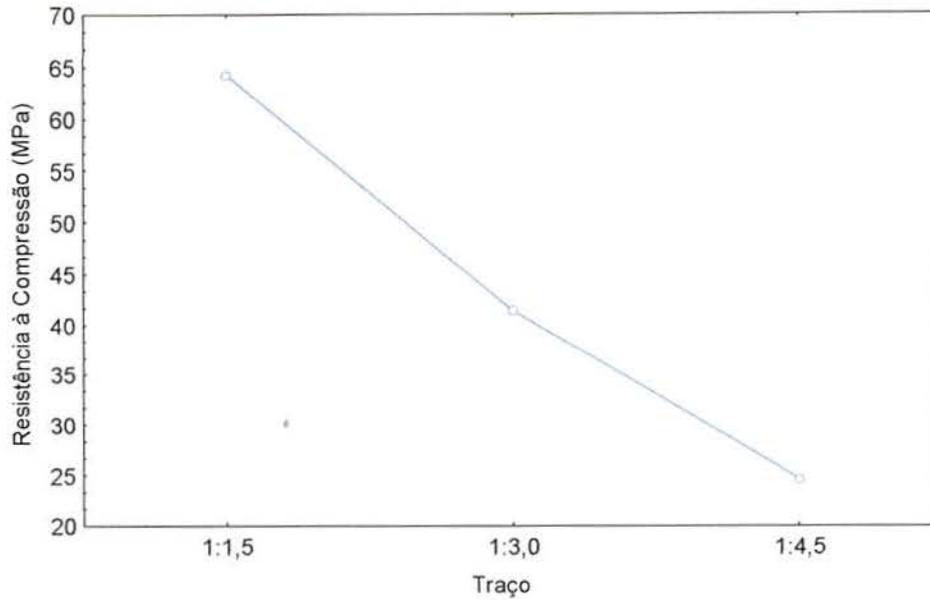
S – Significativo

NS – Não Significativo

A Figura 18 (a) e (b) mostra o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão, com relação ao teor de adição da escória de cobre e ao traço das argamassas, respectivamente. Na Figura 19 é apresentado o comportamento da interação entre as variáveis.

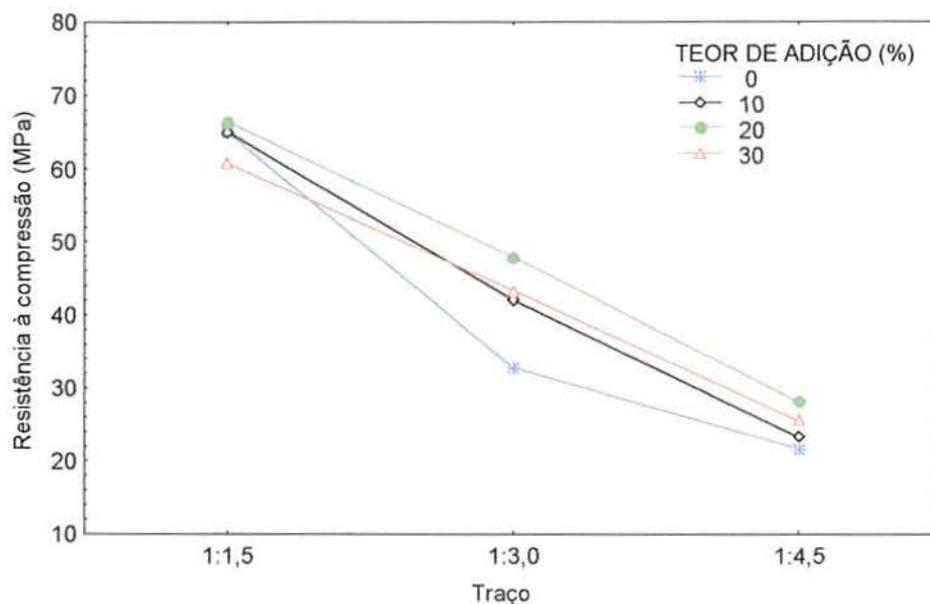


(a)



(b)

**Figura 18** Comportamento das argamassas em função da resistência à compressão axial: (a) com o teor de adição de escória; (b) com o traço.



**Figura 19** Resistência à compressão em função da interação entre o teor de adição e o traço da argamassa

Os resultados mostram que há uma influência significativa do teor de adição e do traço da argamassa na resistência à compressão. Observa-se, também, que há interação entre estas duas variáveis.

Com base nestes resultados, foi adotado o teor de 20% de adição de escória de cobre ao concreto, por apresentar um melhor desempenho quanto à resistência à compressão em relação aos outros teores. A resistência média da argamassa chega a aumentar em 45% (traço 1:3,0), em relação à argamassa sem adição.

### 5.2.2 Dosagem dos concretos

Os traços foram determinados levando em consideração três diferentes relações água/cimento (0,40; 0,50 e 0,60) para o concreto de referência, dentro da faixa mais usual. A metodologia utilizada para dosagem foi a do IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Como fator de controle adotou-se a trabalhabilidade de  $70 \pm 10$  mm, medida através do ensaio de abatimento, NBR 7223 (1992), para todos os traços, inclusive aqueles em que se utilizou adição de escória de cobre. O teor de argamassa seca foi de 49% para os concretos de referência e de 50% para os demais.

Os traços, em massa, empregados estão apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27** Traços em massa utilizados para produção dos concretos

Mistura	água/ cimento	Cimento	Escória de cobre	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Consumo cimento (kg/m <sup>3</sup> )
Referência	0,40	1	-	1,363	2,459	480
	0,50			2,039	3,164	372
	0,60			2,716	3,867	304
Com Escória	0,41	1	0,20	1,363	2,459	468
	0,50			2,039	3,164	365
	0,60			2,716	3,867	299

Foi adotado o teor de 2% de ar no concreto para o cálculo do consumo de cimento

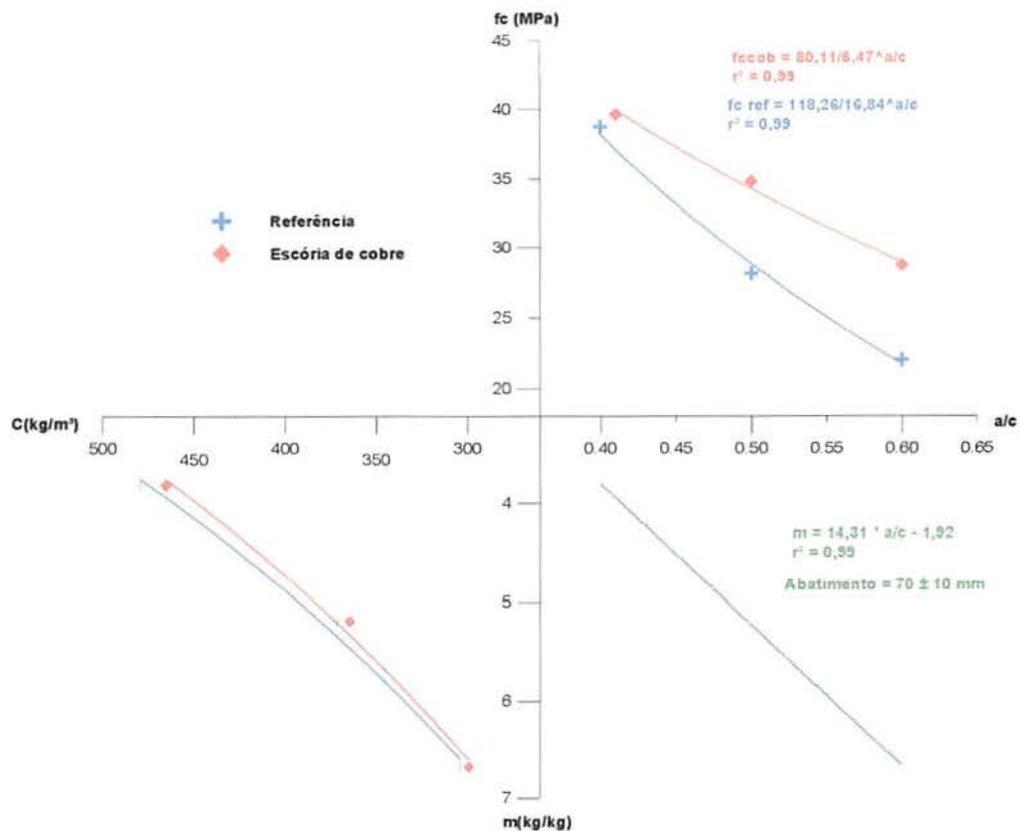
As misturas foram realizadas numa betoneira de eixo vertical.

Os materiais foram colocados com a betoneira em movimento, obedecendo a seguinte ordem:

- 100% da brita + 20% da água;
- 100% do cimento + 50% da água;
- 100% da escória + 30% da água;
- 100% da areia.

O processo de mistura durou 3 minutos, quando então foram determinadas as propriedades do concreto no estado fresco.

Com os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias, foi elaborado o diagrama de dosagem dos concretos, o qual está apresentado na Figura 20.



**Figura 20** Diagrama de dosagem dos concretos

### 5.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

Devido às características físicas e químicas, a escória de cobre pode influenciar nas propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no endurecido.

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da trabalhabilidade e massa específica dos concretos produzidos.

### 5.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi controlada através do ensaio de abatimento, *slump test* NBR 7223, 1992. O abatimento foi considerado como um fator de controle no concreto e fixado na faixa de  $70 \pm 10$ mm. Os resultados dos ensaios de abatimento estão apresentados na Tabela 28.

**Tabela 28** Abatimentos obtidos nos traços dos concretos

Mistura	Água/cimento	Abatimento (mm)
Referência	0,40	75
	0,50	80
	0,60	70
(20%) Escória de cobre	0,41	80
	0,50	75
	0,60	60

Esperava-se que a adição de escória de cobre aumentasse a fluidez do concreto, devido à forma das suas partículas serem bastante esféricas e a superfície ser lisa. Entretanto, não houve influência.

### 5.3.2 Massa específica

Considerando que a massa específica da escória de cobre é bastante elevada ( $3,87 \text{ kg/dm}^3$ ), avaliou-se a sua influência na massa específica do concreto fresco.

A Tabela 29 apresenta os resultados da massa específica, para todas as misturas, determinada de acordo com a NBR 9833 (1987).

**Tabela 29** Massa específica do concreto no estado fresco

Mistura	água/cimento	Massa específica ( $\text{kg/dm}^3$ )
Referência	0,40	2,590
	0,50	2,570
	0,60	2,510
(20%) Escória de cobre	0,41	2,620
	0,50	2,600
	0,60	2,540

### Análise dos Resultados

A análise de variância, apresentada na Tabela 30, permite avaliar se existe influência do teor de adição e da relação a/c na massa específica do concreto fresco e se há alguma interação entre estes fatores.

**Tabela 30** Resultados da ANOVA da influência teor de adição de escória de cobre na massa específica dos concretos no estado fresco.

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,002670	159,4080	5,99	S
B – a/c	2	0,006920	413,1393	5,14	S
AB	2	0,000000	0,0050	5,14	NS
ERRO	6	0			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

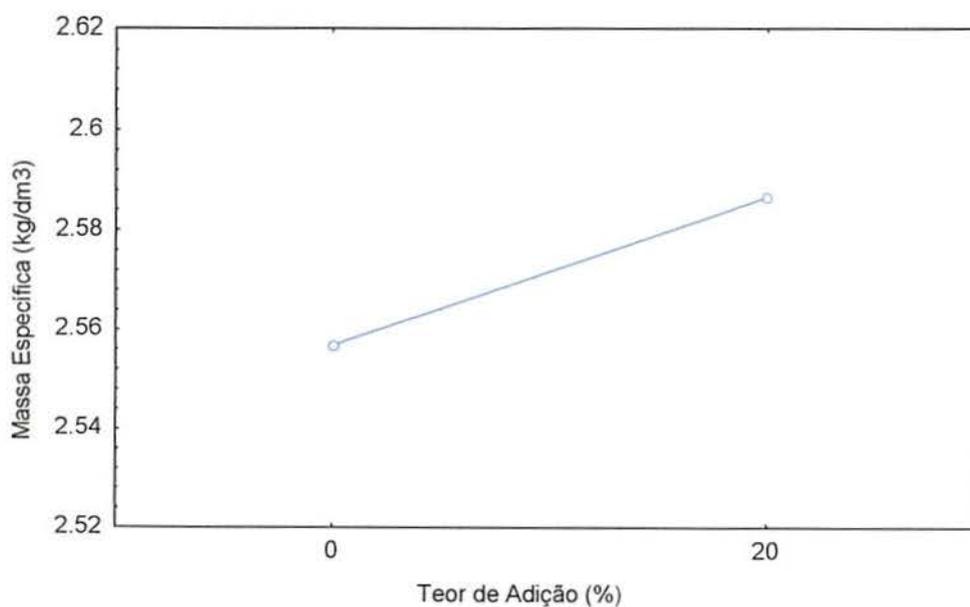
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

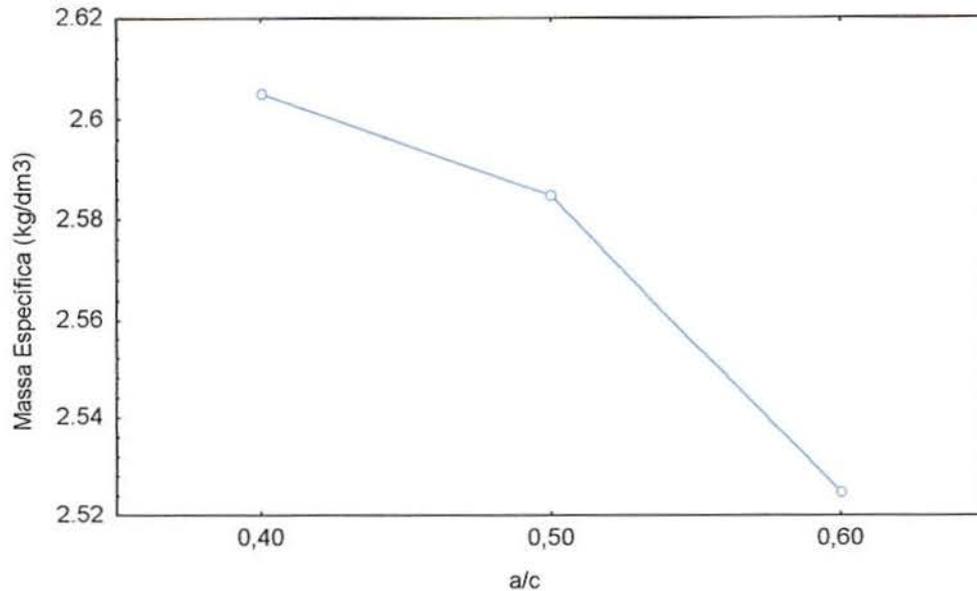
NS – Não Significativo

Pode-se observar que há influência significativa do teor de adição e da relação a/c na massa específica do concreto fresco. Por outro lado, não há interação entre estas variáveis.

A Figura 21 (a) e (b) mostra o comportamento dos concretos, quanto à massa específica, para os diferentes teores de adição e relação a/c.



(a)



(b)

**Figura 21** Comportamento dos concretos no estado fresco, com relação à sua massa específica para: (a) teor de adição; (b) relação a/c

A massa específica aumenta com a adição de escória, já que esta possui massa específica maior do que os demais componentes do concreto. Este aumento foi pequeno (no máximo 1,2%), embora a ANOVA tenha mostrado que é significativo. Por outro lado, quanto maior a relação a/c, menor é o valor da massa específica. Isso é explicado porque o consumo de cimento e de escória são menores.

#### 5.4 MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA

Foram moldados corpos-de-prova para os ensaios de resistências à compressão, tração por compressão diametral e tração na flexão, carbonatação, absorção por sucção capilar, absorção por imersão, e ataque por sulfatos, para cada um dos traços. O número de corpos-de-prova variou de acordo com cada tipo de ensaio, conforme apresentado a seguir.

O processo de adensamento foi feito com vibrador de imersão. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente vinte e quatro horas. Ao serem retirados das formas os corpos-de-prova foram colocados na câmara úmida, com umidade relativa

superior a 95% e temperatura de  $(23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$ , até a data de realização de cada um dos ensaios.

## 5.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

O aumento da resistência do concreto normalmente está associado ao aumento da sua durabilidade e, conseqüentemente, da vida útil da construção.

Para avaliar a influência da adição de escória de cobre no concreto no estado endurecido foram realizados ensaios de determinação da massa específica, resistências à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão, absorção por sucção capilar, absorção por imersão, carbonatação e de ataque por sulfato.

### 5.5.1 Massa específica

A massa específica foi determinada, para todas as misturas no estado endurecido, de acordo com a NBR 9778 (1987). A Tabela 31 apresenta os resultados.

**Tabela 31** Massa específica do concreto no estado endurecido

Mistura	água/cimento	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )
Referência	0,40	2,519
	0,50	2,478
	0,60	2,456
(20%) Escória de cobre	0,41	2,583
	0,50	2,543
	0,60	2,487

### Análise dos Resultados

Para verificar estatisticamente se houve influência do teor de adição e da relação a/c nos resultados de massa específica do concreto no estado endurecido, foi realizada a ANOVA, cujos resultados estão apresentados na Tabela 32.

**Tabela 32** Resultados da ANOVA da influência teor de adição de escória de cobre e relação a/c, na massa específica dos concretos no estado endurecido

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,008694	223,40	5,99	S
B – a/c	2	0,006401	164,48	5,14	S
AB	2	0,000374	9,62	5,14	S
ERRO	6	0,000051			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

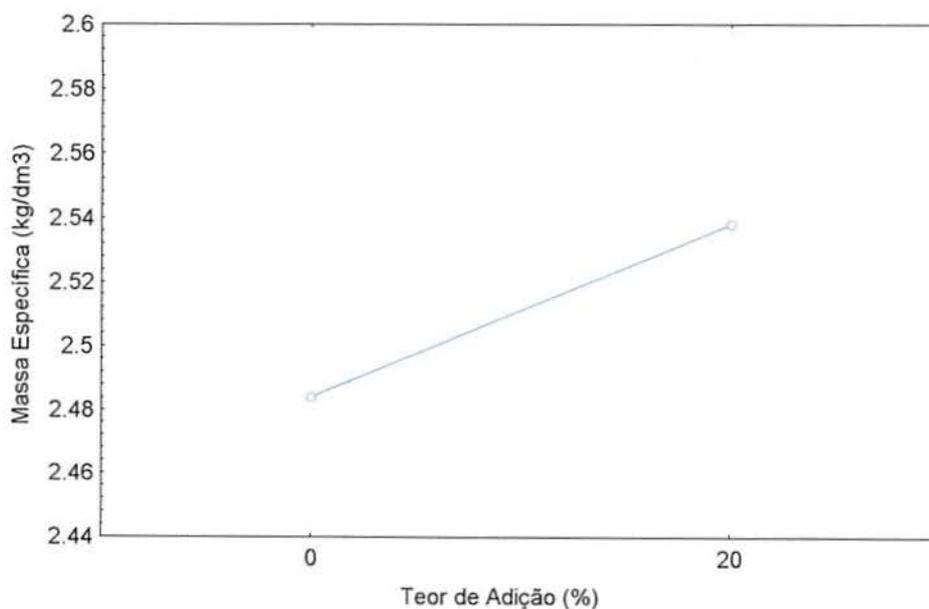
Fcalculado – Valor calculado de F

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

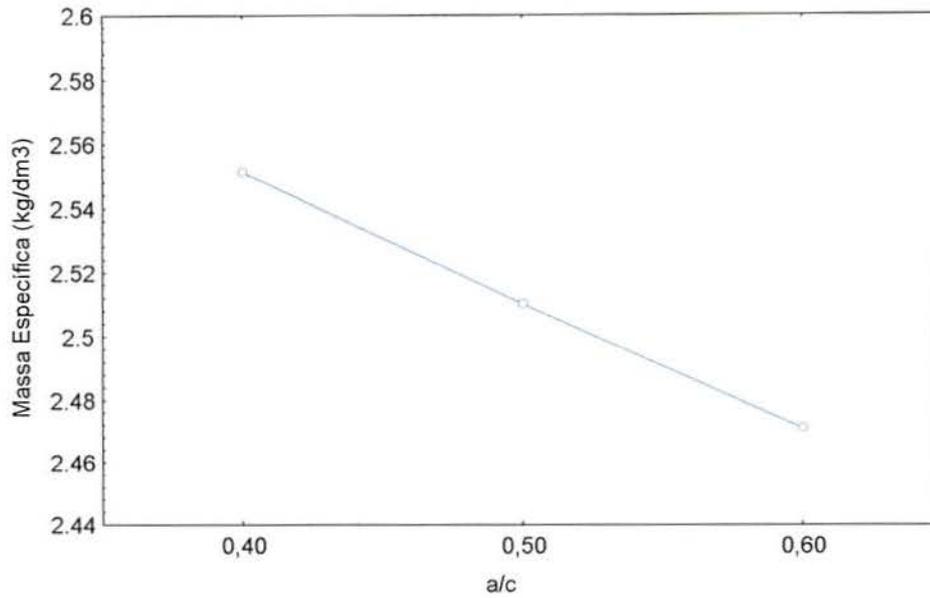
S – Significativo

NS – Não Significativo

A Figura 22 (a) e (b) mostra o comportamento dos concretos no estado endurecido, quanto à sua massa específica, para o teor de adição e relação a/c. Na Figura 23 é apresentado comportamento dos concretos quanto à massa específica, em função da interação entre estes fatores.

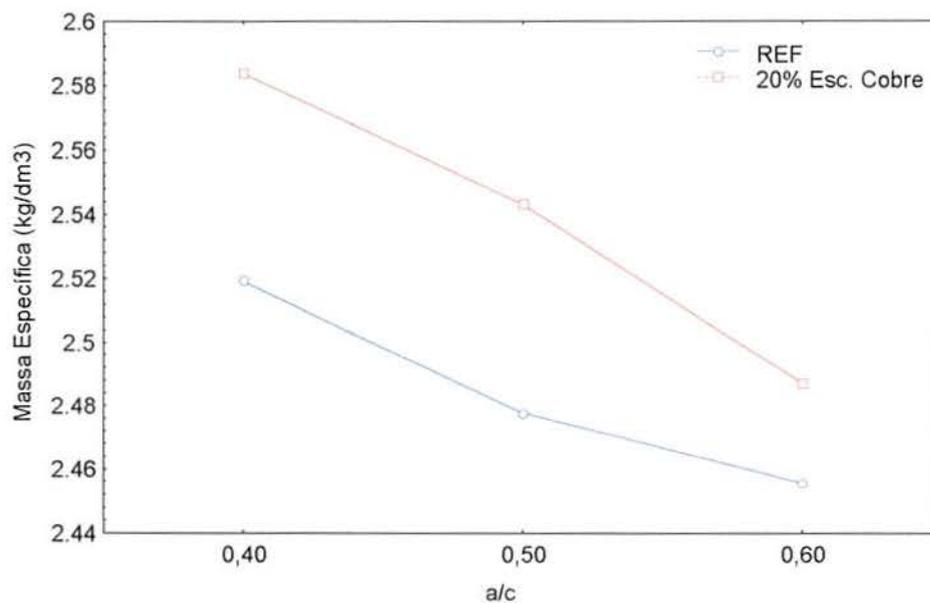


(a)



(b)

**Figura 22** Comportamento dos concretos no estado endurecido, com relação à sua massa específica: (a) teor de adição; (b) relação a/c.



**Figura 23** Massa específica do concreto no estado endurecido, em função da interação entre o teor de adição e a relação a/c

Os resultados da ANOVA mostram que há influência significativa do teor de adição e da relação a/c sobre a massa específica do concreto no estado endurecido. Há, também, interação entre estes fatores.

A massa específica aumenta com a adição de escória. Isso é explicado porque como a escória possui massa específica maior do que os demais componentes, provoca aumento na massa específica do concreto. Este efeito pode, também, estar associado ao tamanho e forma dos grãos da escória, que provoca maior densificação da matriz. Por outro lado, quanto maior a relação  $a/c$ , menor é o valor da massa específica. Isso ocorre porque o consumo de cimento e de escória são menores para maiores relações  $a/c$ .

A diferença entre os valores de massa específica do concreto com adição de escória e sem adição é maior para menores relações  $a/c$ , já que o consumo de escória de cobre é maior. No entanto, esta diferença é de no máximo 2,5% (para relação  $a/c$  0,40).

### 5.5.2 Propriedades mecânicas

Foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão, no concreto de referência e no concreto com adição de 20% escória de cobre. Para determinação de cada uma destas propriedades, foram ensaiados 3 corpos-de-prova para cada traço, a cada idade de referência. Foi definido como idade de referência 7; 28 e 91 dias, visando contemplar possível variação da influência da escória nas reações de hidratação, ao longo do tempo.

#### 5.5.2.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de determinação da resistência à compressão do concreto foram realizados de acordo com a NBR 5739 (1994). Os resultados de resistência nas idades de 7, 28 e 91 dias estão apresentados na Tabela 33.

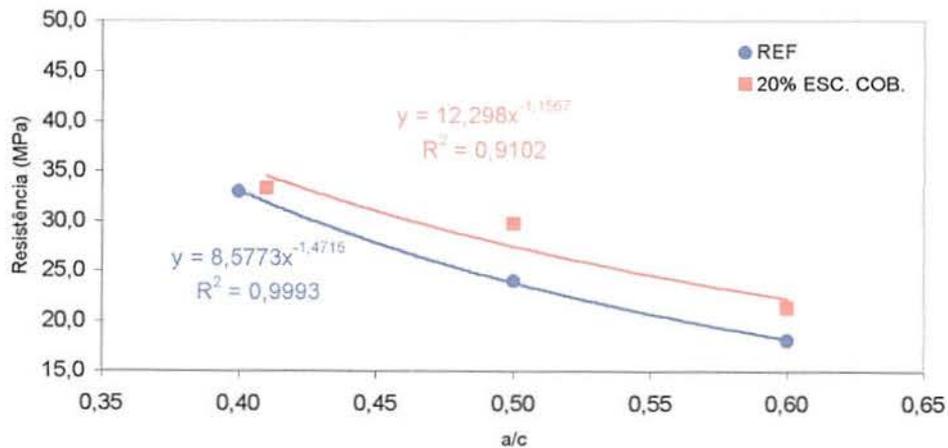
Na Figura 24, Figura 25 e Figura 26 estão apresentados os gráficos de resistência à compressão dos concretos, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente.

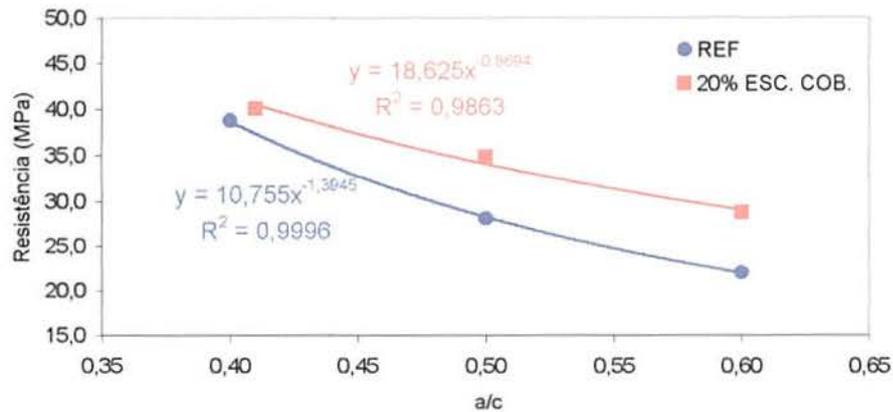
**Tabela 33** Resultados de resistência à compressão axial dos concretos

Mistura	a/c	Idade								
		7 dias			28 dias			91 dias		
		fc	fc <sub>m</sub>	C.V.	fc	fc <sub>m</sub>	C.V.	fc	fc <sub>m</sub>	C.V.
Referência	0,40	33,6	32,9	3,51	40,0	38,7	4,31	42,8	43,3	3,84
		31,6			36,8			45,2		
		33,6			39,2			42,0		
	0,50	24,4	24,0	1,67	28,4	28,1	2,96	32,4	32,9	1,86
		24,0			27,2			32,8		
		23,6			28,8			33,6		
	0,60	18,0	18,1	3,37	22,4	22,0	1,82	24,0	24,1	2,53
		17,6			22,0			24,8		
		18,8			21,6			23,6		
20% de Escória de Cobre	0,41	35,6	33,2	7,23	40,0	39,6	1,54	44,0	44,4	2,38
		33,2			39,6			45,6		
		30,8			39,2			43,6		
	0,50	29,2	29,7	9,54	32,4	34,8	6,08	37,2	38,8	3,57
		32,8			36,4			39,6		
		27,2			35,6			39,6		
	0,60	21,2	21,3	2,86	27,6	28,7	3,51	30,0	30,0	2,67
		20,8			28,8			30,8		
		22,0			29,6			29,2		

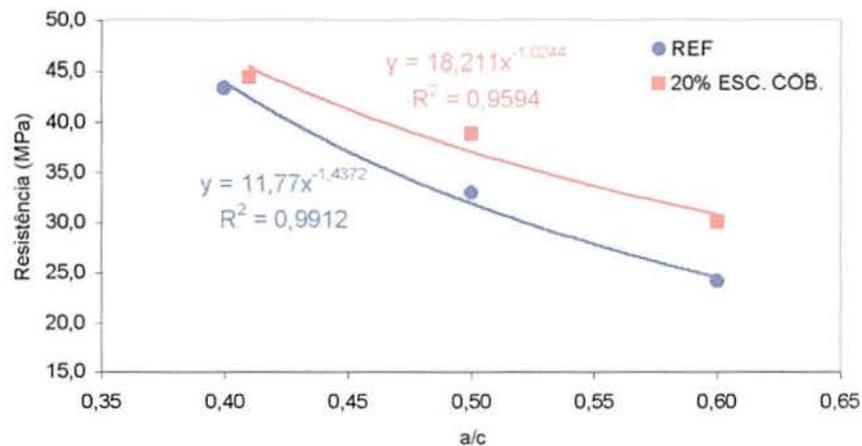
fc – Resistência à compressão axial (MPa)      fcm – Resistência média à compressão axial (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

**Figura 24** Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 7 dias



**Figura 25** Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias



**Figura 26** Resultados de resistência à compressão axial dos concretos aos 91 dias

### Análise dos Resultados

Foi verificada a influência do teor de adição de escória, a/c e idade, nos resultados de resistência à compressão dos concretos, através da ANOVA, para os valores individuais. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 34.

**Tabela 34** Resultados da ANOVA para a resistência à compressão axial dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	220,0185	121,09	4,13	S
B – a/c	2	966,5385	531,93	3,28	S
C – Idade	2	373,0896	205,33	3,28	S
AB	2	36,6541	20,17	3,28	S
AC	2	3,4719	1,91	3,28	NS
BC	4	6,2563	3,44	2,66	S
ABC	4	1,0741	0,59	2,66	NS
ERRO	36	1,817037			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

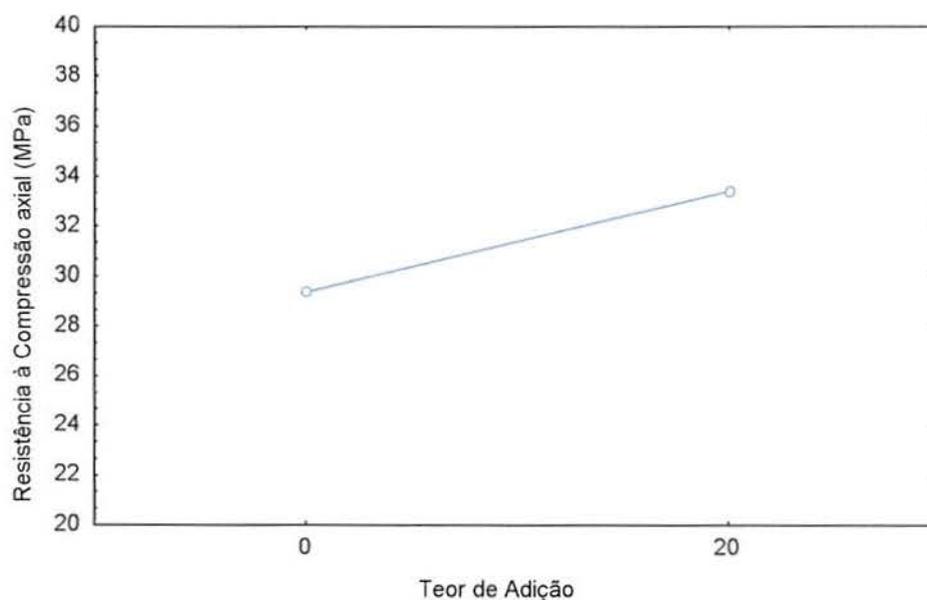
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

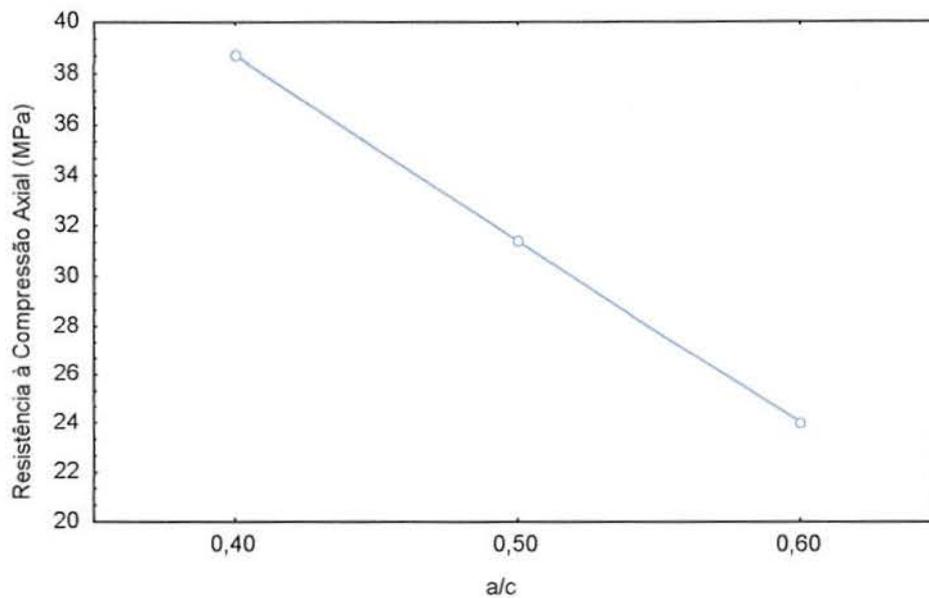
NS – Não Significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência do teor de adição, da relação a/c e da idade dos concretos na resistência à compressão axial. Pode-se observar que há interação entre o teor de adição e a relação a/c. Existe, também, interação da relação a/c com a idade, embora muito fraca. Por outro lado, não se verifica interação entre o teor de adição e a idade do concreto.

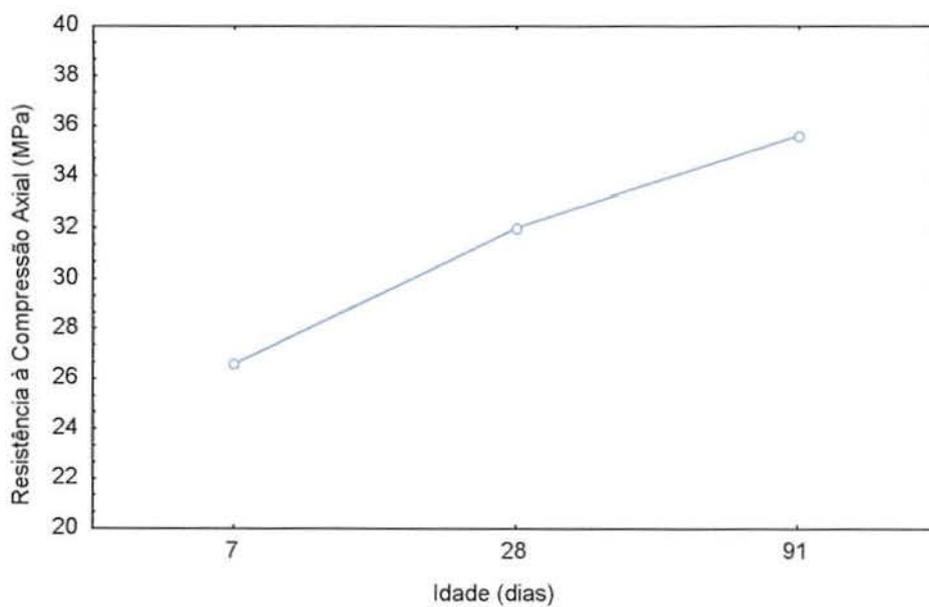
A Figura 27 (a), (b) e (c) mostra o comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão axial em função do teor de adição, da relação a/c e da idade do concreto, respectivamente.



**(a)**



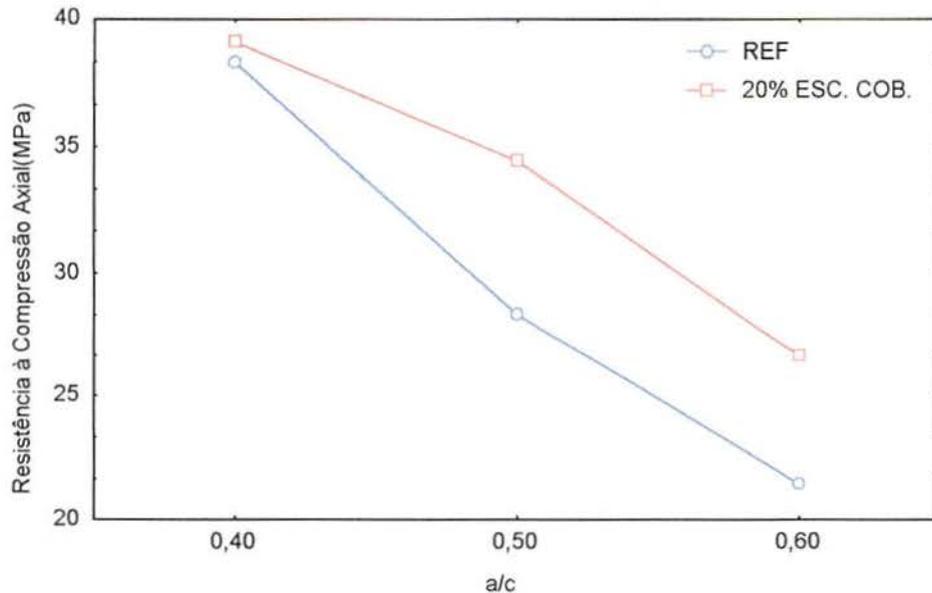
(b)



(c)

**Figura 27** Comportamento dos concretos quanto à resistência à compressão em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade

O efeito da adição de escória de cobre na resistência à compressão, em função da relação a/c, pode ser evidenciado no gráfico da Figura 28.



**Figura 28** Resistência à compressão axial do concreto em função da interação o teor de adição e a relação a/c

Verifica-se que a resistência à compressão do concreto é sempre maior com a adição de escória de cobre. O aumento na resistência é maior para maiores relações a/c do concreto: para relação a/c de 0,40 a adição de escória aumentou a resistência à compressão em 2,3%, para relação a/c de 0,50 em 23,8% e para relação a/c de 0,60 o acréscimo chegou a 30,4% aos 28 dias. Os concretos com adição de escória apresentaram melhor desempenho, provavelmente, devido a atividade pozolânica apresentada pela escória (87% - Tabela 12), bem como pelo efeito fíler, que proporcionaram maior densificação da matriz. O fato de não ser significativa a interação entre o teor de adição e a idade do concreto, indica que o efeito fíler pode ter influenciado mais no aumento da resistência. A atividade pozolânica proporciona maior crescimento da resistência do concreto para as maiores idade, fato que não se verificou nos resultados.

ARIÑO e MOBASHER (1999) verificaram, na sua pesquisa, que a substituição de 15% de cimento por escória de cobre aumentou em 8,7% a resistência à compressão axial do concreto, com relação a/c 0,47. Concluiu, ainda, que esta influência foi devida a maior densificação da matriz, tanto pelo efeito fíler como a atividade pozolânica da escória.

### 5.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral dos concretos foram realizados de acordo com a NBR 7222 (1994). Foram rompidos 3 corpos-de-prova para cada idade (7, 28 e 91 dias). Os resultados estão apresentados na Tabela 35.

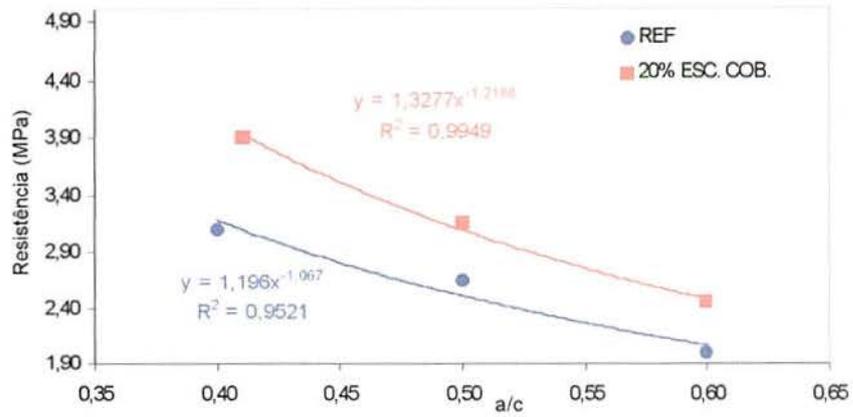
Nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31 são apresentados os gráficos de resistência à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente.

**Tabela 35** Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

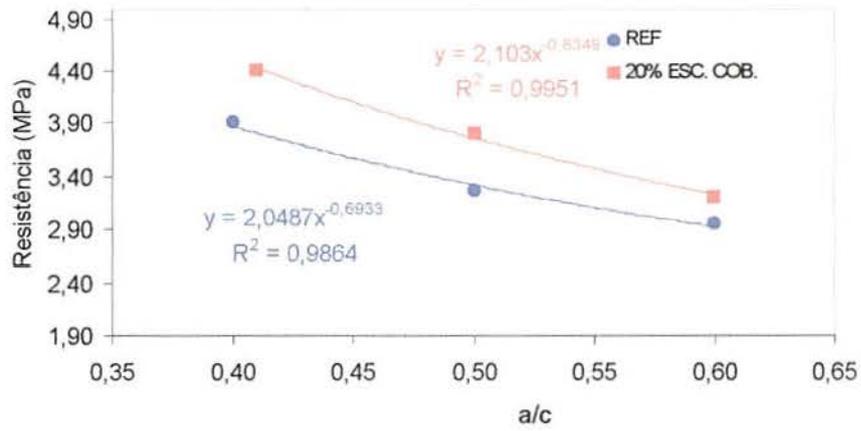
Mistura	a/c	Idade								
		7 dias			28 dias			91 dias		
		ftd	ftdm	C.V.	ftd	ftdm	C.V.	ftd	ftdm	C.V.
Referência	0,40	3,10	3,10	9,68	3,80	3,90	6,78	4,15	4,45	6,89
		3,40			4,20			4,50		
		2,80			3,70			4,75		
	0,50	2,65	2,65	5,8	3,25	3,23	6,44	3,45	3,55	4,32
		2,85			3,05			3,75		
		2,50			3,40			3,40		
	0,60	1,85	2,00	10,0	3,00	2,95	7,10	2,90	3,10	6,45
		2,20			3,10			3,30		
		1,95			2,70			3,10		
20% de Escória de Cobre	0,41	3,55	3,90	7,69	4,35	4,40	4,55	4,70	4,90	4,08
		4,15			4,60			4,95		
		4,00			4,25			5,05		
	0,50	3,50	3,15	9,12	4,00	3,80	5,26	4,40	4,45	3,45
		3,00			3,85			4,65		
		3,00			3,55			4,25		
	0,60	2,40	2,45	4,00	3,40	3,20	6,25	3,90	3,70	5,41
		2,40			3,15			3,50		
		2,60			3,05			3,70		

ftd – Resistência à tração por compressão diametral (MPa)      C.V. – Coeficiente de variação (%)

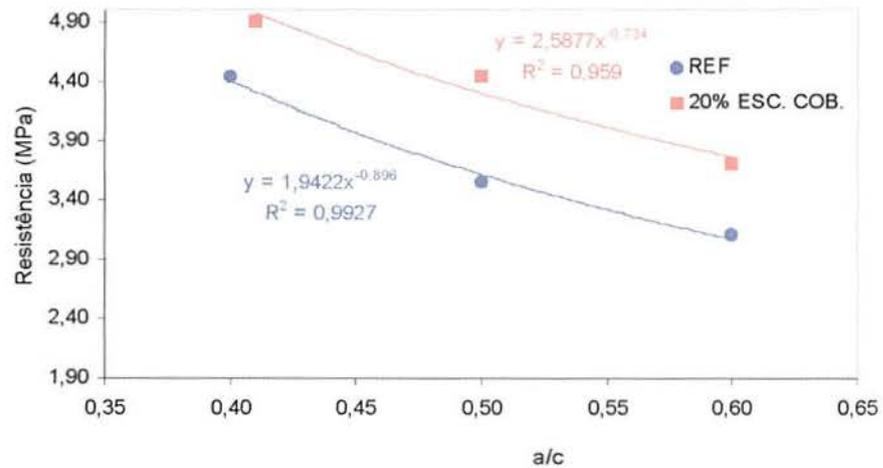
ftdm – Resistência média à tração por compressão diametral (MPa)



**Figura 29** Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 7 dias



**Figura 30** Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias



**Figura 31** Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias

## Análise dos Resultados

Para verificar estatisticamente a influência do teor de adição de escória, *a/c* e idade nos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos, realizou-se a ANOVA. Na Tabela 36 estão apresentados os resultados.

**Tabela 36** Resultados da ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Adição	1	4,1667	79,23	4,13	S
B – <i>a/c</i>	2	6,6668	126,76	3,28	S
C – Idade	2	5,9918	113,93	3,28	S
AB	2	0,0572	1,09	3,28	NS
AC	2	0,0467	0,89	3,28	NS
BC	4	0,0324	0,62	2,66	NS
ABC	4	0,0606	1,15	2,66	NS
ERRO	36	0,052593			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

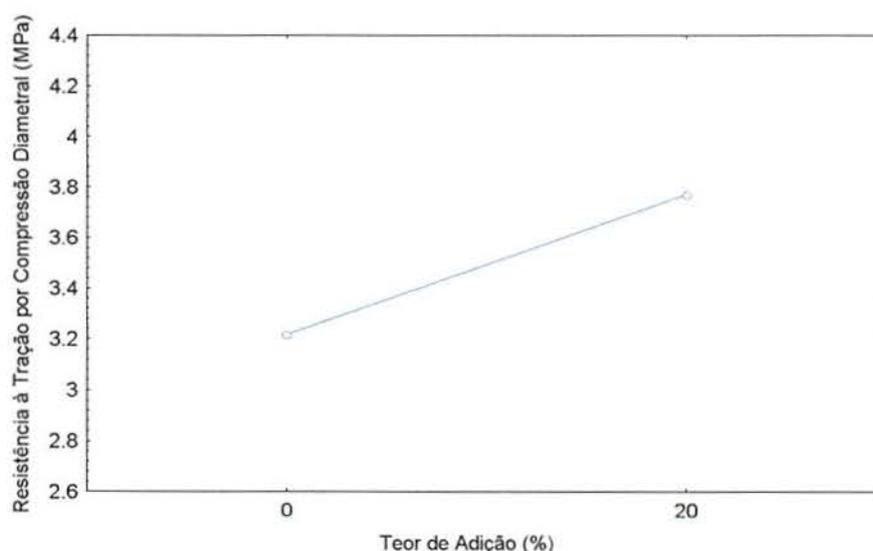
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

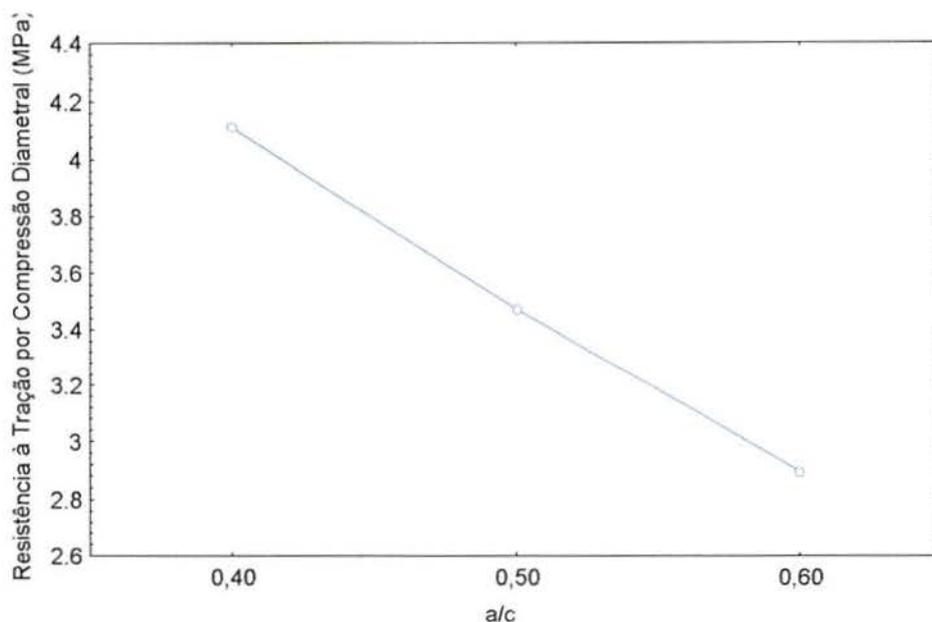
NS – Não Significativo

Com base nos resultados da ANOVA, pode-se dizer que há influência significativa do teor de adição, da relação *a/c* e da idade dos concretos na resistência à tração por compressão diametral. Não há interação entre as variáveis.

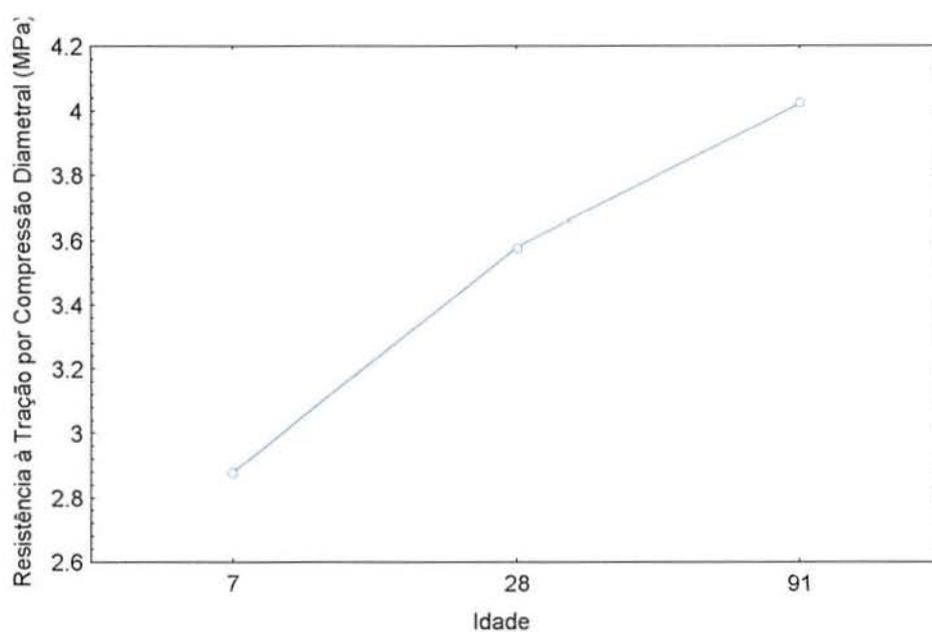
Na Figura 32 (a), (b) e (c) observa-se o comportamento dos concretos, com relação à resistência à tração por compressão diametral, em função do teor de adição de escória de cobre, da relação *a/c* e da idade, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 32** Comportamento dos concretos quanto à resistência à tração por compressão diametral, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade

A resistência à tração por compressão diametral cresce com a adição de escória de cobre, para todas as relações a/c. O comportamento é o mesmo em todas as idades do concreto, como pode ser observado nas Figura 29, Figura 30 e Figura 31. O aumento da resistência chega a ser de 17,6%. Percebe-se que o aumento que a adição de escória de cobre proporcionou na resistência á tração por

compressão diametral do concreto foi bastante inferior ao proporcionado na resistência à compressão axial. Pode-se observar, ainda, que na resistência à compressão axial, a influência da adição de escória de cobre foi mais evidenciada para as maiores relações  $a/c$ , enquanto que na resistência à tração por compressão diametral a influência foi maior para menor relação  $a/c$ .

SILVEIRA et al. (1999) verificaram que a adição de 10% de sílica ativa no concreto aumentou a resistência à compressão axial em 50% e a resistência à tração em 49%, para relação  $a/(c+s)$  0,49. Sabe-se que a sílica ativa exerce atividade pozolânica e efeito microfíler no concreto. Entretanto, o efeito da atividade pozolânica é muito mais pronunciado, razão pela qual o aumento nas resistências foi semelhante. Por outro lado, de acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), a influência do efeito filer na resistência à compressão não é proporcional ao aumento na resistência à tração, sendo menor neste último.

A adição de escória de cobre aumentou a resistência à compressão axial em 30,4% e a resistência à tração por compressão diametral em 17,6%. Considerando que a atividade pozolânica deve aumentar a resistência à tração na mesma proporção da resistência à compressão, pode-se dizer que apesar de ter havido influência da atividade pozolânica, o efeito filer da escória de cobre foi o principal responsável pelo aumento da resistência à tração por compressão diametral do concreto. Se a maior contribuição fosse devida à atividade pozolânica, o aumento na resistência à tração por compressão diametral seria próximo ao obtido por compressão axial. Observa-se que, também, não houve interação entre o teor de adição e a idade do concreto, o que reforça a hipótese.

### 5.5.2.3 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de determinação da resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a NBR 12142 (1991). Os resultados de resistência, nas idades de 7 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 37.

Nas Figura 33 e Figura 34 estão apresentados os gráficos de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

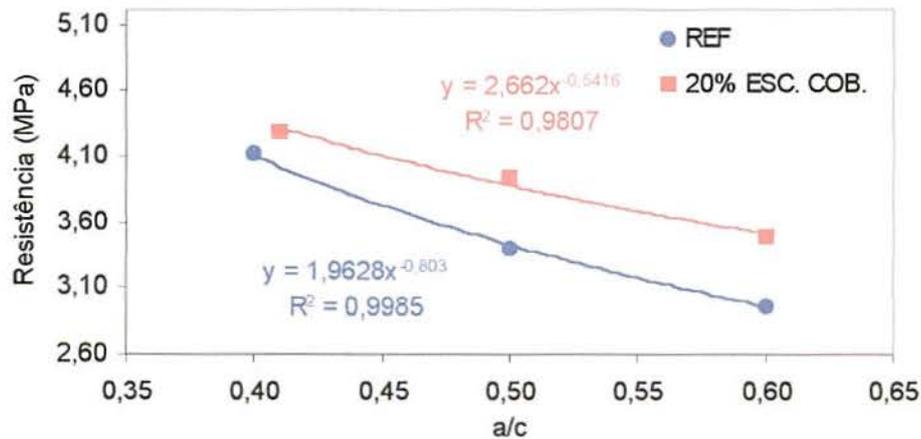
**Tabela 37** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos

Mistura	Idade						
	a/c	7 dias			28 dias		
		ftf	ffm	C.V.	ftf	ffm	C.V.
Referência	0,40	3,86	4,11	6,28	5,03	4,80	4,36
		4,10			4,77		
		4,38			4,61		
	0,50	3,38	3,40	6,16	4,07	4,02	4,14
		3,61			3,83		
		3,20			4,15		
	0,60	2,84	2,97	4,45	3,37	3,37	2,49
		3,10			3,46		
		2,97			3,29		
20% de Escória de cobre	0,41	4,28	4,28	2,74	5,08	5,09	2,57
		4,16			4,96		
		4,40			5,22		
	0,50	3,79	3,94	4,54	4,80	4,69	2,31
		4,14			4,58		
		3,89			4,70		
	0,60	3,38	3,48	3,20	4,15	3,99	3,47
		3,60			3,89		
		3,46			3,94		

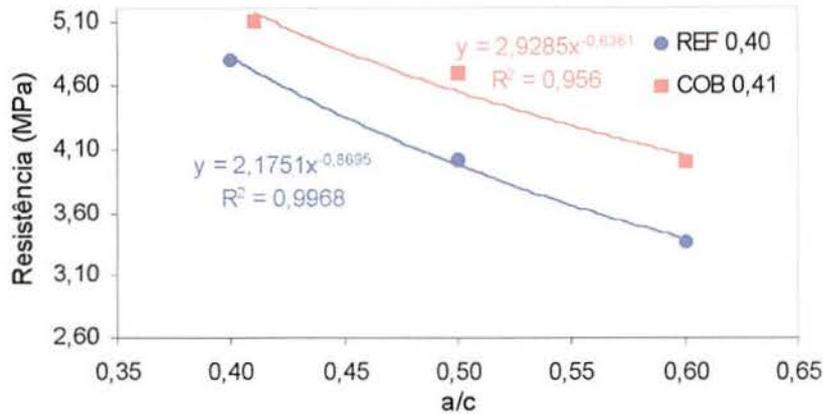
ftf – Resistência à axial (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

ffm – Resistência média à compressão axial (MPa)



**Figura 33** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 7 dias



**Figura 34** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias

### Análise dos Resultados

Através da ANOVA, foi verificado a influência do teor de adição de escória, a/c e idade nos resultados de resistência à tração na flexão dos concretos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 38.

**Tabela 38** Resultados da ANOVA para a resistência à tração na flexão dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Adição	1	138,4544	65,14	4,26	S
B – a/c	2	553,6211	260,46	3,40	S
C – Idade	1	265,6900	125,00	4,26	S
AB	2	25,5411	12,02	3,40	S
AC	1	6,5411	3,10	4,26	NS
BC	2	1,7500	0,82	3,40	NS
ABC	2	1,7411	0,82	3,40	NS
ERRO	24	2,125556			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

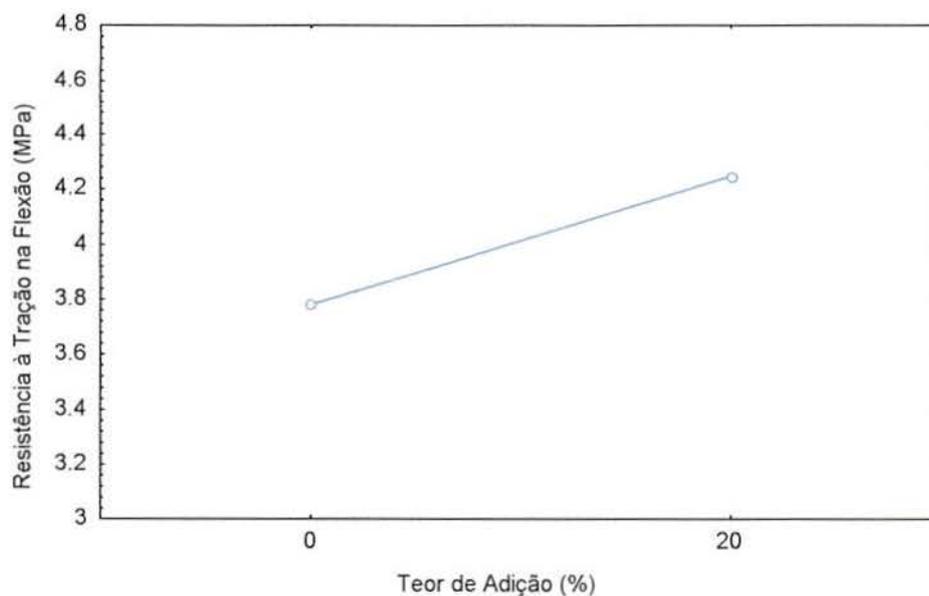
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

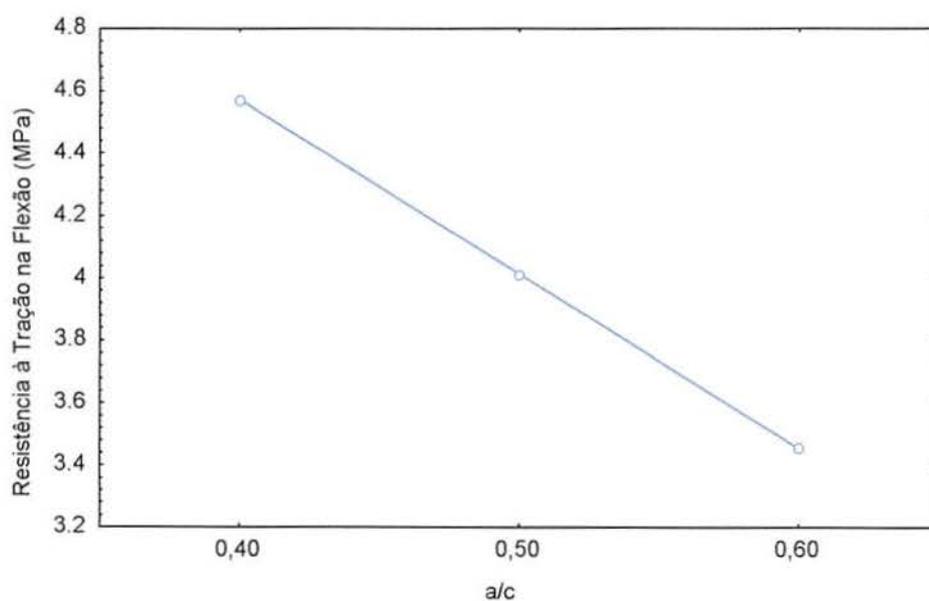
NS – Não Significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência significativa do teor de adição, da relação a/c e da idade dos concretos na resistência à tração na flexão. Verifica-se, também, que existe interação, embora fraca, entre o teor de adição e a relação a/c.

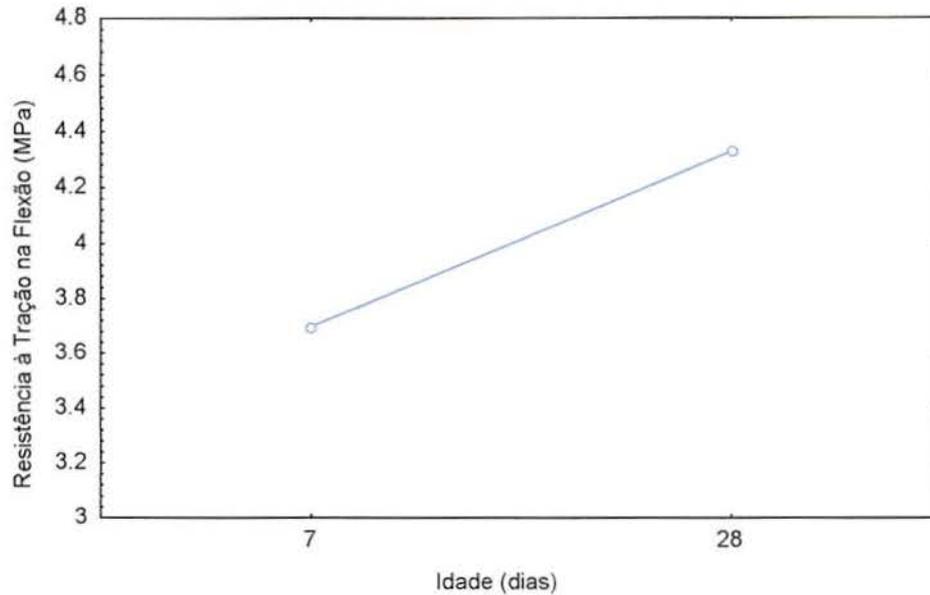
Na Figura 35 (a), (b) e (c) observa-se o comportamento dos concretos com relação à resistência à tração na flexão em função do teor de adição, da relação  $a/c$  e da idade, respectivamente. A influência da interação entre o teor de adição e a relação  $a/c$  pode ser visualizada através do gráfico da Figura 36.



(a)

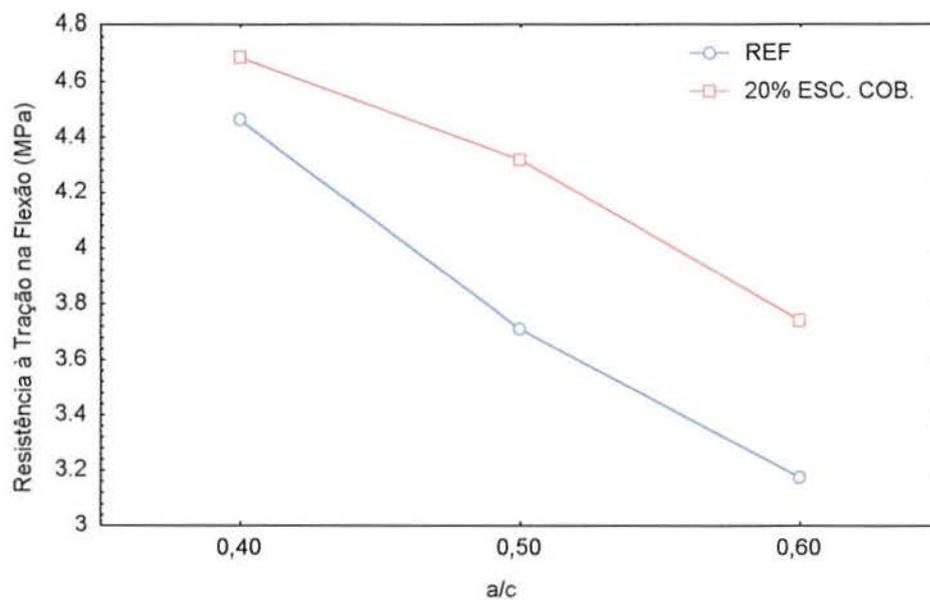


(b)



(c)

**Figura 35** Comportamento dos concretos quanto à resistência à tração na flexão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade



**Figura 36** Resistência à tração na flexão, em função da interação entre a relação a/c e o teor de adição

A adição de 20% de escória de cobre proporcionou um melhor desempenho do concreto quanto à resistência à tração na flexão. A influência é mais significativa, ainda, para maiores relações a/c, chegando a aumentar a resistência em 18,4% para

relação 0,60 aos 28 dias. Este comportamento é semelhante para todas as idades de referência.

A granulometria da escória de cobre moída, a forma dos grãos e sua massa específica, associado à atividade pozolânica, provocaram uma redução na porosidade do concreto, aumentando a sua resistência.

Observou-se que, também, quanto à resistência à tração na flexão, a adição de escória de cobre proporcionou um aumento bem menor do que o obtido na resistência à compressão axial. Este comportamento reforça a hipótese de que o efeito filer contribuiu mais para o aumento da resistência do que a atividade pozolânica.

### 5.5.3 Aspectos relativos à durabilidade do concreto

Além das propriedades mecânicas, é de fundamental importância avaliar o desempenho do concreto com adições, no que se refere à sua durabilidade.

Para avaliar a influência da adição de escória de cobre ao concreto, quanto à durabilidade, foram realizados ensaios de absorção por imersão e por sucção capilar, carbonatação e ataque por sulfato de sódio.

#### 5.5.3.1 Absorção por imersão

No ensaio de absorção por imersão mede-se o volume de poros no concreto, e não a facilidade com que um fluido pode penetrar. Neste caso, aplica-se o método de absorção por sucção capilar, descrito no item 4.2.2.3.1.2.

Os ensaios de absorção dos corpos-de-prova de concreto foram realizados com base na NBR 9778 (1990). A determinação foi feita a frio. Os resultados de absorção média estão apresentados na Tabela 39.

**Tabela 39** Resultados do ensaio de absorção por imersão do concreto

Mistura	a/c	Absorção Média (%)	Coefficiente de Variação	Média do Índice de Vazios (%)
REFERÊNCIA	0,40	3,98	1,3	9,2
	0,50	4,43	4,6	10,6
	0,60	5,20	2,1	12,1
(20%) ESCÓRIA DE COBRE	0,41	3,82	1,5	8,5
	0,50	4,23	3,8	9,4
	0,60	4,50	2,4	10,2

## Análise dos Resultados

Através da ANOVA foi avaliada a influência do teor de adição de escória de cobre e da relação a/c sobre a absorção por imersão, cujos resultados estão apresentados na Tabela 40.

**Tabela 40** Resultados da ANOVA para absorção por imersão dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,243675	29,51	5,99	S
B – a/c	2	0,985975	119,39	5,14	S
AB	2	0,130225	15,77	5,14	S
ERRO	6	0,008258			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

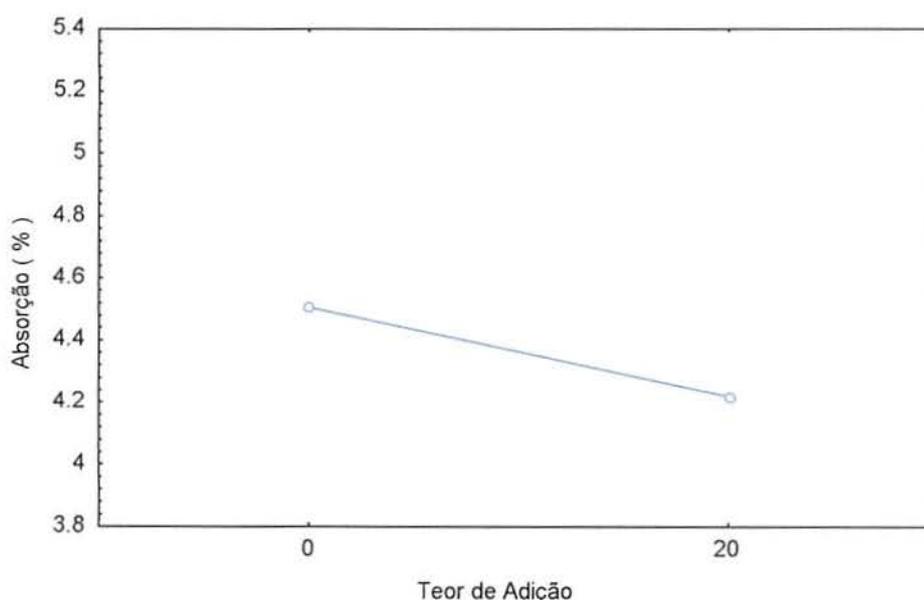
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

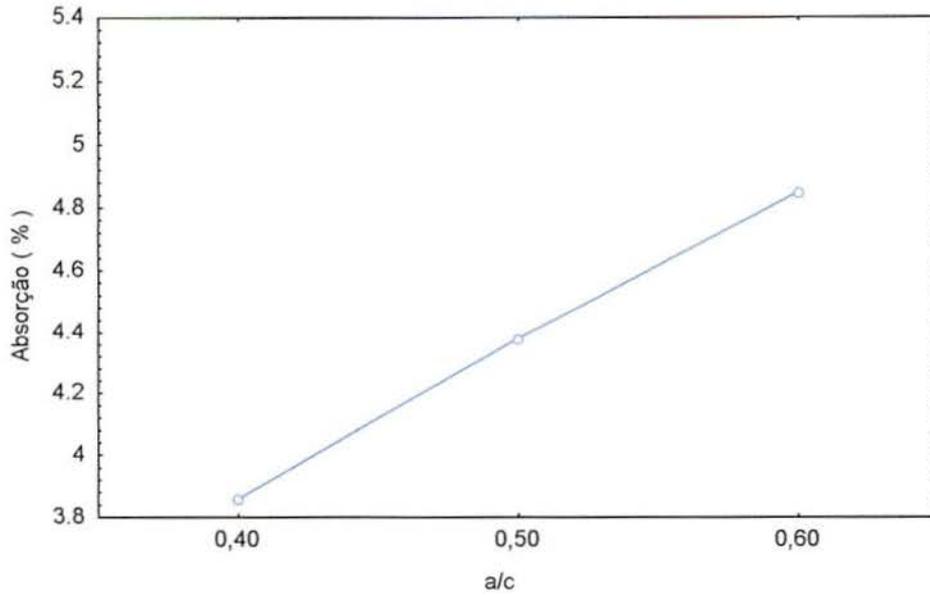
NS – Não Significativo

A ANOVA mostra que há uma influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação a/c nos resultados de absorção. Verifica-se, também que há interação entre estes fatores.

Na Figura 37 (a) e (b) observa-se o comportamento dos concretos, no que se refere à absorção por imersão. A Figura 38 apresenta o gráfico de absorção em função da interação entre o teor de adição e a relação a/c.

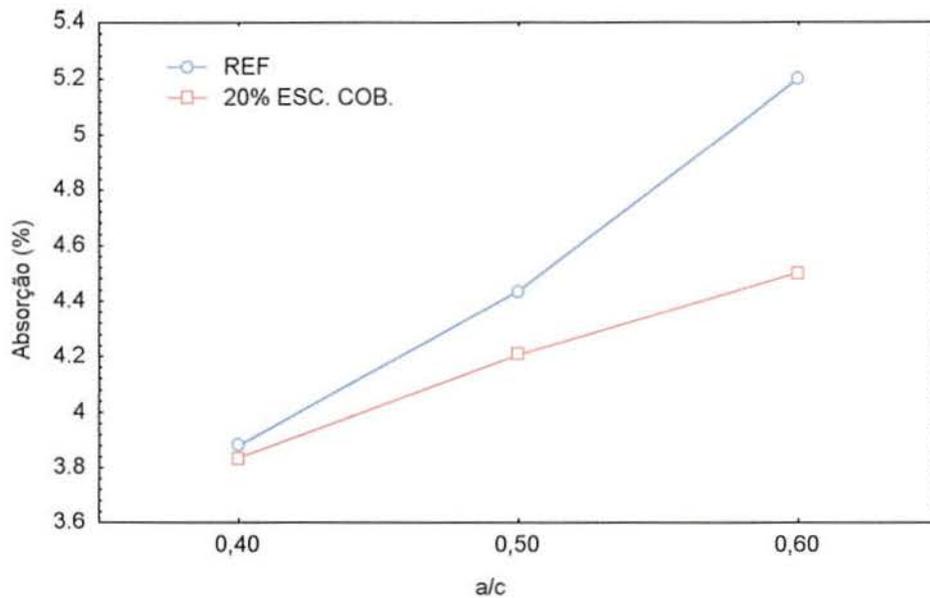


(a)



(b)

**Figura 37** Comportamento do concreto quanto à absorção por imersão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c



**Figura 38** Absorção, em função da interação entre a relação a/c e o teor de adição.

Os resultados mostram que houve um melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre. A forma e textura dos grãos associado à massa específica mais elevada, possibilita uma maior densificação do concreto. O índice de vazios, determinado com base na NBR 9778 (1987), é menor nos concretos com

adição de escória de cobre, para todas as relações a/c. Este fato confirma que há uma maior influência da adição de escória na redução dos poros, principalmente para maiores relações a/c, chegando a reduzir a absorção por imersão em 13,5%, para relação a/c 0,60.

#### 5.5.3.2 Absorção por sucção capilar

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base no ensaio desenvolvido por KELHAM (1988). Este ensaio foi realizado nos concretos com e sem adição de escória de cobre para as diferentes relações a/c. Foi adotada a sugestão de GOPALAN (1996), no que se refere à espessura dos corpos-de-prova, reduzindo de 50 para 25 mm. Desta forma, o ensaio é realizado num menor período de tempo.

Os procedimentos para execução do ensaio de absorção foram os seguintes:

- após 28 dias de cura em câmara úmida os corpos-de-prova prismáticos (100x100x150) mm foram serrados em fatias de (100x100x25) mm. Foram selecionadas 2 fatias para cada traço, sendo uma de cada corpo-de-prova. As fatias foram retiradas da extremidade, para levar em consideração o efeito parede, reproduzindo, desta forma, o que ocorre nos elementos estruturais (pilares, vigas, etc.);
- as amostras foram colocadas em estufa à temperatura de  $110 \pm 10$  °C para secagem até a constância de massa (diferença de 0,1% entre pesagens no intervalo de 24 horas). O tempo de secagem das amostras foi 48 horas, em média;
- após a constância de massa, resfriou-se as amostras num dessecador com sílica gel para manter a umidade relativa baixa até atingir a temperatura ambiente. Quando as amostras permaneceram por mais de um dia no dessecador, realizou-se a pesagem para verificar se a amostra estava totalmente seca, procedendo a secagem, em estufa, caso a diferença entre pesagens fosse superior a 0,1%;
- determinou-se a área e a espessura média de cada amostra, medida a partir das quatro laterais;

- procedeu-se a impermeabilização das faces laterais de cada corpo-de-prova, com resina epóxi e colocou-se os mesmos no recipiente com sílica gel para mantê-los secos. Tomou-se os devidos cuidados para que a resina não atingisse as faces inferior e superior das amostras, principalmente a inferior, para que não houvesse redução da área de contato com a água;
- foi colocada, na face superior da amostra (face serrada), uma placa de PVC furada no centro, com uma mangueira de 4 mm de diâmetro envolvendo o furo. A função desta mangueira foi fazer o contato com a atmosfera, garantindo o equilíbrio de pressão entre a atmosfera e o espaço entre a placa e a face da amostra. A placa PVC ficou afastada da face superior da amostra, em torno de 2 mm;
- estabeleceu-se os tempos para determinação das pesagens em 2, 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440, 2880, 4320 e 5760 minutos, até a saturação do corpo-de-prova. Considerou-se que o corpo-de-prova estava saturado quando a variação de massa era inferior a 0,2%;
- equilibrou-se o conjunto balança e a bandeja de suporte da amostra, antes do ensaio. A bandeja foi posicionada de forma que garantisse a imersão do corpo-de-prova durante as pesagens;
- procedeu-se as pesagens do corpo-de-prova nos tempos pré-estabelecidos.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram o esquema de pesagem dos corpos-de-prova submersos, e o seu aspecto após a saturação. Observa-se na Figura 40 a diferença, por contraste, entre os corpos-de-prova saturados e um seco.



**Figura 39** Aspecto da pesagem dos corpos-de-prova durante a absorção

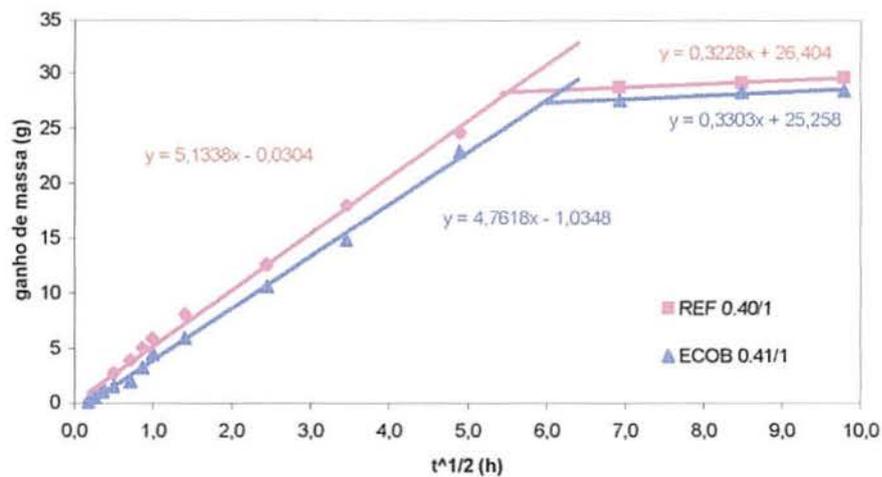


**Figura 40** Aspecto dos corpos-de-prova após a saturação

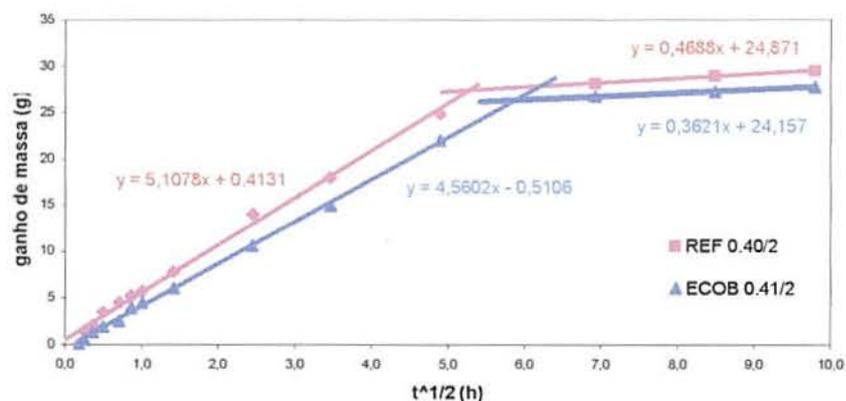
Os valores de acréscimo acumulado de massa são plotados num gráfico em função da raiz quadrada do tempo. Verifica-se, no gráfico, um ponto de inflexão, a partir do qual são ajustadas duas retas: uma na fase de absorção inicial e a outra na

fase de saturação. O ponto de inflexão corresponde ao tempo necessário para que ocorra a saturação efetiva do corpo-de-prova. As retas foram traçadas segundo os critérios de regressão linear simples.

Nas Figura 41 (a) e (b), Figura 42 (a) e (b) e Figura 43 (a) e (b) estão apresentados os gráficos de absorção por sucção capilar dos corpos-de-prova de concreto.

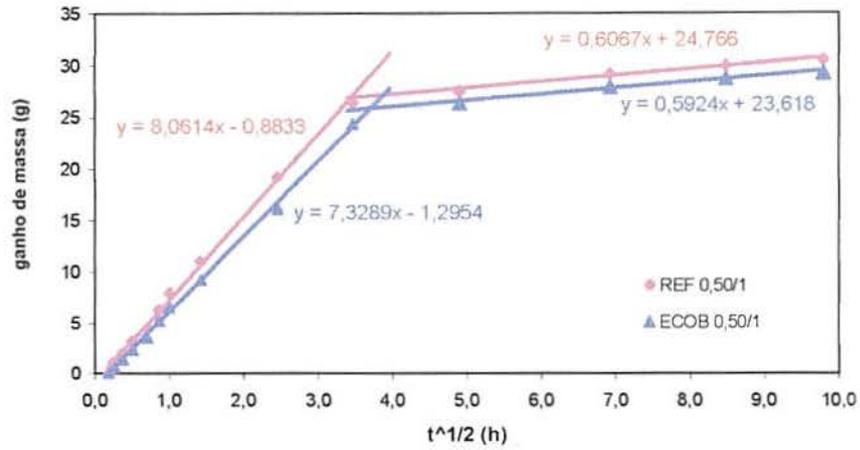


(a)

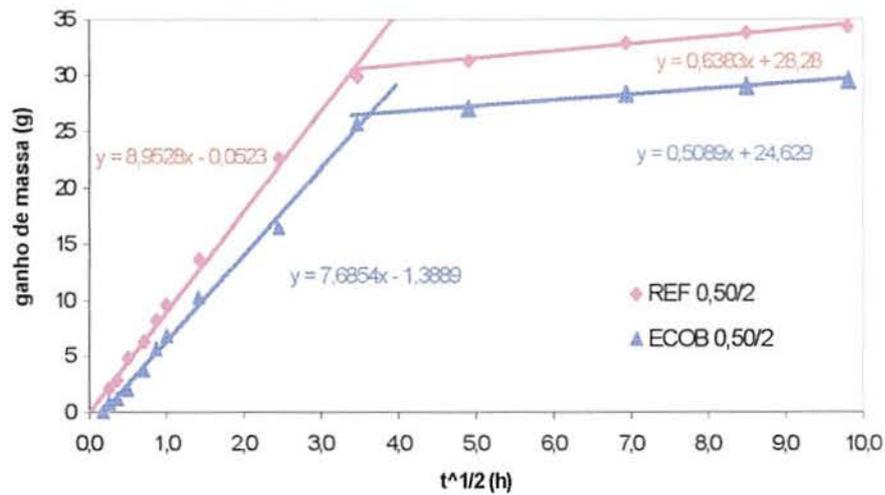


(b)

**Figura 41** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,40: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2

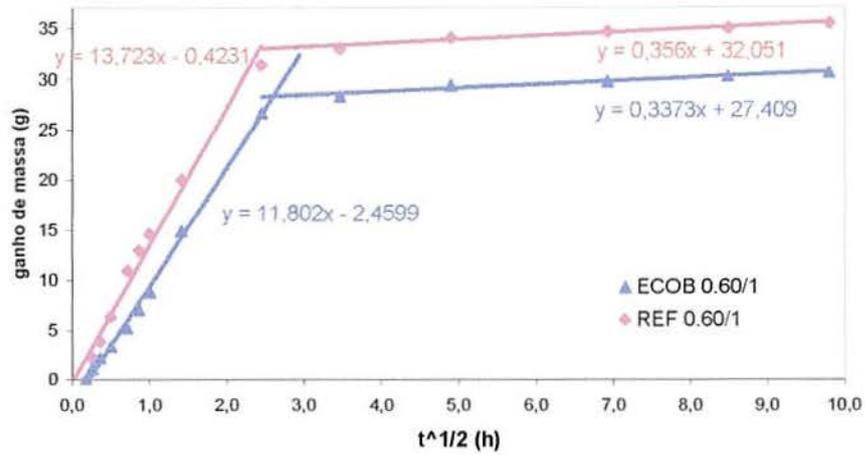


(a)

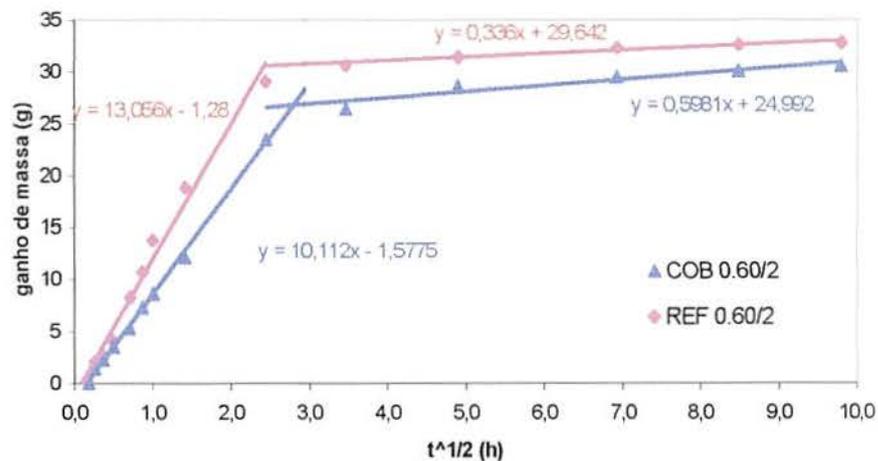


(b)

**Figura 42** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,50: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2



(a)



(b)

**Figura 43** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c 0,60: (a) corpo-de-prova 1, (b) corpo-de-prova 2

Determina-se a taxa de absorção, que é obtida pela inclinação da reta correspondente à fase de absorção inicial, dividido pela área da seção transversal do corpo-de-prova, em centímetros quadrados. Outro parâmetro determinado foi a resistência capilar, obtida pelo quadrado da divisão do valor do *nick point*, no eixo das abcissas, pela espessura média do corpo-de-prova, em metros.

Os resultados dos parâmetros obtidos nos ensaios de absorção por sucção capilar estão apresentados na Tabela 41.

**Tabela 41** Resultados de taxa de absorção e resistência capilar dos concretos

Mistura	a/c	Taxa de Absorção (g/cm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ) x10 <sup>-2</sup>	Taxa de Absorção Média (g/cm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )x10 <sup>-2</sup>	Resistência Capilar (h/m <sup>2</sup> )	Resistência Capilar Média (h/m <sup>2</sup> )
Referência	0,40/1	5,09	5,08	50.297	47.564
	0,40/2	5,06		44.832	
	0,50/1	8,00	8,44	19.562	19.070
	0,50/2	8,87		18.579	
	0,60/1	13,64	13,3	10.078	9.921
	0,60/2	12,95		9.765	
20% de Escória de Cobre	0,41/1	4,72	4,62	54.993	54.254
	0,41/2	4,52		53.516	
	0,50/1	7,29	7,46	22.786	21.908
	0,50/2	7,62		21.030	
	0,60/1	11,77	10,09	11.495	12.037
	0,60/2	10,05		12.579	

### Análise dos Resultados

Os dois parâmetros, obtidos nos ensaios de absorção por sucção capilar, serão analisados separadamente.

#### a) Taxa de absorção

A influência do teor de adição de escória de cobre e da relação a/c sobre a taxa de absorção foi avaliada através da ANOVA. Estes resultados estão apresentados na Tabela 42.

**Tabela 42** Resultados da ANOVA quanto à taxa de absorção dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	0,000486	13,44	5,99	S
B – a/c	2	0,005301	146,53	5,14	S
AB	2	0,000100	2,75	5,14	NS
ERRO	6	0,000036			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

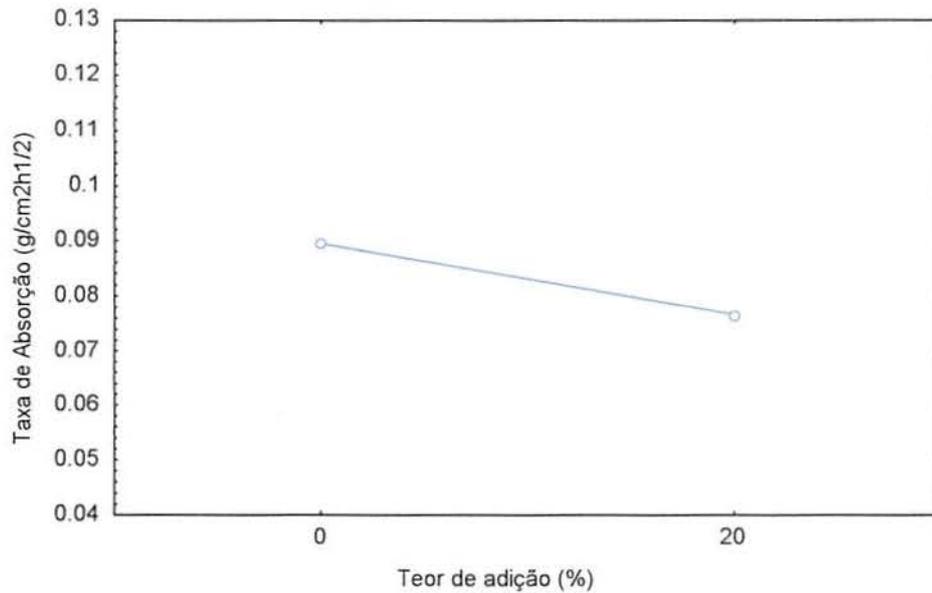
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

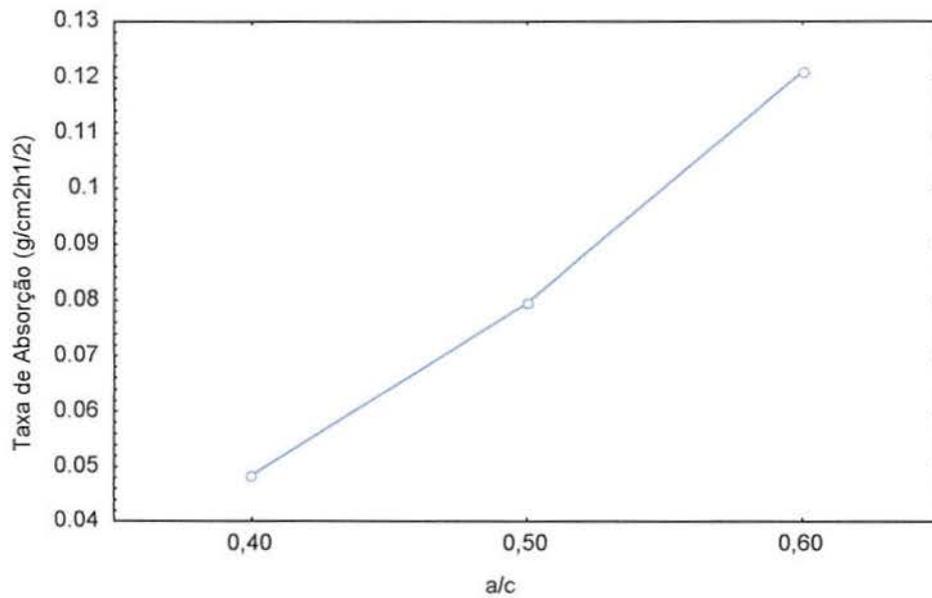
NS – Não Significativo

A ANOVA mostra que há uma influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação a/c nos resultados da taxa de absorção. Porém, não há interação entre estas variáveis.

A Figura 44 (a) e (b) apresenta o comportamento dos concretos, no que se refere à taxa de absorção.



(a)



(b)

**Figura 44** Resultados da taxa de absorção em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c.

Os resultados mostram que houve um melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre. A taxa de absorção diminuiu em até 24,1% para a relação a/c 0,60. Este fato está relacionado com o melhor preenchimento e

distribuição dos vazios no concreto com adição de escória de cobre. A forma dos grãos e massa específica mais elevada favorecem a uma maior densificação do concreto. Por outro lado, quanto menor for a relação  $a/c$ , menor a taxa de absorção. Isso é explicado pela porosidade do concreto, que é maior para relações  $a/c$  maiores, além da maior incidência de capilares.

ISAIA (1995) estudou a influência da adição de sílica ativa, cinza de casca de arroz e cinza volante no concreto, em relação à penetração de água. Verificou que o aumento do teor de adição de sílica ativa de 10% para 20% reduziu o coeficiente de penetração de água, na mesma proporção do aumento da resistência à compressão. Este mesmo comportamento foi verificado com a cinza de casca de arroz. Porém, o aumento do teor de adição de cinza volante de 25% para 50% reduziu o aumento da resistência à compressão em até 20%, bem como o coeficiente de penetração de água. Este comportamento da cinza volante foi atribuído ao efeito fíler, que é preponderante, principalmente nas idades iniciais do concreto, proporcionando um maior refinamento e bloqueio dos poros.

Estudos realizados por BARATA (1998) mostraram que a adição de 10% de sílica ativa aumentou a resistência à compressão axial em 50% e reduziu a taxa de absorção por sucção capilar cerca de 80%, em relação ao concreto sem adição. A adição de 10% de metacaulim aumentou a resistência à compressão cerca de 45% e reduziu a taxa de absorção por sucção capilar em torno de 50%.

AZEVEDO (1999) verificou que a adição de 10% de cinza de casca de arroz ao concreto com cimento de alta resistência inicial reduziu a resistência à compressão axial, aos 180 dias, em 4% e aumentou a taxa de absorção por sucção capilar em torno de 28% em relação ao concreto sem adição. O concreto com cimento pozolânico (cinza volante como pozolana) reduziu a resistência à compressão axial em 10%, porém, reduziu a taxa de absorção por sucção capilar em 15%, em relação ao concreto com cimento de alta resistência inicial.

BAUER (1995) verificou que concretos com cimento composto com 24% de escória de alto-forno apresentaram taxa de absorção capilar cerca de 40% superior aos concretos sem adição. BAUER argumenta que concretos com escória de alto-forno apresentam maior porosidade.

Com base no comportamento das adições avaliadas nestes estudos citados acima, é possível dizer que o efeito da sílica ativa e do metacaulim sobre a absorção

é devido à sua alta atividade pozolânica e ao efeito fíler, que é bastante significativo. A cinza de casca de arroz não apresenta um bom efeito de preenchimento, em consequência, a absorção do concreto aumenta. A escória de alto-forno também aumenta absorção do concreto devido a sua maior porosidade. Por outro lado, o efeito fíler proporcionado pela cinza volante reduz a absorção do concreto. Estes resultados indicam que a menor taxa de absorção verificada nos concretos com adição de escória de cobre deve-se, principalmente, ao efeito fíler.

### b) Resistência capilar

A influência do teor de adição e da relação *a/c* nos resultados de resistência capilar foi avaliada através da análise de variância. Na Tabela 43 estão apresentados os resultados desta análise.

**Tabela 43** Resultados da ANOVA quanto à resistência capilar dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	451865E2	14,51	5,99	S
B – <i>a/c</i>	2	174017E4	5,14	5,14	S
AB	2	6048182	5,14	5,14	NS
ERRO	6	3114217			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

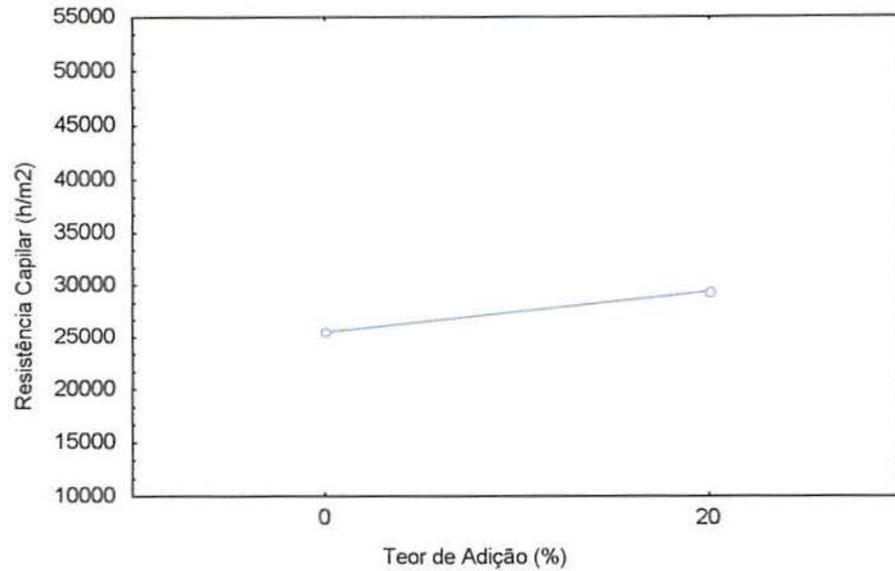
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

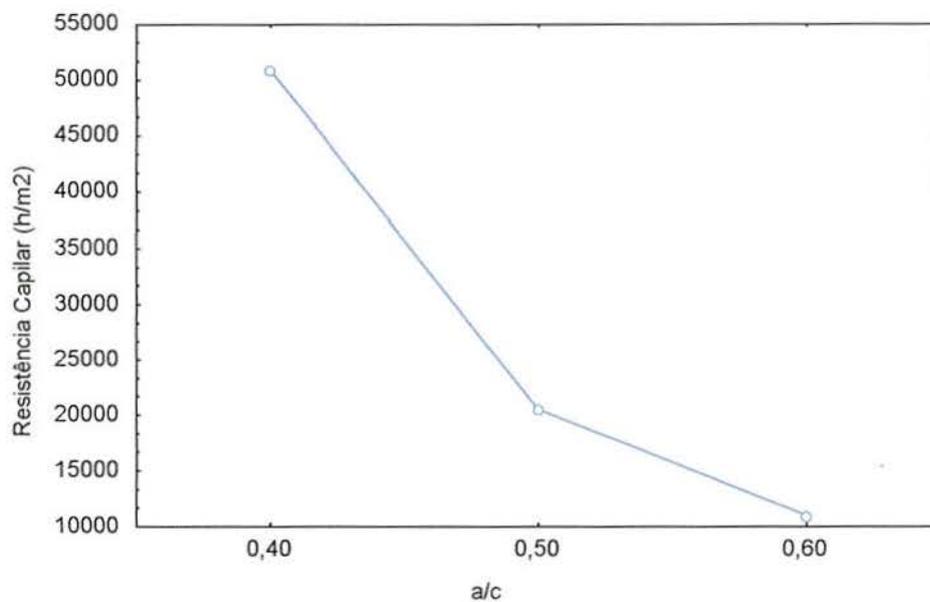
NS – Não Significativo

De acordo com a ANOVA, verifica-se que há uma influência significativa do teor de adição de escória de cobre e da relação *a/c* nos resultados da resistência capilar. Não existe, porém, interação entre estes fatores.

Na Figura 45 (a) e (b) estão apresentados os gráficos de comportamento dos concretos, quanto à resistência capilar.



(a)



(b)

**Figura 45** Resultados de resistência capilar em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c.

Observa-se que houve um melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre, no que se refere à resistência capilar. A adição de 20% de escória de cobre no concreto proporcionou um aumento de 17%, em média, na resistência capilar. Este desempenho está, também, relacionado com a porosidade do concreto, que por sua vez é influenciada pelo teor de adição de escória de cobre. Isso significa que concretos com adição de escória de cobre oferecem maior resistência à

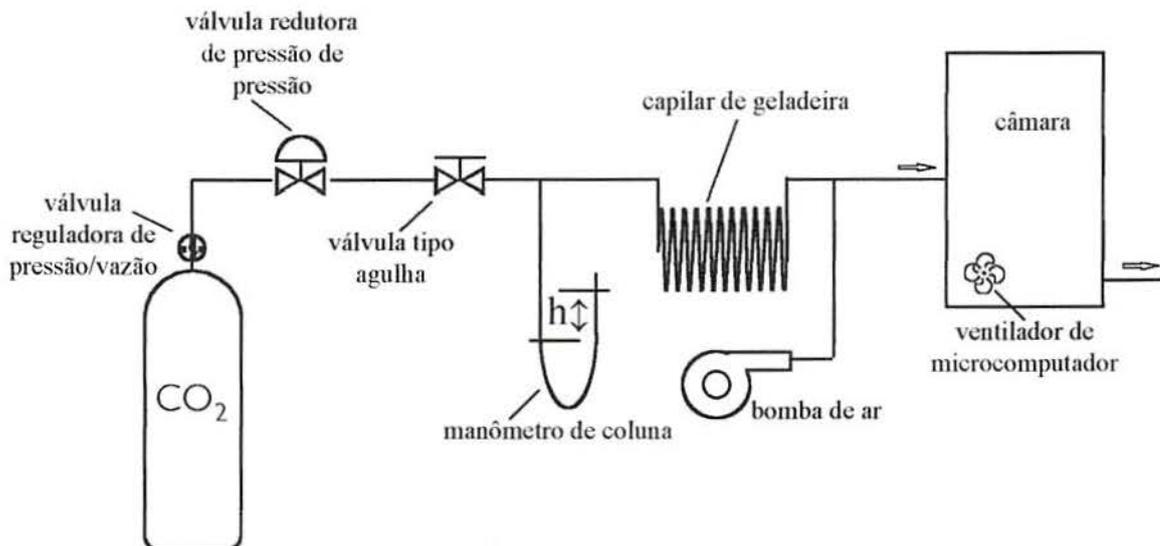
passagem de líquidos. Por outro lado, a resistência capilar diminui quanto maior for a relação *a/c*.

SMESPLASS, citado por GJORV (1994), verificou que concretos com adição de 5% de sílica ativa reduziram, em média, 58% a resistência capilar, em relação aos de referência, independente da relação *a/c*.

### 5.5.3.3 Carbonatação

No presente trabalho, o ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em câmara de concentração controlada de 5% de CO<sub>2</sub>, em ambiente climatizado com umidade relativa  $68 \pm 2\%$  e temperatura de  $21 \pm 2$  °C.

A Figura 46 mostra o esquema da câmara de carbonatação utilizada no ensaio.



**Figura 46** Esquema da câmara de carbonatação para ensaio acelerado (JOHN, 1995)

Neste estudo foram ensaiados 2 corpos-de-prova prismáticos (10x10x15) cm de concreto para cada traço. Após a retirada das formas, os corpos-de-prova foram envolvidos em filme plástico para impedir o contato com o meio e mantidos durante 7 dias de cura na câmara úmida. Após esta idade, foram pesados e colocados numa câmara de sazonalamento para atingir a umidade de equilíbrio da câmara climatizada, definida a partir de pesagens regulares até a constância de massa. A Figura 47 mostra a câmara de sazonalamento utilizada no ensaio. Após atingir esta umidade de equilíbrio, os corpos-de-prova foram colocados na câmara de carbonatação, onde

permaneceram até a data das medições. A Figura 48 mostra os corpos-de-prova dispostos na câmara de carbonatação.

A cada data de ensaio os corpos-de-prova foram retirados da câmara de carbonatação e fraturados, numa prensa de ensaios de compressão, para retirada de uma fatia, que será chamada de amostra. Logo após a retirada da amostra, foi procedida a limpeza da superfície fraturada, aspergida a solução de fenolftaleína sobre esta superfície e 20 minutos após procedidas as medições das espessuras de camadas carbonatadas. Foram realizadas 4 medidas por amostra, a partir de cada uma das laterais, com aproximação de 0,5 mm. A espessura da frente de carbonatação de cada amostra foi considerada como sendo a média das 4 medidas. Após a fratura dos corpos-de-prova, nas idades de 180 e 210 dias, foi aplicada parafina na superfície fraturada, antes de serem repostos na câmara de carbonatação. Desta forma, evitou-se que o fluxo de  $\text{CO}_2$  penetrasse com maior facilidade pela superfície fraturada.



**Figura 47** Aspecto da câmara de sazonalamento



**Figura 48** Aspecto da câmara de carbonatação com os corpos-de-prova

Na Tabela 44 estão apresentados os resultados de carbonatação dos concretos nas diferentes idades de determinação.

**Tabela 44** Resultados dos ensaios de carbonatação

Mistura	a/c	180 dias		210 dias		240 dias	
		Espes. (mm)	Espes. Média (mm)	Espes. (mm)	Espes. Média (mm)	Espes. (mm)	Espes. Média (mm)
Referência	0,40	0	0	0	0	0	0
		0		0		0	
	0,50	0	0	1,0	1,0	5,0	5,0
		0		1,0		5,5	
	0,60	9,5	9,0	16,5	17,5	20,0	21,0
		8,5		18,0		22,0	
20% de Escória de Cobre	0,41	0	0	0	0	0	0
		0		0		0	
	0,50	0	0	0	0	1,0	1,0
		0		0		1,0	
	0,60	0	0	9,0	7,5	16,0	13,5
		0		6,5		11,0	

Espes. – espessura da área carbonatada

Espes. Média – espessura média da área carbonatada

## Análise dos Resultados

Para verificação da influência do teor de adição de escória, *a/c* e idade nos resultados do ensaio de carbonatação foi feita a ANOVA, cujos resultados estão apresentados na Tabela 45.

**Tabela 45** Resultados da ANOVA da profundidade de carbonatação dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de adição	1	108,5069	100,8064	4,41	S
B – <i>a/c</i>	2	472,0208	438,5226	3,55	S
C – Idade	2	84,1458	78,1742	3,55	S
AB	2	63,0069	58,5355	3,55	S
AC	2	0,6319	0,5871	3,55	NS
BC	4	46,6042	43,2968	2,93	S
ABC	4	2,6944	2,5032	2,93	NS
ERRO	18	1,0764			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

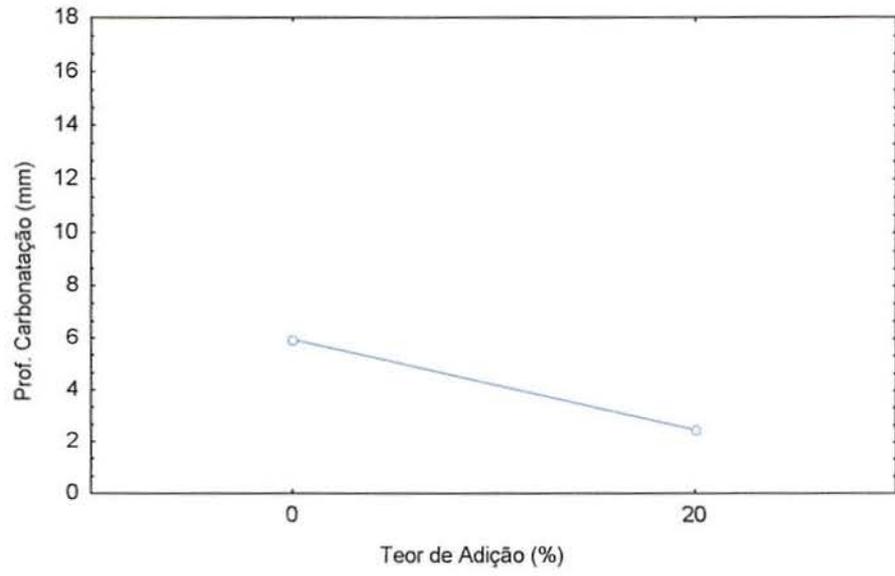
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

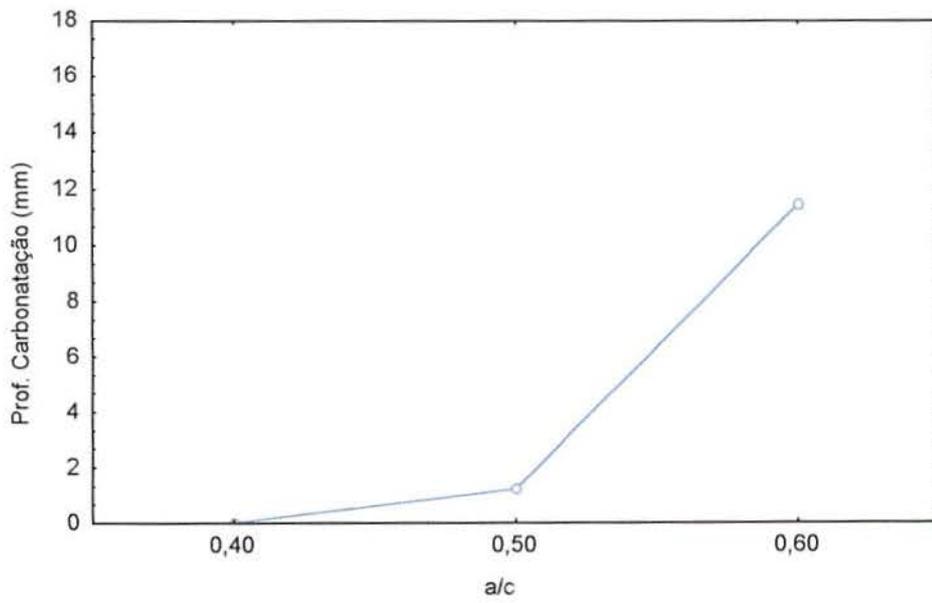
NS – Não Significativo

Verifica-se que há influência significativa do teor de adição, da relação *a/c* e da idade na carbonatação. Existe, também, interação entre o teor de adição e a relação *a/c*, e entre a idade do concreto e a relação *a/c*. Porém não há interação entre o teor de adição e a idade nem entre as 3 variáveis.

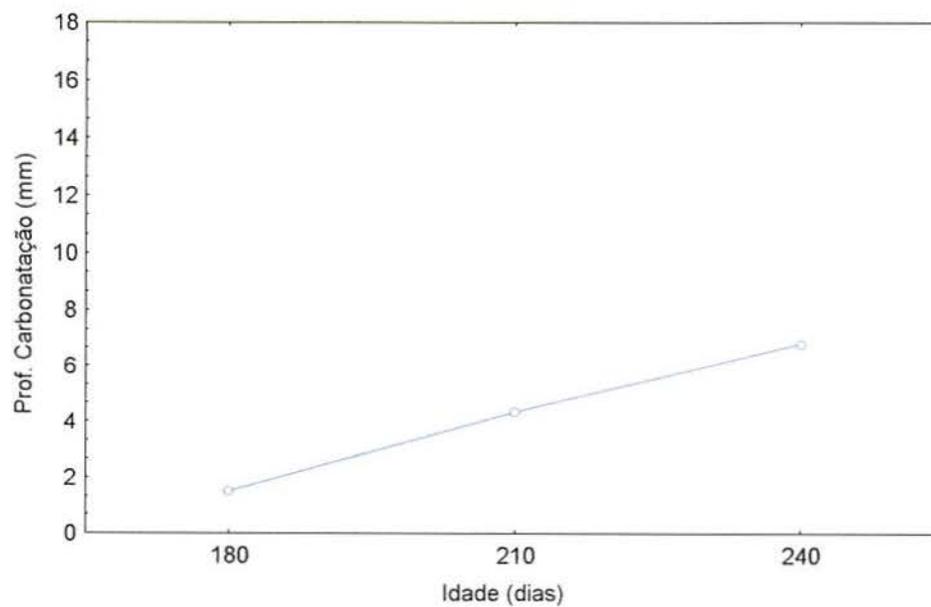
A Figura 49 (a), (b) e (c) apresenta o comportamento dos concretos quanto à carbonatação, sob a influência do teor de adição de escória, da relação *a/c* e da idade, respectivamente. As interações entre o teor de adição e a relação *a/c* e entre a idade e a relação *a/c* estão apresentadas na Figura 50 (a) e (b), respectivamente.



(a)

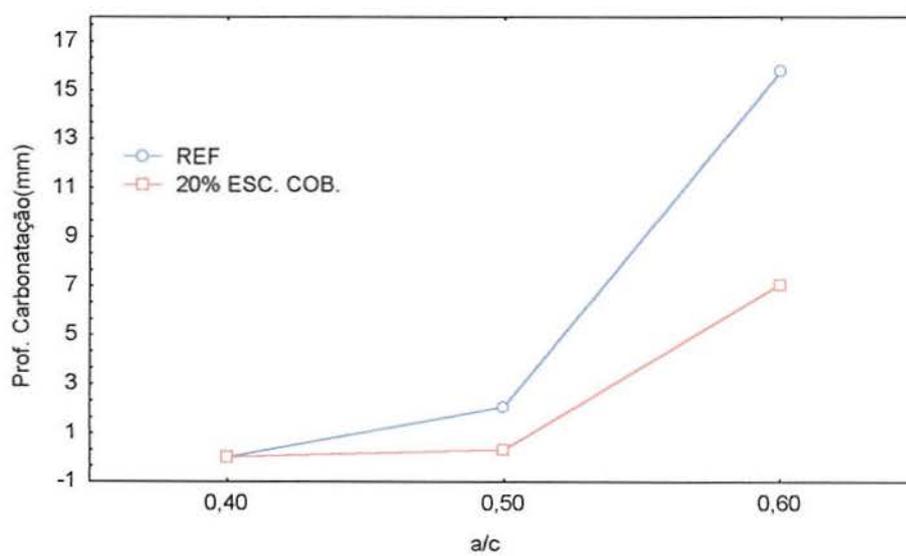


(b)

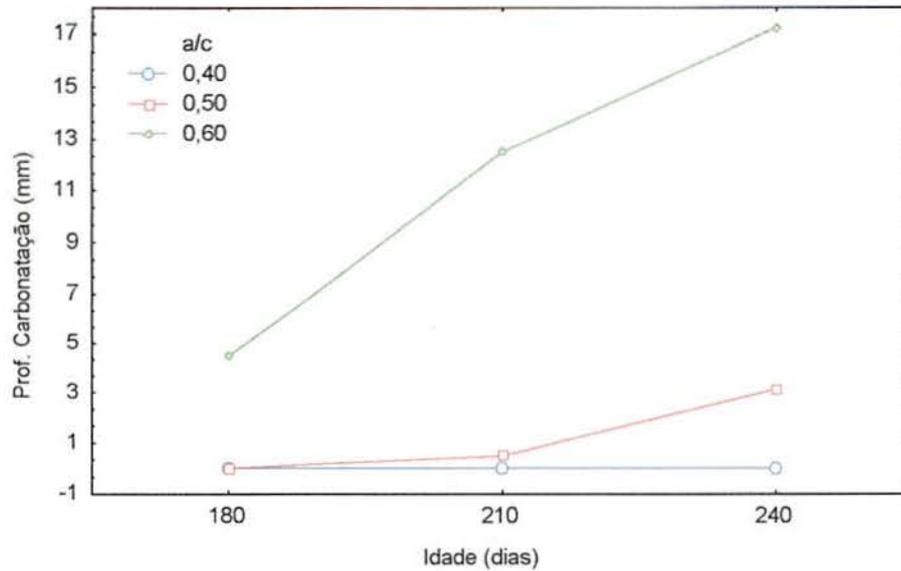


(c)

**Figura 49** Comportamento dos concretos quanto à carbonatação em função: a) do teor de adição; (b) da relação a/c; (c) da idade



(a)



(b)

**Figura 50** Profundidade de carbonatação dos concretos em função das interações: (a) entre o teor de adição e a relação  $a/c$ ; (b) entre a idade e a relação  $a/c$

Os resultados dos ensaios indicam que a adição de escória de cobre melhora o desempenho do concreto, no que se refere à carbonatação. Aos 180 dias de exposição os concretos já apresentavam diferença de comportamento. A carbonatação se manifestou apenas nos corpos-de-prova do concreto sem adição, na relação  $a/c$  0,60. A partir dos 210 dias a diferença é mais evidenciada. Considerando os 240 dias de exposição o melhor comportamento foi dos concretos com adição de escória de cobre, chegando a reduzir a espessura da camada carbonatada 80% para  $a/c$  0,50 e 35,7% para relação  $a/c$  0,60.

Alguns autores discutem a possível influência do teor de adição na carbonatação do concreto, e têm posicionamentos diferentes. SCHUBERT (1987); MORANVILLE-REGOURG (1992); LEWIS e HO (1987); GJORV (1995); e ISAIA (1995), constataram que concretos com adição de pozolanas aumentam a profundidade de carbonatação, principalmente, com altos teores de adição de pozolanas altamente reativas. Por outro lado, JAWED et al. (1991); e NAGATAKI (1994) concluíram que concretos com cinza volante, para níveis de resistência superiores a 30 MPa e baixas relação  $a/c$ , possuem comportamento similar ao dos concretos de referência, quanto à carbonatação.

ISAIA (1995) verificou que a adição de cinza de casca de arroz, sílica ativa ou cinza volante aumentou a profundidade de carbonatação do concreto. A adição de cinza de casca de arroz aumentou o coeficiente de carbonatação em menor proporção do que a cinza volante e a sílica ativa. O pesquisador destaca que altos teores de sílica ativa (superior a 20%) e de cinza volante (superior a 30%) aumentam bastante o coeficiente de carbonatação, devido a menor reserva alcalina proporcionada por estas pozolanas. Teores de adição de até 30% de cinza de casca de arroz não influenciaram muito na carbonatação.

SEINDLER (1999) estudou a influência da adição de sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz na alcalinidade de misturas cimentícias. Verificou, através de calorimetria e titulometria, que a adição de 30% de sílica ativa reduziu o pH das argamassas em cerca de 5%. A adição de 30% de cinza volante reduziu o pH em 3%, enquanto que com a adição de 30% de cinza de casca de arroz, praticamente não houve redução do pH. O valor de pH mais baixo encontrado foi nas argamassas com adição de 30% de sílica ativa, que reduziu de 12,8 para 11,9. Estes resultados confirmam a influência de pozolanas altamente reativas na carbonatação.

De acordo com OSBORNE (1986), a adição de escória de alto-forno granulada aumenta a profundidade de carbonatação, principalmente quando a cura não é cuidadosa. Quanto maior for o teor de adição de escória maior, a profundidade de carbonatação.

Com base na avaliação do comportamento destas pozolanas, pode-se dizer que o melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre, quanto à carbonatação, está associado à porosidade do concreto (menor porosidade, diminuição do tamanho e melhor distribuição dos poros) que dificultou a difusão do  $\text{CO}_2$ . Os resultados dos ensaios de absorção reforçam este argumento.

#### 5.5.3.4 Ataque por sulfato ao concreto

Para avaliar a resistência do concreto com adições de escória de cobre frente ao ataque por sulfato, foi adotada a metodologia de KOCH e STEINEGGER (1960), adaptada por IRASSAR (1990).

Foram moldados seis corpos-de-prova prismáticos 4x4x16 cm para cada traço de concreto. Os corpos-de-prova foram curados durante 28 dias em câmara úmida. Após este período, foi enxugada a superfície de cada corpo-de-prova, para retirada

da água livre, em seguida foram pesados e imersos: três, de cada traço, em água de cal (referência) e outros três em solução com diluição de 5% de sulfato de sódio, conforme recomenda a ASTM C 1012 (1989). Para cada volume de corpo-de-prova foi colocado 4 vezes o volume de solução de sulfato de sódio. Para controle da agressividade da solução foi fixado o nível de pH entre 7 e 8, medido através de papel indicador de pH universal. A partir dos 90 dias, mensalmente, os corpos-de-prova foram retirados da imersão, procedido o enxugamento da superfície e, logo em seguida, pesados, para acompanhamento de variação de massa. Mensalmente, a solução de sulfato foi trocada, para manter a agressividade. Até os 450 dias de imersão não se verificou perda de massa significativa dos corpos-de-prova, conforme Tabela 46. Entretanto, optou-se pela conclusão do ensaio, uma vez que este período atendia recomendações feitas por alguns pesquisadores que realizaram este ensaio anteriormente (SILVEIRA, 1995; SILVA FILHO, 1994; MARCIANO, 1993). Aos 450 dias de imersão, os corpos-de-prova foram, então, retirados da solução, pesados, observados a olho nu e rompidos à tração na flexão.

Pela verificação visual não se constatou nenhuma fissura na superfície dos corpos-de-prova. Porém, observou-se quebra de arestas de vários corpos-de-prova atacados por sulfato. A superfície dos corpos-de-prova de referência apresentou um aspecto mais rugoso, com o aparecimento de alguns grãos de agregado graúdo. A Figura 51 e a Figura 52 mostram o aspecto de corpos-de-prova após 450 dias de imersão em água saturada com cal e em solução de sulfato de sódio, respectivamente.



**Figura 51** Aspecto de corpos-de-prova após 450 dias de imersão em água saturada com cal



**Figura 52** Aspecto de corpos-de-prova após 450 dias de imersão em solução de sulfato de sódio

Utilizou-se, como um dos parâmetros para avaliação da resistência do concreto ao ataque por sulfato, o índice de resistência química "R". Este coeficiente é obtido através da relação entre a resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova imersos na solução de sulfato e a resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova imersos na água com cal.

Na Tabela 46 estão apresentados os resultados da média de resistência à tração na flexão e de variação de massa dos 3 corpos-de-prova, e valores de "R" dos concretos.

**Tabela 46** Resultados de médias resistência à tração na flexão, índice de resistência química "R" e variação de massa dos corpos-de-prova imersos em água com cal e em solução de sulfato de sódio

Mistura	a/c	Sulfato			Água com cal			R
		ftm (MPa)	C. V.	V. M. (%)	ftm (MPa)	C. V.	V. M. (%)	
REFERÊNCIA	0,40	4,85	6,2	-0,2	6,46	9,8	0	0,75
	0,50	2,69	4,8	0,1	4,86	1,4	0	0,55
	0,60	2,37	10,5	-0,3	3,90	4,1	0	0,61
20% ESCÓRIA DE COBRE	0,41	6,83	2,5	0,2	7,04	12,9	0,2	0,97
	0,50	5,76	9,9	0,2	5,47	9,5	0,1	1,05
	0,60	4,79	3,8	0,3	3,85	2,1	0,2	1,24

ftm – resistência média à tração na flexão

C.V. Coeficiente de variação (%)

V.M. – Variação na massa (o sinal " - " significa perda de massa)

R – Relação entre a resistência dos corpos-de-prova imersos em solução de sulfato e em água com cal

### Análise dos Resultados

Adotou-se como parâmetro para comparação do desempenho dos concretos, o valor do índice de resistência química "R", por dar uma idéia mais clara do desempenho nos dois tipos de cura.

Os resultados foram analisados através da ANOVA, para verificar os fatores que influenciaram no ensaio. A Tabela 47 apresenta os resultados desta análise.

**Tabela 47** Resultados da ANOVA do ataque por sulfato dos concretos, para "R"

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Adição	1	0,911250	9112,5	4,75	S
B – a/c	2	0,023450	234,5	3,89	S
AB	2	0,065850	658,5	3,89	S
ERRO	12	0,000100			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

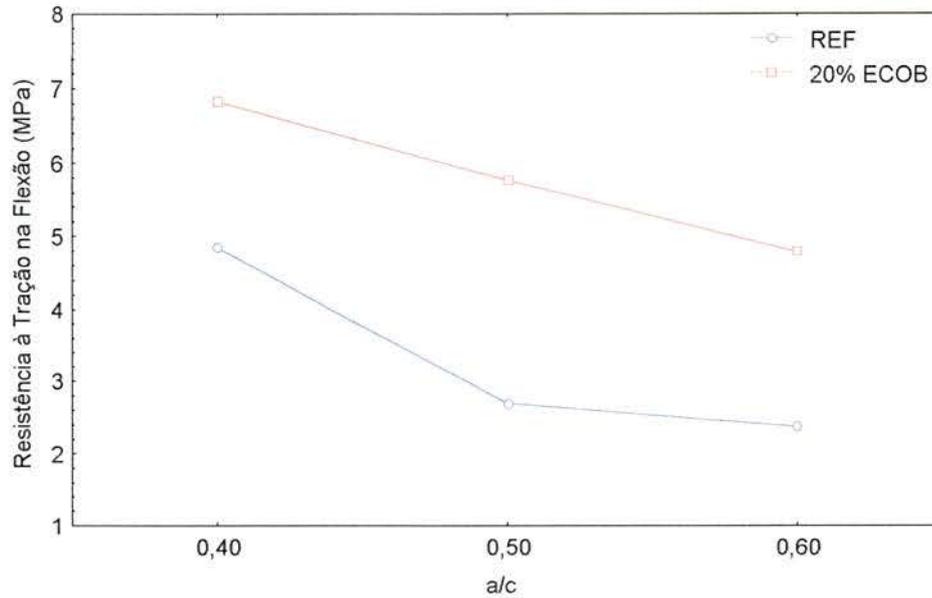
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

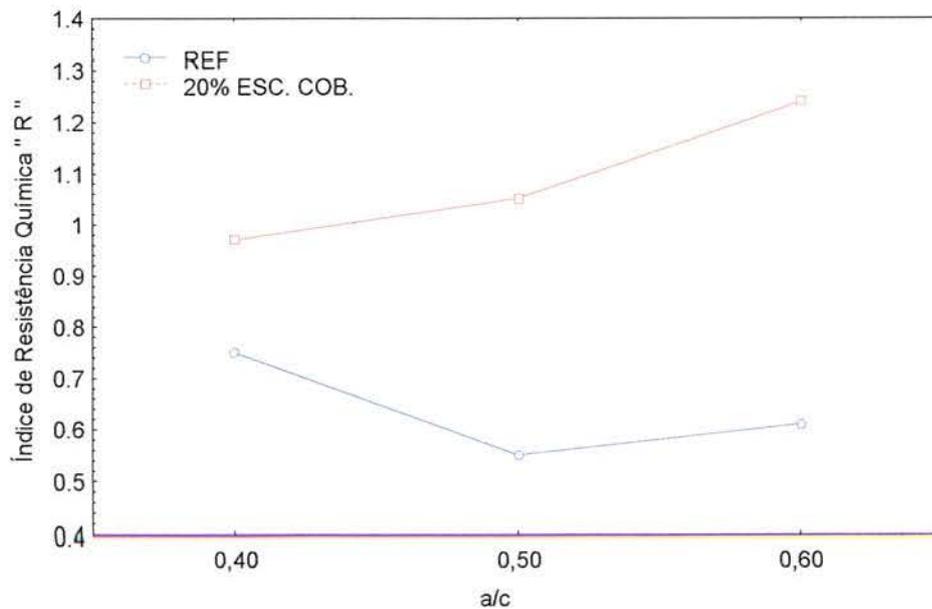
NS – Não Significativo

Verifica-se que há influência significativa do teor de adição e da relação a/c na resistência do concreto ao ataque por sulfato. Existe, também, interação entre o teor de adição e a relação a/c.

Na Figura 53 e na Figura 54 é apresentado o comportamento dos concretos quanto à resistência ao ataque por sulfato, em função das interações entre o teor de adição e a relação a/c.



**Figura 53** Resistência à tração na flexão dos concretos atacados por sulfato, em função da interação entre a relação a/c e do teor de adição



**Figura 54** Resultados de índice de resistência química "R" em função da interação entre a relação a/c e teor de adição

Observa-se que os concretos com adição de escória de cobre apresentaram melhores resultados, principalmente para maiores relação a/c. O aumento do valor de "R" chega a 100% para relação a/c 0,60 e 90,1% para relação a/c 0,50.

No que se refere à variação de massa, apesar do longo período de realização do ensaio, não se verificou variações significativas (máximo 0,3%). Os concretos com adição de escória de cobre, imersos em solução de sulfato de sódio, apresentaram ganho de massa para todas as relações a/c. Este ganho de massa pode estar associado à formação de compostos no interior dos poros, que é mais significativo do que a perda de material na superfície dos corpos-de-prova. Entretanto, esta pequena variação pode ter sido influenciada pelo procedimento de secagem superficial dos corpos-de-prova, que possivelmente não foi uniforme. Portanto, não é possível tirar conclusões categóricas a cerca da variação de massa.

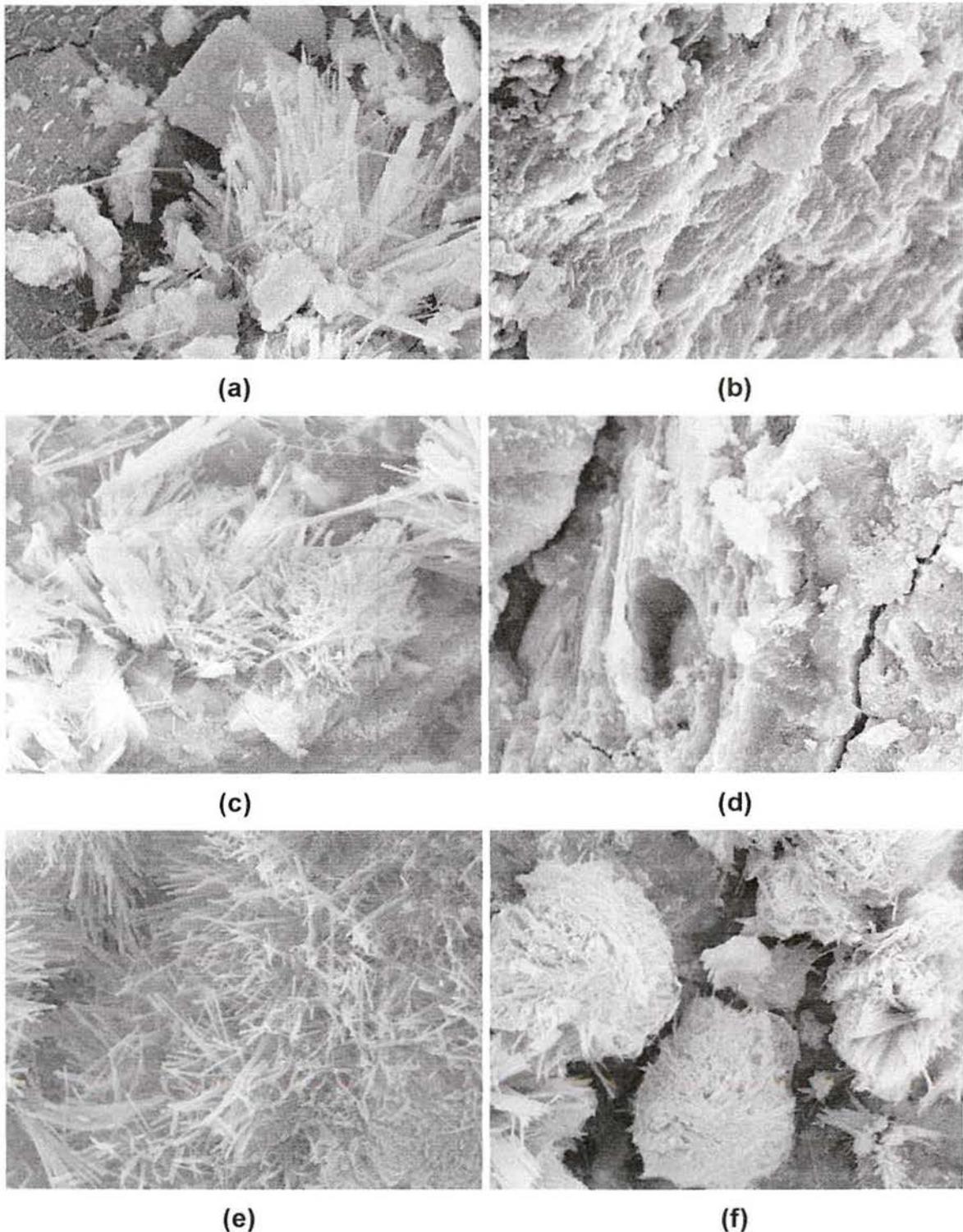
Na Figura 55 são apresentadas micrografias por elétrons secundários (MEV) de amostras de concreto após 450 dias de ataque por sulfato de sódio.

Pode-se observar, na sequência de imagens da Figura 55, que há incidência de etringita nas amostras de concreto sem adição de escória de cobre para todas as relações a/c. Nas amostras de concreto com 20% de escória de cobre, para as relações a/c 0,41 e 0,50, não se verificou a presença de etringita. Nota-se uma maior incidência de etringita nas imagens (e) e (f) (amostras de relação a/c 0,60), inclusive no concreto com adição de escória de cobre. Na amostra de concreto sem adição (imagem (e)), a grande incidência de etringita foi observada no interior de uma fissura, perpendicular à superfície. Essa pode ser uma evidência de que a fissura foi provocada pela ação expansiva por parte da etringita. Na imagem (f), verifica-se uma grande formação de agulhas em forma de pacotes no interior do poro. Nota-se que ainda existe espaço entre os pacotes de etringita, não sendo geradas, ainda, tensões no interior destes poros.

As imagens confirmam que quanto maior for a for a relação a/c, maior é a facilidade de penetração dos fluídos, devido a maior porosidade do concreto. Há também fortes indícios de que a presença da escória de cobre melhora o desempenho do concreto, pela redução da porosidade e do teor de  $C_3A$ . Em consequência, é menor a incidência de etringita nos concretos com adição de escória de cobre.

JASPER, citado por DJANIKIAN (1980), realizou ensaios de ataque por sulfatos em argamassa, pelo método de Kock e Steinegger, e concluiu que para os cimentos sem adição, quanto maior o teor de  $C_3A$ , menor a resistência aos sulfatos.

Os cimentos com teor de adição de escória de alto-forno granulada, superior a 50%, aumentaram a resistência ao ataque por sulfatos.



**Figura 55** Microscopia Eletrônica de Varredura por elétrons secundários (3.500x) em concreto: (a) sem escória,  $a/c = 0,40$ ; (b) 20% de escória de cobre,  $a/c = 0,41$ ; (c) sem escória,  $a/c = 0,50$ ; (d) 20% de escória de cobre,  $a/c = 0,50$ ; (e) sem escória,  $a/c = 0,60$ ; (f) 20% de escória de cobre,  $a/c = 0,60$

DJANIKIAN (1980) estudou a influência dos tipos de cimento na resistência ao ataque por sulfatos, em argamassa, e também constatou que nos cimentos sem adição, quanto maior o teor  $C_3A$  menor o índice de resistência química, ou seja, menos resistente. Por outro lado, os cimentos com adição de pozolana apresentaram melhor desempenho, seguidos dos cimentos com adição de escória de alto-forno.

O melhor desempenho dos concretos com adição escória de cobre pode ser atribuído a menor porosidade e melhor distribuição dos poros, devido à reação pozolânica e ao efeito fíler, reduzindo a permeabilidade da matriz. Este efeito pode ser justificado com base nos resultados dos ensaios de absorção, itens 5.5.3.1 e 5.5.3.2. Além disso, com a adição da escória de cobre, há uma redução dos teores de  $C_3A$ , que é o composto mais importante para o ataque dos sulfatos, e do  $Ca(OH)_2$ , que também é vulnerável ao ataque.

## **6 ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO, APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

O agregado deve ocupar o maior volume relativo possível no concreto, uma vez que, além deste possuir um custo menor do que a pasta, existem razões técnicas para não se desejar uma mistura muito rica em cimento.

A granulometria do agregado e a sua forma são características que indicam a sua aplicabilidade, por influenciarem na trabalhabilidade e permeabilidade dos concretos e argamassas.

O tamanho dos grãos da escória de cobre e sua forma indicam a possibilidade de utilização como agregado miúdo para concreto. Estas características foram apresentadas no capítulo 4.

Os resultados dos ensaios foram analisados através da análise de variância (ANOVA), para cada tipo de ensaio, com o objetivo de comprovar estatisticamente a influência das variáveis investigadas, bem como a existência de possíveis interações entre estas variáveis. O nível de significância adotado nas análises foi de 5%.

### **6.1 COLETA DE AMOSTRAS**

O volume de escória utilizada para realização dos ensaios foi retirado da amostra total já descrito no item 4.1. A amostra foi coletada de acordo com a NBR 7216 (1987) e NBR 9941 (1987).

### **6.2 PRODUÇÃO DO CONCRETO**

Os procedimentos para produção do concreto com utilização de escória de cobre como agregado miúdo foram semelhantes aos utilizados para estudar a influência da escória de cobre como adição ao concreto.

#### **6.2.1 Materiais**

Foram empregados os mesmos materiais utilizados no estudo da escória de cobre como adição, cujas características estão apresentadas no capítulo 5, com exceção da areia.

### 6.2.1.1 Agregado miúdo

Como agregado miúdo foram utilizadas areia e escória de cobre, cujas características estão apresentadas a seguir.

#### 6.2.1.1.1 Areia

Foi estabelecida uma composição granulométrica para a areia a ser utilizada nos concretos, semelhante àquela utilizada na região onde é gerada a escória. A Tabela 48 apresenta as características da areia.

**Tabela 48** Características da areia

<b>Abertura Peneira (mm)</b>	<b>% Retida Acumulada</b>
4,8	-
2,4	2
1,2	2
0,6	16
0,3	64
0,15	94
< 0,15	100
Dimensão máxima característica (mm)	1,2
Módulo de finura	1,78
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,619
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,50

#### 6.2.1.1.2 Escória de cobre

Utilizou-se a escória de cobre granulada, como agregado miúdo, conforme é descartada pela indústria geradora, sem qualquer beneficiamento, cujas características estão apresentadas na Tabela 7 e na Tabela 8, no capítulo 4.

Foi também avaliado o comportamento da escória de cobre quanto à sua estabilidade frente ao intemperismo. Para isso foi realizado o ensaio de ciclagem artificial em água e estufa.

### **Ciclagem em água e estufa**

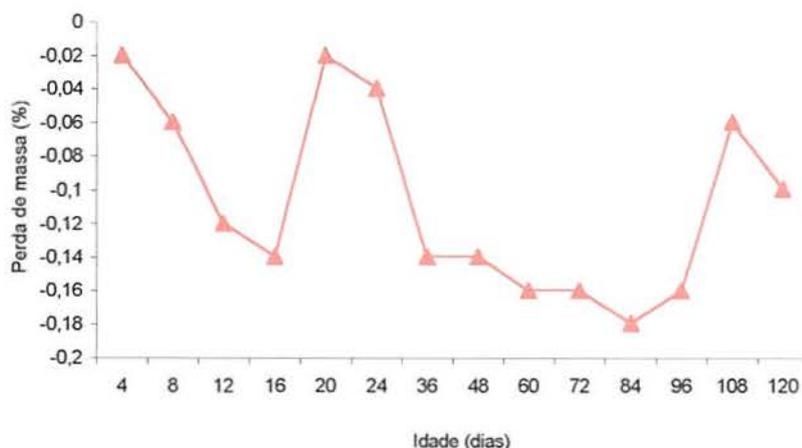
Os ensaios de ciclagem são geralmente aplicados a rochas, de forma qualitativa e quantitativa, tendo em vista a sua utilização como agregado em concreto. A realização deste ensaio teve por objetivo avaliar, em condições

aceleradas, as reações deletérias que as escórias pudessem vir a ter quando empregadas no concreto.

O ensaio de ciclagem em água e estufa é definido segundo a NBR 12696 (1992). Para realização deste ensaio com a escória foi feita uma adaptação da Norma. Como a escória não possui grãos do tamanho especificado, maior do que 19mm, utilizou-se como amostra 1000 g de escória retida na peneira 4,8 mm. A metodologia adotada para a realização deste ensaio foi a seguinte:

- imersão da amostra em água por  $14 \pm 1$  hora;
- secagem da amostra em estufa por  $8 \pm 1$  hora ( $105 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- resfriamento da amostra por  $60 \pm 5$  min. em ambiente com umidade e temperatura controladas (temperatura de  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e umidade relativa entre  $70 \pm 5\%$ );
- peneiramento na peneira 2,4 mm e pesagem do material retido ao fim de cada ciclo;
- realização de 14 ciclos nas idades de 4, 8, 12, 16, 20, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108 e 120 dias.
- inspeção visual ao final do ensaio.

Na Figura 56 está apresentado o gráfico de perda de massa da escória para cada ciclo.



**Figura 56** Perda de massa da escória na ciclagem água-estufa

Observa-se, pelos resultados apresentados no gráfico da Figura 56, que não houve perda significativa de massa da amostra, embora não haja especificações, por norma, para este teor. A perda de massa total, ao término da ciclagem, foi de 1,48%.

A norma recomenda que seja feita uma análise qualitativa da amostra, com vistas a detectar alguma alteração no seu aspecto visual.

Os resultados quantitativos e qualitativos indicam que não houve alterabilidade da escória sob condições de intemperismo.

### 6.2.2 Dosagem

Para avaliar o comportamento da escória de cobre como agregado miúdo para o concreto foram produzidas misturas de referência (sem escória de cobre) e misturas com 30% e com 50% de substituição da areia, em volume, por escória de cobre granulada. Observou-se que o concreto com 50% de escória de cobre apresentou um comportamento muito diferenciado do concreto com 30% escória: grande redução da relação *a/c* e exsudação. Assim, definiu-se, também, pela produção de concreto com 40% de substituição da areia por escória de cobre. Com este teor intermediário poder-se-ia entender melhor o comportamento do concreto. Foram determinadas características e propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

Os traços utilizados foram determinados levando em consideração a relação água/cimento dentro da faixa usual, em pesquisas, e os teores de substituição da areia por escória de cobre. Utilizou-se a metodologia de dosagem do IPT/EPUSP (HELENE & TERZIAN, 1992). Estabeleceu-se como parâmetros de dosagem a obtenção de um abatimento pelo tronco cone, de  $70 \pm 10$  mm, e um teor de argamassa seca de 49% para os concretos de referência, tendo variado para os demais concretos. Como a massa específica da escória de cobre é bem mais elevada do que a da areia, os teores de substituição da areia por escória foram estabelecidos sobre o volume de agregado miúdo, sendo os traços depois convertidos em massa.

A Tabela 49 apresenta os traços em massa utilizados na moldagem dos corpos-de-prova de concreto.

**Tabela 49** Traços utilizados para produção dos concretos

Mistura	Relação a/c	Cimento	Areia	Escória	Brita	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
REFERÊNCIA	0,41	1	1,363	-	2,459	477
	0,50		2,039	-	3,163	372
	0,64		2,716	-	3,867	301
70% AREIA + 30% ESCÓRIA	0,41	1	0,954	0,604	2,459	477
	0,50		1,427	0,904	3,163	372
	0,61		1,901	1,203	3,867	303
60% AREIA + 40% ESCÓRIA	0,38	1	0,817	0,806	2,459	484
	0,48		1,223	1,205	3,163	375
	0,57		1,630	1,605	3,867	307
50% AREIA + 50% ESCÓRIA	0,38	1	0,681	0,998	2,459	485
	0,48		1,020	1,494	3,163	376
	0,53		1,358	1,991	3,867	311

Foi adotado o teor de 2% de ar no concreto para o cálculo do consumo de cimento

A mistura foi realizada em betoneira de eixo vertical. Os materiais foram colocados com a betoneira em movimento, na seguinte ordem:

- 100% da brita + 20% da água;
- 100% do cimento + 50% da água;
- 100% da escória + 30% da água;
- 100% da areia.

O processo de mistura durou 3 minutos, quando então foram determinadas as propriedades do concreto fresco.

### 6.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da trabalhabilidade e massa específica dos concretos produzidos.

#### 6.3.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi medida através do ensaio de abatimento, *slump test* NBR 7223 (1992). O abatimento foi fixado na faixa de  $70 \pm 10$ mm. Na Tabela 50 estão apresentados os resultados.

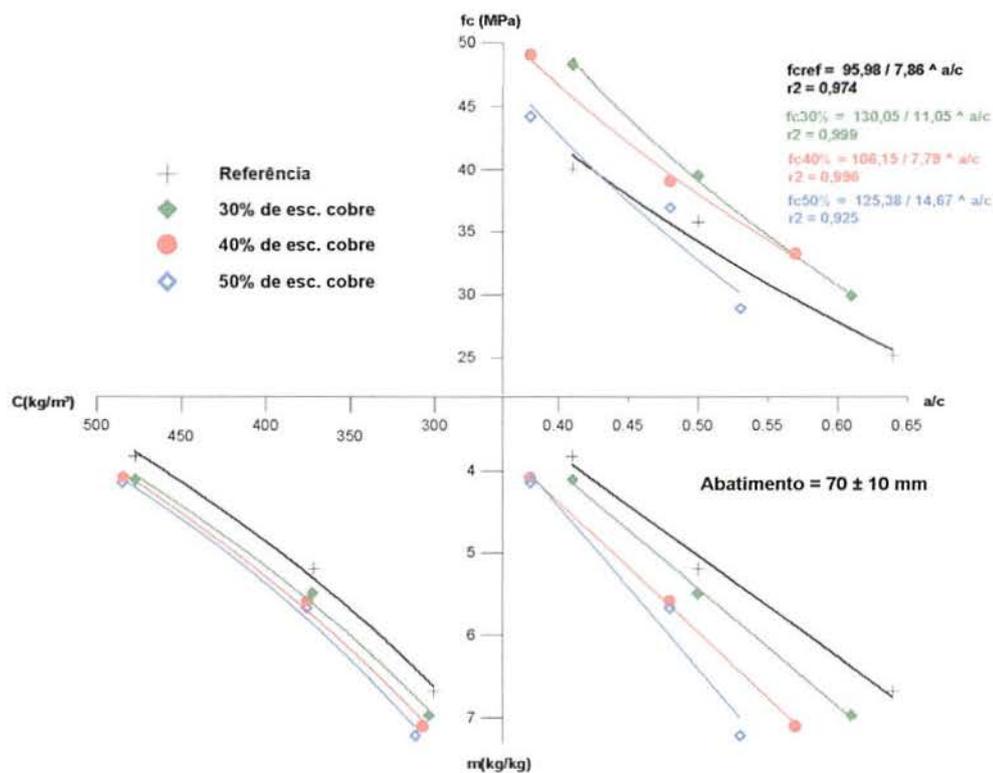
**Tabela 50** Abatimentos obtidos nos traços dos concretos

Mistura	água/cimento	H%	Abatimento (mm)
REFERÊNCIA	0,41	8,50	70
	0,50	8,06	65
	0,64	8,44	80
70% AREIA + 30% ESCÓRIA DE COBRE	0,41	8,17	70
	0,50	7,70	75
	0,61	7,65	80
60% AREIA + 40% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	7,48	75
	0,48	7,28	70
	0,57	7,04	75
50% AREIA + 50% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	7,40	65
	0,48	7,19	80
	0,53	6,45	60

Observa-se que a utilização de escória de cobre como agregado miúdo influenciou bastante na trabalhabilidade do concreto. Como o abatimento foi fixado, a relação água/materiais secos (H%) diminuiu muito, quanto maior foi o teor de substituição de areia por escória de cobre. Para o teor de substituição de 50% a relação água/materiais secos chegou a reduzir em 24%. Por outro lado, com o teor de 50% de substituição, observou-se exsudação no concreto, provavelmente, devido a granulometria da mistura (areia+escória de cobre), que é mais grossa, à superfície lisa dos grão de escória, além da sua massa específica, que é bem mais elevada do que a dos demais componentes da mistura.

Como foi fixado o abatimento dos concretos, foi adotada a relação a/c do concreto de referência como o padrão, para efeito de comparação entre os concretos. Por exemplo, o concreto com 50% de escória de cobre, como agregado miúdo, de relação a/c 0,53, corresponde ao concreto de referência de relação a/c 0,64. Desta forma, foi preservada a característica que a escória possui, de aumentar o abatimento do concreto.

Na Figura 57 está apresentado o diagrama de dosagem, com base nos resultados de abatimento e resistência à compressão axial aos 28 dias.



**Figura 57** Diagrama de dosagem para os concretos

### 6.3.2 Massa específica

A massa específica foi determinada, para todas as misturas no estado fresco, de acordo com a NBR 9833 (1987). A Tabela 51 apresenta a média dos resultados.

**Tabela 51** Massa específica do concreto no estado fresco

Mistura	Água/cimento	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
REFERÊNCIA	0,41	2,571
	0,50	2,553
	0,64	2,530
70% AREIA + 30% ESCÓRIA DE COBRE	0,41	2,642
	0,50	2,660
	0,61	2,679
60% AREIA + 40% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	2,689
	0,48	2,702
	0,57	2,721
50% AREIA + 50% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	2,709
	0,48	2,719
	0,53	2,752

## Análise dos Resultados

Para avaliar a influência dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica dos concretos frescos foi realizada a ANOVA, cujos os resultados estão apresentados na Tabela 52.

**Tabela 52** Resultados da ANOVA da influência da relação a/c e dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica dos concretos no estado fresco

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	0,036375	1299,12	3,49	S
B – a/c	2	0,000658	23,44	3,89	S
AB	6	0,000801	28,62	3,00	S
ERRO	12	0,000028			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

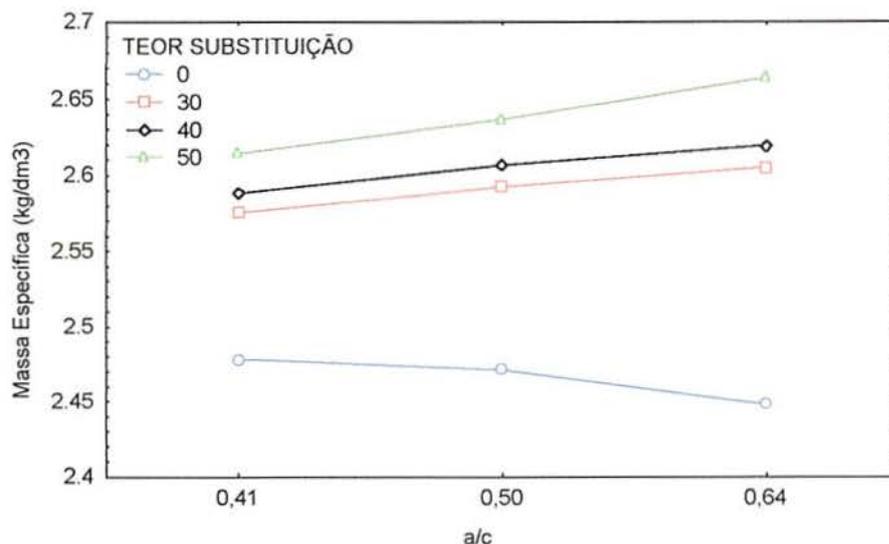
S – Significativo

NS – Não Significativo

Pode-se observar que há influência bastante significativa do teor de substituição de areia por escória e da relação a/c nos resultados da massa específica do concreto. Existe interação entre o teor de substituição e a relação a/c.

Como a massa específica da escória do cobre é muito elevada, a sua utilização como parte do agregado miúdo tem influência significativa sobre a massa específica do concreto. Quanto maior for o teor de substituição da areia por escória, maior é a massa específica do concreto. A substituição de 50% da areia provoca um aumento de 5,4%, para relação a/c 0,41, 6,5% para relação a/c 0,50 e um aumento de 8,8% para a/c 0,64. Portanto, quanto maior a relação a/c, maior será o aumento da massa específica. Isso se explica porque nas relações a/c mais elevadas o volume de agregado é maior

A Figura 58 mostra o comportamento dos concretos, quanto à massa específica, para os diferentes teores de substituição e relação a/c.



**Figura 58** Comportamento dos concretos, com relação à sua massa específica no estado fresco, em função da interação entre o teor de substituição e a relação a/c

Apesar da utilização da escória de cobre como agregado provocar um aumento significativo na massa específica do concreto, estes valores estão na faixa dos concretos convencionais.

#### 6.4 MOLDAGEM, ADENSAMENTO E CURA

Foram moldados corpos-de-prova para os ensaios de resistências à compressão, tração por compressão diametral e tração na flexão, e absorção por sucção capilar e por imersão, para cada um dos traços.

O processo de adensamento foi feito com vibrador de imersão. Após a moldagem, os corpos-de-prova foram cobertos e mantidos no ambiente de laboratório por aproximadamente 24 horas. Após a desmoldagem, os corpos-de-prova foram colocados na câmara úmida com umidade relativa superior a 95% e temperatura de  $(23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C})$  e mantidos até a data da realização dos ensaios.

Durante o adensamento dos corpos-de-prova observou-se que os concretos com substituição de 50% de areia por escória de cobre apresentaram exsudação, principalmente para relação a/c 0,53.

#### 6.5 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO ENDURECIDO

Para avaliar a influência dos teores de substituição de areia por escória de cobre nas propriedades do concreto endurecido foram realizados ensaios de

determinação da massa específica, resistências à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão, absorção por sucção capilar e por imersão.

### 6.5.1 Massa específica

A massa específica foi determinada com base na NBR 9778 (1987). Foram ensaiados 2 corpos-de-prova para cada mistura. A Tabela 53 apresenta os resultados das médias.

**Tabela 53** Massa específica do concreto no estado endurecido

Mistura	Água/cimento	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )
REFERÊNCIA	0,41	2,481
	0,50	2,464
	0,64	2,439
70% AREIA + 30% ESCÓRIA DE COBRE	0,41	2,550
	0,50	2,568
	0,61	2,582
60% AREIA + 40% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	2,577
	0,48	2,592
	0,57	2,612
50% AREIA + 50% ESCÓRIA DE COBRE	0,38	2,618
	0,48	2,652
	0,53	2,690

### Análise dos Resultados

Foi adotada a ANOVA para avaliação dos resultados da influência da relação a/c e dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica do concreto endurecido. Na Tabela 54 são apresentados os resultados da ANOVA.

**Tabela 54** Resultados da ANOVA da influência dos diferentes teores de substituição da areia por escória de cobre na massa específica dos concretos no estado endurecido.

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	0,046214	119,00	3,49	S
B – a/c	2	0,001568	4,04	3,89	S
AB	6	0,001484	3,82	3,00	S
ERRO	12	0,000388			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

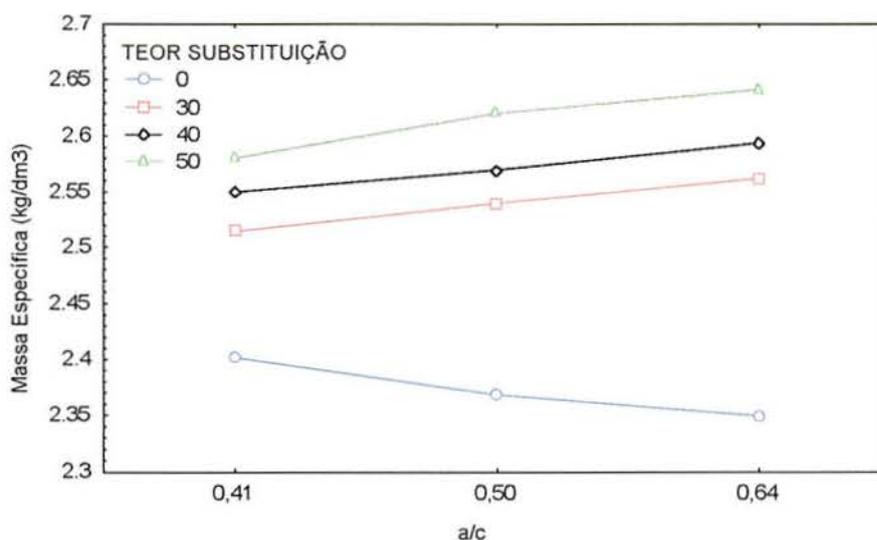
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

NS – Não Significativo

Há influência significativa do teor de substituição e da relação  $a/c$  nos resultados de massa específica. Existe, também, interação entre estes fatores.

A Figura 59 mostra o comportamento dos concretos, no que se refere à massa específica, para os diferentes teores de substituição, com base nos resultados individuais.



**Figura 59** Comportamento dos concretos no estado endurecido, com relação à sua massa específica, para os diferentes teores de substituição e diferentes traços

Observa-se, pelo gráfico de comportamento, que a massa específica dos concretos com escória de cobre como agregado é maior para todas as relações  $a/c$ . Como a massa específica da escória é muito superior à dos demais componentes da mistura, quanto maior for o teor de substituição, maior será a massa específica do concreto endurecido. O aumento na massa específica chegou a 10,3% com relação ao traço de referência, para o teor de substituição de 50%.

De acordo com NEVILLE (1997), a massa específica do concreto normalmente se situa entre 2,20 a 2,60 kg/dm<sup>3</sup>. Logo, a utilização de 50% ou mais de escória de cobre em substituição da areia, faz com que a massa específica do concreto ultrapasse esta faixa, podendo ser considerado como um concreto pesado.

### 6.5.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas avaliadas foram resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e tração na flexão.

## 6.5.2.1 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (1994). Foi determinada a resistência nas idades de 7, 28 e 91 dias, sendo rompidos 3 corpos-de-prova para cada idade. Os resultados estão apresentados na Tabela 55.

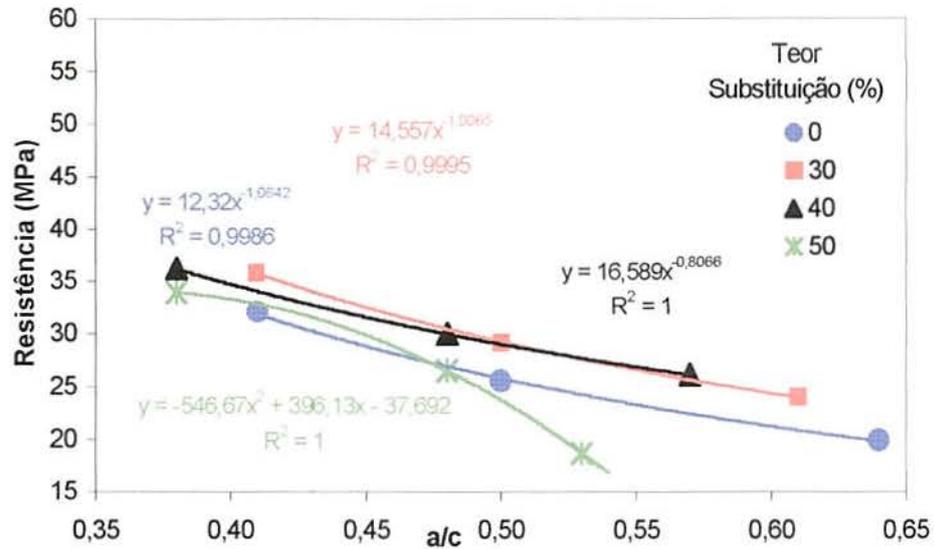
**Tabela 55** Resultados de resistência à compressão axial dos concretos

Mistura	Idade									
	7 dias			28 dias			91 dias			
	a/c	fc	fcm	C.V.	fc	fcm	C.V.	fc	fcm	C.V.
Referência	0,41	33,2	32,0	3,27	38,0	40,1	5,01	45,9	45,7	0,74
		31,6			40,4			45,3		
		31,2			42,0			46,0		
	0,50	26,0	25,5	1,79	35,6	35,8	1,06	42,8	42,0	3,30
		25,2			35,6			40,4		
		25,2			36,3			42,8		
	0,64	19,4	19,9	3,05	25,7	25,2	1,65	29,4	29,1	2,69
		20,5			24,8			28,2		
		19,6			25,1			29,6		
70% de areia + 30% de esc. de cobre	0,41	35,6	35,8	3,13	47,6	48,3	1,46	53,8	53,5	1,50
		37,0			49,0			52,6		
		34,8			48,2			54,2		
	0,50	29,3	29,1	3,35	38,4	39,5	2,40	43,9	44,0	0,87
		28,0			40,2			44,4		
		29,9			40,0			43,6		
	0,61	24,6	24,0	2,72	29,4	29,9	2,61	33,8	33,1	1,82
		23,3			29,6			32,6		
		24,2			30,8			32,9		
60% de areia + 40% de esc. de cobre	0,38	36,5	36,2	1,08	47,9	49,0	2,15	55,1	54,5	1,03
		36,4			50,0			54,2		
		35,8			49,2			54,1		
	0,48	31,2	30,0	3,91	39,9	39,0	2,11	45,9	46,1	1,39
		28,9			38,2			46,8		
		29,9			39,0			45,5		
	0,57	27,1	26,1	3,30	33,2	33,2	2,77	34,3	35,1	2,07
		26,0			34,0			35,3		
		25,4			32,2			35,7		
50% de areia + 50% de esc. de cobre	0,38	34,2	33,9	0,95	43,8	44,2	2,83	54,8	51,6	7,11
		34,0			45,6			47,6		
		33,6			43,2			52,4		
	0,48	26,8	26,5	1,74	37,2	36,9	1,25	43,2	42,0	2,86
		26,0			37,2			40,8		
		26,8			36,4			42,0		
	0,53	18,8	18,7	1,24	29,2	28,9	1,60	31,2	32,0	3,31
		18,4			29,2			33,2		
		18,8			28,4			31,6		

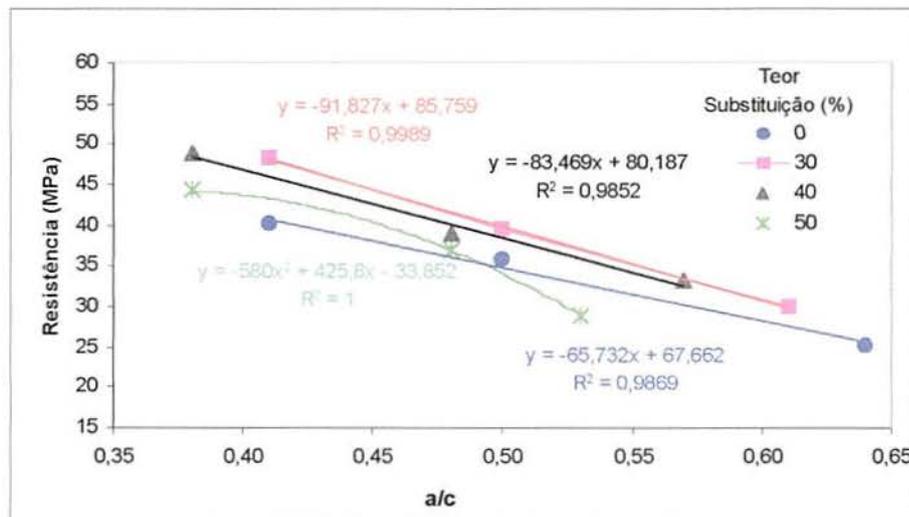
fc – Resistência à compressão axial (MPa)      fcm – Resistência média à compressão axial (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

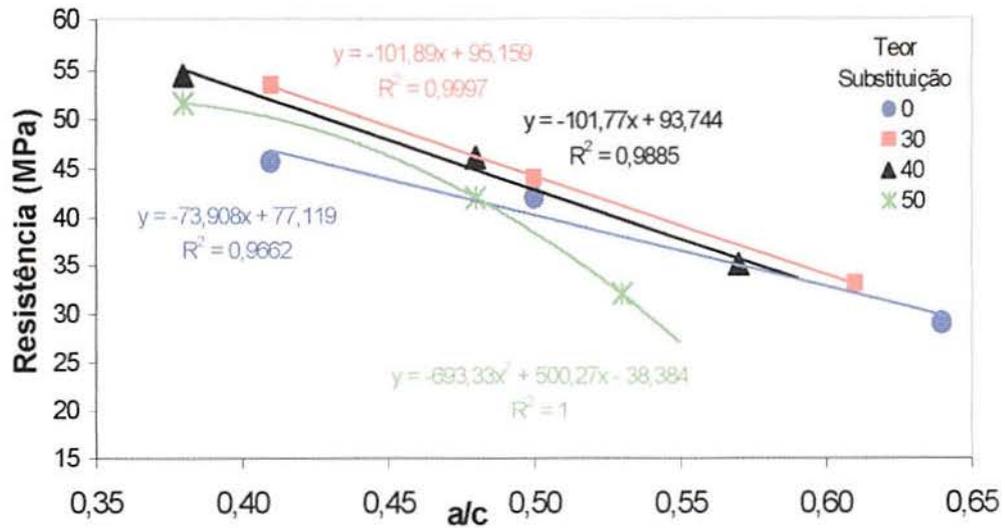
A Figura 60, Figura 61 e Figura 62 apresentam os gráficos comparativos de resistência média à compressão nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente.



**Figura 60** Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 7 dias



**Figura 61** Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 28 dias



**Figura 62** Resultados de resistência à compressão dos concretos aos 91 dias

### Análise dos Resultados

Através da ANOVA, foi verificado se existe influência do teor de substituição de areia por escória, da relação a/c e da idade, nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos, para os valores individuais. Na Tabela 56 é apresentada a análise da influência dos fatores.

**Tabela 56** Resultados da ANOVA da resistência à compressão axial dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Substituição	3	191,316	176,17	2,74	S
B – a/c	2	2254,104	2075,65	3,13	S
C – idade	2	1886,086	1736,77	3,13	S
AB	6	8,222	7,571	2,23	S
AC	6	3,203	2,949	2,23	S
BC	4	38,934	35,851	2,51	S
ABC	12	3,988	3,672	1,85	S
ERRO	72	1,085975			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

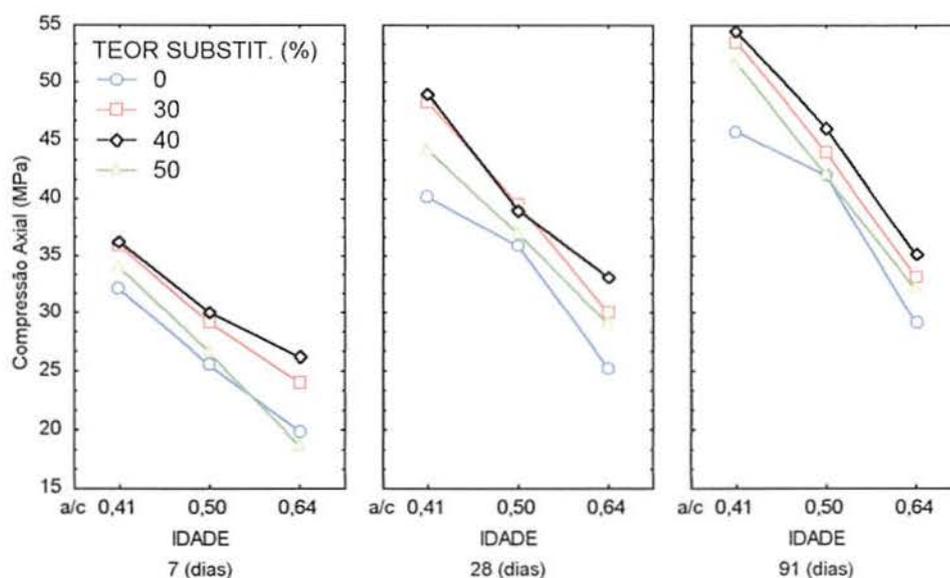
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

NS – Não Significativo

Os resultados da ANOVA mostram que há influência do teor de substituição, da relação a/c e da idade nos resultados. Existe, também, interação entre estas variáveis.

Na Figura 63 é apresentado o resultado de resistência à compressão axial, em função da interação entre o teor de substituição, relação a/c e idade.



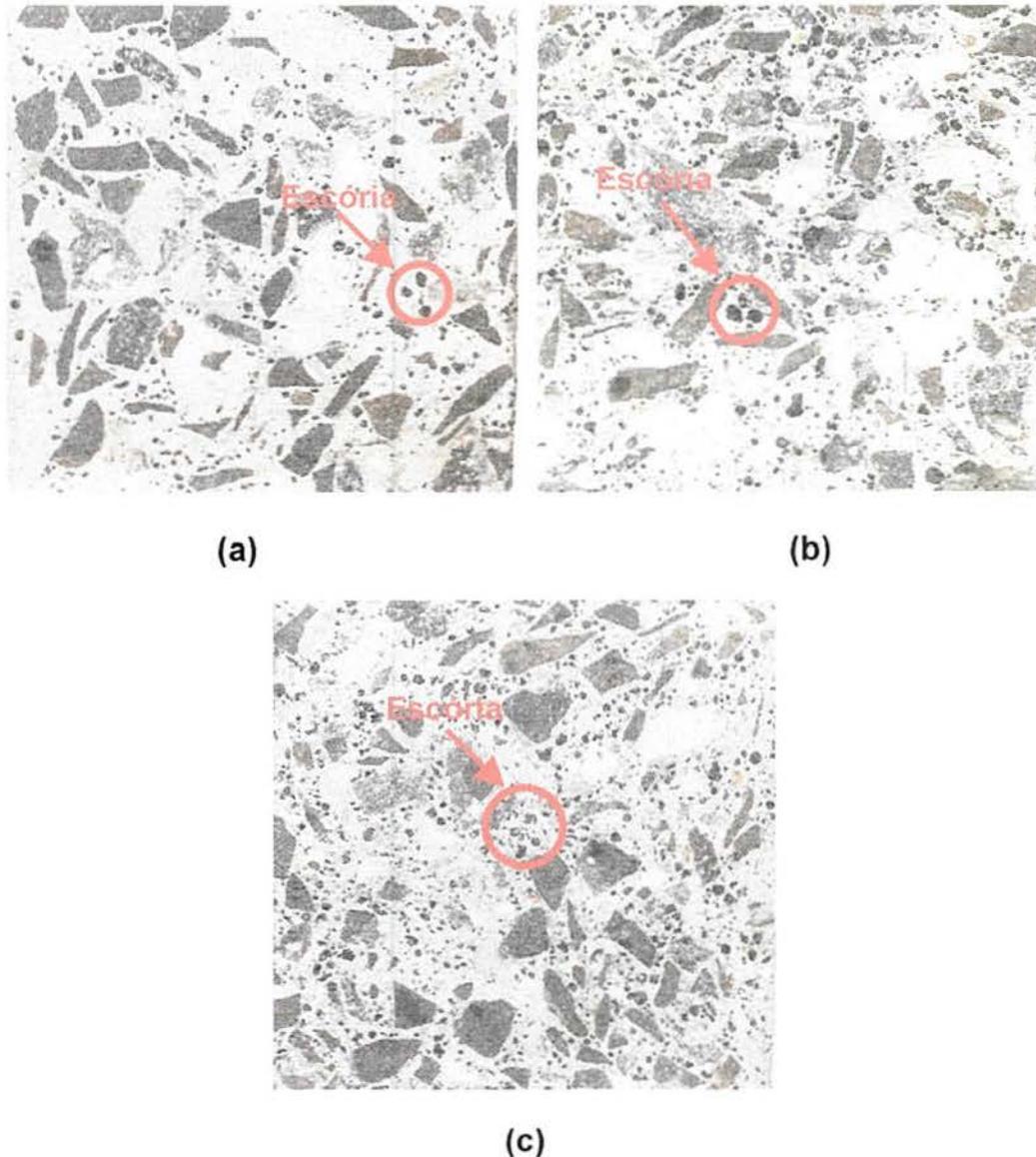
**Figura 63** Resultados de resistência à compressão dos concretos, em função da interação entre o teor de substituição, a relação a/c e a idade

A resistência à compressão do concreto aumentou com a substituição de parte da areia por escória de cobre. Para até 40% de substituição, quanto maior for este teor, maior é a resistência à compressão. Este aumento é justificado pela forma e textura dos grãos da escória, que favorece a sua melhor distribuição no interior do concreto e redução da quantidade de água da mistura. Além disso, a massa específica da escória, por ser mais elevada, contribui para uma maior densificação da matriz.

Porém, a partir de 50% de substituição, a resistência diminui para todas as relações a/c e idades do concreto. Este fato deve estar associado também à granulometria da mistura e à massa específica da escória de cobre, que por ser bem maior do que a dos demais componentes do concreto, provoca exsudação, a partir de altos teores de substituição. Por outro lado, após a ruptura verificou-se que os grãos de escória encontram-se, aparentemente, bem distribuídos na seção do corpo-de-prova. A Figura 64 (a), (b) e (c) mostra o aspecto da seção de corpos-de-prova

de concreto com 30%, 40% e 50% de substituição de areia por escória de cobre, respectivamente, após a ruptura.

Pode-se observar que a substituição de 40% de areia por escória de cobre proporcionou o melhor desempenho do concreto quanto à resistência à compressão axial. Para todas as idades e relação  $a/c$ , a resistência é superior. A diferença chega a ser de 31,7%, aos 28 dias, em relação ao concreto de referência.



**Figura 64** Aspecto da seção de corpos-de-prova de concreto com diferentes teores de escória de cobre, como agregado miúdo: (a) 30%; (b) 40%; (c) 50%

#### 6.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A determinação da resistência do concreto à tração por compressão diametral foi realizada de acordo com a NBR 7722 (1982). Foram rompidos 3 corpos-de-prova para cada idade e relação  $a/c$ . As idades de referência foram 7, 28 e 91 dias.

Na Tabela 57 estão apresentados os resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos nas idades de referência.

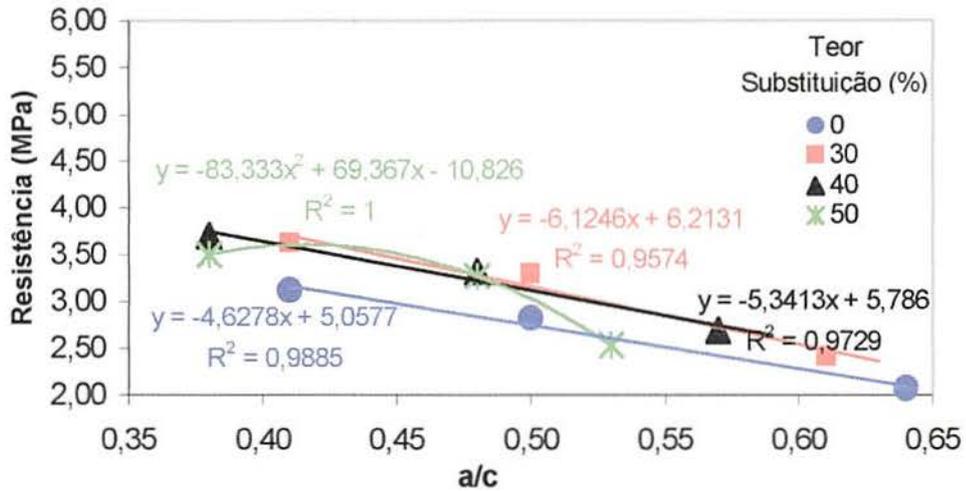
**Tabela 57** Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos

Mistura	Idade									
	a/c	7 dias			28 dias			91 dias		
		ftd	ftdm	C.V.	ftd	ftdm	C.V.	ftd	ftdm	C.V.
Referência	0,41	3,30	3,10	7,56	4,25	4,00	5,89	4,80	4,65	3,70
		3,20			4,00			4,70		
		2,85			3,80			4,50		
	0,50	3,00	2,80	6,47	3,55	3,50	5,98	4,10	3,90	4,23
		2,80			3,30			3,75		
		2,65			3,70			3,90		
	0,64	1,80	2,05	14,78	2,90	2,75	5,32	3,20	3,00	5,51
		2,00			2,70			2,95		
		2,40			2,60			2,85		
70% de areia + 30% de esc. de cobre	0,41	3,85	3,60	5,18	4,85	4,65	4,03	5,30	5,25	2,76
		3,55			4,60			5,10		
		3,45			4,45			5,40		
	0,50	3,50	3,30	6,05	3,90	4,00	3,11	4,45	4,50	4,75
		3,15			4,10			4,30		
		3,25			4,05			4,75		
	0,61	2,45	2,40	5,03	3,40	3,25	4,92	3,65	3,60	2,54
		2,50			3,10			3,50		
		2,30			3,20			3,60		
60% de areia + 40% de esc. de cobre	0,38	3,60	3,70	3,50	4,95	4,85	2,59	5,50	5,45	1,28
		3,85			4,80			5,45		
		3,70			4,70			5,40		
	0,48	3,40	3,30	2,87	4,45	4,25	4,04	4,80	4,80	2,61
		3,30			4,10			4,90		
		3,25			4,20			4,65		
	0,57	2,65	2,70	2,90	3,40	3,50	3,57	3,95	3,75	5,97
		2,80			3,65			3,70		
		2,65			3,50			3,55		
50% de areia + 50% de esc. de cobre	0,38	3,60	3,50	3,43	4,75	4,60	2,82	5,10	4,90	3,25
		3,50			4,60			4,95		
		3,40			4,50			4,75		
	0,48	3,40	3,25	3,55	3,95	4,10	3,91	4,55	4,65	2,58
		3,15			4,10			4,80		
		3,25			4,25			4,65		
	0,53	2,40	2,55	4,35	3,50	3,45	3,35	3,70	3,75	8,11
		2,65			3,35			3,50		
		2,55			3,55			4,10		

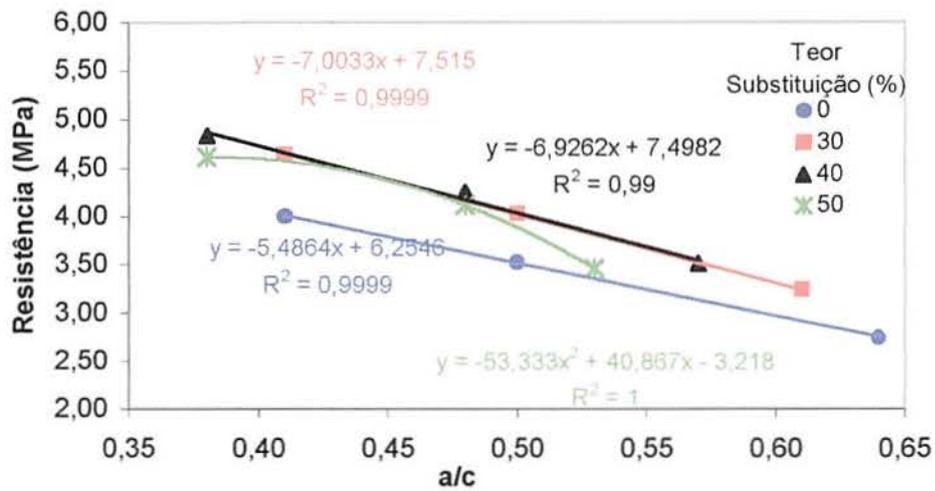
ftd – Resistência à compressão diametral (MPa) C.V. – Coeficiente de variação (%)

ftdm – Resistência média à compressão diametral (MPa)

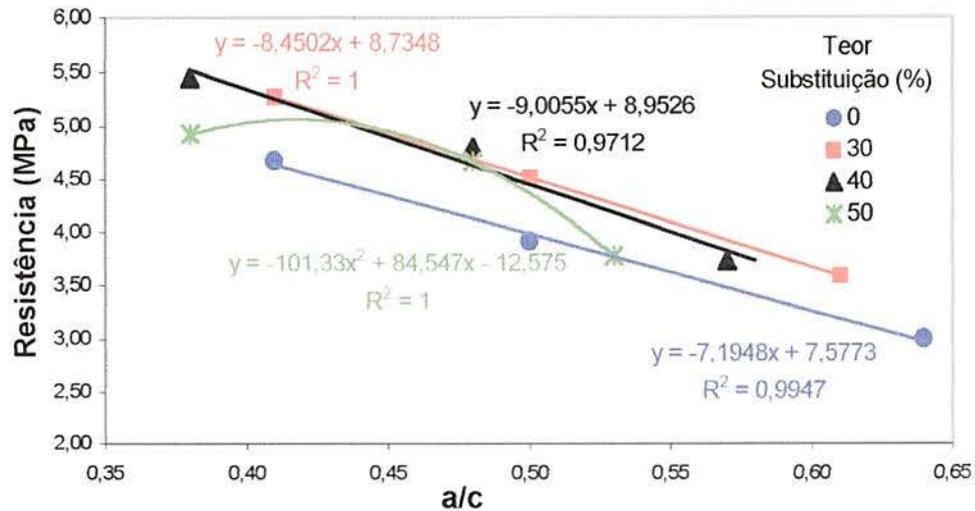
Nas Figura 65, Figura 66 e Figura 67 estão apresentados os gráficos comparativos de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos, nas idades de 7, 28 e 91 dias, respectivamente.



**Figura 65** Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 7 dias



**Figura 66** Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias



**Figura 67** Resultados de resistência média à tração por compressão diametral dos concretos aos 91 dias

### Análise dos Resultados

Foi verificada a influência do teor de substituição de areia por escória nos resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos, para os valores individuais, através da ANOVA. Na Tabela 58 são apresentados os resultados da análise.

**Tabela 58** Resultados da ANOVA da resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	2,62783	92,71	2,74	S
B – a/c	2	15,57629	549,52	3,13	S
C – idade	2	16,39765	578,49	3,13	S
AB	6	0,05226	1,84	2,23	NS
AC	6	0,03020	1,06	2,23	NS
BC	4	0,20108	7,09	2,51	S
ABC	12	0,01880	0,66	1,85	NS
ERRO	72	0,028345			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

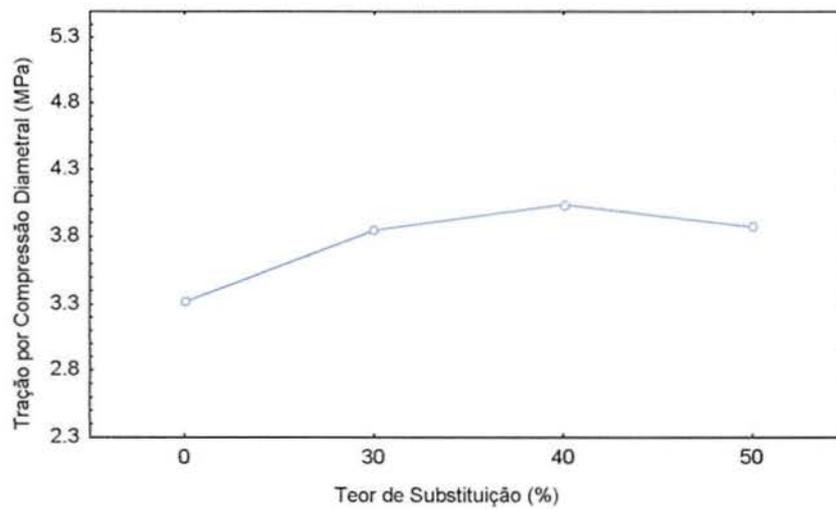
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

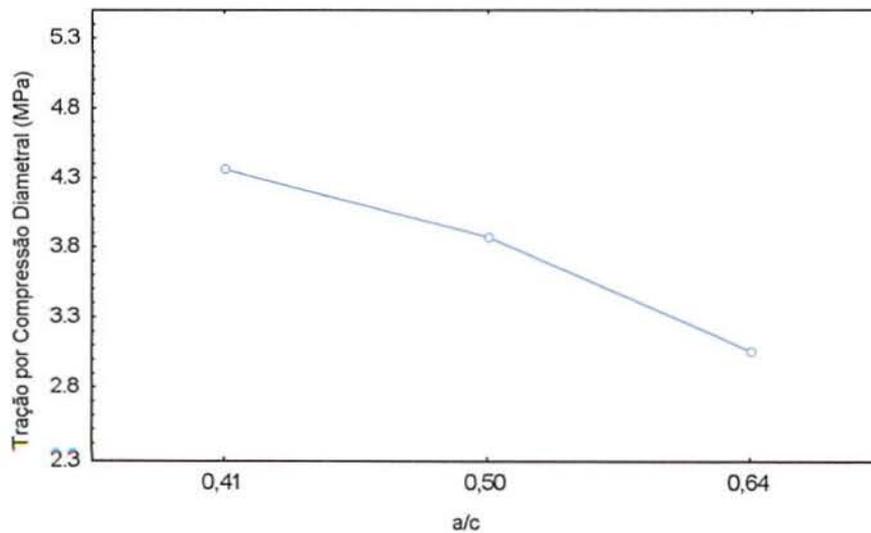
NS – Não Significativo

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral foram influenciados significativamente pelo teor de substituição, pela relação  $a/c$  e pela idade do concreto. Existe interação entre a relação  $a/c$  e a idade do concreto.

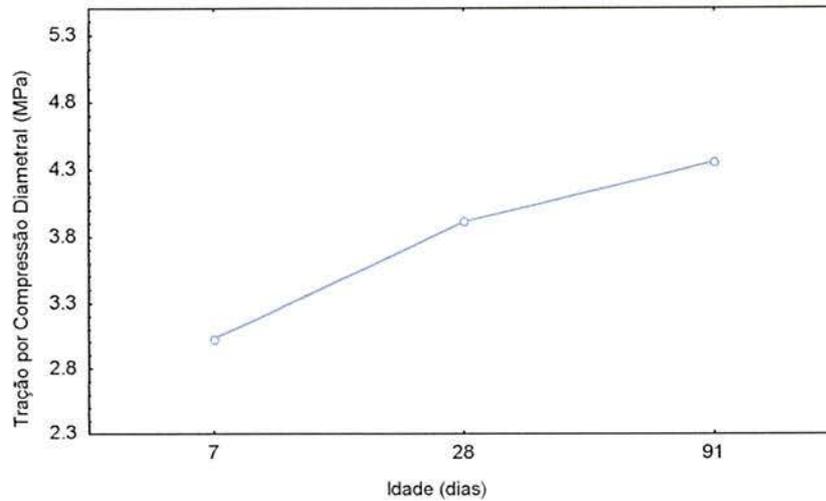
A Figura 68 (a), (b) e (c) mostra o comportamento dos concretos com relação à resistência à compressão axial, sob a influência do teor de adição de escória de cobre,  $a/c$  e idade, respectivamente. A influência da interação entre a relação  $a/c$  e a idade é apresentada na Figura 69.



(a)

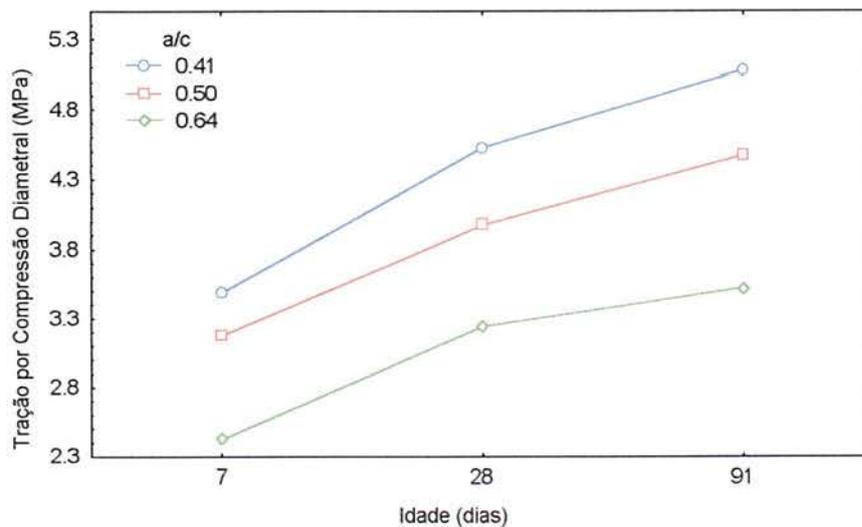


(b)



(c)

**Figura 68** Comportamento do concreto quanto à resistência à tração por compressão diametral função: (a) teor de substituição; (b) relação  $a/c$ ; (c) idade



**Figura 69** Resultados de resistência à tração por compressão diametral em função da interação entre a relação  $a/c$  e a idade

A resistência à tração por compressão diametral aumenta, quanto maior for o teor de substituição da areia por escória de cobre. Este comportamento muda a partir de 50% de substituição, quando a resistência passa a diminuir. A resistência cresce, quanto menor for a relação  $a/c$  e quanto maior for a idade do concreto. As razões para este comportamento estão associadas à granulometria, forma e textura

dos grãos, e massa específica da escória de cobre, conforme já foi discutido no item 6.5.2.1.

Pode-se observar que há uma grande semelhança entre o comportamento do concreto quanto à resistência compressão axial e à tração por compressão diametral. Porém, quanto a resistência à tração por compressão diametral, não houve interação entre o teor de substituição e a relação  $a/c$ , nem entre o teor de substituição e a idade do concreto, conforme foi verificado quanto à resistência à compressão axial.

Também, na tração por compressão diametral, o teor 40% de substituição de areia por escória de cobre foi o que apresenta melhores resultados. O aumento da resistência chegou a 27,3% aos 28 dias.

#### 6.5.2.3 Resistência à tração na flexão

Os ensaios para determinação da resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a NBR 12142 (1991). Foram rompidos 3 corpos-de-prova de cada mistura nas idades de 7 e 28 dias.

Na Tabela 59 estão apresentados os resultados de resistência à tração na flexão dos concretos nas idades de 7 e 28 dias.

As Figura 70 e Figura 71 apresentam os gráficos comparativos de resistência à tração na flexão nas idades de 7 e 28 dias, respectivamente.

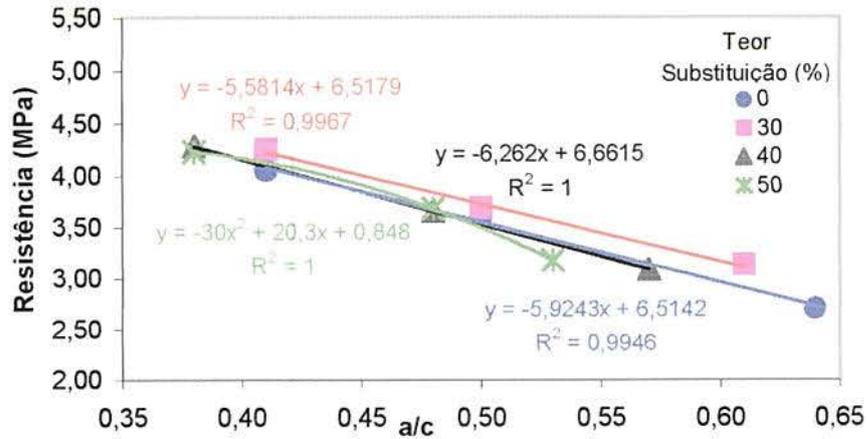
**Tabela 59** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos

Mistura	Idade						
	7 dias				28 dias		
	a/c	ftf	Ftfm	C.V.	ftf	ftfm	C.V.
Referência	0,41	4,11	4,05	5,10	4,83	4,95	3,32
		3,82			5,14		
		4,22			4,89		
	0,50	3,41	3,61	5,16	4,46	4,29	3,77
		3,78			4,14		
		3,63			4,26		
	0,64	2,91	2,70	9,06	3,56	3,41	4,28
		2,43			3,39		
		2,75			3,27		
70% de areia + 30% de escória de cobre	0,41	4,50	4,25	5,89	5,32	5,14	3,50
		4,24			4,96		
		4,00			5,14		
	0,50	3,65	3,69	3,76	4,32	4,48	3,57
		3,84			4,64		
		3,57			4,48		
	0,61	3,28	3,13	4,96	3,68	3,70	3,94
		2,97			3,85		
		3,14			3,56		
60% de areia + 40% de escória de cobre	0,38	4,08	4,28	5,06	5,04	5,19	2,72
		4,25			5,21		
		4,51			5,32		
	0,48	3,92	3,66	6,85	4,47	4,47	3,24
		3,64			4,33		
		3,42			4,62		
	0,57	3,28	3,09	6,91	3,77	3,77	4,11
		3,14			3,93		
		2,86			3,62		
50% de areia + 50% de escória de cobre	0,38	4,18	4,23	3,35	5,22	5,11	2,39
		4,12			4,98		
		4,39			5,14		
	0,48	3,47	3,68	5,58	4,51	4,37	3,10
		3,88			4,24		
		3,68			4,36		
	0,53	3,39	3,18	7,90	3,52	3,79	6,30
		2,90			3,86		
		3,24			3,98		

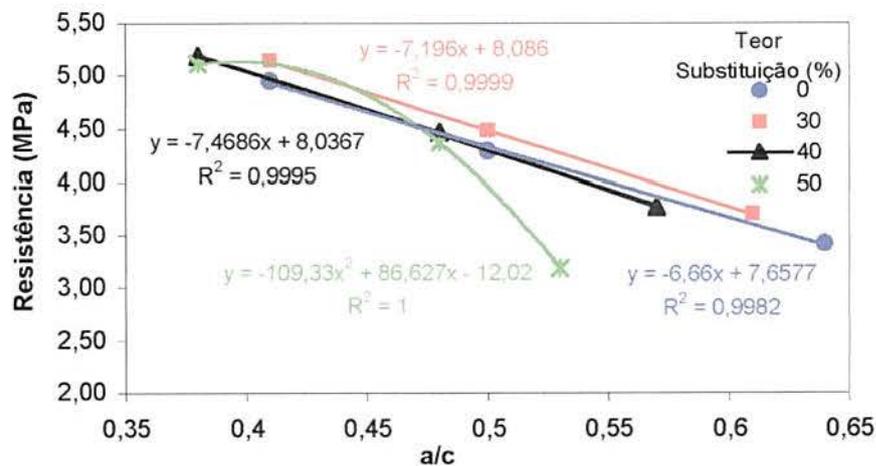
ftf – Resistência à tração na flexão (MPa)

C.V. – Coeficiente de variação (%)

ftfm – Resistência média à tração na flexão (MPa)



**Figura 70** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 7 dias



**Figura 71** Resultados de resistência à tração na flexão dos concretos aos 28 dias

### Análise dos Resultados

Através da ANOVA, foi verificada a influência do teor de substituição da areia por escória de cobre, da relação  $a/c$  e da idade, nos resultados de resistência dos concretos à tração na flexão. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 60.

**Tabela 60** Resultados da ANOVA para resistência à tração na flexão dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	0,24663	7,11	2,79	S
B – a/c	2	10,23302	295,08	3,10	S
C – idade	1	10,43483	300,90	3,95	S
AB	6	0,03663	1,06	2,29	NS
AC	3	0,00412	0,12	2,79	NS
BC	2	0,09938	2,86	3,10	NS
ABC	6	0,00471	0,14	2,29	NS
ERRO	48	0,034679			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

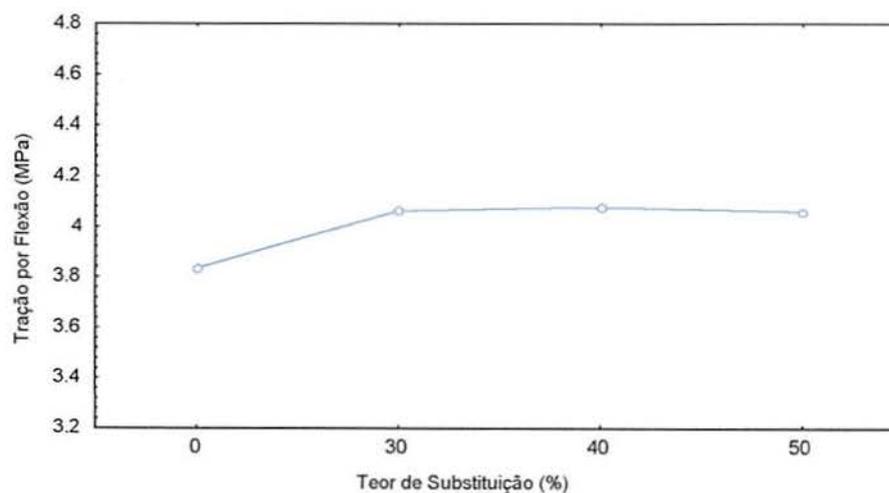
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

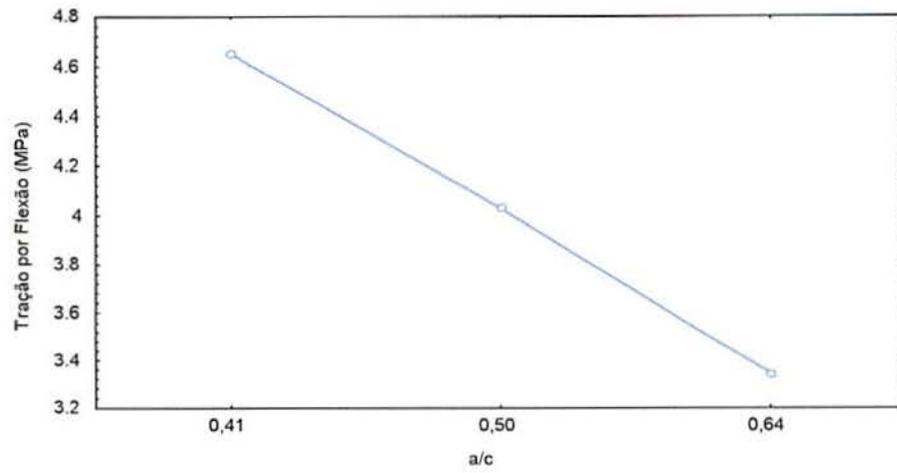
NS – Não Significativo

Observa-se que há influência significativa do teor de substituição, da relação a/c e da idade do concreto sobre os resultados de resistência à tração na flexão. Entretanto, não existe interação entre as variáveis.

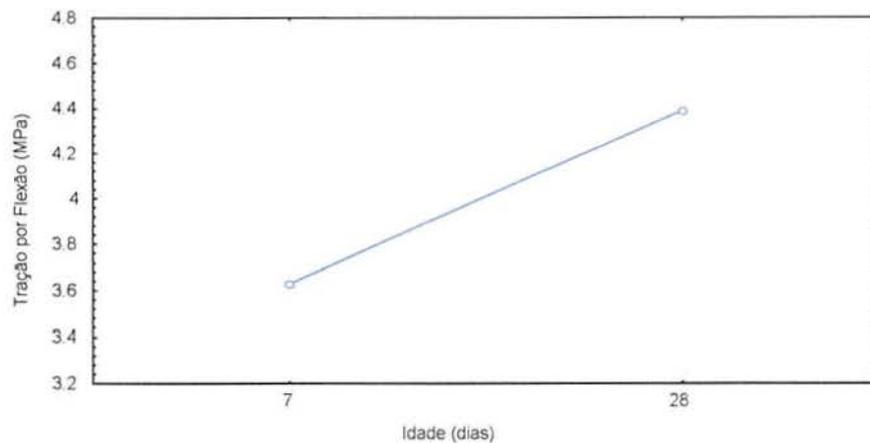
A Figura 72 (a), (b) e (c) mostra o comportamento dos concretos com relação à resistência à tração na flexão, sob a influência do teor de adição de escória de cobre, da relação a/c e da idade, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

**Figura 72** Comportamento do concreto quanto à resistência à tração na flexão, em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c; (c) idade

O comportamento do concreto com utilização de escória de cobre como parte do agregado miúdo, quanto à resistência à tração na flexão, é praticamente o mesmo com relação às outras propriedades mecânicas já analisadas. A substituição de parte da areia no concreto por escória de cobre aumenta a resistência à tração na flexão. Quanto maior for o teor de substituição, maior é o incremento na resistência. Verifica-se este comportamento até 40% de substituição. A partir deste teor, a resistência volta a diminuir, conforme mostra o gráfico da Figura 72 (a).

O fato dos grãos de escória de cobre apresentarem uma textura lisa, pode provocar uma redução nas resistências mecânicas do concreto, principalmente quanto à tração por flexão, uma vez que reduz a aderência à pasta de cimento.

Entretanto, a redução dos vazios, devido à maior densificação da matriz, deve ter sido preponderante sobre a possível redução da aderência.

Os concretos com teor de substituição de 30% apresentaram maior resistência à tração na flexão do que os demais.

### 6.5.3 Absorção por imersão

Conforme foi discutido no capítulo 5, absorção por imersão está relacionada com o volume de poros no concreto, e não com a facilidade com que um fluido pode penetrar. Entretanto, a determinação do volume dos poros do concreto, é importante para o entendimento do seu comportamento quanto às propriedades mecânicas e de durabilidade.

Os ensaios de absorção dos corpos-de-prova de concreto foram realizados com base na NBR 9778 (1990). Os resultados de absorção média estão apresentados na Tabela 61.

**Tabela 61** Resultados de absorção por imersão do concreto

Mistura	a/c	Absorção (%)	Coefficiente de Variação	Índice de Vazios (%)
Referência	0,41	4,3	5,3	9,8
	0,50	4,6	6,5	11,1
	0,64	5,1	5,9	12,0
30% Escória + 70% Areia	0,41	3,8	5,3	9,4
	0,50	4,1	6,3	10,1
	0,61	4,6	4,2	11,4
40% Escória + 60% Areia	0,38	3,6	5,3	9
	0,48	3,8	6,2	9,5
	0,57	4,0	7,5	10
50% Escória + 50% Areia	0,38	3,9	7,7	9,6
	0,48	4,0	11,5	10,2
	0,53	4,2	9,5	11,0

### Análise dos Resultados

Através da ANOVA, foi avaliada a influência do teor de substituição de areia por escória de cobre e da relação a/c, sobre a absorção por imersão. Os resultados estão apresentados na Tabela 62.

**Tabela 62** Resultados da ANOVA para absorção por imersão dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	0,860517	8,12	3,49	S
B – a/c	2	0,609554	5,75	3,89	S
AB	6	0,047571	0,45	3,00	NS
ERRO	12	0,105958			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

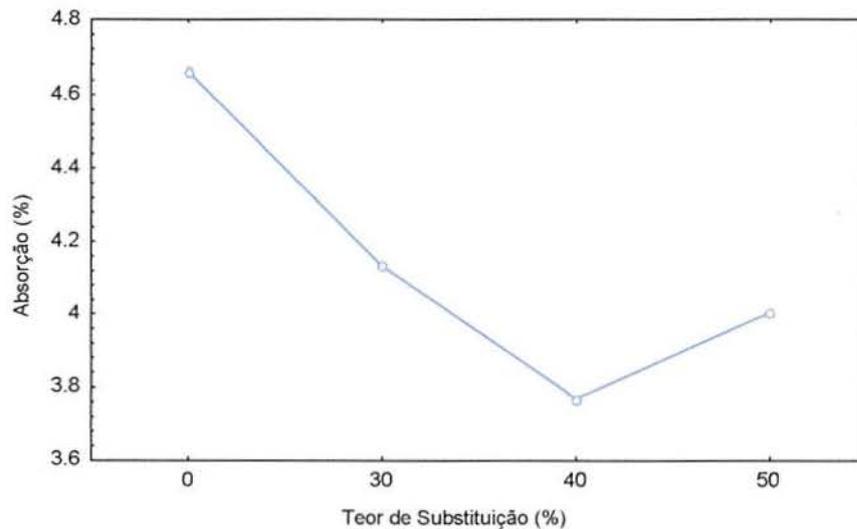
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

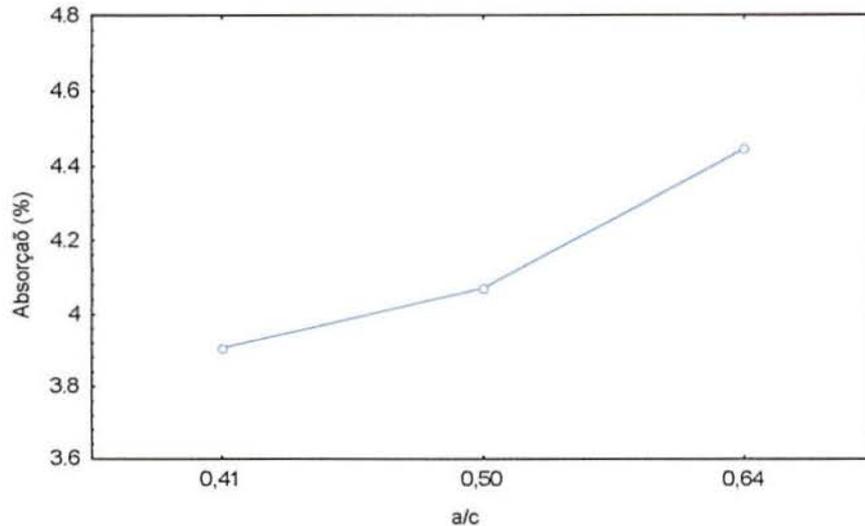
S – Significativo

NS – Não Significativo

A ANOVA mostra que há uma influência significativa do teor de substituição de areia e da relação a/c nos resultados de absorção por imersão. Entretanto, não há interação entre estes fatores.

A Figura 73 (a) e (b) mostra o comportamento dos concretos, no que se refere à absorção por imersão.

**(a)**



(b)

**Figura 73** Comportamento do concreto quanto à absorção por imersão, em função: (a) do teor de adição; (b) da relação a/c

Os resultados mostram que houve um melhor desempenho dos concretos com utilização de escória de cobre, em substituição à parte da areia. Os concretos com até 40% de escória apresentam menor absorção quanto maior for o teor de substituição da areia. A partir 40% a absorção passa a aumentar. A redução da absorção por imersão está associada à porosidade do concreto. Observa-se, na Tabela 61 que o índice de vazios diminui com a utilização da escória como agregado. A justificativa para esta influência está associada, também, à granulometria, forma e textura dos grãos de escória e sua massa específica. Por outro lado, a utilização de altos teores de escória como substituição da areia pode implicar no aumento da absorção, devido à exsudação, provocada pela elevada massa específica da escória, que torna a superfície do concreto mais porosa.

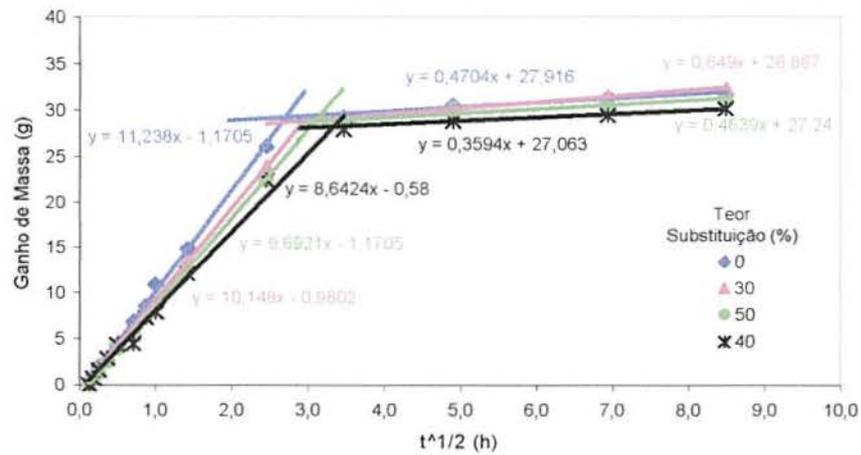
A absorção é também influenciada pela relação a/c. Quanto maior a relação a/c, maior a porosidade do concreto, conseqüentemente, maior será a absorção.

A utilização de 40% de escória como agregado miúdo no concreto apresentou melhores resultados, para todas as relações a/c, chegando a reduzir a absorção em 22%.

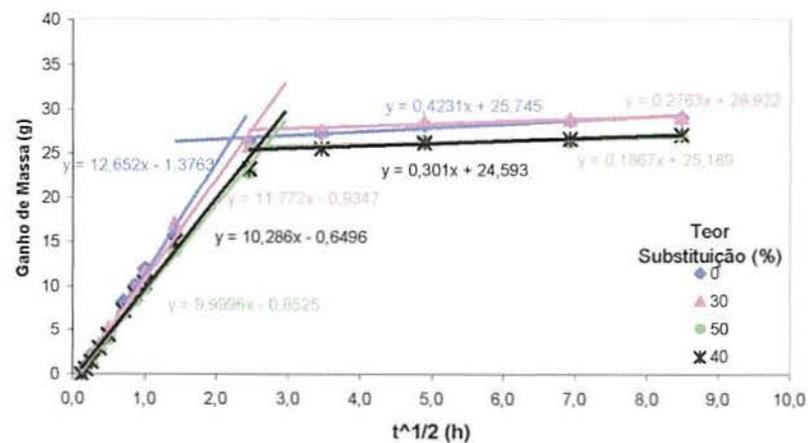
#### 6.5.3.1 Absorção por sucção capilar

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base no ensaio desenvolvido por KELHAM (1988), já descrito no Capítulo 5.

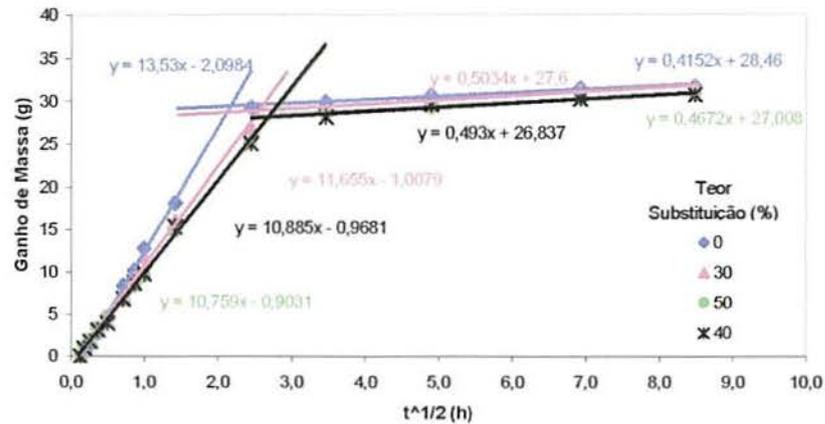
Na Figura 74, na Figura 75 e na Figura 76 estão apresentados os gráficos de absorção por sucção capilar dos concretos.



**Figura 74** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,41



**Figura 75** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,50



**Figura 76** Absorção por sucção capilar dos concretos com relação a/c equivalente a 0,64

A taxa de absorção e a resistência capilar dos concretos foram determinados conforme descrito no Capítulo 5. Os resultados estão apresentados na Tabela 63.

**Tabela 63** Resultados de taxa de absorção e resistência capilar dos concretos

Mistura	a/c	Taxa de Absorção (g/cm <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> )x10 <sup>-2</sup>	Resistência Capilar (h/m <sup>2</sup> )
Referência	0,41	11,10	10.710
	0,50	12,61	7.505
	0,64	13,48	8.031
30% de Escória + 70% de Areia	0,41	9,85	13.221
	0,50	11,66	10.108
	0,61	11,71	9.961
40% de Escória + 60% de Areia	0,38	8,64	16.759
	0,48	10,19	10.840
	0,57	10,88	10.878
50% de Escória + 50% de Areia	0,38	9,55	14.024
	0,48	10,04	11.361
	0,53	10,5	11.311

## Análise dos Resultados

### a) Taxa de absorção

A influência do teor de substituição da areia por escória de cobre sobre a taxa de absorção foi avaliada através da ANOVA. Estes resultados estão apresentados na Tabela 64.

**Tabela 64** Resultados da ANOVA quanto à taxa de absorção dos concretos, e suas interações

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de substituição	3	0,000809	161723,9	5,99	S
B – a/c	2	0,000733	146606,3	5,14	S
AB	6	0,000029	5835,2	5,14	S
ERRO	12	0			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

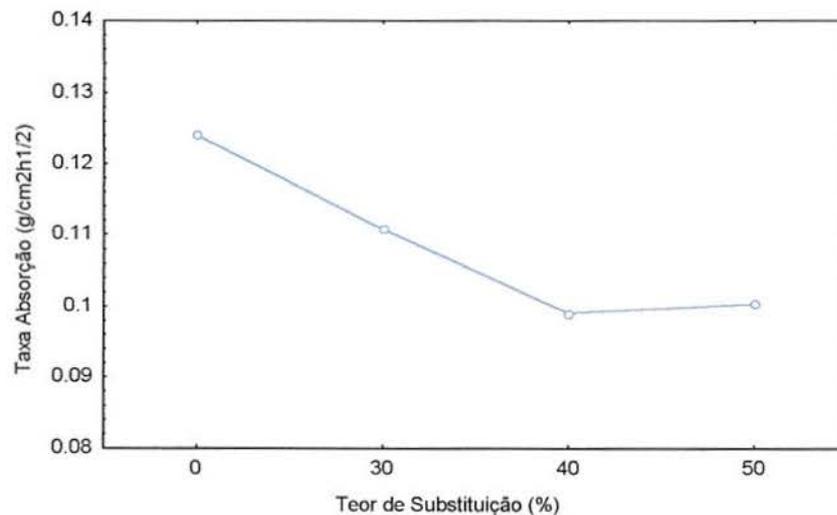
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

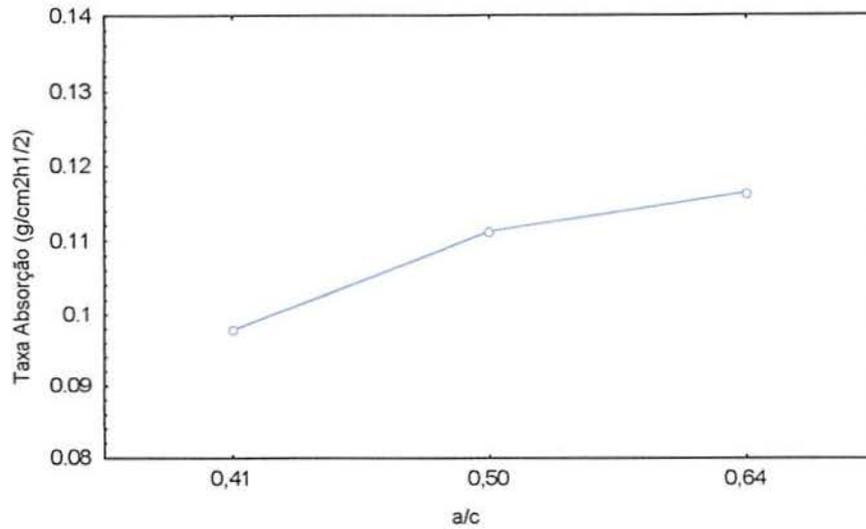
NS – Não Significativo

A ANOVA mostra que há uma forte influência do teor de substituição de areia por escória de cobre e da relação a/c nos resultados da taxa de absorção. Existe, também, interação entre estas variáveis.

A Figura 77 (a) e (b) mostra o comportamento dos concretos, no que se refere à taxa de absorção. O efeito da interação entre o teor de substituição e a relação a/c sobre a taxa de absorção é apresentado na Figura 78.

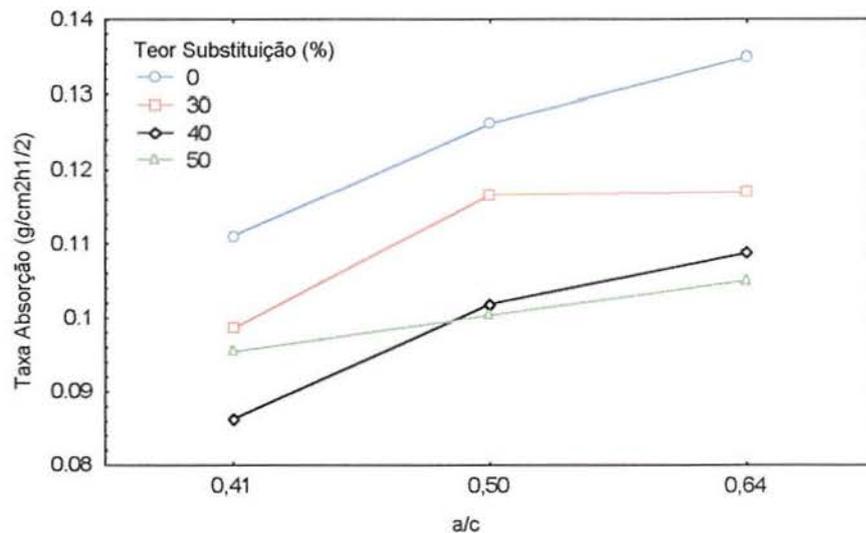


(a)



(b)

**Figura 77** Resultados da taxa de absorção em função: (a) teor de adição; (b) relação a/c



**Figura 78** Taxa de absorção capilar em função da interação entre a relação a/c e teor de substituição de areia

Os resultados mostram que houve um melhor desempenho dos concretos com adição de escória de cobre. A taxa de absorção diminuiu quando o teor de substituição aumenta. A redução na taxa de absorção se dá, provavelmente, pela granulometria, forma e textura dos grãos, além da massa específica, que proporcionam uma maior redução e melhor distribuição dos vazios. No entanto, para relações a/c superiores a 0,48, o teor de 50% de substituição não apresenta o melhor comportamento. Isso se explica, porque nesta faixa de relação a/c o volume

de escória é muito grande e provoca exsudação no concreto, devido à elevada massa específica da escória. A exsudação, por sua vez, facilita o desenvolvimento de poros capilares, aumentando a taxa de absorção em relação aos concretos com 40% de escória de cobre.

O teor de substituição que proporcionou melhor desempenho aos concretos quanto à taxa de absorção, foi de 40%, sendo uniforme para todas as relações *a/c*, como pode ser observado na Figura 78.

### b) Resistência capilar

A influência do teor de substituição da areia por escória de cobre e da relação *a/c* sobre a resistência capilar foi avaliada através da ANOVA. Estes resultados estão apresentados na Tabela 65.

**Tabela 65** Resultados da ANOVA quanto à resistência capilar dos concretos

Fator	GDL	MQ	Fcalculado	F0,05	Significância
A – teor de Substituição	3	192570x10 <sup>2</sup>	385140x10 <sup>2</sup>	3,49	S
B – <i>a/c</i>	2	363290x10 <sup>2</sup>	726579x10 <sup>2</sup>	3,89	S
AB	6	1581714	3163428	3,00	S
ERRO	12	0,50000			

GDL – Graus de Liberdade

MQ - Média Quadrada

Fcalculado – Valor calculado de F

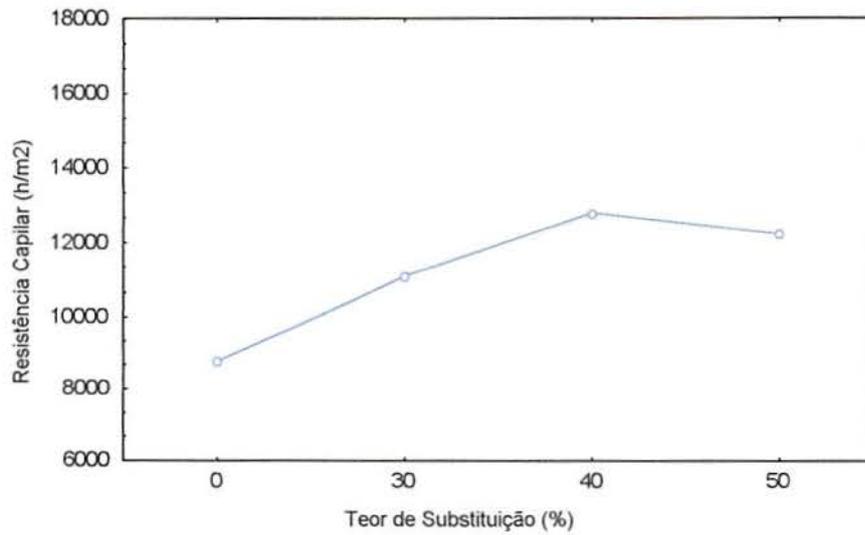
F0,05 – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S – Significativo

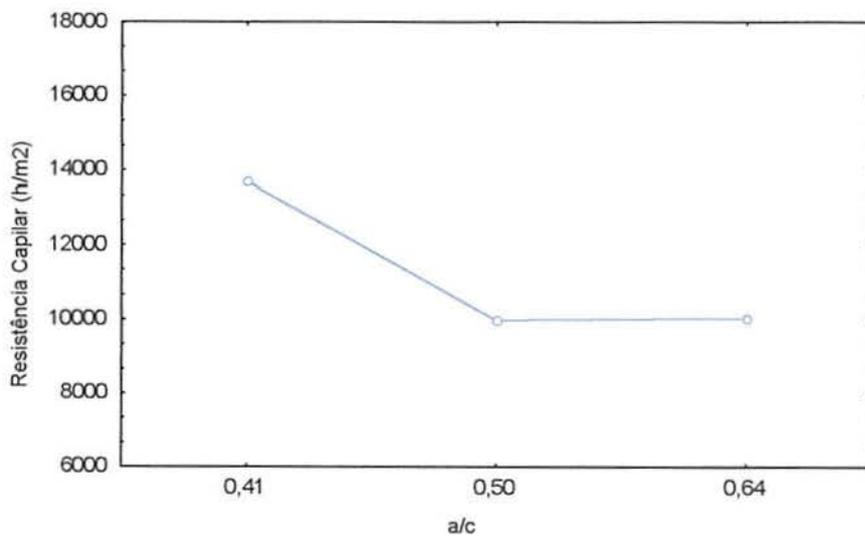
NS – Não Significativo

De acordo com a ANOVA, verifica-se que existe influência significativa do teor de substituição de areia por escória de cobre e da relação *a/c* nos resultados da resistência capilar. A interação entre estes fatores é, também, muito significativa.

Na Figura 79 (a) e (b) estão apresentados os gráficos de comportamento dos concretos, quanto à resistência capilar. O efeito da interação entre a relação *a/c* e do teor de substituição sobre a resistência capilar está apresentado na Figura 80.

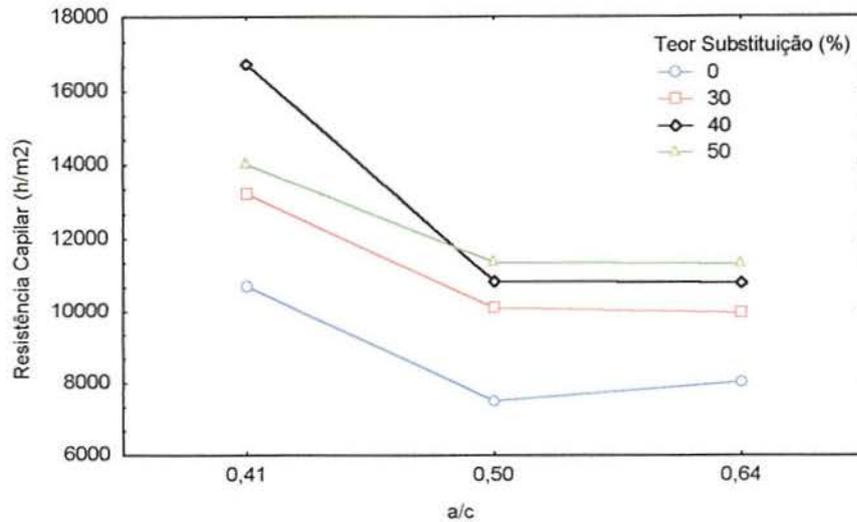


(a)



(b)

**Figura 79** Resultados de resistência capilar em função: (a) teor de adição e (b) relação a/c



**Figura 80** Resistência capilar em função da interação entre a relação a/c e o teor de substituição de areia

Observa-se que houve um melhor desempenho dos concretos com teor de substituição de areia por escória de cobre, no que se refere à resistência capilar. Estes resultados confirmam o comportamento do concreto, quanto à taxa de absorção.

Quanto maior for o teor de substituição de areia por escória de cobre, maior a resistência capilar. Exceto para os concretos com 50% de substituição, na faixa de relação a/c superior a 0,48. O efeito de um grande volume de escória como agregado miúdo, sobre a resistência capilar, é o mesmo que aconteceu quanto à taxa de absorção capilar: a exsudação provocada em função da elevada massa específica da escória favorece ao aparecimento de poros capilares, reduzindo, desta forma, a resistência capilar. No que se refere à relação a/c, a resistência capilar diminui quanto maior for o seu valor. Este desempenho está também relacionado com a porosidade do concreto.

## 7 CONCLUSÕES

A reciclagem se apresenta como uma alternativa para o problema de destinação final adequada para os resíduos e redução do impacto ambiental, provocado pelo crescente consumo de recursos naturais.

Com base nos resultados do estudo das possibilidades de utilização da escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto, pode-se tirar conclusões que serão apresentadas a seguir.

As conclusões apresentadas referem-se apenas aos resultados obtidos com concretos produzidos com os tipos, quantidades e características específicas dos materiais, e técnicas de execução utilizadas. Sua representatividade deve ser confirmada através da execução de novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementá-las e confirmá-las.

### 7.1 COM RELAÇÃO À CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE

A escória estudada se caracteriza, do ponto de vista da sua composição química, como uma pozolana, por apresentar 84,3% dos compostos  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . A estrutura dos compostos é predominantemente cristalina, com forte predominância da faialita olivina, que é um silicato bastante estável. Verifica-se, também, no difratograma, um pequeno halo de amorfização dos compostos. Isso significa que eles podem reagir com compostos hidratados do cimento, dando origem a novos compostos, que contribuem para resistência da pasta.

Os resultados dos ensaios de determinação da atividade pozolânica, pelo método mecânico (NBR 5752, 1992), mostram que a escória pode ser classificada como uma pozolana classe "E", já que apresentou atividade de 87%. Os resultados dos ensaios, pelo método químico (NBR 5753, 1991), confirmaram esta atividade.

A forma dos grãos da escória bruta é esférica e a textura lisa. Sua granulometria é equivalente à de um agregado miúdo na faixa IV – grosso, de acordo com a NB 7211 (1983). Após a moagem, grande parte dos grãos preservam a forma esférica, o que facilita a sua distribuição nas misturas.

A massa específica da escória é muito elevada ( $3,870 \text{ kg/dm}^3$ ), classificando-a como agregado pesado.

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilidade mostram que a escória de cobre pode ser classificada como resíduo classe II – não inerte. Entretanto, não apresenta riscos ambientais, uma vez que, não foi lixiviado nem solubilizado, acima dos limites das normas, nenhum elemento químico considerado tóxico.

## 7.2 COM RELAÇÃO À UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE COBRE COMO ADIÇÃO AO CONCRETO

- a) A escória, para ser utilizada como adição ao concreto, deverá ser moída. O tempo de moagem em moinho de bolas horizontal, escolhido para os ensaios, foi de 60 minutos, por ter proporcionado o tamanho médio dos grãos compatível com o de materiais pozolânicos. Este desempenho foi definido através da granulometria da escória moída e da resistência à compressão aos 28 dias de argamassas produzidas com 20% de escória moída em diferentes tempos. Vale salientar, que estas características podem variar em função do tipo de moinho.
- b) O teor definido de adição de escória de cobre ao concreto foi de 20%, em relação à massa de cimento. A escolha deste teor foi feita com base nos resultados de resistência à compressão axial, aos 28 dias, de argamassas produzidas com teores de adição 10%, 20% e 30%. A maior resistência foi obtida com o teor de adição de 20%.

### 7.2.1 Quanto às características do concreto no estado fresco

- a) A adição de escória de cobre não influenciou na trabalhabilidade do concreto. Praticamente não houve alteração na relação a/c dos concretos produzidos com adição de escória, em relação aos sem adição, exceto, para relação 0,40, que com a adição de escória aumentou para 0,41.
- b) A massa específica do concreto no estado fresco aumentou um pouco com adição de escória. A diferença, no entanto, foi de no máximo 1,2%.

### 7.2.2 Quanto às características do concreto no estado endurecido

- a) A massa específica do concreto no estado endurecido também aumentou com a adição da escória de cobre. Quanto maior a relação a/c, maior o percentual de aumento, chegando a 2,5%.

- b) A resistência à compressão axial do concreto aumentou com a adição de escória, para todas as idades de referência (7, 28 e 91 dias). A diferença foi maior para as maiores relações a/c. O aumento na resistência à compressão axial chegou a 30,4%, aos 28 dias.
- c) A resistência do concreto à tração por compressão diametral aumentou significativamente em todas as idades de ensaio. Quanto menor a relação a/c maior essa influência da adição de escória. Aos 28 dias o aumento na resistência chegou a 17,6%, confirmando o comportamento do concreto quanto à resistência à compressão axial.
- d) A resistência do concreto à tração na flexão também aumentou com adição de escória de cobre, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de idade. Da mesma forma que as propriedades mecânicas anteriores, com o aumento da relação a/c, a influência da adição de escória é mais significativa, devido à maior porosidade do concreto. Para relação 0,60, aos 28 dias, a resistência à tração na flexão do concreto com adição de escória foi 18,4% maior do que a do concreto de referência.
- e) A absorção por imersão foi menor para os concretos com adição de escória, principalmente nas relações a/c maiores. A redução da absorção foi de 13,5% para relação a/c 0,60. O índice de vazios também diminuiu com a adição de escória, reforçando as conclusões anteriores.
- f) Os concretos com adição de escória de cobre, também apresentaram melhor desempenho quanto à absorção por sucção capilar. A taxa de absorção diminuiu e a resistência capilar aumentou. Isso significa que além de apresentarem uma menor porosidade, mostrada no ensaio de absorção por imersão, nos concretos com adição de escória, provavelmente, os poros estão melhor distribuídos, reduzindo a formação de capilares.
- g) A profundidade de carbonatação foi menor nos concretos com adição de escória de cobre. A influência foi mais significativa na relação a/c 0,60 e com maiores tempos de exposição do concreto ao CO<sub>2</sub>. Aos 240 dias de exposição a profundidade de carbonatação do concreto com adição de escória diminuiu 80% para relação a/c 0,50 e 35,7% para relação a/c 0,60.

h) A influência da adição de escória de cobre ao concreto, também ficou evidenciada nos resultados dos ensaios de ataque por sulfato. Os índices de resistência química "R" dos concretos com adição foram bastante superiores aos do concreto de referência. Mais uma vez o melhor desempenho se deu para maiores relações a/c, quando se tem maior porosidade do concreto. O valor de "R" chega a ser 100% maior para relação a/c 0,60. No que se refere à variação de massa verificou-se um pequeno ganho de massa nos concretos com adição e uma pequena perda nos concretos de referência, exceto para relação a/c 0,50. Entretanto, não foi possível tirar conclusões a esse respeito, já que a variação não foi significativa.

Com base neste conjunto de resultados pode-se dizer que a adição de 20% de escória de cobre ao concreto, de um modo geral, melhorou o desempenho do concreto quanto às suas propriedades mecânicas e durabilidade.

### 7.3 COM RELAÇÃO À UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE COBRE COMO AGREGADO MIÚDO PARA CONCRETO

A granulometria, forma e textura dos grãos da escória bruta apontam para viabilidade do seu uso como agregado miúdo para concreto e argamassa.

Com base nos resultados de ciclagem água-estufa pode-se dizer que o comportamento da escória frente à intempéries foi bastante satisfatório. Não se verificou perda de massa significativa, e nenhum aspecto que indicasse alterabilidade dos grãos.

A massa específica da escória é muito elevada ( $3,870 \text{ kg/dm}^3$ ) e impõe restrições quanto a seu uso no concreto, já que teores elevados de escória implica em aumento significativo na massa específica do concreto. Entretanto, essa pode ser uma vantagem, quando se deseja produzir concreto pesado para contenção de encostas, por exemplo.

#### 7.3.1 Quanto às características do concreto no estado fresco

a) A trabalhabilidade do concreto aumentou significativamente com a utilização de escória de cobre como parte do agregado miúdo. Esta influência tem reflexo na relação a/c, já que a trabalhabilidade do concreto

foi fixada. Quanto maior o teor de escória em substituição da areia, maior a redução na relação a/c. Com a utilização de 50% de escória a relação a/c baixou de 0,64 para 0,53. Uma redução de 17,2%, portanto. Este comportamento foi atribuído à granulometria, forma e textura dos grãos da escória, além da massa específica mais elevada, que contribuíram para um maior abatimento. Para considerar este efeito da escória de cobre sobre a trabalhabilidade do concreto, que foi avaliada através do abatimento, as relações a/c do concreto de referência foi adotada como padrão, para efeito de comparação entre os concretos.

Os concretos com 50% de escória de cobre apresentaram exsudação, devido à granulometria do agregado miúdo (areia + escória de cobre) e à elevada massa específica da escória.

- b) A massa específica do concreto aumentou significativamente com a utilização da escória de cobre como agregado. Quanto maior o teor de substituição da areia por escória, maior a influência na massa específica. O aumento chega a 8,8% com o teor de 50% de escória. Isso deve-se à massa específica da escória que é maior do que a dos demais componentes do concreto.

### **7.3.2 Quanto às características do concreto no estado endurecido**

- a) A massa específica do concreto no estado endurecido também aumentou quando se utilizou escória de cobre como parte do agregado miúdo. Este aumento chegou a 10,3% para o teor de 50% de escória.
- b) A resistência à compressão axial do concreto aumentou com a substituição de parte da areia por escória de cobre, em todas as idades de ensaio. Entretanto, nos concretos com 50% de escória, com relação a/c 0,53, a resistência foi inferior à do concreto de referência. Esse fato deve-se à exsudação provocada pela granulometria do agregado miúdo (areia + escória de cobre) e elevada massa específica da escória.

Os concretos com utilização de 40% de escória foram os que apresentaram melhor desempenho quanto à resistência à compressão axial, chegando a aumentar em até 31,7% aos 28 dias.

- c) A resistência à tração por compressão diametral, também aumentou com a utilização da escória de cobre como parte do agregado miúdo. O aumento da resistência foi maior, quanto maior foi o teor de escória de cobre. Porém, nos concretos com 50% de escória, a resistência à tração por compressão diametral foi menor do que à do concreto de referência. Apenas para a relação a/c 0,48 a resistência do concreto foi maior do que o de referência.

O melhor desempenho foi dos concretos com utilização de 40% de escória de cobre como agregado miúdo. O aumento da resistência à tração por compressão diametral chegou a 27%, em relação ao concreto de referência, aos 28 dias de idade.

- d) No que se refere a resistência à tração por flexão, o comportamento dos concretos foi praticamente o mesmo verificado nas demais propriedades mecânicas avaliadas. O teor de 50% de substituição da areia por escória de cobre, também, na tração por flexão, apresentou um comportamento diversificado do concreto, tendo variado da mesma forma que nas duas outras propriedades mecânicas.

Os concretos com 40% de escória como agregado miúdo apresentaram o melhor desempenho quanto à resistência à tração na flexão, tendo aumentado em até 10,6%, em relação ao concreto de referência.

- e) Os resultados dos ensaios de absorção por imersão confirmaram o comportamento dos concretos quanto às propriedades mecânicas. A absorção dos concretos com escória de cobre como parte do agregado miúdo, é menor do que à dos concretos de referência. Quanto maior o teor de escória no concreto, menor a absorção. Porém, a absorção dos concretos com 50% de escória é maior do que à dos concretos com 40%. Provavelmente a exsudação do concreto provocou maior porosidade no concreto, aumentando a sua absorção.

Os concretos com 40% de escória de cobre apresentaram melhores resultados quanto à absorção por imersão.

- f) No que se refere à absorção por sucção capilar, a utilização de escória de cobre como parte do agregado miúdo, também melhorou o desempenho

dos concretos. A taxa de absorção foi menor e a resistência capilar foi maior, em relação aos concretos de referência.

O teor de 40% de escória, também quanto à absorção por sucção capilar, foi o que melhores resultados apresentou.

Os resultados dos ensaios de absorção por sucção capilar confirmam a hipótese de que a escória de cobre, além de reduzir a porosidade do concreto, proporcionou uma melhor distribuição dos poros. A redução da relação a/c para a mesma faixa de abatimento, também evidencia este fato.

Em síntese, pode-se dizer que a utilização de escória de cobre como parte do agregado miúdo, até 40% em volume, proporcionou melhor desempenho do concreto quanto às propriedades mecânicas. O fato de reduzir a absorção indica que o seu uso também poderá aumentar a durabilidade do concreto. Entretanto, faz-se necessário a realização de outros ensaios (carbonatação, difusão de cloretos) para constatar esta tendência.

A utilização de escória de cobre como agregado miúdo para concreto apresenta-se como uma grande alternativa, sobretudo na região de Camaçari, onde é gerada. Não só pelas vantagens técnicas, mas pela redução do impacto ambiental provocado pela retirada da areia das dunas existentes na região.

#### 7.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como este trabalho teve ampla abrangência, envolvendo dois tipos de aplicação bastante distintos para a escória de cobre, alguns aspectos não foram totalmente contemplados. Acredita-se, portanto, que ele possa abrir novas possibilidades de pesquisas. Neste sentido, sugere-se que nestas pesquisas sejam levados em consideração os seguintes aspectos:

- Avaliação da influência da adição de escória de cobre sobre o módulo de elasticidade do concreto;
- Determinação da influência da adição de escória de cobre sobre a distribuição dos poros na pasta, através da técnica de intrusão de mercúrio;
- Realização do ensaio de ataque por sulfato de sódio no concreto com adição de escória de cobre, por um período mais prolongado, com acompanhamento

do ensaio, com determinação da presença de etringita ao longo do período de ataque;

- Determinação da relação custo *versus* benefício para utilização de escória de cobre como adição ao concreto;
- Avaliação da influência da utilização de escória de cobre como agregado miúdo na durabilidade do concreto;
- Estudo da utilização de escória de cobre como agregado miúdo, para produção de concreto pesado;
- Estudo da utilização de escória de cobre na produção de argamassa e concreto para blindagem.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre, 1998. 126p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- AICTIN, P. C.; LAPLANTE, P. The development of high performance concrete in North America. In: MALIER, Y. (ed.). **High Performance Concrete-from Material to Structure**. London, E & F. Spon, 1992. P. 412-420.
- AKMAN M. S.; OZKAN B. S. Durability of natural pozzolan blended Portland cement mortars against ammonium nitrate and sodium sulfate. In.: **Durability of Building Materials and Components, 6.** E & FN Spon, 1993. p. 335-343.
- AL-AMOUDI, O.S.B. et al. Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n 167, p. 113-123, Jun 1994.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Use of fly ash in concrete. ACI 226 3R-87. In: **ACI Manual of Concrete Practice 1990, part 1, Materials and General Properties of Concrete**. Detroit, 1990. ACI COMMITTEE 226.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Guide to durable concrete. **Journal of American Concrete Institute**, v. 88, n. 5, p. 544-588, Sept-Oct 1991. ACI COMMITTEE 201.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for length change of hydraulic – cement mortars exposed to a sulfate solution; c1012/87. **Anual Book of ASTM Standars**. Philadelphia, 1987. v.04.01.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard test method for potencial expansion of Portland cement mortars exposed to sulfate; C 452/89. **Anual Book of ASTM Standars**. Philadelphia, 1989. v.04.01 p. 223-225.
- ARIÑO, A. et al. Effect of ground copper slag on the hidration of blended cementitious mixtures. In: ASCE, MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE, MATERIALS FOR THE NEW MILENIUM, 1996. p. 1677-1686.
- ARIÑO, A.;MOBASHER, B. Effect of ground copper slag on strength and toughness of cementitious mixes. **ACI Materials Journal**. Jan-Feb., 1999, p. 68-73.
- ASSIS, R. M. et al. Algumas questões ligadas ao controle ambiental na siderurgia e suas soluções. In SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Vitória. **Anais**. Vitória, 1997. p 15-28.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **O Brasil e a futura série ISO 14000**. Rio de Janeiro, 1994, 14p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5735 - **Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, 1991.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5738 – **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5739 – **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5752 – **Materiais Pozolânicos: determinação de atividade pozolânico com cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5753 – **Cimento Portland Pozolânico: determinação da pozolanicidade.** Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118 – **Projeto e execução de obras de concreto armado.** Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6474 – **Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181 – **Solo – Análise granulométrica – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7182 – **Solo – Determinação do grau de compactação – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregado para concreto.** Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7214 – **Areia normal para ensaio de cimento.** Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7215 – **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7216 – **Amostragem de agregados.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7217 – **Agregados: determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7218 – **Agregados: determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, 1987.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7219 – **Agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7220 – **Agregados: determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7221 – **Qualidade do agregado miúdo.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7222 – **Argamassa e Concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7223 – **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7251 – **Agregados em estado solto: determinação da massa unitária.** Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9776 – **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapmann.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9779 – **Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9833 – **Concreto fresco: determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9937 – **Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9941 – **Redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 – **Resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 – **Lixiviação de resíduos.** Rio de Janeiro, 1987.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006 – **Solubilidade de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10007 – **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11578 – **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11579 – **Cimento Portland: determinação da finura por meio da peneira 75 $\mu$ m (nº 200)**. Rio de Janeiro 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12142 – **Concreto: determinação da resistência á tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos**. Rio de Janeiro 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653 – **Materiais Pozolânicos: especificação**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12696 – **Agregados – Verificação do Comportamento Mediante Ciclagem Artificial Água-Estufa**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13276 – **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de tetos – determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência padrão**. Rio de Janeiro, 1990.
- ASU Barzin Mobasher. Site disponível na *internet* [ceaspub.eas.asu.edu/cement](http://ceaspub.eas.asu.edu/cement). Consultado em novembro, 1999.
- BALL, D. Selecting aggregates formaximum packing density in low permeability concretes. **Concrete**, p. 9-14, May 1998.
- BANTHIA, N.; MINDESS, S. Water permeability of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p 727-736. 1989.
- BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim**. Porto Alegre, 1998. 153p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BARROSO, L. R. Proteção do meio ambiente na Constituição Brasileira. **Revista Doutrina**. Rio de Janeiro, p. 58-79 nov. 1995.
- BASSET et al. Análise inorgânica quantitativa VOGEL. 4. ed.. Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 1981. p. 178-193.
- BAUER, E. **Avaliação comparativa da influência da adição de escória de alto-forno na corrosão das armaduras através de técnicas eletroquímicas**. São

- Paulo, 1995. 236 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.
- BILODEAU, A. MALHOTRA, M. High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development. **ACI Materials Journal**, p.41-48. Jan.-Feb. 2000.
- BITTENCOURT, A. L. B. **Otimização de escória do forno elétrico da Caraíba Metais S.A.** Rio de Janeiro, 1992. 187p Dissertação (mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- BRAJA, M. das et al. Geotechnical properties of a copper slag. **Transportation Research Record 941**. Washington D.C., National Academy of Sciences, 1983, p. 1-4.
- BRETANHA, A. M. **Resistência à sulfatos de concretos contendo diferentes tipos de cimento e adição de CCA.** Porto Alegre, 2000. 150p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BUTLER, A. Capillary absorption by concrete. **Concrete.**, p. 23-25. Jul.-Aug., 1997.
- CAHYADI, J.H.; UOMOTO, T. Influence of environmental relative humidity on carbonation of concrete (mathematical modeling). **Durability of Building Materials and Components**. 6 ed. E & FN Spon, 1993.
- CÁNOVAS. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo. PINI. 1988, 522p.
- CASTILHO J. A. B. et al. Diagnóstico de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: perspectivas de valorização na construção civil. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 71-78.
- CAVALCANTE, J. R; CHERIAF, M. Ensaio de avaliação para controle ambiental de materiais com resíduos incorporados. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 31-38.
- CEMENT RESEARCH INSTITUTE OF INDIA. **Evaluation of sulphate resistance of concrete**. New Delhi, 1981.
- CEUKELAIRE, L.; VAN NIEUWENBURG, D. Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. **Cement and Concrete Research**, 23, p. 442-452. 1993.
- CINCOTTO, M. A. A utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: SIMPÓSIO DE DESEMPENHO DE MATERIAIS E COMPONENTES DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1988, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis, 1988. p. 171-181.
- CINCOTTO, M. A. Cimento alternativo à base de escória de alto-forno. **Construção Região Sul**, n 259, p. 23-26. 1990.

- CINCOTTO, M. A. et al. **Caracterização de escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado**. São Paulo, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2, 1994, 34p. (Boletim 65).
- COHEN, M.D.; MATHER, B. Sulfate attack on concrete – research needs. **ACI Materials Journal**, Detroit. v. 88, n 1. p. 62-69. Jan – Feb. 1991.
- COLLEPARDI, M. **Concrete deterioration from sulfate and acid attacks**. Course on Durability of concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS HIGH-PERFORMANCE CONCRETE-PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. Florianópolis, 1996.
- COSTA, U. et al. Permeability and diffusion of gases in concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 9., 1992. **Proceedings**. New Delhi, NCB, 1992, v.1, p. 107-114.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3 v.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssilica**. São Paulo, SP. 1995, 286p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). DNER-ME50. **Determinação do índice de suporte califórnia**. Rio de Janeiro, 1979.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). DNER-ME59. **Determinação da resistência à água (adesividade) de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro, 1979.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). DNER-ME107. **Ensaio marshall**. Rio de Janeiro, 1979.
- DHIR, R.K. Pulverized full ash. In: CEMENT REPLACEMENTS MATERIALS. **Concrete Technology and Design. Proceedings**. Glasgow: Surrey University Press, 1986, v. 3. p. 197-255.
- DJANIKIAN, J. G. **Cimentos resistentes a sulfatos**. São Paulo, 1980. 123 p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica – Universidade de São Paulo
- DUDA, A.; BAUWESEN, A. Aspects of the sulfate resistance of steelwork slag cements. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, N.Y., v.17, n.3., P. 373-384. 1987.
- FAGERLUND, G. On the capilarity of concrete. **Nordic Concrete Research**. n.1, p.15-20, 1982.
- FERREIRA, A. de A. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Porto Alegre, 1999. 154p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- FIGUEIREDO, E. J. P. **Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto.** São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo 1993. (Boletim Técnico, BT/PCC/121).
- GALDEANO, O. V. R. et al. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIOS E MATÉRIAS-PRIMAS, 25., 1994. Volta Redonda. **Anais.** Volta Redonda, 1994, p. 48-64.
- GEBLER, S. H; KLIEGER, P. Effect of fly ash on physical properties of concrete. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE, 2, 1986, Madrid: **Proceedings ACI.** SP-91, 1986, p.1-50.
- GEYER, R. M. T. et al. Escórias siderúrgicas: caracterização e aplicações para a indústria da construção civil. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS, RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, ABM, Volta Redonda, nov. 1994, p.363-381.
- GEYER, R. M. T. et al. Uso de escórias de aciaria como substituição ao cimento Portland - uma análise da melhoria das propriedades do concreto. In: Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 3, 1997, Porto Alegre. **Anais.** LEME-CPGEC-UFRGS. Porto Alegre, 1997. P. 241-248.
- GHAFOORI, N.; ZHANG, Z. Sulfate resistance of roller compacted concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n 4, p. 347-355, Jul/Aug 1998.
- GJORV, O. Properties of silica fume. In: INTERNATIONAL WORKSHOPS ON THE USE OF FLY ASH, SILICA FUME AND OTHER SILICEOUS MATERIALS IN CONCRETE, 1988, Sidney, p. 230-251. 1988.
- GJORV, O. Important test methods for evaluation of reinforced concrete durability. In: V. M. MALHOTRA SYPOSIUM ON CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1993 Berkeley, Califórnia. Detroit: American Concrete Institute, 1994. p. 545-576. (ACI Special Publication, 144).
- GJORV, O. e SAKAI, K. Testing of chloride diffusivity for concrete. In: CONCRETE UNDER SEVERE CONDITIONS, 1995, Sapporo, Japan. **Proceedings.** London: E & FN SPON, 1995. v.1, p. 655-666.
- GOPALAN, M. K. Sorpivity of fly Ash Concretes. **Cement and Concrete Research.** v.26, n 8, p. 1189-1197, 1996.
- GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD em materiais de construção civil.** Porto Alegre, 2000, 91 p. [Proposta de Tese, apresentada no NORIE-UFRGS, em março de 2000].
- GUTT, W.; NIXON, P. J. Steel-making slag as a skid resistant roadstone. **Chemistry and Industry**, n. 17. London, Jun. 1972. p. 503-504.
- HALL, C. Water absorption of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**, v. 41, n. 147, p. 51-61, 1989.

- HARRISON, W.H. Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n 152, p. 113-126, sep, 1990.
- HELENE, P. & TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI. São Paulo, 1992, 349p.
- HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HO, D. W. S. et al. Influence of slag cement on the water sorptivity of concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG, AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 2., 1986, Madri, Spain. **Proceedings...** Detroit: American Concrete Institute, 1986. v. 2, p. 1463-1473 (ACI Special Publication, 91).
- IAWED, I. et al. Hardened mortar and concrete with fly ash. **Fly ash in concrete. Properties and performance**. London: E & FN SPON, 1991, p. 42-159 (RILEM Report 7).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA-IBS. **Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira - 1998**. Rio de Janeiro, 1999. 100p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA-IBS. **Classificação provável e destinações mais usuais de resíduos siderúrgicos**. Comissão de Assuntos Ambientais. Março 1989, 6p.
- IRASSAR, E.F.; SOTA, J.D.; BATIC, O.R. Evaluación de la resistencia a los sulfatos de cemento com ceniza volante (utilizando el método de Koch & Steinegger). **Materiales de Construccion**, v. 38, n° 212, p. 21-35, oct/nov/dic, 1988.
- IRASSAR, E.F. Sulfate resistance of blended cement: prediction and relation with flexural strength. **Cement and Concrete Research**, v. 20, p. 209-218, 1990.
- ISAIA, G. C. **Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da Armadura**. São Paulo, 1995. 298p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ISAIA, G. C. Entraves e perspectivas para uso de elevados teores de cinza volante e cinza de casca de arroz. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais**. São Paulo, 1996 p. 40-46.
- JAWED, I., et al. Hardened mortar and concrete with fly ash. **Fly ash in concrete. Properties and performance**. London: E&FN SPON, 1991. p. 42-159 (RILEM Report 7).
- JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. 112 p. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São de São Paulo.

- JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos agro-industriais para uso na construção civil no Brasil: o caso da escória de alto-forno. In: SEMINÁRIO RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, ALTERNATIVA ECONÔMICA PARA PROTEÇÃO AMBIENTAL. Anais. São Paulo, 1997. p. 87-76.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102 p. São Paulo, 2000. Tese (Livre docência) Escola Politécnica da Universidade de São de São Paulo.
- KAYYALI, O. A. Porosity and compressive strength of cement pate in sulphate solution. **Cement and Concrete Research**, v 19, p. 423-433. 1989.
- KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise de eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 168 p. São Paulo, 1995. Tese (Doutorado). Escola Politécnica – Universidade São Paulo.
- KELHAM, S. A. Water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 10, p. 106-110. Jun 1988.
- KERSNER, Z. et al. Uncertainty in service life prediction based on carbonation of concrete. **Durability of Building and Components**, 7. London, E & FN Spon, 1996. p. 3-20.
- KOBAYASHI, K. et al. Carbonation of concrete structure and decomposition of C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 1, p. 55-61, 1993.
- KOCH, A.; STEINEGGER, H. **A rapid method for testing the resistance of cements to sulphate attack**. Wiesbaden, v. 13, n. 7, p. 317-324. jul, 1960.
- KRUGER, P. V. Panorama mundial do aproveitamento de resíduos na siderúrgia. **Revista Metalurgia & Materiais**, p. 116-118. fev. 1995.
- LARRARD, F.; MALIER, Y. Engineering properties of very high performance concretes. **High Performance Concrete. From material to structure**. London: E & FN SPON, 1992. p. 85-144.
- LAWRENCE, C.D. Sulphate attack on concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 42, n. 153, p. 249-264, dec, 1990.
- LEA, F. M. The chemistry of cement and concrete. **Chemical Publishing Company**. 1971. p. 1-10.
- LENZI, J. C. R. **Técnicas de análise estrutural e microestrutural aplicadas ao estudo de escórias siderúrgicas; uma abordagem sobre a aplicabilidade em escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 1986,. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais – UFRGS.
- LEWIS, R.K.; HO, D. W.S. Carbonation of concrete and its prediction. **Cement and Concrete Research**. v. 17, p. 489-504, 1987.

- LIMA, L. A. de **Hormigones com escórias de forno elétrico como áridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. Barcelona, 1999. 243 p. Tese (Doutorado) Univeritat Politècnica de Catalunya.
- LITVAN, G.G.; MEYER, A. Carbonation of granulated blast furnace slag cement concrete during twenty years of field exposure. **Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozolans in Concrete**. Detroit: ACI, 1986. v. 2. p. 1445-1462 (SP, 91).
- LOO, Y. H. et al. A carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n. 168, p. 191-200. Sept, 1994.
- LOUZADA, D. M. **Contribuição ao estudo da aplicação das escórias siderúrgicas na fabricação de blocos de concreto**. Rio de Janeiro, RJ. 1991, 85p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense.
- LUDIRDJA, D. et al. Simple method for measuring water permeability of concrete. **ACI Materials Journal**. p. 433-439. Sept.-Oct 1989.
- MALHOTRA, V. M. Fly-ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: a review. **Concrete International**. p. 23-28. April, 1993.
- MALHOTRA, V. M.; ZHANG MIN-HONG. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. **ACI Materials Journal**. p.629-636. Nov.-Dec, 1996.
- MARCIANO, Z.A.N. **Desenvolvimento de um método acelerado para avaliação da resistência de argamassas de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio**. São Paulo, 1993. 202 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MASSAZZA, F.; COSTA U.; MARCHESE, B. Capillary absorption and composition of pastes and mortars made with Portland and Pozzolanic cements. **Durability of Building Materials and Components**, 6. E & FN Spon, 1993. p. 193-202.
- MASSAZZA, F.; COSTA, U. Aspetti dell'attività pozzolanica e proprietà dei cementi pozzolanici. In: **INFORMAL SEMINAR ON CEMENT CHEMISTRY**, 1997. Wexham Springs organizado dalla C.a.C.A., Gran Bretagna, p 36-47. Sept, 1997.
- MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétricas com vistas a sua utilização como material para construção civil**. Porto Alegre, 1998. 52 p. [Proposta de tese, apresentada para pré qualificação de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais].
- MASUERO, A. B. et al. Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concretos. In: **INTERNATIONAL CONGRESS OF CONCRETE TECHNOLOGY**, 1., 1998, Buenos Aires. **Anais**. Buenos Aires, 1998. p. 447-460.
- McCARTER, W. J., et al. Absorption of water and chloride into concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 44, n. 158, p. 513-532. 1992.

- MEHTA, P. K.; GJORV, O. E. A new test for sulfate resistance. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 2, n. 6, p. 510-514. Nov 1974.
- MEHTA, P. K. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete. Another look. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZOLANS IN CONCRETE, 3., 1989, Trondheim, Norway. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1989. V. 1, p. 1-44 (ACI Special Publication, 114).
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 1994. 573 p
- MEHTA, P. K.; MALHOTRA, V. M. Pozzolanic and cementitious materials. **Advances in Concrete Technology**, v. 1. CANMET, Ottawa, 1996.
- MEYER, A. Investigations on the carbonation of concrete. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968. Tokio,. **Proceedings**. Tokyo, 1969, v. 3, p. 394-401. (SP III-52).
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Escórias siderúrgicas- material de múltiplas aplicações**. Brasília: Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1988. 50p.
- MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture. **Materials Forum**, n.15,. p 374-382. 1991.
- MORANVILLE-RÉGOURG, M. Durability of high performance concretes - alkali-aggregate reaction and carbonation. In: MALIER, y. (ed.) **High Performance Concrete. From material to structure**. London: E&FN SPON, 1992. p. 225-233.
- MOUKWA, M. Characteristics of the attack of cement paste by  $MgSO_4$  and  $MgCl_2$  from the pore structure measurements. **Cement Concrete Research**. v. 20. p. 148-158, 1990.
- MOURA, W. A. et al. Utilização da escória de cobre na construção civil. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL, 1., 1995, Juiz de Fora. **Anais**. Juiz de Fora, 1995, p. 27-44.
- MOURA, W. A. et al. Concrete performance with admixtures of electrical steel slag na copper slag concerning mechanical properties. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE. PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Proceedings, second CANMET**. American Concrete Institute. International Conference. Gramado, Brazil, CANMET/ACI, 1999. p 81-100. (SP 186).
- NAGATAKI, S. Mineral admixtures in concrete: state of the art and trends. In: MEHTA, P. K. V. MOHAN MALHOTRA SYMPOSIUM - CONCRETE TECHNOLOGY PAST, PRESENT, AND FUTURE, 1994 Berkeley. **Proceedings**. Detroit: American Concrete Institute, 1994, p. 447-483. (SP-144).
- NANNI, L. F.; RIBEIRO, J. L. **Planejamento e Avaliação de Experimentos**. 2. ed. Porto Alegre, 1992. 213p. (Caderno de Engenharia. CPGEC - UFRGS).

- NEBASAR, B.; CARETTE, G.G. Variations in the chemical composition, specific surface area, finess and pozzolanic activity of a condensed silica fume. **Cement Concrete and Aggregates**, Philadelphia v. 8, n. 1, p. 42-45. 1986.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo, PINI, 1997. 828 p.
- OSBORNE, G.J. Carbonation of blastfurnace slag cement concretes. **Durability of Building Materials**. Amsterdam, Elsevier, 1986, p. 81-96.
- OZYILDIRIM, C. Laboratory investigation of low – permeability concretes containing slag and silica fume. **ACI Materials Journal**, Detroit v. 91, n. 2. p. 197-216. 1994
- PAN ABRASIVES Copper Slag. Abrasives; Brast cleaning equipment; Copper slag. Site disponível na internet [www.panabrasives.com.sg/cs.htm](http://www.panabrasives.com.sg/cs.htm). Consultado em fevereiro de 2000.
- PAPADAKIS, V. G. et al. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.
- PARROT, L. J. Damage caused by carbonation of reinforced concrete. Damage Classification of Concrete Structures - 104-DCC RILEM. **Materials and Structures**, n. 23, p. 230-234, 1990.
- PARROT, L. J. Water absorption in cover concrete. **Materials and Structures**, v.25, p 284-292, 1992.
- PARROT, L. J. Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete. **Materials and Structures**, v. 29, nº 187, p.164-173, April 1996.
- PERA, J. State of the art report – use of waste materials in construction in western europe. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 1-20.
- PERRATON, D. et al. Permeability, as seen by the research. High Performance Concrete – from material to structure, London, E & Spon, 1992. p. 252-277.
- PLANTE, P.; BILODEAU, A. Rapid chloride ion permeability test. **Data on Concretes Incorporating Supplementary Cementing Materials**. Tirodheim, 1989. p. 625-644. (SP 114-30).
- PROCOBREBRASIL. Site do Instituto Brasileiro do Cobre, disponível na internet [www.procobrebrasil.org.br](http://www.procobrebrasil.org.br) Consultado em maio de 2000.
- PRUDÊNCIO J. L. R.; SANTOS, S. Influência do grau de moagem na pozzolanicidade da cinza da casca de arroz. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1996 p. 53-62.
- RASHEEDUZZAFAR. Influence of cement composition on Concrete Durability. **ACI Materials Journal**, v. 89, n.6, p. 574-586, nov-dec 1992.

- RILEM Draft Recommendation CPC-18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. 1998, p. 437-440.
- ROY, S. K., et al. The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, p. 293-300. Dec. 1993.
- SCHNEIDER, U.; PIASTA, W.G. The behavior of concrete under  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution attack and sustained compression or bending. **Magazine of Concrete Research**, v. 43, n. 157, p. 281-289, dec, 1991.
- SCHUBERT, P. Carbonation behavior of mortars and concretes made with fly ash. In CONCRETE DURABILITY, 1987, Detroit. **Proceedings**. P. 1945-1962. (SP-100).
- SEIDLER, N. **Efeito de adições pozolânicas na alcalinidade e consumo de hidróxido de cálcio durante a hidratação e carbonatação de materiais cimentícios**. Porto Alegre, 1999. 139p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica**. Porto Alegre, 1994. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVA, E.; ALMEIDA, C. Escória de alto-forno granulada como agregado miúdo para argamassa e concreto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1., 1986, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1986, p.255-273.
- SILVA, F. J. da. **Utilização de escória de cobre como agregado miúdo em peças pré-moldadas de concreto**. Rio de Janeiro, 1994. 104p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense.
- SILVEIRA, A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996. Dissertação (Mestrado). Curso de pós Graduação em engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SILVEIRA, A. A. et al. A cinza de casca de arroz como adição mineral. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 39-45.
- SILVEIRA, R. L. et al. Mechanical properties and durability of high performance concrete. In: HIGH PERFORMANCE CONCRETE. PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Proceedings, second CANMET**. American Concrete Institute. International Conference. Gramado, Brazil, CANMET/ACI, 1999. p 655-670. (SP 186).
- SIMS, I. The assessment of concrete for carbonation. **Concrete**, v. 28, n° 6, p. 33-38, nov/dec, 1994.
- SINDICEL. Dados estatísticos. Site do Sindicato da Indústria de Condutores Elétricos, Trefilação e Laminação de Metais Não-Ferrosos do Estado de São

Paulo, disponível na *internet* [www.sindicelabc.org.br](http://www.sindicelabc.org.br). Consultado em maio de 2000.

SOONGSWANG, P. et al. Factors affecting the strength and permeability of concrete made with porous limestone. **ACI Materials Journal**, Detroit, v. 88, n. 4., p. 400-406. 1991

STEEL INDUSTRY AND THE ENVIROMENT. International iron and steel institute and united. **Technical and Management Issues**. Belgium, 1997. 102p.

TALERO, R. et al. La resistencia a los sulfatos de los cementos portland y su grado de finura de molido: análisis de su relación. **Materiales de Construcción**, v. 44, n. 234, p. 5-11, abr/may/jun, 1994.

TECHNOLOGICAL CENTER. Abrasive, granulated copper slag. Site disponível na *internet* [www2.teniente.cl/oferta/granallaeng.html](http://www2.teniente.cl/oferta/granallaeng.html). Consultado em fevereiro de 2000.

TORII et al. Carbonation and steel corrosion in concretes containing mineral admixtures under different environments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE HELD AT THE UNIVERSITY OF SHEFFIELD, Sheffield, 1994. **Proceedings** p. 24-28, 1994.

TOUTANJI, H.A.; EL-KORCHI, T. The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar. **Cement and Concrete Research**., v. 25, n. 7, p. 1581-1590, Oct 1995.

TUTHILL, L.H. Lating concrete in a sulfate environment. **Concrete International**, p. 85-86. Dec. 1988.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research Institute**. Stokolm, p 119-134. 1982.

UOMOTO, T.; TAKADA, Y. Factors affecting concrete carbonation rate. In.: DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 6., 1993. E & FN Spon. p. 1133-1141.

WEE, Tiong H. et al. Production and properties of high strength concretes containing various mineral admixtures. **Cement and Concrete Research**, vol. 23, n. 4. Elsevier, p. 709-714. 1995.

XU, A.; RODHE, M.; CHANDRA S. Influence of alkali on carbonation of concrete. In.: DURABILITY OF BUILDING AND COMPONENTS, 7., v. 1. 1996. E & FN Spon, London, 1996. p. 596-604.

ZAMPIERRI, V.A. **Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas**. 191p. São Paulo, 1989. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia da Universidade de São Paulo.

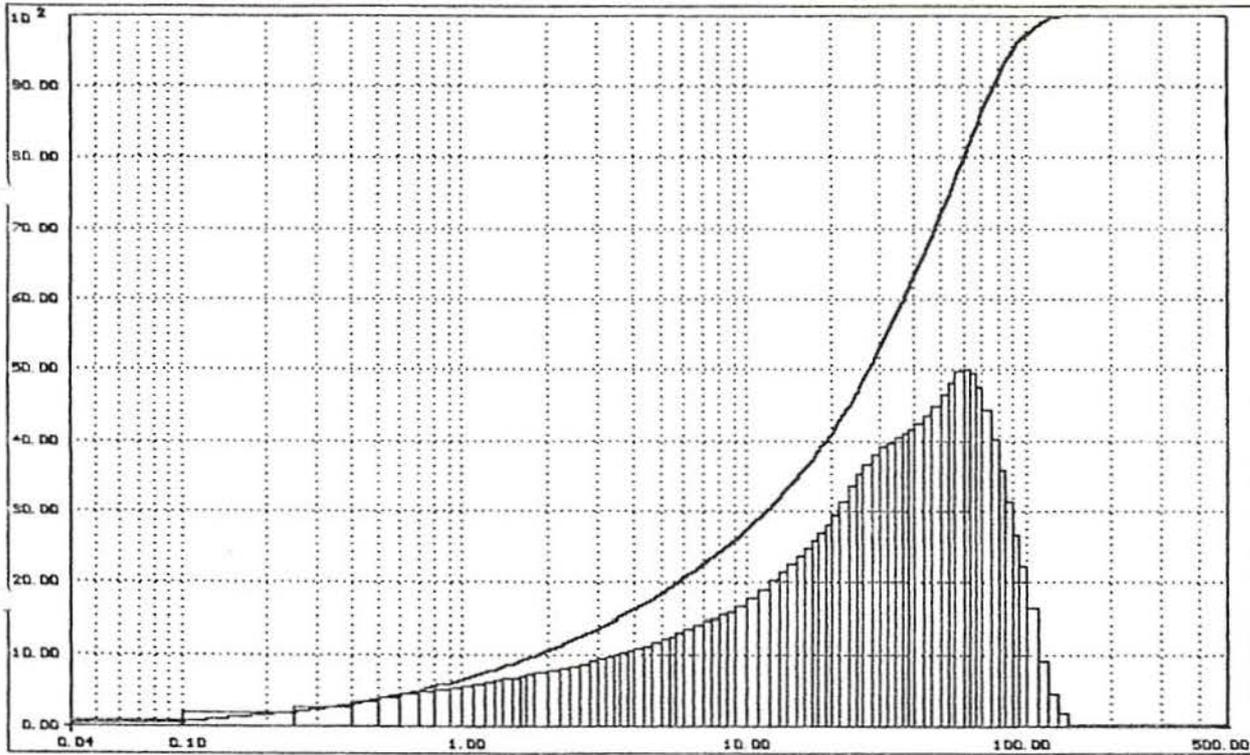
ZHANG, M. e GJORV, O. Effect of silica fume on cement hydration in low porosity cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 800-808, 1991.

## ANEXOS

**Anexo 1: Composição granulométrica da escória de cobre moída  
utilizada no ensaio de determinação da atividade pozolânica**



Granulometer 1064 number 169  
Version V 3.30  
File name : C:\CILAS\DIVERSOS\VILELA3.MES  
05/20/1998 19:12:01



**CILAS 1064 N.169**

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS

**Anexo 2: Resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de argamassa para determinação da atividade pozolânica da escória de cobre**

Identificação	Tensão (Mpa)
REF 1	36,1
REF 2	35,7
REF 3	34,7
REF 4	36,8
REF 5	35,9
<b>Média</b>	<b>35,8</b>
COB 1	30,5
COB 2	29,9
COB 3	30,2
COB 4	33,6
COB 5	31,7
<b>Média</b>	<b>31,2</b>

REF - 100% CPI S

COB - 65% CPI S + 35% ESCÓRIA DE COBRE

**Anexo 3: Composição granulométrica da escória de cobre moída em diferentes tempos: 40 minutos (E 40), 60 minutos (E 60), 80 minutos (E 80) e 100 minutos (E 100)**

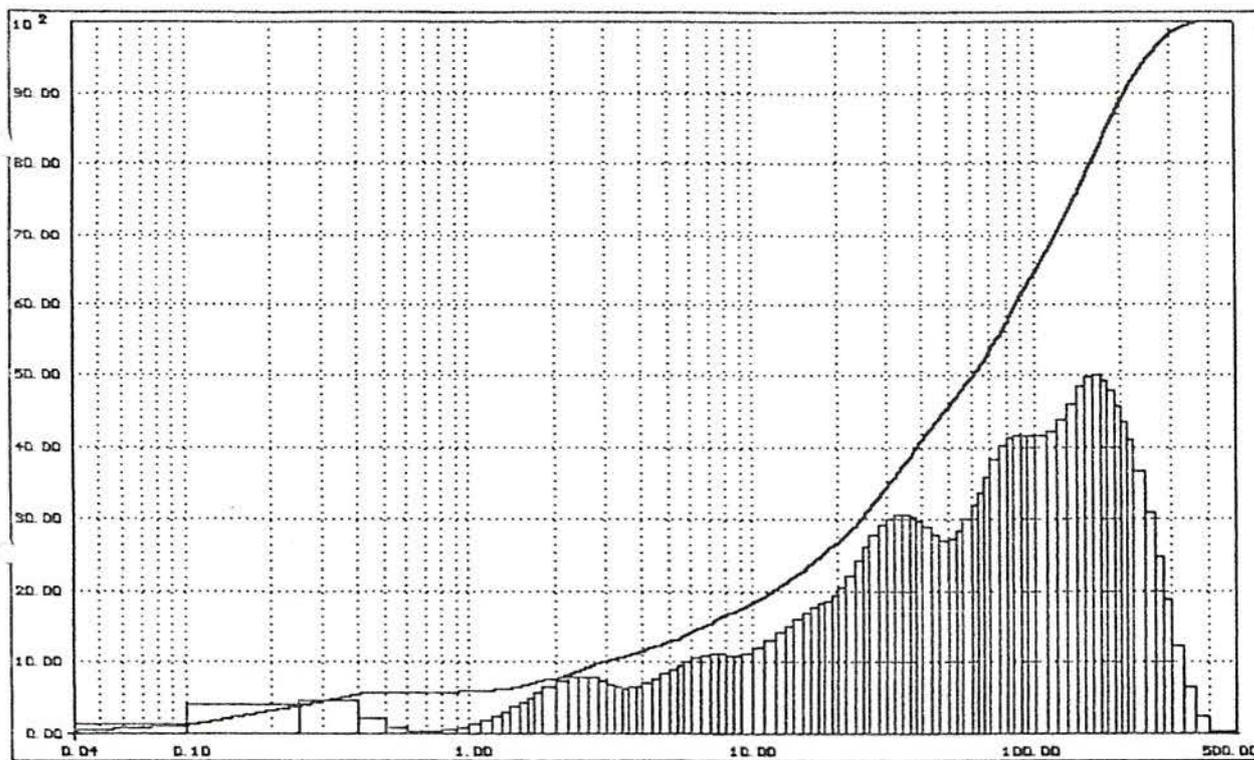


Granulometer 1064 number 169

Version V 3.30

File name : C:\CILAS\SYDNEY\DIVERSOS\LEILAE40.MES

09/16/1999 15:31:44

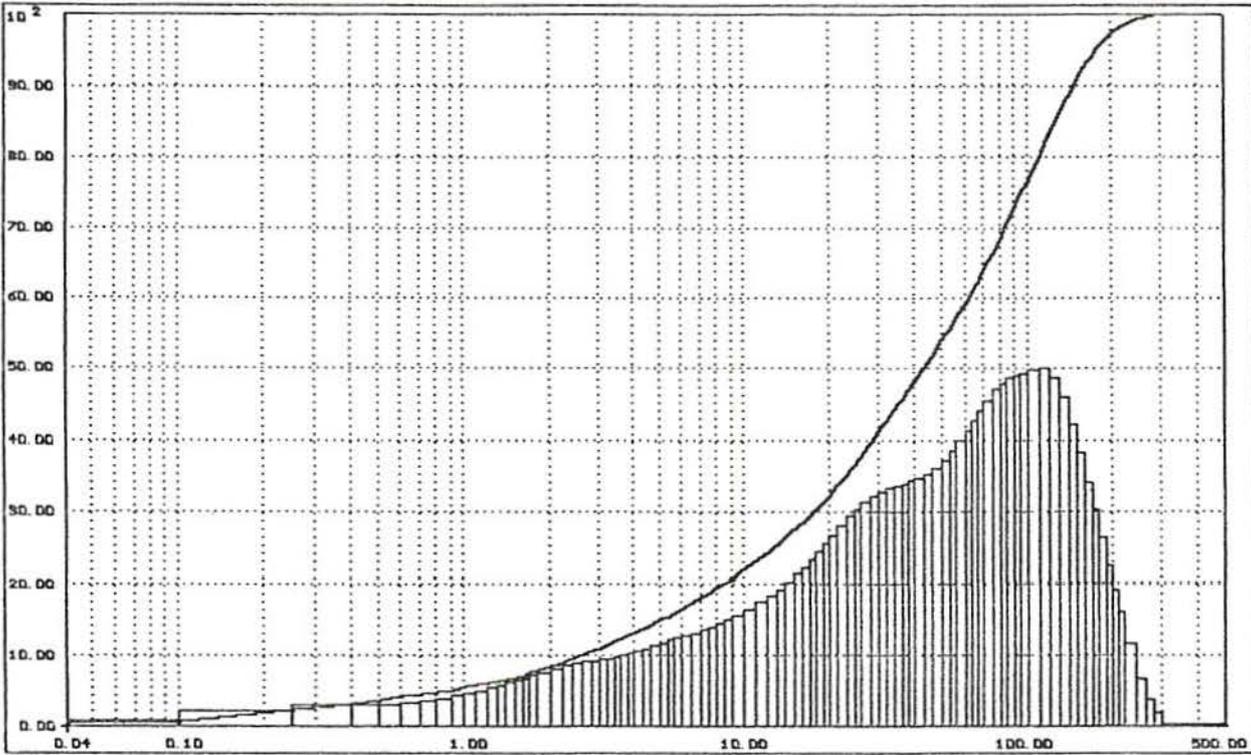


**CILAS 1064 N.169**

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS



Granulometer 1064 number 169  
Version V 3.30  
File name : C:\CILAS\SYDNEY\DIVERSOS\LEILAE60.MES  
09/16/1999 15:44:12

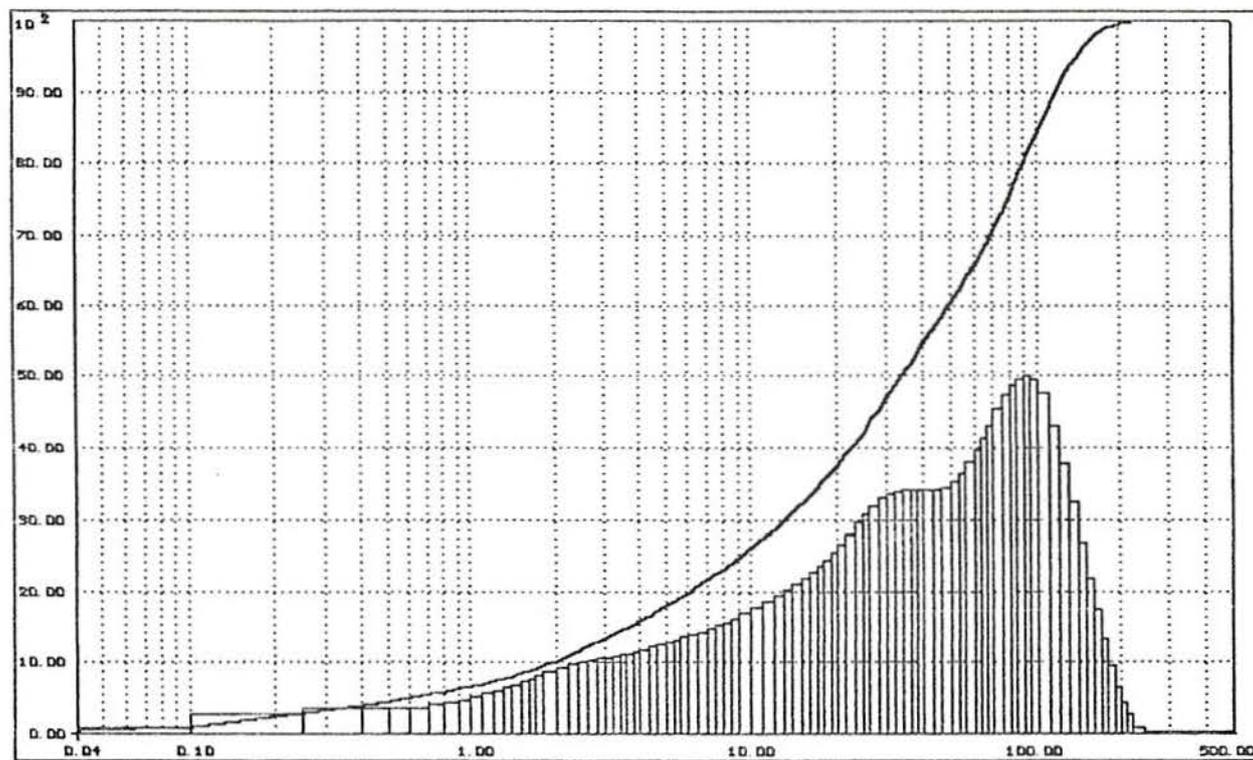


**CILAS 1064 N.169**

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS



Granulometer 1064 number 169  
Version V 3.30  
File name : C:\CILAS\SYDNEY\DIVERSOS\LEILAE80.MES  
09/16/1999 15:53:18



**CILAS 1064 N.169**

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS

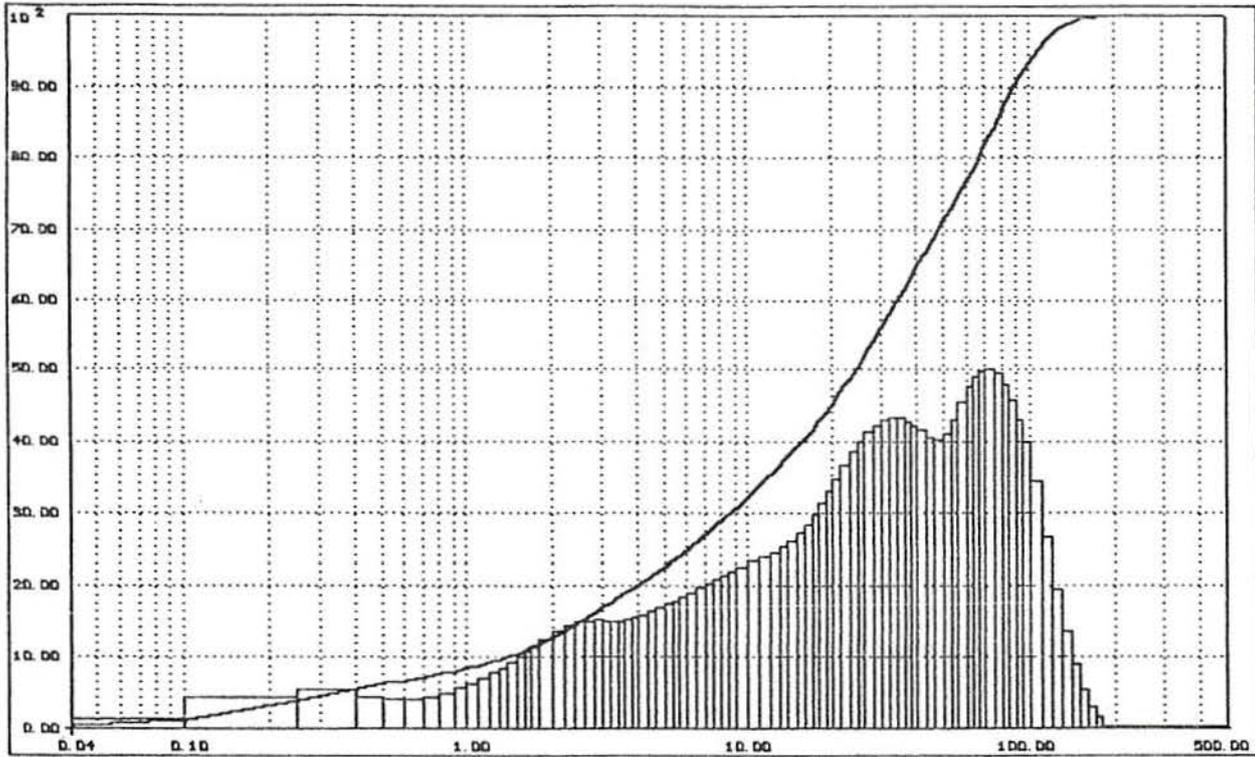


Granulometer 1064 number 169

Version V 3.30

File name : C:\CILAS\SYDNEY\DIVERSOS\LEILA100.MES

09/16/1999 16:01:11



**CILAS 1064 N.169**

COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS

**Anexo 4: Resistência à tração na flexão dos corpos-de-prova de concreto para determinação da resistência ao ataque por sulfatos**

Identificação	Sulfato	Água com cal
	Tensão (Mpa)	Tensão (Mpa)
REF0,40/1	5,18	5,80
REF0,40/2	4,61	6,52
REF0,40/3	4,75	7,07
<b>Média</b>	<b>4,85</b>	<b>6,46</b>
REF0,50/1	2,55	4,87
REF0,50/2	2,78	4,93
REF0,50/3	2,75	4,78
<b>Média</b>	<b>2,69</b>	<b>4,86</b>
REF/1	2,20	3,73
REF/2	2,95	4,05
REF/3	1,97	3,92
<b>Média</b>	<b>2,37</b>	<b>3,90</b>
ECOB0,41/1	6,65	6,82
ECOB0,41/2	6,85	8,04
ECOB0,41/3	6,98	6,26
<b>Média</b>	<b>6,83</b>	<b>7,04</b>
ECOB0,50/1	6,05	6,01
ECOB0,50/2	6,13	4,99
ECOB0,50/3	5,10	5,42
<b>Média</b>	<b>5,76</b>	<b>5,47</b>
ECOB0,60/1	4,59	3,90
ECOB0,60/2	4,81	3,80
ECOB0,60/3	4,96	3,84
<b>Média</b>	<b>4,79</b>	<b>3,85</b>

REF - 100% CPI S

COB - 65% CPI S + 35% ESCÓRIA DE COBRE