

**ESTUDO DO PROCESSO DE CORROSÃO SOB A AÇÃO DE  
ÍONS CLORETO EM CONCRETOS OBTIDOS A PARTIR DE  
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Geilma Lima Vieira

Porto Alegre

Fevereiro 2003

**GEILMA LIMA VIEIRA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE CORROSÃO SOB A AÇÃO DE  
ÍONS CLORETO EM CONCRETOS OBTIDOS A PARTIR DE  
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia na modalidade acadêmico**

Porto Alegre  
Fevereiro 2003

VIEIRA, Geilma Lima

Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição / VIEIRA, Geilma Lima – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003

150 p.

Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Mestre em Engenharia. Orientadores: Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Flávio Barboza de Lima

1. Resíduos de construção e demolição
2. Reciclagem
3. Durabilidade
4. Corrosão

I. Título

CCAA2

**GEILMA LIMA VIEIRA**

**ESTUDO DO PROCESSO DE CORROSÃO SOB A AÇÃO DE  
ÍONS CLORETO EM CONCRETOS OBTIDOS A PARTIR DE  
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE  
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 27 de fevereiro de 2003

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dr.a pela Universidade de São Paulo  
Orientadora

Prof. Flávio Barboza de Lima  
Dr. pela Universidade de São Paulo  
Co-orientador

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

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Dra. Ângela Borges Masuero**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Dra. Iduvirges Lourdes Müller**  
Dra. pela Universidade Nacional do Rosário

**Profa. Dra. Mônica Batista Leite**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à tia Vitória (*em memória*),  
que me ensinou o dom da leitura e da escrita.

## AGRADECIMENTOS

Quero reservar um espaço neste trabalho para prestar uma pequena homenagem a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada. Sem a contribuição de vocês a caminhada teria sido bem mais difícil.

À professora Denise Dal Molin pela orientação correta e competente, pelas contribuições valiosas no decorrer do trabalho, principalmente pelo apoio, carinho e amizade com que trata a todos nós, sem distinção de pessoa.

Ao professor Flávio Barboza de Lima pela co-orientação dada, que muito contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho e pela disponibilidade de ajudar sempre quando era possível.

À querida amiga Aguida Gomes de Abreu pela ajuda de grande importância durante a realização dos ensaios eletroquímicos. A amizade, compreensão e disponibilidade de sempre ajudar é característico da sua pessoa.

À professora Mônica Batista Leite, pelas intermináveis consultorias via e-mail. Obrigada, sobretudo, pelas dicas de como se trabalhar com resíduos. Sua tese é uma grande ferramenta de consulta para quem deseja continuar trabalhando nessa área.

À professora Carin Schmitt, pela proposição em realizar o manual de formatação de trabalhos e pela ajuda na elaboração do projeto de pesquisa, ainda quando este trabalho ganhava vida.

Ao professor Carlos Formoso, pela dedicação notória dispensada ao NORIE. Quero agradecer também aos professores Ruy Cremonini, Miguel Sattler, Greven e Luis Carlos Bonin, pela experiência e conhecimento transmitidos. À professora Ângela Masuero, pela amizade e carinho disponibilizados a todos nós e em todos os momentos.

Aos meus amigos de turma e do NORIE, Adriana, Dayana, Ricardo, Hilton, Henrique, Marcos, Constance, Marco Maia, Leandro, Dóris, Juliana, Cristóvão, Renato, Fabrício, Rafael, Conceição. Obrigada pela amizade e companheirismo.

Aos meus adoráveis companheiros da *sala de materiais*, Ana Paula, querida amiga, Daniel, Paulo Sérgio, Ludmila, Alexandre, Marlova, Fernanda, Diana, Lucília, Maria Tereza, Cristiane, Natália. Com certeza ganhei grandes amigos. Valeu pelo companheirismo, amizade e pela alegria em todos os momentos, principalmente quando a saudade de casa se fazia sentir.

Aos auxiliares de pesquisa do NORIE, principalmente ao Diego Altieri, Fabrício, Samuel e Valter pela dedicação em todas as fases do trabalho, desde a caracterização dos materiais até os ensaios de durabilidade. Obrigada por tudo.

Ao Luiz Carlos, Marlise e Anne, pela presteza e amizade.

Ao Éderson e Airton pela ajuda na realização das concretagens e pela amizade. Também ao pessoal do LEME, Fontes, por suas invenções fantásticas, e professor Luiz Carlos.

A Universidade Federal de Alagoas, na qual tive a honra de fazer o curso de graduação, pelo conhecimento adquirido e que, apesar das dificuldades, insiste em sobreviver e formar bons profissionais em todas as áreas.

Ao professor Roberaldo Carvalho de Souza, por ter me iniciado na pesquisa científica e por ter me ensinado a pensar com objetividade no desenvolvimento dos trabalhos científicos que realizei sob sua orientação.

Aos amigos da Casa do Estudante, Maíra, Renata, Eliane e todo pessoal do oitavo andar, nos quais tive a oportunidade de conhecer. Obrigada pela amizade e carinho dedicados a mim.

Aos meus amigos de Maceió, especialmente ao Luis Gustavo e ao Omar, que me ajudaram assim que eu cheguei em Porto Alegre.

Ao Pedro, pela compreensão, amor e carinho dispensados a mim em todos os momentos, principalmente pela compreensão, quando negligenciei a sua presença para fazer este trabalho.

Ao CNPq, pelo financiamento da bolsa de estudo e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade que me foi dada de realizar uma pós-graduação.

Ao NORIE, exemplo maior de produtividade, capacitação e integração para com as pessoas que dele fazem parte. Sinto-me honrada de fazer parte desse núcleo de fundamental importância para o desenvolvimento da construção civil.

Aos meus pais, Geraldo e Valda, pelo amor incondicional e a minha tia Rita, pelo amor de mãe dado a mim. A saudade é grande, mas saibam que é por vocês que faço tudo isso. Aos meus irmãos, que são meus amores, obrigada pelo carinho e compreensão.

A Deus, por todas as bênçãos recebidas e por ter sido meu refúgio nos momentos difíceis.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....		<b>p.10</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....		<b>p.12</b>
<b>RESUMO</b> .....		<b>p.13</b>
<b>ABSTRACT</b> .....		<b>p.14</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>p.15</b>
1.1	HIPÓTESE.....	p.20
1.2	OBJETIVOS.....	p.20
1.3	ESTRUTURA E APRESENTAÇÃO DA PESQUISA.....	p.21
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO</b> .....	<b>p. 22</b>
2.1	DEFINIÇÃO, GERAÇÃO E POLÍTICA DE BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.....	p.25
2.1.1	Definição e classificação.....	p.25
2.1.2	Geração dos resíduos de construção e demolição.....	p.26
2.1.3	Política de gestão dos resíduos de construção e demolição.....	p.29
2.1.4	Benefícios da reciclagem dos resíduos de construção.....	p.31
2.1.4.1	Experiências brasileiras da reciclagem dos resíduos de construção e demolição..	p.34
2.1.4.2	Composição dos resíduos.....	p.35
2.2	UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS.....	p.39
2.2.1	Influência dos agregados reciclados no concreto fresco.....	p.41
2.2.2	Influência dos agregados reciclados no concreto endurecido.....	p.42
2.2.2.1	Propriedades mecânicas.....	p.43
2.2.2.1.1	<i>Concretos de alta resistência e alto desempenho a partir de agregados reciclados</i> .....	p.45
2.2.2.2	Durabilidade de concretos com agregados reciclados.....	p.46
2.2.2.2.1	<i>Corrosão nas armaduras de concreto e a influência dos íons cloreto</i> .....	p.49
2.2.3	Obras realizadas com agregados reciclados.....	p.54
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>p.59</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	p.59
3.1.1	Planejamento dos ensaios.....	p.59
3.1.2	Coleta da amostra e beneficiamento dos resíduos.....	p.64
3.1.3	Composição média do resíduo utilizado.....	p.66
3.1.4	Seleção e caracterização dos materiais.....	p.68

3.1.4.1	Cimento.....	p.68
3.1.4.2	Agregados.....	p.69
3.1.4.2.1	<i>Composição granulométrica.....</i>	p.70
3.1.4.2.2	<i>Massa específica.....</i>	p.73
3.1.4.2.3	<i>Absorção de água dos agregados.....</i>	p.76
3.1.4.3	Água.....	p.79
3.1.4.4	Aditivo.....	p.79
3.1.4.5	Armadura.....	p.79
3.1.5	Dosagem Experimental.....	p.80
3.1.5.1	Ajuste do teor ideal de argamassa.....	p.80
3.1.5.2	Definição dos traços e produção dos concretos com agregados naturais e reciclados.....	p.81
3.1.5.2.1	<i>Mistura dos materiais e moldagem dos corpos-de-prova.....</i>	p.84
3.1.6	Propriedades avaliadas – ensaios.....	p.86
3.1.6.1	Resistência à compressão axial.....	p.86
3.1.6.2	Ensaio de durabilidade.....	p.86
3.1.6.2.1	<i>Resistência de polarização e potencial de corrosão.....</i>	p.87
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO.....</b>	<b>p.91</b>
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	p.91
4.1.1	Efeito da relação a/c na resistência à compressão axial do concreto..	p.93
4.1.2	Efeito do %AMR e do %AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	p.94
4.1.3	Efeito da interação a/cxAMR sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	p.96
4.1.4	Efeito do %AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto	p.97
4.1.5	Efeito da interação a/cxAMRxAGR sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	p.99
4.1.6	Considerações gerais.....	p.102
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS DE DURABILIDADE DOS CONCRETOS.....</b>	<b>p.104</b>
5.1	ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	p.104
5.1.1	Resultado dos ensaios com ação isolada do agregado miúdo reciclado.....	p.104
5.1.2	Resultado dos ensaios com ação isolada do agregado graúdo reciclado.....	p.109

5.1.3	Resultado dos ensaios com ação combinada dos agregados miúdo e graúdo reciclados.....	p.114
5.2	<b>MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E TAXA DE CORROSÃO.....</b>	<b>p.118</b>
5.2.1	Análise de regressão múltipla para os concretos reciclados sobre o potencial de corrosão.....	p.119
5.2.1.1	Efeito isolado da relação a/c sobre o potencial de corrosão.....	p.121
5.2.1.2	Efeito isolado do percentual de agregado miúdo reciclado e do agregado graúdo reciclado sobre o potencial de corrosão.....	p.122
5.2.1.3	Efeito da interação a/cxIdade sobre o potencial de corrosão.....	p.123
5.2.1.4	Efeito da interação a/cxAMRxAGR sobre o potencial de corrosão.....	p.124
5.2.2	Análise de regressão múltipla para os concretos reciclados sobre a taxa de corrosão das armaduras.....	p.126
5.2.2.1	Efeito isolado da idade sobre a taxa de corrosão das armaduras.....	p.128
5.2.2.2	Efeito da interação $IdadexE_{corr}$ sobre a taxa de corrosão das armaduras.....	p.129
5.2.2.3	Efeito da interação a/cxAMRxAGR sobre a taxa de corrosão das armaduras.....	p.130
5.2.2.4	Efeito da interação a/cxAGRxIdade sobre a taxa de corrosão das armaduras.....	p.132
5.2.2.5	Efeito da interação AMRxAGRxIdade sobre a taxa de corrosão das armaduras..	p.134
5.2.3	Considerações gerais.....	p.135
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>p.138</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	p.141
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>P.143</b>
	<b>APÊNDICE A - RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À</b>	
	<b>COMPRESSÃO.....</b>	<b>p.149</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Composição do entulho de Itatinga – São Paulo.....	p.36
Figura 2:	Fração potencialmente reciclável do entulho de Itatinga – São Paulo.....	p.37
Figura 3:	Composição do entulho de Porto Alegre – Rio Grande do Sul.....	p.37
Figura 4:	Composição do entulho de Salvador – Bahia.....	p.38
Figura 5:	Formação de pilha de corrosão em concreto armado.....	p.52
Figura 6:	Amostra do resíduo utilizado. (a) Vista geral da amostra. (b) Coleta da amostra para o transporte.....	p.64
Figura 7:	Etapa de beneficiamento do resíduo. (a) Britador de mandíbulas para obtenção dos agregados. (b) Peneirador mecânico pra separação dos agregados miúdo e graúdo reciclados.....	p.65
Figura 8:	Composição média dos resíduos de construção e demolição provenientes da cidade de Maceió.....	p.66
Figura 9:	Porcentagem da composição média dos resíduos de construção e demolição da cidade Maceió.....	p.67
Figura 10:	Agregados reciclados utilizados. (a) Agregado miúdo. (b) Agregado graúdo...	p.69
Figura 11:	Curvas granulométricas dos agregados miúdos, naturais e reciclados, e seus limites inferiores e superiores.....	p.72
Figura 12:	Curvas granulométricas dos agregados graúdos, naturais e reciclados, e seus limites inferiores e superiores.....	p.73
Figura 13:	Ensaio de absorção do agregado reciclado. (a) Recipiente utilizado no ensaio. (b) execução do ensaio e balança hidrostática utilizada para anotação das medidas.....	p.77
Figura 14:	Limpeza das barras de aço com solução de ácido clorídrico e água deionizada	p.80
Figura 15:	Diagrama de dosagem dos concretos realizados.....	p.81
Figura 16:	Medida do abatimento em concretos com agregados naturais e reciclados. (a) concreto com agregados naturais. (b) Concreto com agregados reciclados.....	p.84
Figura 17:	Ciclos de imersão e secagem dos CP's. (a) Imersão na solução de cloretos. (b) painel para secagem dos corpos -de-prova.....	p.87
Figura 18:	ensaio de resistência de polarização. (a) equipamento utilizado no ensaio. (b) aplicação da técnica no corpo-de-prova.....	p.90
Figura 19:	Efeito isolado da relação água/cimento sobre a resistência à compressão aos 28 dias.....	p.93
Figura 20:	efeito isolado do percentual de substituição do agregado reciclado sobre a resistência à compressão axial do concreto.....	p.95
Figura 21:	Resistência à compressão em função da interação a/cxAMR. (a) $f_c$ em função do %AMR. (b) $f_c$ em função da relação a/c para os diferentes teores de AMR	p.96

Figura 22:	Resistência à compressão em função da relação a/c e do %AGR. (a) fc em função do %AGR. (b) fc em função da relação a/c para diferentes percentuais de AGR.....	p.98
Figura 23:	Resistência à compressão em função da relação a/c para os diferentes percentuais de substituição do AMR e do AGR aos 28 dias.....	p.100
Figura 24:	Curvas de comportamento da resistência à compressão em função da relação a/c dos concretos com agregados reciclados aos 28 dias.....	p.102
Figura 25:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,40 e %AMR.....	p.105
Figura 26:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,60 e %AMR.....	p.106
Figura 27:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,80 e %AMR.....	p.107
Figura 28:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,40 e %AGR.....	p.110
Figura 29:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,60 e %AGR.....	p.111
Figura 30:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,80 e %AGR.....	p.112
Figura 31:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,40, %AMR e %AGR.....	p.115
Figura 32:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,60, %AMR e %AGR.....	p.116
Figura 33:	Gráfico da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão para relação a/c = 0,80, %AMR e %AGR.....	p.117
Figura 34:	Efeito isolado da relação a/c sobre o potencial de corrosão.....	p.121
Figura 35:	Efeito isolado do teor de AMR e AGR sobre o potencial de corrosão.....	p.122
Figura 36:	Potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxIdade.....	p.123
Figura 37:	Potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxAMRxAGR. (a) gráfico de $E_{corr}$ em função do %AMR. (b) gráfico de $E_{corr}$ em função do %AGR.....	p.124
Figura 38:	Potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxAMRxAGR.....	p.125
Figura 39:	Taxa de corrosão em função da idade.....	p.128
Figura 40:	Taxa de corrosão em função da interação entre Idade e $E_{corr}$ .....	p.129
Figura 41:	Taxa de corrosão das armaduras em função.....	p.131
Figura 42:	Taxa de corrosão em função da interação a/cxAGRxIdade. (a) relação a/c = 0,40. (b) Relação a/c = 0,60. (c) Relação a/c = 0,80.....	p.133
Figura 43:	Taxa de corrosão em função do efeito da interação AMRxAGRxIdade. (a) Efeito isolado do %AMR, %AGR e 100% de ambos. (b) Efeito da atuação conjunta de AMR e AGR.....	p.135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Resumo de eventos e normas existentes na área de reciclagem.....	p.24
Tabela 2:	Estimativas de geração de resíduo de construção e demolição em diferentes países.....	p.28
Tabela 3:	Geração de resíduo em algumas cidades brasileiras.....	p.29
Tabela 4:	Custo para instalação de uma central de reciclagem.....	p.33
Tabela 5:	Estimativa de custos para implantação de uma central de reciclagem.....	p.33
Tabela 6:	Algumas obras de concreto com agregados reciclados na Holanda.....	p.55
Tabela 7:	Algumas obras de concreto com agregados reciclados na Inglaterra.....	p.56
Tabela 8:	Algumas obras de concreto com agregados reciclados na Alemanha.....	p.57
Tabela 9:	Algumas obras de concreto com agregados reciclados na Bélgica.....	p.57
Tabela 10:	Variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova do experimento completo.....	p.63
Tabela 11:	Variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova no experimento fracionado.....	p.63
Tabela 12:	Porcentagem dos resíduos de construção e demolição da amostra coletada na cidade de Maceió.....	p.67
Tabela 13:	Comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição.....	p.68
Tabela 14:	Composição granulométrica do agregado miúdo, natural e reciclado.....	p.71
Tabela 15:	Composição granulométrica do agregado graúdo, natural e reciclado.....	p.71
Tabela 16:	Resultado da massa específica dos agregados.....	p.76
Tabela 17:	Taxa de absorção dos agregados reciclados.....	p.78
Tabela 18:	Traços unitários em massa, quantitativos de materiais (kg) e consumo de cimento por metro cúbico de concreto para o concreto de referência.....	p.82
Tabela 19:	Traços unitários e quantitativos de materiais utilizados para os concretos com 50% e 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado.....	p.83
Tabela 20:	Quantitativos de materiais utilizados nas concretagens.....	p.85
Tabela 21:	Níveis reais e codificados para as variáveis utilizadas.....	p.93
Tabela 22:	Crêterios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão de acordo com a ASTM C-876.....	p.120
Tabela 23:	Crêterios de avaliação da velocidade de corrosão.....	p.126
Tabela 24:	Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias do experimento completo.....	p.150
Tabela 25:	Resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias do experimento fracionado.....	p.151

## RESUMO

VIEIRA, G.L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A reciclagem dos resíduos provenientes de atividades da indústria da construção civil está sendo uma prática de fundamental importância, tanto para o meio ambiente, quanto para a sociedade em geral. O entulho de construção civil que sai dos canteiros de obras, de demolição ou de restos de construção é constituído de uma mistura heterogênea de materiais com grande potencial de reciclagem. A composição dos resíduos de construção e demolição constitui-se numa alternativa para eliminar a nociva deposição de entulho às margens de vias públicas, terrenos baldios, rios, e ao mesmo tempo obter materiais de construção mais econômicos e de qualidade assegurada. Muitos estudos já foram desenvolvidos com estes materiais, sendo avaliados, na sua grande maioria, em propriedades mecânicas e viabilidade técnica da utilização desses resíduos incorporados ao concreto. Pouco se têm estudado sobre aspectos de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo fazer um estudo relacionado à durabilidade de concretos confeccionados a partir de agregados reciclados, analisando o comportamento do concreto quando submetido a um ataque de agentes agressivos, neste caso, os íons cloreto. O estudo apresenta resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial, como parâmetro de controle dos concretos produzidos. Para os ensaios de durabilidade, são apresentados resultados do potencial de corrosão e taxa de corrosão nas armaduras dos concretos obtidos com estes agregados, submetidos a um ataque de íons cloreto. Na produção dos concretos foram consideradas três relações água/cimento (0,40; 0,60; 0,80) e três percentuais de substituição do agregado natural pelo reciclado, que foram de 0%, 50% e 100% de substituição, tanto do agregado miúdo reciclado (AMR) quanto do agregado graúdo reciclado (AGR). Os resultados comprovaram que há uma grande resistência por parte do concreto obtido com estes agregados, em permitir que a armadura sofra a ação dos íons cloreto, principalmente com aqueles obtidos com um maior percentual de substituição do agregado miúdo reciclado se comparado aos concretos produzidos sem substituição de material reciclado.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição; reciclagem; concreto; durabilidade; corrosão.

## ABSTRACT

VIEIRA, G.L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The recycling of the coming wastes of activities of the industry of the building site is being a practice of fundamental importance, so much for the environment, as for the society in general. The building site dump that leaves the construction sites, the demolition waste or construction remains is characterized as a of a heterogeneous mixture of materials with a great recycling potential. The composition of the construction and demolition waste itself constitute an alternative to eliminate the nocive dump deposition at the margins of public roads, fallow lands and rivers. At the same time, it is very useful to obtain more economical construction materials with a insured quality. Many studies were already developed with these materials, being appraised, in your great majority, in mechanical properties and technical viability of the use of those residues incorporate to the concrete mix. Little one has been studying on aspects of durability of concretes produced with recycled aggregates. In that way, the objective of this work is to do a study the durability of concrete made from recycled aggregates, analyzing the behavior of the concrete when submitted to the attack of aggressive agents, in this case, the chloride ions. This study presents the results of the compressive strength, as parameter of control of the concrete produced. For the durability indexes, results of the potential of corrosion and the corrosion rate of the iron bars of the recycled concrete obtained are presented. The concrete production was carried out, with three different water/cement ratios (0,40; 0,60; 0,80) and with three different proportion of substitution of the natural aggregates for the recycled, these proportions were of 0%, 50% and 100% of substitution, so much of the recycled fine aggregates (RFA) as of the recycled coarse aggregates (RCA). The results proved that there is a great resistance of the concrete obtained with these aggregates, in allowing corrosion in the shielding shell, with those obtained with a bigger percentage of substitution of the fine recycled aggregate when compared to concretes produced without substitution of recycled material.

Keywords: construction and demolition waste; recycling; concrete; durability; corrosion

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vem, ao longo dos anos, aprimorando suas técnicas construtivas e caminhando paralelamente com o avanço tecnológico que hoje está espalhado pelo mundo. Essa mesma indústria que cresce e se aprimora, está as voltas com problemas tão grandes quanto seu crescimento. Um dos questionamentos que se faz é o que será da construção civil sem os recursos naturais, antes tidos como inesgotáveis e renováveis, uma vez que sua exploração, excessiva e indiscriminada, tem causado graves problemas ambientais.

Nenhum questionamento desse tipo estaria em foco se não estivesse havendo uma consciência mundial de preservação da natureza em todos os seus aspectos, desde a conservação da matéria-prima até uma percepção de preservação do ambiente, de modo que se possa garantir a sobrevivência do homem. Isso se justifica porque preservação ambiental é, acima de tudo, conservar área de matas nativa, rios e espécies em extinção. Essa é a visão de desenvolvimento sustentável.

A partir do momento em que a indústria da construção civil explora suas jazidas naturais e não renováveis para a extração de recursos minerais, criando cada vez mais crateras e crateras, ela está contribuindo para o desequilíbrio ecológico daquela região e conseqüentemente, quase que simultaneamente, comprometendo várzeas e áreas da baixada urbana.

Estas justificativas se fazem mais do que necessárias para que haja uma profunda reformulação das atividades humanas, que passa a incorporar todos os impactos das atividades de produção e consumo, desde a extração da matéria-prima até o produto final após sua utilização. Nesse processo de transformação a sociedade depende de significativas mudanças, por parte do setor da construção civil, para alcançar o desenvolvimento sustentável (JOHN, 2001).

A cadeia produtiva da construção civil, segundo John (2001), é responsável por grandes impactos ambientais em todas as etapas do seu processo, que vai desde a extração, produção de materiais, construção, uso até a demolição.

A redução do impacto ambiental dessa indústria não é uma tarefa das mais fáceis, tendo que agir em várias áreas, e de forma concomitante, para que se possa obter algum resultado positivo, devendo portanto: minimizar o consumo dos recursos (conservar); maximizar a reutilização de recursos; usar recursos renováveis ou recicláveis; proteger o meio ambiente; criar um ambiente saudável e não tóxico e buscar a qualidade na criação do ambiente construído (a partir de JOHN, 2001).

Em uma das pontas desse complexo está a geração dos resíduos. Estes são produtos de correntes de atividades extrativistas, produção industrial e serviços. Podem ser chamados de subprodutos quando adquirem um valor comercial. Como é caso, por exemplo, da grande quantidade de armaduras usadas em concreto armado e que contêm altos teores de resíduos, e da sílica ativa, hoje largamente empregada na construção civil. (CINCOTTO 1989, citado por LEITE, 2001; JOHN, 2001).

Por outro lado, essa mesma indústria que emprega grandes quantidades de resíduos em seus materiais também é responsável pelo enorme volume de resíduos de construção e demolição que vem sendo gerado nas cidades, ano após ano, e depositados indiscriminadamente em lugares inadequados, provocando sérios problemas ambientais, como assoreamento de rios e córregos, e evidenciando a falta de uma política para a gestão desses resíduos por parte dos governantes.

Resta, portanto, ir em busca de alternativas para reduzir o acúmulo desses resíduos. A solução pode estar inserida em vários pontos. Pode-se começar na melhoria da qualidade dos bens e serviços dentro da construção civil, resultando numa diminuição de perdas de materiais e que mais tarde vão diminuir a fatia no percentual de resíduos gerados. Também pode haver uma grande conscientização ambiental, provocando sérias transformações socioeconômicas e culturais por parte dos centros urbanos e da sociedade em geral, no sentido de minimizar os impactos causados pela urbanização indiscriminada e mal planejada das cidades e cobrar dos responsáveis uma legislação que atenda a todos e que, de sobremaneira, faça valer os direitos e deveres de cada pessoa envolvida nesse processo.

Uma outra alternativa é fazer uso da reciclagem desses resíduos. A reciclagem significa redução de custos, redução do volume de extração da matéria-prima, preservando os recursos naturais limitados, e também a minimização dos problemas com gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos dos municípios (LEITE, 2001; JOHN, 2001).

Os resíduos provenientes de obras da construção civil e de demolição apresentam características que dependem do tipo de obra, das técnicas construtivas, da fase em que se encontra a obra, das características sócio-econômicas da região considerada, entre outros fatores.

Segundo Zordan (1997), o entulho de construção civil que sai dos canteiros de obras, demolição ou de restos de construção é constituído por uma mistura de cacos cerâmicos, tijolos, blocos, argamassa, concreto, madeira, papel, terra e restos orgânicos, entre outros. Para Pinto (1986), essa mistura é composta, basicamente, de 60% de argamassa, 30% de componentes de vedação – tijolos, blocos, cacos cerâmicos, 9% de outros materiais (concreto, pedra, areia, metálicos e plásticos) e 1% de orgânicos.

Observando esta composição subentende-se que a reciclagem desses resíduos, já consolidada em outros países, mas com muito pouca atividade ainda no Brasil, pode ser uma boa alternativa, unindo dois fatores positivos: eliminar a nociva deposição de entulho às margens de vias públicas, rios, córregos, terrenos baldios e, ao mesmo tempo, obter materiais de construção mais baratos e de boa qualidade.

De acordo com John (1996), citado por Leite (2001), o mercado da construção civil se apresenta como uma das melhores alternativas para consumir materiais reciclados, pois a atividade de construção é realizada em qualquer região, o que já reduz custos como de transporte. Além disso, os materiais necessários para produção da grande maioria dos componentes de uma edificação não precisam de sofisticação técnica. O raio de alcance que o resíduo beneficiado pode ter é um ponto importante e favorável no conjunto da possibilidade de sua reutilização.

Para John (2001), a reciclagem de resíduos apresenta dois tipos de risco. O primeiro é o risco associado a qualquer inovação tecnológica na construção civil, pois a natureza empírica do conhecimento e a falta de tradição em inovação, aliadas à longa durabilidade requerida, têm significado desempenho inadequado de muitas novas tecnologias introduzidas no mercado. A esse problema soma-se o risco inerente à própria reciclagem, pois muitos resíduos são considerados perigosos, por possuírem taxas elevadas de concentrações de espécies químicas perigosas. O que não é o caso dos resíduos de construção e demolição.

Apesar de algumas desvantagens, as vantagens de se utilizar materiais como esses, muitas vezes compensam em vários aspectos técnicos e de utilização dos materiais. Se, na origem da geração do resíduo, a reciclagem significa redução de custos e até mesmo novas oportunidades de negócios, na outra ponta do processo, a cadeia produtiva que recicla reduz o volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais, que são limitados. A incorporação desses resíduos a outros produtos permite muitas vezes a produção de materiais com melhores características técnicas, como é o caso da sílica ativa, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica, e da escória de alto forno, que melhora o desempenho do concreto frente à corrosão por cloretos (JOHN, 2001).

Na tentativa de contribuir com o aumento do conhecimento sobre as características de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil relativo à reciclagem dos mesmos, este trabalho foi desenvolvido utilizando-se desses materiais como agregado miúdo e graúdo, em diferentes teores de substituição, na produção de concretos. Para o desenvolvimento deste estudo optou-se por utilizar o resíduo como ele sai das fontes geradoras, ou seja, completamente misturado, separando-se as impurezas, e avaliar sua influência em algumas propriedades do concreto.

Vários autores seguiram e estão seguindo essa linha de pesquisa em busca do desenvolvimento e aprimoramento de novas técnicas de utilização destes materiais, que podem ser inseridos na sociedade como um novo produto e que cultiva um grande valor social. Leite (2001) avaliou as propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados obtidos a partir de resíduos de construção e demolição e a possibilidade de utilização desses resíduos como substitutivo, total ou parcial, do agregado natural para produção de concretos. Zordan (1997) estudou a utilização do entulho como agregado na confecção do concreto, avaliando também propriedades mecânicas. Levy (1997) estudou a reciclagem do entulho de construção civil utilizando o agregado reciclado na fabricação de concretos e argamassas. Latterza (1998) avaliou concretos produzidos com agregados graúdos provenientes da reciclagem de resíduos de construção e demolição na fabricação de painéis leves de vedação.

Silva, Costa e Canêdo (2001) estudaram a viabilidade técnica de concreto fabricado com agregado miúdo proveniente da reciclagem do entulho do concreto. Nesse trabalho a substituição do agregado se deu de forma total (100%) e parcial (50%). Os autores puderam

constatar que os resultados dos ensaios de resistência à compressão atingiram a ordem de 77 a 92% daquela obtida com os concretos de referência, ou seja, sem substituição, constituindo assim uma opção econômica e ambientalmente lucrativa.

Em termos de viabilidade econômica de concretos produzidos com agregados reciclados, Grigoli (2001) avalia algumas formas de como, em um canteiro de obras, pode-se utilizar o entulho gerado por esta mesma obra, para que este resíduo seja reutilizado como material de construção, seja na forma de concreto sem função estrutural, seja na forma de argamassa ou na forma de simples enchimentos diversos, provocando uma diminuição nos custos que se teria se fosse utilizar materiais convencionais para realizar esta mesma etapa.

Pouco se têm estudado sobre aspectos de durabilidade desses concretos. A grande maioria dos trabalhos avalia propriedades mecânicas e viabilidade técnica da utilização desses materiais incorporados ao concreto. Oliveira e Assis (1999) estudaram a deterioração de concretos provenientes de demolição de obras de construção civil e o seu comportamento em relação ao meio ambiente, simulando um ataque de água com pH baixo. O estudo revelou que a perda de massa do concreto com agregados reciclados, em função do efeito da chuva ácida, foi aproximadamente 16% em relação à massa da amostra do concreto de referência.

Quebaud et al. (1999) avaliaram a influência do teor de agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição na permeabilidade do concreto. Neste trabalho os autores puderam detectar dois obstáculos em relação à utilização de agregados reciclados na mistura do concreto. Um deles, é a inadaptação às normas técnicas, que freqüentemente são destinadas aos materiais naturais. O outro, é a falta de conhecimento sobre a durabilidade destes concretos, fato este que provoca uma insegurança aos usuários potenciais deste material. Ainda segundo os autores, como aumentar as incertezas sobre a vida útil de uma obra não é aceitável, faz-se necessário a atribuição de um domínio de utilização para os concretos a base de agregados reciclados, fundamentada na sua durabilidade e esta etapa é indispensável.

Dessa forma, passa a ser objeto de pesquisa deste trabalho fazer um estudo relacionado à durabilidade de concretos produzidos a partir de agregados reciclados, analisando o comportamento desses concretos quando submetidos a um ataque de agentes agressivos. No caso da pesquisa em questão, será realizada, em ambiente de laboratório, uma simulação de ataque de cloretos nestes concretos. Os cloretos são considerados um dos piores agentes de deterioração de uma estrutura de concreto, pois eles penetram na estrutura porosa do

concreto, atingem a armadura e podem provocar corrosão, e conseqüentemente levam a estrutura ao colapso, por esgotar a sua capacidade de resistir aos esforços aos quais é submetido o concreto armado.

## 1.1 HIPÓTESE

Como hipótese a ser testada nesse trabalho tem-se a de que a ação de cloretos no concreto executado com misturas contendo agregados reciclados provoca o fenômeno da corrosão das armaduras em menor grau quando comparado com concretos obtidos com agregados convencionais.

Para isso foram realizados ensaios, em laboratório, de potencial de corrosão e resistência de polarização para o cálculo da taxa corrosão em concretos produzidos com diferentes substituições do agregado reciclado, sempre com vistas à durabilidade.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é fazer um estudo comparativo do processo de corrosão das armaduras devido à ação de cloretos, entre concretos tradicionais, ou seja, concretos produzidos com agregados naturais, e concretos produzidos com agregados reciclados.

Os objetivos específicos são:

- avaliação da influência dos diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado sobre a taxa de corrosão das armaduras nos concretos produzidos;
- análise das diferentes relações água/cimento utilizadas nos concretos, no estudo da taxa de corrosão das armaduras causada pelos cloretos;
- análise da propriedade de resistência à compressão desses concretos, em função da relação água/cimento e dos percentuais de substituição dos agregados reciclados.

### 1.3 ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DA PESQUISA

Para que este trabalho se apresentasse de forma clara e organizada, foi dividido em sete capítulos.

No primeiro capítulo foi descrita uma breve introdução sobre o assunto a ser estudado, enfatizando sua importância, assim como a especificação dos objetivos principais e secundários.

No capítulo 2 está apresentado um estudo sobre o estado da arte dos resíduos de construção civil, enfocando a importância da reciclagem e fazendo um resumo das pesquisas envolvendo agregados reciclados e sua influência nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos. Também foi realizada uma breve definição sobre corrosão das armaduras, visto que esse assunto é um ponto importante no trabalho.

No capítulo 3 está apresentado o programa experimental, com o projeto estatístico utilizado, planejamento e metodologia dos ensaios, caracterização e seleção dos materiais, bem como o método de dosagem experimental utilizado na pesquisa.

No capítulo 4 apresenta-se uma análise dos resultados de resistência mecânica à compressão, avaliando o efeito do percentual de substituição do agregado reciclado nessa propriedade.

No capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios eletroquímicos de durabilidade dos concretos produzidos, onde foram analisados os ensaios de potencial de corrosão e taxa de corrosão das armaduras dos concretos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre a pesquisa realizada e algumas sugestões para trabalhos futuros.

No capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas citadas no trabalho.

## **2 ESTADO DA ARTE DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Após receber a herança grega, o império romano (753 a.C. a 476 d.C.) desenvolveu vários campos da arte, do direito e da engenharia. Nessa época, os romanos usavam em suas construções calcário calcinado e aprenderam a misturar cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos britados ou telhas em cacos. Foi o primeiro concreto que se teve notícia na História e, ironicamente, feito de restos de alvenaria e outras pedras trituradas. Portanto, não é nenhum exagero afirmar que o primeiro concreto produzido no mundo, que se tem notícia, foi um concreto obtido de agregados reciclados (NEVILLE, 1997; SUPERINTERESSANTE, 2002).

Na Alemanha, em torno de 1860, foram produzidos artefatos de concreto de cimento Portland com agregados reciclados. Foi quando teria se iniciado o desenvolvimento de técnicas de reciclagem. Mas só a partir de 1928 começaram a realizar pesquisas organizadas no sentido de avaliar o efeito do consumo de cimento e água usando agregados de alvenaria britada. Contudo, a utilização mais necessária e relevante se deu após o fim da Segunda Guerra Mundial (1945), quando milhares de resíduos ficaram espalhados pelas cidades da Alemanha. Face à necessidade de reconstruir as cidades, que tiveram seus edifícios demolidos, e a carência de materiais de construção, a saída foi o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem dos resíduos de construção e demolição (LEITE, 2001; LEVY 2002).

Nessa época o material utilizado na reciclagem foi proveniente de um volume estimado entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos. Por volta de 1955, as instalações de reciclagem produziram milhões de metros cúbicos de agregados reciclados, com os quais foram construídas 175.000 unidades habitacionais. Assim, no final de 1956, cerca de 85% do entulho da Segunda Grande Guerra havia sido removido e, em 1960, todo entulho proveniente da guerra havia sido reciclado na Alemanha (LEVY, 2002). A partir dessa época, caracterizou-se o início do desenvolvimento da tecnologia da reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Atualmente, suprir a carência de matéria-prima e preservar os recursos naturais não renováveis continuam sendo os maiores motivos para que a reciclagem de resíduos de construção e demolição seja feita.

Países da Comunidade Européia como Holanda, Bélgica, França, Alemanha, Dinamarca, entre outros, aliado à nação asiática do Japão, têm pesquisado o assunto de maneira mais aprofundada, com o objetivo de estabelecer procedimentos para a obtenção de um padrão de qualidade para os agregados reciclados (VAZQUEZ, 2001; LEVY 2002). Hendricks e Janssen (2001) estudaram a classificação dos agregados reciclados, quanto a granulometria, massa específica, absorção e finalidade para a qual será utilizado o agregado reciclado. Os estudos revelaram que os agregados reciclados não se encaixaram nas faixas aceitáveis de padronização com relação às normas vigentes na Comunidade Européia e os autores propõem uma revisão das normas.

Entre encontros e congressos, cujo principal tema era a reutilização de resíduos, foram desenvolvidas normalizações para a utilização desses agregados. Na tabela 1 é mostrado um resumo dos principais eventos internacionais, no âmbito da reciclagem de resíduos, que marcaram o início de normalizações e padronizações do uso de agregados reciclados.

Dentre os países citados, a Holanda se destaca pelo grau de desenvolvimento da técnica de reciclagem e incentivos dados à mesma. Segundo Vazquez (2001), a Europa recicla quase sua totalidade dos resíduos de construção e demolição. A Holanda, devido à grande demanda de materiais de construção e a escassez dos recursos naturais, tem procurado otimizar o processo de reciclagem dos resíduos, para que, num futuro próximo, não haja um colapso da indústria de extração de minérios.

Por conta disso, o governo holandês publicou, em 1989, uma lei sobre resíduos sólidos, com a intenção de reduzir a poluição ambiental e o consumo de recursos naturais, cuja oferta diminui a cada ano. De diversas pesquisas nesse país foram formuladas leis e regulamentações, cujas diretrizes permitem classificar o material reciclado que é produzido.

Nos Estados Unidos, na década 1960, foi criada uma política para gestão dos resíduos chamada *Lei de Conservação e Reciclagem de Recursos*, que abrange vários setores da cadeia produtiva e privilegia os produtos contendo resíduos ou ambientalmente saudáveis. Na década de 1990, os governos norte-americanos começaram a criar leis que regulamentavam a

disposição final dos resíduos de construção e demolição. Atualmente, mineradoras já adicionam aos agregados extraídos das jazidas algumas porcentagens de reciclados. No programa de reciclagem da cidade de Los Angeles, os custos com reciclagem é cerca da metade dos custos dos aterros norte-americanos (ZORDAN, 2002; JOHN e AGOPYAN, 2000).

Tabela 1: resumo de eventos e normas existentes na área de reciclagem

<b>Data</b>	<b>Localidade</b>	<b>Evento</b>
1976	Comunidade Européia	Formação do Comitê técnico da RILEM TC 37 DRC “Demolição e Reutilização de Concreto”
1977	Japão	Propostas das primeiras normas de utilização de agregado reciclado de concreto
1978	Grã-Bretanha	Publicado o 1º Relatório RILEM TC 37 DRC “Estudo da arte da Reciclagem de Concreto, para a Utilização como Agregado de Concreto”
1981	Comunidade Européia	O Comitê RILEM TC 37 DRC é reestruturado e Torben C. Hansen é nomeado seu presidente
1982	Dinamarca	IIª reunião de DRC. A partir dessa data o CT RILEM promoveu reuniões anuais na Holanda, França, Inglaterra, Bélgica e Japão
1988	Japão	Neste simpósio o Comitê RILEM TC 37 encerrou suas atividades e foi formado o comitê RILEM 121-DRG para prosseguir com as pesquisas, além de prestar apoio na formulação de diretrizes na área de reciclagem.
1996	Escócia	Congresso “Concreto a Serviço da Humanidade”, no qual foram abordados temas sobre reciclagem e reutilização de concretos e alvenarias

(fonte: LEVY, 2002)

No Brasil, o pioneiro nos estudos sobre reciclagem de resíduos da construção foi o arquiteto Tarcísio de Paula Pinto, em 1986. Seu primeiro trabalho foi uma dissertação de mestrado realizada com a utilização de resíduos de construção na fabricação de argamassas. Depois disso, desencadeou-se no país uma consciência coletiva por parte da sociedade e do meio

técnico, até então desacordados para o assunto, no que diz respeito à reciclagem de resíduos de construção e demolição.

Entretanto, a discussão sobre resíduos ainda permeia no ambiente técnico-científico. A reciclagem de resíduos como material de construção no Brasil se dá de uma forma bastante incipiente, exceto pela intensa reciclagem das indústrias do cimento e do aço (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001). O aprofundamento das discussões a respeito do que fazer com os milhares de metros cúbicos depositados inadequadamente nos locais não propícios para esse fim, vem, aos poucos, ocupando espaço nas discussões políticas, dada a importância do tema e a conscientização ambiental por parte da sociedade.

## 2.1 DEFINIÇÃO, GERAÇÃO E POLÍTICA DE BENEFICIAMENTO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

### 2.1.1 Definição e classificação

Qualquer material proveniente de atividades de demolição de obras civis, restos de obras, autoconstrução ou reformas, pode ser considerado como resíduo de construção e demolição.

Alguns contestam o termo “resíduo de construção”, pois estes materiais geram um produto final com a reciclagem e a designação dada é sinônimo de um material que não se pode mais utilizar. A melhor definição talvez seja “subprodutos”, estes são gerados por processos que incluem atividades extrativistas, produção industrial e de serviços, com emprego na construção civil (LEITE, 2001; JOHN, 2001).

Sob o ponto de vista ambiental, os resíduos se inserem num determinado nível de classificação. De acordo com NBR 10004 (ABNT, 1987), que trata da classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais e à saúde pública, os resíduos de construção e demolição podem ser classificados na classe III, como resíduos inertes, ou seja, estes resíduos não reagem quimicamente mesmo contendo elementos minerais.

Esta classificação está sendo muito contestada no meio técnico. Oliveira, Mattos e Assis (2001) sugerem que seja feita uma revisão da norma NBR 10004, passando os resíduos de

construção e demolição da classe III – inertes, para a classe II – não inertes. Segundo os autores, o estudo constatou, através de análise química, que o resíduo proveniente de concreto não apresentou propriedades inertes.

Zaharieva et al. (2002) também afirmam que o agregado reciclado não pode ser considerado inerte, devido a sua grande heterogeneidade, assim como altos teores de impurezas, como metais pesados, por exemplo, que podem contaminar os resíduos e conseqüentemente afetar a durabilidade dos concretos produzidos a partir desses agregados.

Para John e Agopyan (2000), os resíduos são classificados pela NBR 10004, como inertes por exceção, pois se forem submetidos à análise certamente seriam classificados como não inertes, especialmente devido ao pH e à dureza da água absorvida, que podem ter importantes níveis de contaminação. Ainda segundo os autores, as contaminações podem ser originadas tanto da fase de geração, como do manuseio. Estes contaminantes tanto podem afetar a qualidade do produto quanto possibilitar riscos ambientais.

Entretanto, segundo Zordan (2000), citado por Leite (2001), os resíduos podem se inserir em quaisquer das classes II ou III, vai depender apenas da origem e da constituição dos materiais.

### 2.1.2 Geração de resíduos de construção e demolição

A indústria da construção civil tem tido anualmente significativas perdas de materiais de construção e, por conseqüência, têm aumentado o número de resíduos de construção gerados. Formoso et al. (1998) encontraram índices de aumento do custo da edificação da ordem de 7,9%, em função da grande quantidade de perdas de materiais dentro da própria obra.

Isatto et al. (2000) apontaram que a falta de algumas medidas relativamente simples, como gerenciamento do armazenamento de materiais no canteiro de obras, está intimamente ligada à questão das perdas de materiais, e que medidas de prevenção são necessárias para reduzir estas perdas, sem que, necessariamente, se façam grandes investimentos em novas tecnologias. Segundo os autores, os grandes índices de perdas originam-se fora dos canteiros de obras, ainda na fase de planejamento, em virtude de projetos inadequados e falta de planejamento.

Há alguns anos não havia quaisquer indicadores para a ocorrência de perdas na construção civil e quase nada se sabia sobre a geração de resíduos de construção e demolição, exceto pela formação de imensas pilhas de entulho depositadas nos ambientes urbanos. No Brasil, atualmente já é possível confirmar as significativas perdas e quantificar a geração desses resíduos fazendo uso de uma série de indicadores sobre a geração desses materiais. Pinto (1999) fez uma estimativa de que os resíduos de construção e demolição, além de outras atividades de manutenção e reparos, gerados nos grandes centros brasileiros, são responsáveis por aproximadamente 50% do quantitativo dos resíduos gerados, enquanto que as atividades de canteiro de obras respondem pela outra metade da geração desses resíduos.

Supõe-se que são gerados de 2 a 3 bilhões de toneladas de entulho por ano em todo mundo. Em países europeus, como Alemanha e Europa Oriental, aproximadamente dois terços dos resíduos de construção gerados são provenientes de obras de manutenção e demolição, sendo o restante vindo de atividades de construção. Em países onde o desenvolvimento é acelerado, o percentual de geração de resíduos tende a aumentar, dada a sua necessidade de aumentar o ambiente construído. Nos Estados Unidos, o percentual passa para 8% das atividades de construção e 33% se dão em demolições não residenciais. Na Europa, estima-se que a geração de entulho varia de 600 a 918 kg/hab.ano, que é muito maior do que a estimativa de 390 kg/hab.ano de resíduo sólido municipal (OZKAN, 2001; VAZQUEZ, 2001; LEITE, 2001; POON, 1997; JOHN, 2000). Na tabela 2 é possível visualizar a geração dos resíduos de construção em diferentes países.

No Brasil, não há números precisos que apontam uma estimativa nacional da geração de resíduos. As estimativas pontuais levam a uma geração anual entre 220 a 670 quilos por habitante. Estima-se que cerca de 150 quilos de resíduos são gerados para cada metro quadrado de área construída. A geração de resíduos em algumas cidades brasileiras chega a 500 kg/hab.ano. Na cidade de São Paulo, só a indústria da construção civil gera 90.000 metros cúbicos de entulho por mês e esse montante corresponde apenas ao material que chega em aterros oficiais. Para um edifício, cuja massa de materiais equivale a 1000 kg/m<sup>2</sup>, o entulho gerado corresponde a aproximadamente 5% da massa total do edifício (ANDRADE et al., 2001; JOHN, 2000; PINTO, 1999).

Tabela 2: estimativas de geração de resíduos de construção em diferentes países

País	Quantidade anual	
	Mton/ano	kg/hab
Suécia	1,2 – 6	136 – 680
Holanda	12,8 – 20,2	820 – 1300
EUA	136 – 171	463 – 584
Reino Unido	50 – 70	880 – 1120
Bélgica	7,5 – 34,7	735 – 3359
Dinamarca	2,3 – 10,7	440 – 2010
Itália	35 – 40	600 – 690
Alemanha	79 – 300	963 – 3658
Japão	99	785
Portugal	3,2	325
Brasil	-	220 - 670

(fonte: JOHN e AGOPYAN, 2000)

A tabela 3 apresenta alguns dados sobre a geração de resíduos em algumas cidades do país. Dados estes que podem revelar importantes índices, mostrando a realidade da geração dos resíduos sólidos no Brasil.

Tabela 3: geração de resíduos em algumas cidades brasileiras

<b>Cidade</b>	<b>População (milhões de habitantes)</b>	<b>Geração de entulho (ton/dia)</b>	<b>% de entulho em relação ao resíduo sólido urbano</b>
São Paulo <sup>(1)</sup>	15,0	5000	-
Salvador <sup>(1)</sup>	2,20	1700	37
Belo Horizonte <sup>(1)</sup>	2,01	1200	51
Porto Alegre <sup>(1)</sup>	1,20	350	-
Campinas <sup>(2)</sup>	0,85	1258	-
Maceió <sup>(3)</sup>	0,70	1100	45
Florianópolis <sup>(2)</sup>	0,28	636	-
Santo André/SP <sup>(1)</sup>	0,63	1013	58
São José dos Campos <sup>(1)</sup>	0,50	733	65
Ribeirão Preto <sup>(1)</sup>	0,46	1043	67

(fonte: (1) a partir de LEITE, 2001; (2) ANDRADE et al. 2001; (3) Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió- SLUM, 1997)

### 2.1.3 Política de gestão dos resíduos de construção e demolição

As soluções adotadas atualmente pelos governos da maioria dos municípios brasileiros no que diz respeito ao grande volume de resíduos de construção e demolição gerados, são, na sua maioria, emergenciais. Essas soluções, sem planejamento, corriqueiramente repetitivas e com preços elevados, caracterizam o que se chama de “*Gestão Corretiva*”<sup>1</sup>. Segundo Pinto (2001), a gestão corretiva envolve atividades não preventivas e repetitivas e que, por não apresentarem resultados satisfatórios, tornam-se muito ineficientes. Além de se sustentarem

---

<sup>1</sup> Definições apresentadas pelo arquiteto Tarcísio de Paula Pinto (2001)

na inevitável deposição irregular dos resíduos em áreas naturais, degradando o ambiente urbano.

Ainda segundo Pinto (2001), as municipalidades recorrem à ineficácia da gestão corretiva porque não contam com uma política de gestão adequada e ainda não perceberam a extensão da geração de resíduos da construção. A saída para esse problema consiste em adotar uma política de gerenciamento dos resíduos de construção baseada no conceito de sustentabilidade, envolvendo os setores da indústria da construção e a reciclagem dos resíduos gerados. De acordo com o autor, essa nova política de gerenciamento dos resíduos de construção é denominada “*Gestão Diferenciada*”<sup>1</sup>, que consiste na adoção de uma série de ações que começa na captação desses resíduos, passando pela reciclagem e chegando numa reeducação de procedimentos e culturas com relação à geração de resíduos e as possíveis utilizações dos resíduos reciclados.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou uma resolução, em 2002, com orientações a respeito da destinação que é dada ao entulho. Nesta resolução, o CONAMA recomenda que seja feita reciclagem do material e cria uma co-responsabilidade entre a construtora e a empresa removedora do entulho, além da previsão de multas.

Foi o primeiro grande passo para a evolução da reciclagem de resíduos de construção no Brasil. Depois dessa resolução, o processo de reciclagem deve se tornar mais econômico, pois as multas com a co-responsabilidade, tendem a fazer com que as construtoras não queiram arcar com o ônus de um entulho mal destinado. Além de proibir que o entulho seja colocado em aterros de resíduos domiciliares ou bota-foras, a resolução determina a reciclagem da parcela mineral do entulho, que é composta de concreto, materiais cerâmicos, tijolos, argamassa, entre outros (TECHNE, 2001).

Estima-se que, em média, 65% do entulho dos bota-foras são de origem mineral, 13% madeira, 8% plásticos e 14% de outros materiais. O custo projetado do metro cúbico de argamassa com material reciclado é de 36 dólares, contra 62 dólares de uma argamassa com material convencional. Um outro dado significativo, é que percentuais de 20 a 25% do entulho gerado nas cidades são provenientes das construtoras. O restante vem de reformas e de outros tipos de obra de autoconstrução (TECHNE, 2001).

As principais questões que definem a política de reciclagem dos resíduos de construção civil foram apontadas por Pinto e Agopyan (1994), citado por Cavalcanti (2002):

- mais de 90% dos resíduos da construção civil podem ser reutilizados na própria indústria da construção civil, na produção de novos componentes de construção;
- é de fundamental importância conhecer a composição química e as qualidades físicas do resíduo, para que seja definido o uso para o qual será destinado;
- a utilização de rejeitos contribui na melhoria do meio-ambiente e reduz gastos públicos para gerenciá-los;
- o processo de reciclagem deve ser abrangente e aliado a políticas de ação local;
- os principais adversários à reciclagem de resíduos da construção são decorrentes da falta de políticas sistemáticas e da dificuldade de mudar os hábitos das pessoas envolvidas na construção civil.

Dessa forma, é possível atingir os setores responsáveis e possibilitar o uso de ferramentas legais para uma gestão adequada desses materiais.

#### 2.1.4 Benefícios da reciclagem dos resíduos de construção e demolição

Para que os resíduos de construção e demolição deixem de ser um problema e passem a ser uma solução, a reciclagem desses materiais constitui-se na técnica mais simples e rentável em termos econômicos e sociais. Além de diminuir os volumosos montantes de entulho depositados nos diversos tipos de ambientes urbanos, a reciclagem ainda pode reduzir o custo na construção civil. A reciclagem do resíduo de construção e demolição transforma um material aparentemente sem uso, em uma fonte de matéria-prima que serve tanto para obras prediais e residenciais, como também soluciona os problemas que as municipalidades enfrentam com o gerenciamento desses resíduos.

O apelo ambiental também é outro ponto de grande enfoque para o uso da reciclagem dos resíduos. Durante a conferência RIO-92 discutiu-se a necessidade de implementação de um sistema de gestão ambiental para os resíduos sólidos, bem como os benefícios gerados por essa gestão. Na construção civil, onde o consumo de matéria-prima é altamente impactante na

natureza, a reciclagem se insere nesse contexto para a minimização dos impactos ambientais causados pela extração dos recursos naturais não renováveis, uma vez que a construção civil pode reaproveitar grande percentual de materiais de construção que foi descartado (ÂNGULO, ZORDAN e JOHN, 2001).

Na conjuntura atual, é de fundamental importância que os processos de construção sejam otimizados. Se essa condição não acontece, a reciclagem do entulho que sai da obra passa a ser a solução para os materiais que são perdidos inevitavelmente.

Entretanto, para que o uso da reciclagem se dê em uma escala na qual os benefícios sociais, econômicos e ambientais sejam percebidos, o poder público deve implantar um programa fazendo uso do levantamento dos resíduos gerados na cidade e estimar os custos diretos e indiretos da disposição do entulho em aterros e, a partir daí, determinar a tecnologia que será empregada na reciclagem, os investimentos necessários e as possíveis aplicações dos resíduos reciclados. A sistemática da coleta do entulho, assim como a reciclagem do mesmo, se dará de forma mais eficiente se houver a presença dos agentes envolvidos na construção civil aliado ao poder público municipal<sup>2</sup>.

A reciclagem do entulho, apesar de existirem técnicas mais sofisticadas tecnologicamente, pode ser realizada com instalações e equipamentos de baixo custo, podendo até mesmo ser realizada na própria obra que gera o resíduo, reduzindo uma significativa parcela de atividades agregadas, como por exemplo os custos com transporte (GRIGOLI, 2001).

Na tabela 4 são apresentados alguns parâmetros de investimentos para a instalação de um programa de gestão dos resíduos de construção e demolição no sentido de fazer uso da reciclagem desses materiais.

---

<sup>2</sup> José Carlos Vaz (1994). Disponível em <http://www.federativo.bndes.gov.br/dicas>

Tabela 4: custos para uma instalação de uma central de reciclagem

<b>Instalação</b>	<b>Área Aproximada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo estimado (R\$)</b>
Local de entrega voluntária	300	11.250
Central de reciclagem	5.000	60.000

(Fonte: PINTO, 2001)

Obviamente, os custos com materiais e equipamentos não estão incluídos nessa estimativa. Estes equipamentos têm um valor consideravelmente alto, mas em médio prazo esse investimento já teria sido compensado. Um estudo realizado para a implantação da usina de reciclagem de Santo André (SP) mostrou que para uma geração de entulho em torno de 115 metros cúbicos por dia seria necessário um investimento de U\$ 144 mil dólares na montagem dos equipamentos. O custo na obtenção dos agregados reciclados, incluindo todas as despesas, ficaria em torno de 2,5 dólares por metro cúbico, enquanto que os gastos com o gerenciamento dos resíduos e os custos com agregados naturais somavam 24,7 dólares por metro cúbico para a prefeitura da cidade (TECHNE, 1995).

Para a implantação de uma central de pequeno porte os custos se tornam bem menores. Na tabela 5 são mostrados alguns valores de investimentos numa central de reciclagem com capacidade para processar 40 toneladas por hora de entulho.

Tabela 5: estimativa de custos para implantação de uma central de reciclagem

<b>Materiais e Equipamentos</b>	<b>Custo estimado (R\$)</b>
Maquinário – britador, moinho e argamassadeira	130.000
Peneiras granulométricas	40.000
Obras de infra-estrutura (guaritas, arrimo, caixa d'água)	120.000
<b>TOTAL</b>	<b>290.000</b>

(fonte: CAVALCANTI, 2002)

Os custos dessas centrais são considerados baixos, se comparados com os gastos das prefeituras com transportes para remoção do entulho. Um exemplo pode ser dado para a cidade de São Paulo, onde a prefeitura gasta em torno de 80 reais para uma caçamba retirar seis metros cúbicos de entulho depositados em locais inadequados. Considerando que dois terços da massa de resíduos sólidos seja entulho, as despesas com a remoção do entulho para aterros são substancialmente maiores que a própria reciclagem (CAVALCANTI, 2002; PINTO 1999).

#### 2.1.4.1 Experiências brasileiras da reciclagem de resíduos de construção e demolição

As centrais de reciclagem são gerenciadas predominantemente pelas prefeituras municipais, onde os agregados produzidos são utilizados na produção de pequenos artefatos de concreto e em obras de pavimentação. Em 1991, a prefeitura de São Paulo implantou uma usina de reciclagem com capacidade de 100 toneladas por hora, produzindo material que era utilizado como sub-base para pavimentação (TECHNE, 2001).

Ultimamente, cidades como Belo Horizonte, São Paulo, Santo André, Londrina, São José dos Campos, Ribeirão Preto e Piracicaba se envolveram no estudo do gerenciamento dos resíduos de construção e implantaram centrais de reciclagem funcionando experimentalmente. Atualmente, apenas as centrais de Belo Horizonte, Ribeirão Preto e Piracicaba estão em funcionamento. Nas cidades de Recife, Campinas e Natal, o setor privado está desenvolvendo projetos no sentido de colocar em operação uma central de reciclagem. As cidades de Santo André e São José do Rio Preto estão analisando a possibilidade de empresas privadas se associarem às prefeituras e terem autorização de operar estas centrais. Em Santo André a central funcionou por apenas alguns meses, fazendo uso da reciclagem experimental (JOHN e AGOPYAN, 2000).

Dentre as usinas de reciclagem, em funcionamento, citadas anteriormente, uma merece destaque pela sua proposição de crescente demanda e funcionamento, que é a central de reciclagem da cidade de Belo Horizonte. Funcionando desde 1995, a usina processa 300 toneladas por dia, contando com duas centrais de reciclagem, e ainda está em fase de ampliação. Desse volume de processamento, cerca de 5% não tem características recicláveis e são encaminhadas para os aterros. As despesas por parte da prefeitura na implantação da

usina ficaram em torno de U\$ 150 mil dólares, incluindo equipamentos e obras civis. Um valor consideravelmente razoável, uma vez que se gastava U\$ 3 mil dólares por dia com o trabalho de coleta, transporte e deposição final desse material. O projeto prevê ainda, que a usina possua quatro estações de reciclagem atingindo 8,8 mil toneladas por mês, produzindo 5.500 metros cúbicos de agregados reciclados (JOHN e AGOPYAN, 2000; CAVALCANTI, 2002).

Segundo Cavalcanti (2002), os agregados reciclados poderão ser utilizados em diversas atividades da construção civil, como por exemplo, sub base de ruas, briquetes para calçadas, blocos para muração, agregados para *rip-rap* (contenção de muros e encostas), blocos para alvenaria (com uma projeção de construção de 920 casas populares de 40 metros quadrados por mês), entre outros. Como medida de incentivo à reciclagem, a prefeitura de Belo Horizonte está propondo a isenção de alguns impostos para obras cujos resíduos tenham sido encaminhados à usina.

#### 2.1.4.2 Composição dos resíduos

Uma grande variedade de componentes constitui a formação dos resíduos. Dentre eles estão componentes orgânicos como madeira, papéis, materiais betuminosos, plásticos, entre outros, e materiais inorgânicos como concretos, cerâmicas, argamassas, materiais metálicos e outros produtos gerados pela construção civil.

O proporcionamento destes materiais em diferentes amostras é de grande variabilidade e heterogeneidade. Talvez por esse motivo, a utilização de agregados reciclados ainda seja tão tímida, pois as indústrias não vão querer apostar em um material de natureza variável. Segundo Ângulo et al. (2002), uma solução para a diminuição da variabilidade é a homogeneização dos resíduos de construção e demolição para a produção em larga escala. Porém, a redução da variabilidade da composição não dá garantias de que o produto obtenha um maior valor agregado.

Zordan (1997), em seus estudos, analisou a variabilidade dos agregados reciclados em algumas propriedades mecânicas do concreto. A variação da composição dos agregados provocou uma diferença entre 13% e 30% na resistência à compressão axial dos concretos com agregados reciclados com relação ao concreto de referência. Para Ângulo et al. (2002),

as aplicações comerciais dos agregados reciclados somente serão possíveis se houver um controle da variabilidade dos mesmos.

Para John e Agopyan (2000), a possibilidade de reciclagem desses resíduos vai depender da composição do mesmo. Para resíduos de material cerâmico, quase todo seu percentual pode ser reciclado e utilizado em diferentes aplicações. Dos percentuais de concreto e argamassa, assim como rochas naturais, podem ser obtidos agregados para confecção de concretos. Ainda segundo os autores, uma aplicação que já está sendo muito utilizada no mercado é a reciclagem de resíduos mistos para a produção de argamassa em canteiro. Foi analisada também a possibilidade e a viabilidade técnica de reciclagem a partir de composições típicas de entulhos provenientes da cidade de Itatinga em São Paulo, como pode ser visualizado nas figuras 1 e 2.

De acordo com Leite (2001), a composição do resíduo de construção e demolição tem influência direta na análise do comportamento do agregado no concreto. A autora analisou a composição do resíduo proveniente de um aterro de inertes da cidade de Porto Alegre. Nesta composição foram encontrados diversos materiais, como concreto, argamassa, material cerâmico, rochas naturais, entre outros elementos de menores percentuais e considerados impuros como, por exemplo, madeira, papel, plásticos, entre outros. A composição do resíduo de Porto Alegre está apresentada na figura 3.

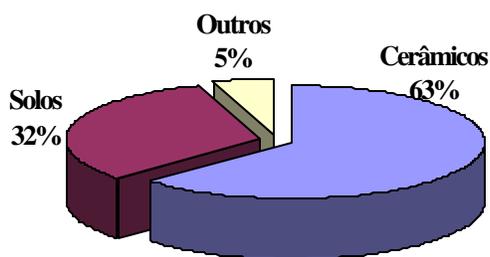


Figura 1: composição do entulho de Itatinga – São Paulo  
(fonte: a partir de Brito Filho (1999), citado por John e Agopyan (2000))

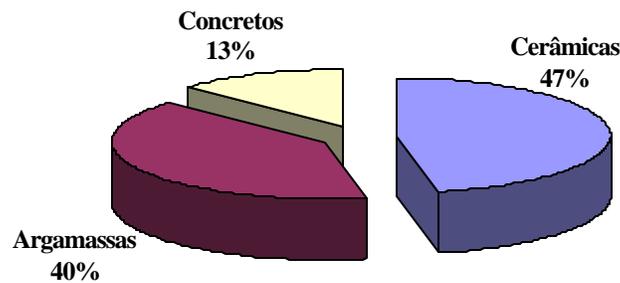


Figura 2: fração potencialmente reciclável do entulho de Itatinga – São Paulo  
(fonte: a partir de Brito Filho (1999), citado por John e Agopyan (2000))

Elementos como gesso, vidros, materiais betuminosos, matéria orgânica, metais, plásticos, papéis, entre outros, são considerados como impurezas na reciclagem dos resíduos de construção e demolição. A presença do gesso na composição do resíduo provoca reações de expansão e pode fissurar o concreto, devendo não ser utilizado na reciclagem. O vidro também é outro elemento limitante na composição dos resíduos, pois, uma vez inserido no concreto como agregado reciclado, pode reagir com os álcalis do cimento provocando a reação álcali-sílica, que provoca a deterioração do concreto. Materiais metálicos também podem causar danos ao concreto se inseridos na mistura, pois a presença de elementos como zinco e alumínio podem favorecer o desprendimento do hidrogênio no concreto fresco ou podem provocar reações de expansão, causando fissuras no concreto endurecido (HANSEN, 1992; LEITE, 2001; JOHN e AGOPYAN, 2000).

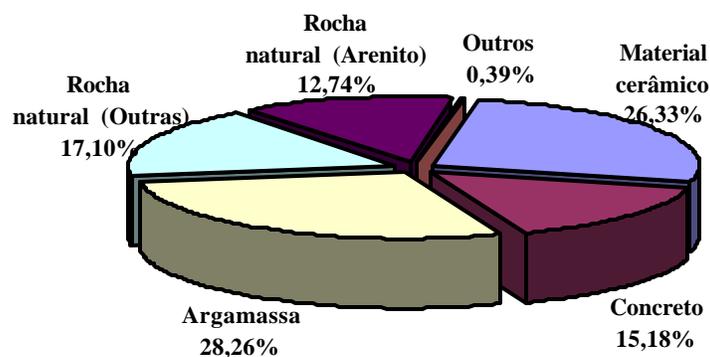


Figura 3: composição do entulho de Porto Alegre – Rio Grande do Sul  
(fonte: Leite, 2001)

Carneiro et al. (2001) avaliaram composições do entulho proveniente da cidade de Salvador, na Bahia, e detectaram grandes percentuais de resíduos de concreto e argamassa, seguidos de materiais cerâmicos. A composição dos resíduos pode ser vista na figura 4.

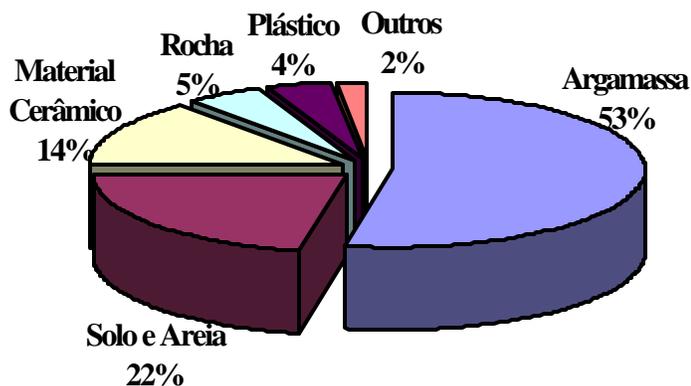


Figura 4: composição do entulho de Salvador – Bahia  
(fonte: Carneiro et al., 2001)

Observando estas composições nota-se que, apesar de serem composições das mais variadas regiões do país, não há muita diferença nos percentuais e na caracterização do entulho gerado no Brasil. Observa-se também, que grandes percentuais dos resíduos de construção e demolição são compostos de concreto, argamassa e materiais cerâmicos. De onde se pode concluir que parcelas significativas na composição dos resíduos são passíveis de reciclagem. Após uma etapa de reciclagem, esses materiais podem se transformar em agregados com grandes utilizações no setor civil.

Em outros países, a composição dos resíduos de construção e demolição não difere muito da composição dos resíduos brasileiros. No capítulo 3, no item 3.1.3 é feito um comparativo com a composição dos resíduos utilizados nesta pesquisa, bem como de outros trabalhos a níveis nacionais e internacionais, no que diz respeito ao percentual de resíduos utilizados nas misturas.

## 2.2 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS

A utilização dos agregados reciclados em concretos está se tornando cada vez mais crescente. Esse crescimento pode ter se dado por várias razões, entre elas o desenvolvimento da pesquisa na área tecnológica de produção de concretos com agregados reciclados e também devido à conclusão de que é perfeitamente possível se utilizar parcelas de agregados reciclados em concretos das mais variadas classes de resistência.

Inúmeras pesquisas tratam do assunto e, quase sempre, a conclusão é a mesma ou muito similar: a de que concretos com agregados reciclados respondem positivamente quando submetidos aos critérios de avaliações mecânicas e de durabilidade. Zordan (1997), Leite (2001), entre outros, avaliaram a viabilidade técnica da utilização desses materiais e concluíram que agregados reciclados são perfeitamente passíveis de serem utilizados em concretos. Gómez-Soberon (2002) salienta que, apesar da grande porosidade dos agregados reciclados, a sua utilização em concretos é perfeitamente aplicável. Olorunsogo e Padayachee (2002) concluíram que, quando os concretos, obtidos com agregados reciclados, eram avaliados por índices de durabilidade, algumas propriedades eram melhoradas, como, por exemplo, diminuição da condutividade de íons cloreto em determinados níveis de substituição.

Tomadas as devidas e criteriosas precauções, os concretos obtidos a partir de agregados reciclados podem ser utilizados nas mais diversas atividades do setor de construção civil. Estas precauções referem-se ao tratamento dado ao agregado reciclado desde o seu beneficiamento até o momento de ser utilizado na mistura do concreto. Essa, talvez, seja a grande dificuldade de se trabalhar com agregados reciclados no concreto. Por causa da grande heterogeneidade e variabilidade na composição dos agregados reciclados, às vezes não é possível obter concretos de boa qualidade, que atendam aos requisitos pré-estabelecidos para a produção da mistura e do desempenho do mesmo.

Como foi dito anteriormente, a produção de agregados reciclados em concretos disseminou-se depois da Segunda Guerra Mundial. Desde então, o desenvolvimento das técnicas de reciclagem desses resíduos aprimorou-se. Entretanto, não se pode afirmar que a reciclagem seja, atualmente, uma idéia que esteja sendo muito difundida, apesar dos inúmeros trabalhos de conteúdo técnico desenvolvido nessa área.

No estudo particular do concreto com agregados reciclados, várias são as abordagens dadas a esse tópico, uma vez que a disponibilidade de agregados reciclados permite a aplicação em larga escala nos concretos. Porém, a utilização desses materiais ainda é algo muito restrito às construções de sub-base de rodovias. De acordo com Hendriks e Janssen (2001), nos Países Baixos, mais de 90% dos resíduos reciclados são utilizados na construção de rodovias.

Só recentemente, esses agregados têm sido usados em obras que não sejam rodovias. Segundo Touahamia, Sivakumar e McKelvey (2002), agregados provenientes de resíduos de construção e demolição estão sendo usados em aterros para fundações, paredes de gabiões e estabilização de encostas.

Para Ângulo et al. (2002), a atual tecnologia empregada dentro das centrais de reciclagem, no Brasil, não permite que os agregados reciclados sejam utilizados em concretos. Por causa da inexistência de normas brasileiras, os agregados reciclados têm que seguir as especificações internacionais, e, na maioria das vezes, os agregados não se enquadram nos critérios normativos.

Nas várias fases de preparo e execução do concreto reciclado, no processo de separação e caracterização dos resíduos de construção e demolição, Ângulo e John (2001) propõem uma metodologia de determinação dos teores de concreto e argamassa presentes na composição dos agregados graúdos desses resíduos, que normalmente é feita utilizando-se uma separação manual dos grãos por inspeção e pesagem das fases individuais (por exemplo, concreto, argamassa, cerâmica, rochas). Neste trabalho os autores empregam um sistema de equações para a determinação desses teores, adotando-se valores médios de absorção de água e massa específica definidos por pesquisa bibliográfica.

Na avaliação de agregados reciclados em concretos, a influência dos mesmos pode ser analisada sob dois aspectos: um aspecto diz respeito às propriedades do concreto fresco e o outro relaciona-se com as propriedades do concreto no estado endurecido. O desempenho desses agregados nessas duas fases vai definir a sua aplicabilidade nas misturas.

### 2.2.1 Influência dos agregados reciclados no concreto no estado fresco

As avaliações que são feitas relativas à influência dos agregados reciclados dentro das propriedades do concreto fresco baseiam-se fundamentalmente no estudo da trabalhabilidade dos mesmos.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a trabalhabilidade dos concretos está relacionada com a facilidade de mobilidade e com a resistência à segregação ou à exsudação. Estas características vão depender de vários fatores, como consumo de água, consumo de cimento, aditivos e das características dos agregados. Agregados muito angulosos ou com muitos finos necessitam de mais água para atingir uma dada consistência.

Leite (2001) avaliou a propriedade de trabalhabilidade em concretos com agregados reciclados em diferentes proporções, mantendo constante a relação a/c, e concluiu que estes concretos tendem a obter trabalhabilidades insatisfatórias, principalmente com altos percentuais de agregado graúdo incorporado à mistura. Entretanto, a autora ressalta que as misturas apresentaram moldabilidade satisfatória quando eram adensadas, exceto quando possuíam percentuais de 100% de substituição dos agregados naturais, miúdo e graúdo, pelos reciclados. Foi constatado também, que quando as misturas recebiam a substituição do agregado miúdo isoladamente, o abatimento aumentava. Esse fato deve ter ocorrido em função da quantidade de finos na mistura, que possibilita uma maior lubrificação das partículas, propiciando um aumento da trabalhabilidade.

Estes resultados levam a conclusão de que quanto maior o percentual de agregado miúdo reciclado, isoladamente, maior é o abatimento da mistura, em relação ao agregado graúdo reciclado. Para relação a/c maiores, Leite (2001) concluiu que quanto maior a relação a/c, menores os valores do abatimento. Isso acontece porque misturas com relação a/c mais altas tendem a se tornar mais ásperas, em função da menor quantidade de cimento.

Hansen (1992), ao citar trabalhos de alguns autores, salienta que algumas adições podem ajudar as misturas a obterem um abatimento satisfatório, visto que concretos reciclados possuem desvantagem em relação a trabalhabilidade.

Katz (2002) avaliou propriedades do concreto fresco com agregados reciclados de idades novas e avançada e concluiu que concretos com agregados reciclados mais velhos requerem

mais água que os concretos reciclados de agregados com idades mais recentes. Isso se deve, segundo o autor, ao percentual de finos, que nos agregados de idade mais avançada têm quantidades de finos insuficientes que podem prejudicar a trabalhabilidade.

De uma maneira geral, os concretos com agregados reciclados tendem a apresentar um abatimento menor com relação aos concretos com agregados naturais. Quanto maior a dimensão máxima do agregado reciclado, menor tende a ser o abatimento obtido. Para minimizar estas perdas algumas precauções podem ser tomadas como, por exemplo, evitar a utilização de cimentos com altos teores de álcalis e de alta resistência, pois o calor de hidratação, bastante intenso, pode dificultar a trabalhabilidade dos concretos. A temperatura também é um forte influenciador na perda de abatimento, pois quanto maior seu valor, maior tende ser a perda. Portanto, todos esses cuidados devem ser tomados para que não haja perda do abatimento. Quando os concretos produzidos forem obtidos a partir de agregados de natureza reciclada, estes cuidados devem ser tomados, inevitavelmente (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ARM, 2001; DOLLIMORE et al., 2000).

### 2.2.2 Influência dos agregados reciclados no concreto endurecido

Podem ser citados dois pólos de avaliações das propriedades do concreto. São elas as propriedades *mecânicas* e de *durabilidade*. Para que os concretos desempenhem as funções que lhe foram atribuídas é de se esperar que ele mantenha a sua resistência e que seja útil por um período de vida especificado e previsto.

As propriedades mecânicas dizem respeito ao potencial do concreto de resistir aos esforços que a ele for solicitado. Dentre as propriedades analisadas, a resistência à compressão é mais utilizada em todas as frentes de estudos, dada a relativa facilidade de realização dos ensaios. Porém, propriedades como módulo de elasticidade e resistência à flexão são também estudadas.

Para as propriedades de durabilidade, o grau de dificuldade começa a aumentar dada a diversidade de elementos que pode favorecer uma durabilidade inadequada. Efeitos físicos, químicos e mecânicos interferem na durabilidade dos concretos, devendo ser estudados em todos os seus aspectos.

### 2.2.2.1 Propriedades mecânicas

Várias são as pesquisas sobre propriedades mecânicas em concretos reciclados. Na sua grande maioria, os pesquisadores avaliam propriedades mecânicas de resistência à compressão e quase sempre o resultado é mesmo: a viabilidade técnica dos concretos com agregados reciclados devido ao seu bom desempenho diante dessa propriedade. Apenas algumas recomendações precisam ser feitas para que essa afirmação se confirme. O tratamento dado ao agregado reciclado antes da concretagem é de fundamental importância para o bom desempenho das misturas.

As mais diversas possibilidades do tratamento do agregado estão sendo testadas, principalmente do agregado graúdo, antes da concretagem. Esse tratamento se deve, possivelmente, a natureza heterogênea e de grande variabilidade dos materiais reciclados. Alguns agregados graúdos, mesmo depois do beneficiamento, possuem percentuais de impurezas impregnados na sua superfície, que podem prejudicar a qualidade do concreto.

Chen et al. (2003) desenvolveram um estudo de concretos com agregados reciclados de tijolos e concretos, utilizando os agregados reciclados em lotes separados de agregados graúdos reciclados, lavados e não lavados. Os resultados mostraram que os concretos reciclados, obtidos a partir dos agregados graúdos lavados, obtiveram valores em torno de 90% da resistência à compressão e flexão dos concretos de referência. Enquanto que para os concretos de agregados reciclados não lavados, os valores não passaram de 75%. Para que não houvesse a saturação dos agregados e, conseqüentemente, uma diminuição da resistência, nos concretos com os agregados lavados, os mesmos eram lavados de 24 a 36 horas antes da concretagem e armazenados em um ambiente onde a água pudesse evaporar livremente.

Oliveira e Vazquez (1996) analisaram o desempenho mecânico de concretos reciclados utilizando-se de agregados graúdos nas condições: secos, semi-saturados e saturados. Os resultados mostraram que os concretos obtidos a partir dos agregados semi-saturados obtiveram resistências melhores aos 28 dias e praticamente com os mesmos valores de resistências dos concretos sem agregado reciclado. Os concretos de agregados saturados obtiveram valores de resistências cerca de 10% menor. Este mesmo percentual foi percebido na avaliação da resistência à flexão, para qual os concretos de agregados saturados obtiveram menores valores em relação aos de referência. Ainda segundo os autores citados, a resistência

à flexão de todos os concretos produzidos foi cerca de 10% menor que o concreto de referência.

A influência do concreto com agregado reciclado no módulo de elasticidade e na resistência à flexão também está sendo muito estudada. Chen et al. (2003) concluíram que os agregados reciclados possuem os valores do módulo de elasticidade cerca de 70% do valor do concreto de referência, para as diversas relações a/c utilizadas. Nesse caso, não houve diferença significativa entre um agregado ser utilizado da forma lavada ou não lavada. Para a resistência à flexão, os autores puderam verificar que os concretos obtidos com os agregados lavados obtiveram uma resistência 10% superior com relação ao concreto convencional para relação a/c igual a 0,80. Por se tratar de um agregado que passou por um processo de lavagem, segundo os autores, a superfície do agregado se torna mais limpa, facilitando as condições de aderência entre o agregado reciclado e a pasta de cimento.

A questão da diminuição da resistência dos concretos reciclados está sendo alvo de muitas discussões. É perfeitamente comum encontrar resultados onde misturas, contendo agregados reciclados, obtenham valores abaixo dos de referência. Limbachiya (2000), citado por Levy (2001) afirma que o decréscimo da resistência nos concretos com agregados reciclados se dá, principalmente, devido à alteração da relação a/c. Zaharieva et al. (2002) enfatizam que a alteração da relação a/c provoca diminuição das resistências, mas o acréscimo de água na mistura, em função da alta taxa de absorção dos agregados reciclados, é necessário para atingir uma trabalhabilidade adequada.

Um ponto fundamental que precisa ser discutido, é a alta taxa de absorção de água dos agregados. Por ser um agregado mais poroso, obviamente irá precisar de mais água para ter a mesma trabalhabilidade que concretos com agregados convencionais. Balizados nessa teoria, muitos autores realizam misturas de concretos variando a quantidade de água para que o abatimento e a trabalhabilidade sejam satisfeitos. Dessa forma, a relação a/c é alterada e a classe de resistência desses concretos também acaba se alterando, acarretando então uma impossibilidade de comparação direta entre concretos convencionais e reciclados.

Dos trabalhos realizados fixando-se a relação a/c, os resultados foram bastante satisfatórios e em muitos casos os valores das resistências em concretos reciclados foram significativamente superiores em relação aos valores do concreto de referência.

Para Leite (2001), os fatores de maior influência na resistência à compressão dos concretos são a porosidade dos materiais e o percentual de substituição dos agregados reciclados. Em seu trabalho, a autora concluiu que a viabilidade técnica de utilização de percentuais totais de agregados reciclados era possível apenas para os agregados miúdos reciclados, principalmente quando se trabalha com relações a/c menores. Quando este percentual de substituição se dá apenas por parte do agregado miúdo, ou seja, 100% de agregado miúdo e 0% de agregado graúdo, os concretos apresentam resistências superiores aos concretos de referência, e apontou uma possível atividade pozolânica, além da maior compactidade das misturas, em função da melhor distribuição granulométrica.

#### *2.2.2.1.1 Concretos de alta resistência e alto desempenho a partir de agregados reciclados*

Dada a possibilidade de um bom desempenho com relação à resistência mecânica, um assunto que tem chamado a atenção dos pesquisadores é a utilização de agregados reciclados para fabricação de concreto de alta resistência e alto desempenho. Trata-se de um tema relativamente novo na bibliografia, pois antes acreditava-se que concretos de agregados reciclados tinham resistências relativamente inferiores em relação aos outros concretos e sua aplicação era de menor importância.

Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) enfatizam que resíduos de construção e demolição originários de obras de concreto armado e concreto protendido cujas resistências eram relativamente altas, podem ser verdadeiras fontes de agregados de alta resistência e boa qualidade. Tais propriedades poderão ser obtidas usando agregados reciclados formados de concreto de alta resistência e com adição de sílica ativa e ajuda de superplastificante. Nessa pesquisa, os autores puderam constatar que é possível obter concretos de alta resistência de agregados reciclados. Os autores observaram também, que todas as misturas que tiveram substituição por agregados reciclados, as resistências foram maiores que as do concreto de referência. As propriedades do concreto que originou os agregados reciclados tiveram influência significativa nas propriedades do concreto reciclado. Entretanto, foi preciso fazer algumas correções na relação a/c para obter as propriedades de trabalhabilidade, mas as alterações feitas não alteraram significativamente os valores das relações a/c. O uso de adições como sílica ativa, assim como aditivos superplastificantes, também contribuíram para o aumento da resistência mecânica dos concretos reciclados.

Em seu trabalho, Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002) obtiveram valores de resistência à compressão maiores que 80 MPa em alguns concretos reciclados, enquanto que no concreto de referência esse valor não passou de 60 MPa. A resistência à flexão e a tensão de cisalhamento foram outras propriedades analisadas e em todas elas os concretos reciclados foram significativamente maiores que os de referência.

Para Limbachiya (2000), citado por Levy (2001), é recomendável usar até 30% de material reciclado para confecção de concreto de alta resistência. Neste trabalho, foram encontradas resistências entre 50 e 70 MPa em concretos feitos a partir de agregados reciclados. Com percentuais acima de 30%, as resistências foram menores. Entretanto, a correção da relação a/c foi feita de modo que houve uma alteração de importância significativa e, conseqüentemente, houve uma redução da resistência. Ocorrências como essas são perfeitamente factíveis de acontecerem, pois é sabido que a modificação da relação a/c em misturas de concreto alteram o valor da resistência mecânica. Trata-se, portanto, da lei de Abrams, que é amplamente difundida e aplicada no meio técnico.

#### 2.2.2.2 Durabilidade de concretos com agregados reciclados

A vulnerabilidade do concreto diante de condições de agressividade do meio é um fator bastante preocupante na avaliação da vida útil das estruturas dessa origem, pois uma durabilidade inadequada pode manifestar sérias complicações, comprometendo a utilidade das mesmas.

Atualmente, é perfeitamente aceitável que critérios de durabilidade sejam especificados de forma bastante clara no projeto de estruturas de concreto sujeitas às mais diversas condições de exposição. Somado a isso, existe a consciência de que é preciso preservar os recursos naturais através da produção de materiais e componentes com vida útil mais longa ou a produção de materiais alternativos, como agregados reciclados.

Mas para que esses materiais alternativos sejam amplamente utilizados há uma necessidade de conhecer o seu comportamento diante de condições que afetam negativamente as propriedades do concreto.

De uma forma geral, a durabilidade de concretos, sejam eles naturais ou reciclados, incide diretamente na facilidade ou dificuldade do transporte de fluidos dentro do concreto, sendo classificado como um concreto pouco ou muito permeável. Os principais agentes de transporte de fluido no concreto são a água, que pode estar pura ou pode conter agentes agressivos, o dióxido de carbono e o oxigênio. O deslocamento desses elementos no concreto vai depender da estrutura da pasta de cimento hidratado (NEVILLE, 1997).

O concreto de agregados reciclados também deverá responder a essa facilidade, ou não, do transporte desses fluidos, para que sua durabilidade seja avaliada.

Rasheeduzzafar e Khan (1984), citado por Hansen (1992), compararam absorção de água em concretos reciclados com diferentes relações a/c e concluíram que a absorção de água nos concretos com relação a/c maior era cerca de três vezes superior à dos concretos convencionais devido, principalmente, a porosidade do agregado graúdo reciclado. Entretanto, essa perda poderia ser amenizada se os agregados graúdos fossem utilizados em concretos com baixa relação a/c.

Sagoe-Crentsil, Brow e Taylor (2001) analisaram o desempenho de concretos feitos com agregados naturais e agregados de concreto reciclados na propriedade de absorção de água. Os resultados comprovaram que os resíduos de argamassa, que ficaram aderentes às partículas de concreto reciclado, propiciaram um aumento da umidade do concreto, possibilitando aumentos em torno de 25% a mais na taxa de absorção em relação ao concreto de referência.

Quebaud et al. (1999) analisaram a permeabilidade de diversos concretos elaborados, ora apenas com agregado graúdo reciclado e areia normal, ora com percentuais mistos (agregados, miúdo e graúdo, naturais e reciclados) e com percentuais totais de agregados reciclados. Os resultados obtidos mostraram que os concretos reciclados tiveram uma permeabilidade à água bem maior que os de referência, cujos valores situaram-se entre 2 e 3 vezes a mais que a do concreto convencional. A permeabilidade ao ar situou-se com valores de 2 a 5 vezes maior para os concretos reciclados.

Zaharieva et al. (2002) realizaram estudos sobre permeabilidade de concretos com agregados reciclados e concluíram que, pelo fato de os agregados reciclados requerem mais água na mistura, a permeabilidade se torna maior em relação aos concretos convencionais. Os estudos mostraram que a porosidade do concreto reciclado foi duas vezes maior que os de referência.

Os autores ressaltaram a limitação desses concretos para uso em concreto armado, pois a alta porosidade implicaria em corrosão das armaduras, entretanto, com o uso de adições como escória ou sílica, a porosidade dos concretos reciclados pode diminuir significativamente.

Katz (2002) realizou estudos com agregados reciclados utilizando cimentos Portland branco e cinza na análise de propriedades mecânicas e de durabilidade. O uso do cimento branco tinha o objetivo de analisar microscopicamente a diferença entre a pasta da matriz entre um agregado reciclado e um outro cimento, visto que as amostras de agregados reciclados tinham composições de concreto e argamassa de cimento Portland cinza. Os resultados de durabilidade mostraram que as taxas de absorção verificadas aos 28 dias foram maiores para os concretos reciclados produzidos com cimento branco, mas no geral não houve diferença significativa entre um cimento e outro no valor da taxa de absorção. Entre os concretos reciclados e os de referência, a taxa de absorção foi maior para o concreto reciclado. Para os autores, a alta porosidade do concreto reciclado é função direta da porosidade do agregado.

A profundidade de carbonatação também foi estudada por Katz (2002). Os concretos reciclados tiveram profundidade de carbonatação entre 1,3 e 2,5 maior que nos concretos de referência. Com relação entre um cimento e outro, a carbonatação nos concretos de reciclados de cimento cinza foi maior que no cimento branco.

Sagoe-Crentsil, Brow e Taylor (2001) analisaram carbonatação acelerada num ambiente com 4% de CO<sub>2</sub> e concluíram que os concretos produzidos com 100% de agregados reciclados tiveram maiores valores que os de referência. Entretanto, em percentuais mistos, ou seja, com agregados naturais e reciclados, e ainda com adição de 5% de escória, os resultados de carbonatação acelerada foram menores que os de referência.

Kikuchi (1998), citado por Leite (2001), estudou o fenômeno de carbonatação de concretos reciclados a partir de resíduos de concreto e os resultados mostraram que os concretos reciclados tiveram uma menor profundidade de carbonatação que os concretos de referência. Quando o percentual de substituição se dava por parte do agregado miúdo, os valores foram maiores que os de referência.

Olorunsogo e Padayachee (2002) estudaram propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto como condutividade de íons cloreto, permeabilidade ao oxigênio e sorvidade à água, contendo percentuais de 0%, 50% e 100% de substituição de agregados naturais por

reciclados. Os resultados mostraram que a durabilidade diminui à proporção que aumenta o percentual de substituição para todas as propriedades avaliadas. Entretanto, essas propriedades melhoram com o aumento da idade e com percentuais de 50% de agregados reciclados na mistura.

Levy e Helene (2001b) puderam analisar a influência da penetração de cloretos em concretos com diferentes teores de agregados reciclados de alvenaria e concreto em diferentes classes de resistências. Os autores concluíram que a utilização de agregados miúdos reciclados, sendo de alvenaria ou concreto, eleva a taxa de penetração de cloretos. Entretanto, foi detectado também que para os concretos reciclados com 30 MPa, a durabilidade não é afetada pela penetração de cloretos quando os percentuais são de 50% de substituição.

Como pôde ser visto, é grande o número de trabalhos relacionados não só com propriedades mecânicas mas também com relação à durabilidade desses concretos. Diversos focos são estudados para avaliar a qualidade desses concretos. Entretanto, ainda talvez, por causa da resistência em afirmar que concretos reciclados não podem ser usados em concreto armado, uma carência de trabalhos frente à corrosão das armaduras foi sentida no âmbito dessa revisão bibliográfica. Por ser um assunto de extrema importância para a durabilidade dos concretos, seja convencional ou reciclado, e por ser objetivo principal desta pesquisa, uma breve discussão sobre corrosão das armaduras foi realizada, enfocando a ação agressiva dos cloretos.

#### 2.2.2.2.1 Corrosão nas armaduras do concreto e a influência dos íons cloreto

Na sua composição, o concreto armado é um conjunto de diferentes materiais que tem uma função específica: absorver esforços de tração e compressão. O concreto é formado por cimento, água e agregados e é caracterizado estruturalmente por possuir alta resistência à compressão. No entanto, sua resistência à tração é baixa. E devido a isso, o aço é incorporado ao concreto para resistir aos esforços de tração, formando então o *concreto armado*.

Quando corretamente executado, o concreto protege a armadura sobre dois aspectos: o físico e o químico. Quanto ao primeiro, a proteção é devida à barreira física proporcionada pelo cobrimento, sobre a armadura, cuja eficiência depende da qualidade e dimensão da espessura do concreto de cobrimento; a proteção química resulta do elevado pH existente na solução

aquosa presente nos poros do concreto, permitindo, assim, a formação de uma fina película protetora, conhecida como *camada de passivação*

O concreto e o aço são materiais de construção compatíveis, não apresentando problemas quanto à dilatação térmica e são largamente usados na construção civil. Com exceção dos metais nobres (ouro, prata e platina) que são encontrados na natureza sob a forma estável, os outros existem na forma de minério (matéria-prima) na condição de maior estabilidade em relação ao metal já beneficiado (GENTIL, 1996).

Para extrair um certo metal é necessário aplicar, ao minério, energia num processo de redução. O metal, perdendo energia através de uma reação espontânea, retorna, gradualmente, ao seu estado natural. Tal fenômeno é chamado corrosão metálica que é a *transformação dos materiais metálicos, pela ação química ou eletroquímica do meio*. Caso o aço não tenha proteção, entrando em contacto com o ar atmosférico e umidade, volta ao seu estado original (minério) sofrendo corrosão (GENTIL, 1996, grifo do autor).

Ainda segundo Gentil (1996), o concreto que envolve a armadura de aço, quando executado sem os devidos cuidados, pode não funcionar como uma barreira perfeita, permitindo que as armaduras sofram ataques de íons agressivos ou de substâncias ácidas existentes na atmosfera, danificando a *camada passivante ou protetora*. Os principais agentes responsáveis pela perda de proteção são: o *dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e os íons cloreto (Cl)*.

As armaduras podem sofrer as seguintes formas de corrosão eletroquímica (GENTIL, 1996):

- *corrosão uniforme*: corrosão em toda a extensão da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo;
- *corrosão puntiforme ou por pite*: os desgastes são localizados sob a forma de pequenas cavidades, também chamadas de alvéolos;
- *corrosão intergranular*: é processada entre os grãos dos cristais do metal e quando os vergalhões sofrem, principalmente, tensões de tração, podem fissurar ou fraturar perdendo sua estabilidade;
- *corrosão transgranular*: que se realiza intragrãos da rede cristalina, podendo levar à fratura da estrutura, quando houver esforços mecânicos;

- *fragilização pelo hidrogênio*: deterioração originada pela ação do hidrogênio atômico na sua difusão pelos vergalhões da armadura, propiciando a sua fragilização e, em consequência, a fratura.

São extremamente graves as quatro últimas formas de corrosão quando existe ação conjunta de solitação mecânica e meio corrosivo (o que é bastante provável), pois ocasionam a *corrosão sob tensão fraturante*, possivelmente a mais grave, podendo provocar a ruptura da armadura do concreto, enquanto que, a menos prejudicial, é a uniforme, pois se apresenta distribuída em toda a extensão da barra de aço e, portanto, dificilmente traz conseqüências graves.

O mecanismo da corrosão da armadura é uma manifestação específica da corrosão eletroquímica em meio aquoso, se bem que o eletrólito confinado a uma rede de poros existentes no concreto possui resistividade elétrica bem mais elevada do que a verificada nos eletrólitos típicos ou comuns. Daí o mecanismo da corrosão do aço, no concreto, só se desenvolver em presença de água ou ambiente com umidade relativa elevada (U.R.> 60%). Por outro lado isto só ocorre nas três seguintes condições básicas: existência de um eletrólito; deve existir uma diferença de potencial de eletrodo e presença de oxigênio. É um processo desenvolvido de modo espontâneo como o de qualquer pilha eletroquímica onde exista um ânodo, um cátodo, um eletrólito e a presença de um condutor elétrico. A ausência de um destes elementos impedirá o início da corrosão ou cessará o processo, caso já esteja em andamento (SONG, 2000; ZIVICA, 2000; FORTES e ANDRADE, 2001).

Entre o *ânodo* e o *cátodo* haverá uma diferença de potencial (*ldp*), que pode ser mínima, que pode dar origem à circulação de corrente elétrica, devido à formação de uma certa pilha. Conforme a intensidade de corrente e a de acesso do oxigênio, haverá corrosão que tanto poderá evoluir lentamente e, neste caso, ser desprezível para efeito de vida útil da estrutura, como rapidamente, quando a corrosão deverá ser considerada

O fenômeno eletroquímico da corrosão da armadura, desde que esta esteja *despassivada*, é ilustrada na figura 5 e está resumido como segue:

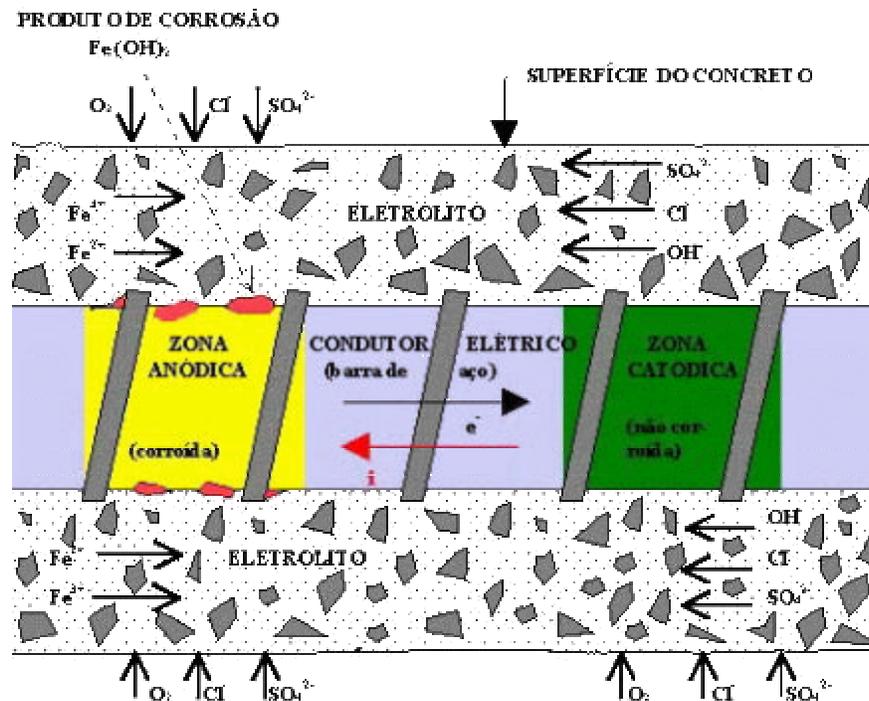


Figura 5: formação de pilha de corrosão em concreto armado  
(fonte: a partir de FORTES e ANDRADE, 2001)

Primeiramente, a película passivante da armadura é destruída por ação combinada da umidade, do oxigênio e de agentes agressivos, principalmente cloretos, que penetram no concreto. A concentração destes elementos é variável ao longo da armadura, dando origem a uma pilha de corrosão, devido a ddp entre trechos diferentes (ânodo e cátodo). Surge então uma corrente elétrica (fluxo de íons) que sai das áreas anódicas para o concreto (eletrólito), corroendo-as, penetra nas áreas catódicas, protegendo-as e retorna às áreas anódicas, pelos ferros da armadura, fechando o circuito (FORTES e ANDRADE, 2001).

Não há corrosão em *concretos secos* (ausência de eletrólito) e tampouco em *concreto totalmente saturado*, devido não haver suficiente acesso de oxigênio. Como a corrosão se apresenta como um fenômeno eletroquímico, procura-se evitar que haja no concreto, condições que facilitem a formação de pilhas eletroquímicas. Dentre estas condições estão a presença de eletrólitos, aeração diferencial (porosidade do concreto), áreas diferentemente deformadas ou tensionadas (concentração de esforços) e a existência de uma corrente elétrica (GENTIL, 1996, grifo do autor).

### *Ação dos íons cloreto ( $Cl^-$ )*

Tais íons têm o poder de destruir, de forma localizada, a película passivante sobre a armadura, provocando a corrosão por pite. De acordo com Cascudo (1997), estes pontos, ou pequenas crateras, formam o ânodo da pilha de corrosão e, devido à sua progressão em profundidade, podem provocar a ruptura da barra de aço. O restante da superfície metálica torna-se o cátodo e, como se sabe, a relação área anódica/área catódica, sendo muito pequena, poderá dar motivo a uma intensa corrosão.

Pode haver cloretos no concreto incorporados às misturas dos componentes (aditivos, água, brita e areia), ou por penetração, do exterior, através da rede de poros, como é o caso de ambientes marinhos (maresia ou névoa salina) e de sais de degelo usados em estradas e estacionamentos nos países de climas frios. A quantidade de  $Cl^-$  é incrementada temporalmente chegando, até mesmo, a atacar toda a superfície da armadura, podendo provocar velocidades de corrosão intensas e perigosas (POLDER e PEELEN, 2002; FORTES e ANDRADE, 2001).

As normas existentes limitam o conteúdo de cloretos totais no concreto, em relação à massa de cimento (%). Um valor médio aceito, geralmente para o teor de cloretos, é de 0,4% em relação à massa de cimento ou 0,05% a 0,1% em relação à massa de concreto. Já a Norma Brasileira, NBR 6118 (ABNT, 1978), limita o teor máximo de cloretos em 500 mg/l em relação à água de amassamento do concreto. Tal conteúdo depende de vários parâmetros, entre os quais, cita-se: tipo de cimento, quantidade de cimento, relação a/c, conteúdo de umidade, agressividade do meio, adensamento, cura e outros, havendo, portanto, dificuldade de ser estabelecido um limite seguro abaixo do qual não haveria possibilidade de despassivação da armadura de aço.

De acordo com Fortes e Andrade (2001), os íons cloreto ( $Cl^-$ ), em contato com a armadura, produzem uma redução do elevado pH do concreto, que é formado por valores entre 12,5 a 13,5, para valores de até 5. Tais íons atingem a armadura de forma localizada, destruindo a camada passivadora, resultando na corrosão por pite (pequena área anódica) que, depois de formado, permanece ativo sempre reduzindo o diâmetro da barra.

Os cloretos agressivos podem ser encontrados na natureza, dissolvidos em água. Quando sólidos, podem depositar-se na superfície do concreto. Em dissolução aquosa, por intermédio de chuvas ou umidade e através da rede de poros, os agentes agressivos, tanto para o concreto como para a armadura, atingem as regiões mais internas do concreto armado. Segundo Cascudo (1997), tais agentes podem ser transportados para dentro do concreto através dos *mecanismos de absorção capilar, difusão, permeabilidade e migração*.

O mecanismo de difusão é bastante lento, porém os cloretos, e geralmente os sais, penetram bem mais rápido, através do transporte por forças capilares, muito apropriadas em *climas quentes*, quando há *névoa salina* na qual os cloretos estão em suspensão, nas gotículas de umidade do ar, como é o caso de regiões localizadas próximo às praias. A ação deste fenômeno é intensificada ou atenuada conforme a velocidade, direção de incidência dos ventos e grau de insolação.

Dessa forma se caracteriza a corrosão das armaduras. Em concretos obtidos com agregados reciclados o mecanismo de transporte é o mesmo, mudando apenas com relação à facilidade ou dificuldade de transporte dos agentes agressivos. Para concretos reciclados, a resistência à penetração de agentes agressivos parece limitar o uso desses tipos de concretos para apenas parte da mistura, pois os trabalhos relacionados com a durabilidade aqui citados, indicam que utilizar agregados reciclados em percentuais totais, pode comprometer a durabilidade da estrutura. Entretanto, algumas obras realizadas na Europa, todas executadas com agregados reciclados no todo ou parte, dão conta de que a reciclagem de resíduos de construção é uma alternativa viável também para concreto armado.

### 2.2.3 Obras realizadas com concreto de agregados reciclados

Alguns países onde a reciclagem de resíduos de construção já está consolidada, a utilização de agregados reciclados há muito deixou de ser apenas em obras de construção de rodovias. Nos países europeus, precursores da reciclagem de resíduos de construção e demolição, o concreto reciclado já está sendo utilizado em concreto armado, casas residenciais de médio padrão, portos marítimos e até em concretos de alta resistência.

Segundo Levy (2001), a Comunidade Européia realizou, em 1988, uma série de obras de concreto obtido a partir da reciclagem de resíduos de concreto e alvenaria, bem como da mistura de ambos, as quais eram e continuam sendo monitoradas para que se possa avaliar o comportamento desses concretos com relação à capacidade portante e durabilidade.

A seguir são apresentadas algumas dessas obras realizadas, em seus respectivos países, seguidas de suas principais características:

### **Holanda**

A Holanda é o país com melhor índice de reaproveitamento de resíduos de construção, beirando a 80% dos resíduos gerados. Essa filosofia se deve, em parte, a grande escassez de recursos naturais no país. Por conta da falta de recursos, a Holanda importa areia natural da Sibéria e entulho da Inglaterra (TECHNE, 2001). Diante desse cenário, a solução é fazer uso de materiais alternativos e de baixo custo. Um resumo das obras utilizado-se agregados reciclados, pode ser visto na tabela 6:

Tabela 6: algumas obras de concreto com agregado reciclado na Holanda

<b>Ano</b>	<b>Obra realizada</b>	<b>Aplicação</b>
1988	Viaduto na rodovia RW-32	Muretas laterais
1988	Eclusa na hidrovía de Haandrick	Laje submersa
1989	Interligação entre barragem e eclusa	Laje submersa
1990	2º viaduto na rodovia RW-32	Todos os componentes da estruturas
1997-1998	Empreendimento residencial de médio padrão	Painéis pré-moldados de concreto

(fonte: Levy, 2001)

Na obra do empreendimento residencial, o projeto foi desenvolvido para demonstrar a viabilidade técnica de substituição de 100% de agregados naturais pelo reciclado. Os painéis não apresentaram diferenças no aspecto visual com relação aos concretos com agregados naturais e o isolamento acústico atende as exigências normativas. Este mesmo

empreendimento está servindo de suporte para regulamentação de normas específicas para a construção e produção de concretos com agregados reciclados (LEVY, 2001)

### **Inglaterra**

Além de exportar entulho para a Holanda, a Inglaterra também é referência em obras executadas com agregados reciclados. As obras realizadas estão descritas na tabela 7:

Tabela 7: algumas obras de concreto com agregado reciclado na Inglaterra

<b>Ano</b>	<b>Obra realizada</b>	<b>Aplicação</b>
1996	Edifício do meio ambiente do BRE <sup>3</sup>	Fundações, lajes e pilares
1996	Piso do laboratório de Cardinton BRE	Piso de alta resistência
1999-2000	Novo centro de operações para tratamento de água	Aplicado em toda estrutura

(fonte: Levy, 2001)

Na obra do edifício do meio ambiente, as fundações obtiveram resistências de 25 MPa, as lajes obtiveram 20 MPa e o cimento utilizado foi com adição de escória de alto forno.

O piso de alta resistência foi construído para analisar o efeito do percentual de 20% de agregados reciclados de concreto e alvenaria de baixa qualidade. Mesmo assim, os concretos produzidos obtiveram resistência à compressão similar a de um piso construído com agregados naturais, atingindo 60 MPa aos 91 dias.

No projeto do centro de operações de tratamento de água, os resíduos aplicados no concreto eram provenientes de concretos de dormentes ferroviários.

### **Alemanha**

---

<sup>3</sup> BRE (Building Research Establishment). Centro de experimentação de construção e meio ambiente. Realiza consultorias, pesquisas, especificações e padronizações de produtos no Reino Unido.

Desde o fim da Segunda Guerra que a Alemanha se destaca pelo reaproveitamento de resíduos de construção e demolição. É apresentado na tabela 8 um resumo das principais obras realizadas neste país.

Tabela 8: algumas obras de concreto com agregado reciclado na Alemanha

Ano	Obra realizada	Aplicação
1945-2000	Reconstrução das cidades alemãs	Concretos normais, leves e blocos de alvenaria
1996-1997	Unidades residenciais e comerciais	Em toda estrutura
1999	Concretos, alvenaria de blocos cerâmicos e combinação de ambos	Peças decorativas

(fonte: Levy, 2001)

Na obra de unidades residenciais, foram construídas 550 unidades, cujo objetivo era propagar a utilização da reciclagem de materiais de construção civil. Para as peças decorativas foi utilizado cimento branco e cinza, de acordo com o tom do acabamento externo.

### **Bélgica**

A Bélgica também se insere num contexto mundial como um país que também se preocupa com o gerenciamento dos resíduos. Como exemplo disso, foi a construção da Casa da Reciclagem, cujo projeto tinha a finalidade de informar sobre a tecnologia da reciclagem para arquitetos e construtores, que resistem em utilizar materiais alternativos (LEVY, 2001). Na tabela 9, são mostradas algumas aplicações do concreto com agregados reciclados neste país.

Tabela 9: algumas obras de concreto com agregado reciclado na Bélgica

Ano	Obra realizada	Aplicação
1987-1988	Eclusa na ampliação do porto de Antuérpia	Paredes de uma das maiores eclusas do mundo
1997-2000	Casa da reciclagem	Blocos de concreto e outros elementos

(fonte: Levy, 2001)

Para a realização da obra da eclusa do porto de Antuérpia foram utilizados agregados provenientes da demolição de uma das paredes de embocamento da eclusa. Para manter a trabalhabilidade dos concretos produzidos, a técnica do pré-umedecimento foi muito eficiente, para a qual a quantidade de água necessária foi corrigida em função da absorção dos agregados reciclados.

Ainda com referência à obra do porto, dos 650.000 metros cúbicos de concreto, 80.000 metros cúbicos foram provenientes de agregados reciclados. A caracterização dos resíduos se deu de forma detalhada e foi utilizada, o processamento e beneficiamento do entulho foram otimizados e foi empregado todo o controle tecnológico do concreto. Como consequência, a obra está a 14 anos sem manifestações patológicas (LEVY, 2001).

## **Brasil**

No Brasil, apesar da grande demanda de material que pode ser reciclado, o uso na fabricação de concretos ou de outros elementos da construção civil é pouco ou quase inexistente, sendo estes materiais utilizados em sub-bases de vias e rodovias, na sua grande maioria. A escassez dos recursos naturais é um problema que, aparentemente, não afeta este país. Por enquanto, a grande questão consiste em resolver o problema do gerenciamento dos resíduos dessa natureza depositados nos grandes centros urbanos. Sendo assim, cidades como Belo Horizonte e algumas cidades de São Paulo estão buscando na reciclagem a saída para minimizar os efeitos nocivos da deposição inadequada nas cidades dos resíduos de natureza da atividade de construção civil.

### **3 METODOLOGIA DE PESQUISA**

#### **3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Para que os objetivos deste trabalho fossem plenamente atingidos, um projeto experimental foi desenvolvido de modo que pudesse otimizar o planejamento, a execução e a análise do material estudado em concretos produzidos com resíduos. Assim, foram analisadas algumas propriedades dos concretos feitos com este material no estado fresco e no estado endurecido, nos quais foram utilizados diferentes percentuais de substituição do agregado natural pelo reciclado proveniente dos resíduos de construção e demolição, para diferentes níveis de relação água/cimento.

O projeto experimental é constituído de ferramentas estatísticas cujo objetivo é analisar, com confiabilidade, os resultados obtidos nos ensaios experimentais e achar um ajuste ótimo de todos os parâmetros estudados, de forma que se consiga maximizar o desempenho dos experimentos como um todo, minimizando os custos e tomando os experimentos pouco suscetíveis a variáveis externas que não estão sendo medidas e que podem comprometer os resultados dos ensaios.

##### **3.1.1 Planejamento dos ensaios e projeto estatístico utilizado**

O planejamento dos ensaios requer, acima de tudo, um respaldo científico que possibilite a definição das variáveis a serem estudadas, além de facilitar a realização de uma avaliação estatística dos resultados e maximização das informações obtidas. O planejamento estatístico de experimentos também possibilita a definição de uma seqüência de ensaios econômica e eficiente.

As avaliações do produto final desse trabalho são percebidas como importantes porque possuem aspectos que podem ser medidos e que permitem quantificar as características de qualidade do produto final. Estes aspectos são transformados em variáveis de resposta que podem ser analisadas estatisticamente. Para os concretos produzidos a partir do agregado

reciclado, o objetivo é que os mesmos tenham um bom desempenho com relação à resistência e que sejam duráveis (MONTGOMERY, 2001).

Partindo de um dos objetivos do trabalho que é comparar o processo de corrosão das armaduras entre os concretos obtidos com agregados reciclados e os tradicionais, foram definidas as variáveis de resposta, que estão listadas a seguir:

- resistência à compressão, utilizada como um parâmetro de controle dos concretos ensaiados;
- taxa de corrosão das armaduras devido à ação de cloretos.

Para Ribeiro e Caten (2000), estas variáveis de respostas analisadas são também chamadas de variáveis dependentes, porque elas dependem de um conjunto de fatores experimentais que podem afetar os seus resultados. Esses fatores são chamados de variáveis independentes ou fatores controláveis, que são definidos previamente com a finalidade de conduzir a melhores valores de resposta. Estas variáveis independentes podem ser alteradas de acordo com os resultados que se deseja obter e podem ter algum efeito sobre os valores de respostas obtidos.

Muitos projetos de experimentos são realizados com duplo propósito: quantificar a relação entre a importância de algumas das variáveis de resposta mensuráveis e o conjunto de fatores experimentais que podem afetá-las; e encontrar os valores dos fatores que produzem o melhor, ou os melhores valores de resposta (MONTGOMERY, 2001).

Definidas então as variáveis de resposta que se deseja quantificar foram definidas as variáveis independentes, ou fatores controláveis. Neste caso, foram adotadas as seguintes variáveis:

- *relação água/cimento*: foram utilizados três níveis de relação água/cimento para que fosse permitido avaliar o comportamento do material estudado, contemplando diferentes faixas de resistência. Os valores para as relações água/cimento definidos foram 0,40; 0,60 e 0,80;
- percentuais de substituição do agregado: a combinação de substituição dos agregados variou de 0% a 100 % tanto para o agregado graúdo reciclado (AGR) quanto para o agregado miúdo reciclado (AMR), cujos percentuais são 0%, 50% e 100%. Estes valores foram definidos para que se pudesse fazer uma melhor

análise não só da influência da granulometria do agregado, mas também do teor de substituição que é incorporado ao concreto.

Utilizando três fatores controláveis (relação a/c, % AGR e % AMR), cada um a três níveis, o projeto estatístico adotado foi um fatorial cruzado, que consiste em investigar todas as combinações possíveis de níveis dos fatores. Os fatoriais cruzados são mais econômicos, porque necessitam de um número menor de repetições, e permitem que se possa avaliar possíveis interações e os valores dos fatores escolhidos obedecem a uma distribuição que permitirá construir modelos de comportamento bem mais estruturados (RIBEIRO e CATEN, 2000).

Dentro do intervalo definido para a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, observa-se o percentual 100% de agregados naturais para os três níveis de relação água/cimento. Isso se deve, principalmente, à heterogeneidade do material reciclado, sendo necessário um concreto com agregados naturais (de referência) para servir de parâmetro norteador nos ensaios e na interpretação dos resultados obtidos no experimento. Dessa forma, o projeto experimental consta de um total de 27 traços, dentre os quais, três são do concreto de referência.

Foram considerados quatro exemplares para cada traço e a repetição se deu construindo uma matriz com um projeto fatorial fracionado envolvendo as três relações água/cimento e os três percentuais de substituição do agregado. Este procedimento foi adotado em virtude das dificuldades técnicas que seriam enfrentadas se o projeto *fatorial cruzado* fosse rodado completamente duas vezes. Uma das dificuldades seria nos ensaios de durabilidade que requer bastante tempo e espaço físico para sua realização.

Alguns fatores durante a execução do experimento desta pesquisa foram mantidos constantes, são eles:

- *idade do concreto*: estabelecida como padrão a idade de 28 dias tanto para a avaliação da resistência mecânica quanto para o início dos ensaios de durabilidade (ação de cloretos) dos concretos executados. Não foi avaliada a evolução da resistência à compressão porque o objetivo não é estudar propriedades mecânicas e sim aspectos de durabilidade do material. Um outro

ponto que contribuiu para essa decisão foi com relação à falta de tempo e espaço disponibilizados para os ensaios;

- *pré-umidificação dos agregados reciclados*: esta decisão foi tomada para que o mesmo não absorvesse parte da água de amassamento do concreto, o que prejudicaria a trabalhabilidade e afetaria o valor da relação água/cimento.

Na tabela 10 estão dispostos todos os parâmetros do projeto fatorial cruzado completo e suas combinações, bem como o número de corpos-de-prova moldados para cada traço e ensaio, sendo considerado quatro exemplares por traços. Na tabela 11 é apresentado o projeto fatorial fracionado para a repetição do experimento.

De posse do planejamento dos experimentos e das variáveis analisadas, o programa experimental consistiu das seguintes etapas:

- seleção e caracterização dos materiais utilizados na execução dos concretos;
- estudo da dosagem dos traços, fixando-se um ajuste do teor ideal de argamassa e um abatimento do concreto;
- avaliação das propriedades mecânicas (resistência à compressão) e de durabilidade (ensaios eletroquímicos de resistência de polarização e potencial de corrosão).

Tabela 10: variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova do experimento completo

a/c	% AMR	% AGR	Nº de traços	Ensaio realizado	Nº de CP
0,40	0	0	9	Resist. à compressão	36
	50	0			
	100	0			
	0	50		e	
	50	50			
	100	50			
	0	100		Corrosão	
	50	100			
	100	100			
0,60	0	0	9	Resist. à compressão	36
	50	0			
	100	0			
	0	50		e	
	50	50			
	100	50			
	0	100		Corrosão	
	50	100			
	100	100			
0,80	0	0	9	Resist. à compressão	36
	50	0			
	100	0			
	0	50		e	
	50	50			
	100	50			
	0	100		Corrosão	
	50	100			
	100	100			
<b>Total</b>			<b>27</b>	<b>-</b>	<b>108</b>

Para os ensaios realizados, serão considerados quatro exemplares por traço

Tabela 11: variáveis analisadas no programa experimental e quantidade de corpos-de-prova do experimento fracionado

a/c	% AMR	% AGR	Nº de traços	Ensaio realizado	Nº de CP
0.40	0	0	4	Resist. à compressão	16
	100	0			
	0	100		e	
	100	100			
0.60	50	50	1		4
0.80	0	0	4	Corrosão	16
	100	0			
	0	100		-	
	100	100			
<b>Total</b>			<b>9</b>	<b>-</b>	<b>36</b>

### 3.1.2 Coleta da amostra e beneficiamento do resíduo

Com o propósito de se investigar as características e o comportamento desses materiais em diferentes regiões do país, resolveu-se optar pela utilização dos materiais provenientes da cidade de Maceió e fazer um comparativo com estudos já realizados com resíduos de outros locais, como cidades da região sul e sudeste, por exemplo.

A cidade de Maceió é uma das capitais brasileiras que ainda não possui uma usina de beneficiamento de resíduos de construção. Todo resíduo dessa natureza é coletado e uma parte é armazenada em aterros que recebem todo tipo de material, não só inerte, gerado na cidade. A outra parte é utilizada como aterro em terrenos e estradas não pavimentadas.

A amostra do resíduo foi proveniente de uma obra de demolição de uma escola (figura 6a e 6b). Apesar de ter sido uma amostra vinda diretamente de uma obra de demolição, não foram encontrados apenas restos de construção. Na amostra do resíduo foram encontrados, e conseqüentemente descartados papel, plástico, matéria orgânica e quaisquer outras impurezas que pudessem danificar a qualidade do concreto.



Figura 6: amostra de resíduo utilizada. (a) Vista geral da amostra. (b) Coleta da amostra para o transporte

A coleta se deu no local de demolição e foi transportada até o Núcleo de Pesquisas Tecnológicas (NPT) da Universidade Federal de Alagoas através de caçambas. Foi feita uma separação preliminar de impurezas e selecionada uma amostra de aproximadamente 7500 kg, da qual seria utilizada uma quantidade de aproximadamente 2000 kg nesta pesquisa.

Depois da etapa de coleta iniciou-se o beneficiamento do resíduo. O processo de britagem se deu através de um britador de mandíbulas (figura 7a), que possuía dois tipos de granulometria, uma para se obter o agregado graúdo e a outra para obter o agregado miúdo reciclados.

Terminada a fase de britagem, os resíduos, já transformados em agregados, foram peneirados em um peneirador mecânico (figura 7b) e separados de acordo com sua classificação granulométrica. Para o agregado graúdo foi separado todo material passante na peneira de 19 mm e retido na malha de 4,8 mm, e para o agregado miúdo foi separado todo material passante na peneira de 4,8 mm.



(a)



(b)

Figura 7: etapa de beneficiamento do resíduo. (a) Britador de mandíbulas para obtenção dos agregados. (b) Peneirador mecânico para separação do agregado miúdo e do agregado graúdo reciclado

Após essa etapa, os resíduos foram armazenados em tonéis de alumínio e transportados para Porto Alegre juntamente com os agregados naturais e o cimento Portland comercializados em Maceió para produção de concreto.

### 3.1.3 Composição média do resíduo utilizado

Após o beneficiamento do resíduo foi feita a determinação da composição gravimétrica do entulho com o objetivo de fazer uma análise da influência do comportamento deste material no concreto, e ainda fazer um comparativo da composição do resíduo da cidade de Maceió com outros locais que tinham sua composição conhecida.

A composição foi feita apenas para o agregado graúdo, pois não seria possível fazer um detalhamento macroscópico do agregado miúdo reciclado e dizer de qual tipo de material seria composto aquela fração miúda.

O processo de verificação da composição do material foi feito manualmente e identificados os diversos tipos de constituintes na amostra, como apresentado na figura 8. Foi encontrado material cerâmico, argamassa, concreto, cerâmica polida, entre outros materiais de menor percentual, como rochas naturais, telha de amianto, além de papel, plástico, madeira e metal. Impurezas ainda foram encontradas, apesar da mesma amostra já ter sido passada por uma limpeza preliminar para a retirada de elementos nocivos à qualidade do concreto que seria produzido.



Figura 8: determinação da composição média do resíduo de construção e demolição proveniente da cidade de Maceió.

Para a realização da composição dos resíduos, foram utilizadas duas amostras do mesmo material com aproximadamente 12 kg cada uma. O resultado da composição média do entulho está representado na tabela 12, bem como o percentual para cada tipo de material analisado.

Tabela 12: percentual do resíduo de construção e demolição da amostra coletada na cidade de Maceió

<b>Material</b>	<b>Amostra 1(%)</b>	<b>Amostra 2 (%)</b>	<b>Percentual médio</b>
Material cerâmico	48,43	47,88	48,15
Argamassa	28,62	27,02	27,82
Concreto	17,57	19,72	18,65
Cerâmica polida	3,10	3,02	3,06
Outros	2,28	2,36	2,32
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Nesta composição foi observado que determinados materiais tinham percentuais bastante baixos, como por exemplo os valores da composição de rochas naturais e telhas de amianto que tiveram suas composições em torno de 0,48% e 0,88%, respectivamente. Assim, optou-se por não apresentar esses componentes em um percentual separado e juntá-los àqueles materiais que também tiveram seus percentuais consideravelmente baixos.

A figura 9 apresenta a distribuição da composição do resíduo que foi estudado proveniente da cidade de Maceió.

Pode ser observado nesta figura o grande percentual de material cerâmico na composição dos resíduos utilizados nesta pesquisa. Ainda pode ser visto nestes resultados um grande percentual de argamassa, seguido também de um valor considerável de resíduos de concreto.

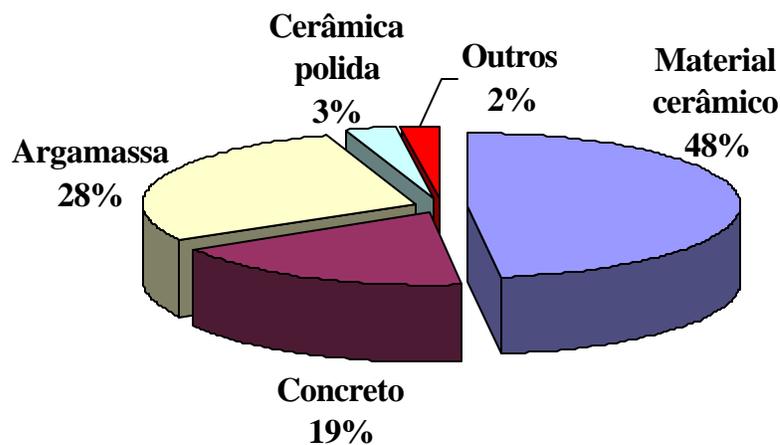


Figura 9: percentual da composição média dos resíduos de construção e demolição coletados na cidade de Maceió

Leite (2001), em seus estudos também apontou um grande percentual de argamassa na composição média dos resíduos provenientes da cidade de Porto Alegre. Por todo o país, nas pesquisas feitas sobre resíduos de construção e demolição, são apresentados valores de grande incidência desses materiais. Hendricks e Janssen (2001), Zordan (1997) e Chen et al. (2003) evidenciaram grandes percentuais de concreto, argamassa e materiais cerâmicos na composição dos resíduos em seus trabalhos. Na tabela 13 é possível fazer um comparativo dos percentuais de resíduos desses materiais dos autores citados, com a composição dos resíduos de construção e demolição utilizados neste trabalho, que pode ser visualizado na figura 9.

Tabela 13: comparativo da composição dos resíduos de construção e demolição

<b>Material</b>	<b>Chen et al. (2003)</b>	<b>Hendricks e Janssen (2001)</b>	<b>Zordan (1997)</b>	<b>Leite (2001)</b>	<b>Resíduo utilizado nesta pesquisa</b>
Concreto	43%	42%	21%	15%	19%
Argamassa	12%	6%	37%	28%	28%
Material cerâmico	35%	32%	21%	26%	48%
Outros	10%	20%	21	31%	5%

### 3.1.4 Seleção e caracterização dos materiais

#### 3.1.4.1 Cimento

Na execução dos concretos foi utilizado o cimento Portland composto CII F - 32 (Cimento Portland composto com filer, com 32 MPa de resistência à compressão aos 28 dias). Este tipo de cimento foi escolhido por não possuir adição pozolânica, fato este que pode influenciar nos resultados dos ensaios. Segundo a NBR 11578 (ABNT, 1991), o teor de adição de filer neste cimento fica entre 6 e 10% de material carbonático ( $\text{CaCO}_3$ ), não provocando com isso alteração nas constituições resistentes do cimento, pois o filer não reage quimicamente, ele tem a função de apenas preencher os vazios do cimento, não possuindo propriedades cimentantes e pozolânicas.

### 3.1.4.2 Agregados

Foram utilizados agregados naturais e reciclados para a produção dos concretos. As características físicas dos agregados estão descritas a seguir.

*Agregado miúdo natural:* a areia utilizada foi de origem quartzosa e utilizada toda a fração passante na malha de # 4,8 mm e descartada qualquer quantidade superior a esta granulometria.

*Agregado miúdo reciclado:* este material foi britado e peneirado e utilizado toda porção passante na peneira de # 4,8 mm (figura 10a).

*Agregado graúdo natural:* foi utilizada uma brita de origem granítica, possuindo uma dimensão máxima característica de 19 mm. O material foi lavado, retirando todo material pulverulento ou qualquer impureza que ele pudesse conter, sendo colocado ao ar livre para secar.

*Agregado graúdo reciclado:* tal como o agregado miúdo reciclado, este agregado foi britado e peneirado, definindo-se uma faixa granulométrica que passasse na peneira de malha # 19 mm e ficasse retido na peneira de # 4,8 mm (figura 10b). Este material não pôde ser lavado em função da facilidade de desagregação. Portanto, foi utilizado no mesmo estado em que estava depois de peneirado.



Figura 10: agregados reciclados utilizados. (a) Agregado miúdo. (b) Agregado graúdo

### *3.1.4.2.1 Composição granulométrica*

A importância de fazer uma análise granulométrica nos agregados se dá pelo fato de obter dados empíricos importantes para uma dosagem adequada do concreto. O módulo de finura, por exemplo, é um dado extraído dessa análise. Quanto maior o módulo de finura mais graúdo se torna o agregado. Isso infere de forma direta em algumas características físicas do agregado.

O aumento do tamanho dos grãos provoca uma diminuição na superfície específica, fazendo com que a mistura necessite de uma demanda menor de água, especialmente para o caso do agregado miúdo (NEVILLE, 1997). Ainda segundo o autor, a composição granulométrica dos agregados é um fator de grande importância na trabalhabilidade de concretos. Essa mesma propriedade, a trabalhabilidade, influencia em outros fatores como a demanda de água e de cimento, o controle da segregação e ainda possui efeito sobre a exsudação, o lançamento e o acabamento do concreto. Entretanto, não se pode balizar o comportamento de dois materiais distintos, como agregado natural e reciclado, apenas com dados obtidos de análise granulométrica. Outras propriedades também devem ser consideradas, principalmente quando está envolvida no problema a quantidade de água para a mistura.

A composição granulométrica dos agregados, naturais e reciclados, foi realizada seguindo as recomendações das normas NBR 7217 (ABNT, 1987) e NBR 7211 (ABNT, 1983). Os resultados são apresentados nas tabelas 14 e 15.

Apesar de estarem classificados em uma mesma graduação e terem uma mesma dimensão máxima característica, o agregado miúdo reciclado teve uma distribuição granulométrica diferente do agregado natural, apresentando uma distribuição bastante contínua, ou seja, as partículas de agregado de um certo tamanho se acomodam de modo que os vazios formados são preenchidos pelas partículas de tamanho inferior.

Tabela 14: composição granulométrica do agregado miúdo natural e reciclado

Agregado Miúdo Natural				Agregado Miúdo Reciclado			
Peneira (mm)	% retida	% acumulada	Método de ensaio (NBR)	Peneira (mm)	% retida	% acumulada	Método de ensaio (NBR)
4,8	0,9	1	7217 (1987)	4,8	0,7	1	7217 (1987)
2,4	3,8	5		2,4	15,6	17	
1,2	11,4	16		1,2	17,9	35	
0,6	27,1	43		0,6	17,8	53	
0,3	40,1	83		0,3	23,3	76	
0,15	15,3	98		0,15	15,4	91	
<0,15	1,4	100		<0,15	9,3	100	
Total	100	-		Total	100	-	
Dimensão máxima característica (mm)		4,8	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)		4,8	7217 (1987)
Módulo de finura		2,46		Módulo de finura		2,73	
Graduação		Zona 3 (Areia média)	7211 (1983)	Graduação		Zona 3 (Areia média)	7211 (1983)

Tabela 15: composição granulométrica do agregado graúdo natural e do reciclado

Agregado Graúdo Natural				Agregado Graúdo Reciclado			
Peneira (mm)	% retida	% acumulada	Método de ensaio (NBR)	Peneira (mm)	% retida	% acumulada	Método de ensaio (NBR)
25	0	0	7217 (1987)	25	0	0	7217 (1987)
19	2,6	3		19	1,1	1	
12,5	68,2	71		12,5	34,8	36	
9,5	26,4	97		9,5	32,1	68	
6,3	2,1	99		6,3	16,5	85	
4,8	0,6	100		4,8	8,4	93	
<4,8	0,1	100		<4,8	7,1	100	
Total	100	-		Total	100	-	
Dimensão máxima característica (mm)		19	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)		19	7217 (1987)
Módulo de finura		7,00		Módulo de finura		6,62	
Graduação		Brita 1	7211 (1983)	Graduação		-	7211 (1983)

Observa-se que o agregado graúdo reciclado apresentou um módulo de finura menor que o agregado natural. Para este caso, além de possuir um módulo de finura menor, o agregado graúdo reciclado precisará de mais água para envolver sua área superficial que o agregado natural devido a sua superfície porosa. O agregado graúdo reciclado, apesar de ter uma granulometria contínua, não se encaixou em nenhuma das faixas de graduação prescrita pela NBR 7211 (ABNT, 1983).

Resultados semelhantes, como módulo de finura menor e a não classificação do agregado graúdo reciclado dentro de uma faixa de graduação, também foram evidenciados por Leite (2001) em seu trabalho. Mesmo com as amostras tendo sido coletadas e beneficiadas em outra cidade, os resultados de composição granulométrica obtidos neste trabalho se assemelharam aos resultados obtidos na pesquisa da autora citada. A semelhança talvez tenha se dado na forma com o que a amostra foi selecionada e posteriormente britada para a obtenção dos agregados reciclados.

Para que os resultados das análises granulométricas sejam mais facilmente interpretados, são apresentados a seguir os gráficos das curvas granulométricas para os agregados miúdo e graúdo, permitindo perceber se a granulometria de uma amostra se enquadra em uma determinada especificação, ou se é muito grossa ou muito fina, ou deficiente de um determinado tamanho (NEVILLE, 1997). Os gráficos com as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo estão dispostos nas figuras 11 e 12.

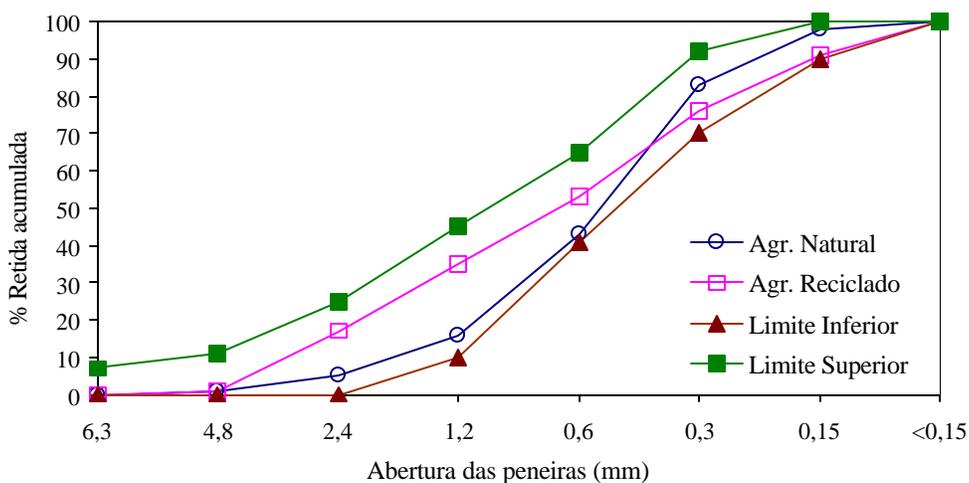


Figura 11: curvas granulométricas dos agregados miúdos, naturais e reciclados, bem como seus limites, inferior e superior

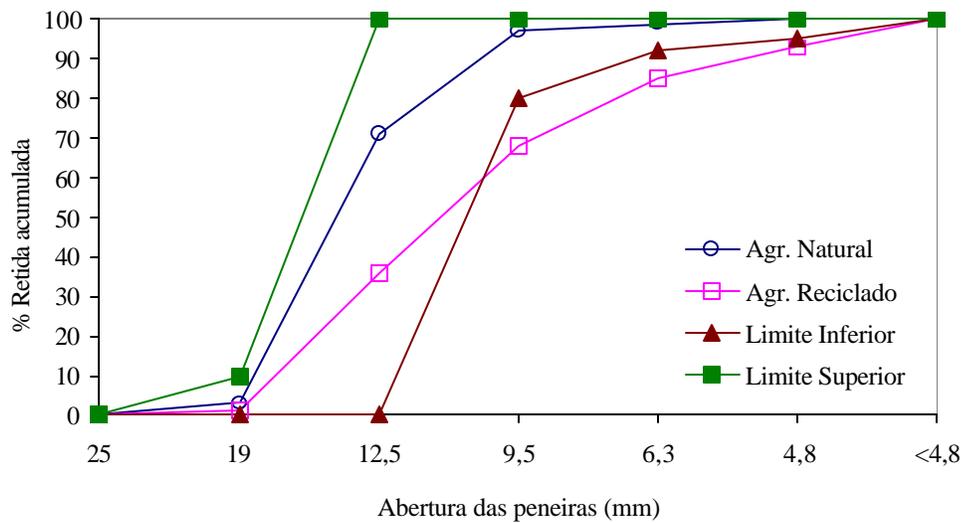


Figura 12: curvas granulométricas dos agregados graúdos, naturais e reciclados, bem como seus limites, inferior e superior

Os gráficos com as curvas granulométricas mostram os limites inferior e superior especificados pela NBR 7211 (ABNT, 1983) e evidenciam com mais clareza a não classificação do agregado graúdo reciclado em uma faixa de graduação e em nenhuma outra faixa especificada pela norma dentro dos limites inferior e superior de graduação da brita (figura 12). Ainda pode ser visto pelas curvas a granulometria contínua dos agregados, tanto do natural quanto do reciclado, para os agregados miúdo e graúdo. Isto, segundo Neville (1997), é benéfico para a produção de concretos, pois permite uma melhor combinação entre as partículas do agregado, aumentando o efeito de empacotamento entre os grãos.

#### 3.1.4.2.2 Massa específica

Na dosagem dos concretos foi necessário determinar os valores da massa específica dos agregados. Quando se estuda o controle da dosagem e consumo dos materiais é importante que se conheça o volume que é ocupado, incluindo-se os poros existentes nas partículas do agregado. Dessa forma, faz-se necessário conhecer o valor da massa específica que é definido, segundo a NBR 9937 (ABNT, 1987), como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas.

Para o agregado miúdo, natural e reciclado, foi determinada a massa específica seguindo as prescrições da NBR 9776 (ABNT, 1987), que recomenda o uso do frasco de Chapman.

O agregado graúdo natural teve sua massa específica determinada de acordo com a NBR 9937 (ABNT, 1987), com o uso de uma balança hidrostática.

Com o agregado graúdo natural, por ser um material frágil e bastante poroso, não foi possível se utilizar dessa norma. O procedimento normal dos ensaios seria prejudicado, pois a norma de ensaio para agregados graúdos recomenda fazer uma secagem superficial do material. Este tipo de procedimento, feito com o agregado reciclado, desagregaria o material e ainda, por ser muito poroso, a água dos poros poderia não estar sendo retirada na secagem. Assim, os resultados obtidos seriam valores provavelmente incorretos e acabaria prejudicando todo o processo de dosagem do concreto.

Leite (2001), apoiada na bibliografia internacional, desenvolveu um método que pudesse fazer essa medida, obtendo resultados confiáveis. O procedimento foi adaptado para o agregado graúdo reciclado e descrito em forma de proposta de norma. Deste modo, foi utilizado nesta pesquisa a proposta de norma da referida autora para a determinação da massa específica dos agregados graúdos reciclados.

O procedimento do ensaio faz uso de um picnômetro ou balão volumétrico de vidro com capacidade mínima de 1000 ml; uma balança hidrostática com resolução mínima de 0,1 g; uma bomba de vácuo de 88 kPa para remoção do ar presente nos agregados. A amostra a ser ensaiada neste procedimento deve ser coletada de acordo com a NBR 7216 (ABNT, 1982) e reduzida conforme a NBR 9941 (ABNT, 1987). Todo material passante na peneira de 4,8 mm deve ser desprezado, através de peneiramento, seguido de lavagem cuidadosa dos grãos, para retirada do material pulverulento.

A ordem de execução do ensaio foi a seguinte (LEITE, 2001):

- deixar a amostra em estufa por 24 horas;
- resfriar a amostra em temperatura ambiente e depois pesar uma quantidade entre 800 g e 1000 g. Determinar a massa da amostra seca em estufa (C).
- adicionar água à temperatura ambiente no recipiente de vidro. Quantidade suficiente para deixar toda amostra do agregado submersa, mas sem preenchê-lo totalmente;

- adicionar a amostra do agregado cuidadosamente no recipiente de vidro e deixar o conjunto tampado em repouso por 24 horas;
- aplicar o vácuo durante pelo menos 15 minutos, agitando o recipiente cuidadosamente em intervalos regulares para que haja a saída de ar entre os grãos do agregado;
- acrescentar água ao recipiente até preenchê-lo por completo;
- cobrir o recipiente com uma placa de vidro, de modo que não haja nenhuma bolha de ar aprisionado;
- determinar a massa do conjunto amostra+recipiente+água+placa de vidro (A);
- retirar a amostra do recipiente, lavá-lo e preenchê-lo com água. Cobrir o recipiente com a placa de vidro sem que haja nenhuma bolha de ar aprisionado no conjunto. Determinar a massa do recipiente+água+placa de vidro (B).

A massa específica do agregado graúdo reciclado é calculada através da expressão:

$$\tilde{\alpha} = \frac{C}{B - A + C} \quad (\text{equação 3.1})$$

onde:

$\gamma$  = massa específica do agregado graúdo, em kg/dm<sup>3</sup> ou g/cm<sup>3</sup>;

A = massa da amostra+recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

B = massa do recipiente+água+placa de vidro, expressa em g;

C = massa da amostra seca em estufa, expressa em g.

É importante que sejam efetuadas pelo menos duas medidas consecutivas desse ensaio com amostra do mesmo agregado. O resultado é a média entre os resultados de cada determinação.

O resultado do ensaio de massa específica dos agregados naturais e reciclados estão dispostos na tabela 16.

Tabela 16: resultados de massa específica dos agregados

Agregado	Tipo de material	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Relação com o agregado natural (%)
Graúdo	Natural	2,70	-
	Reciclado	2,52	93
Miúdo	Natural	2,62	-
	Reciclado	2,51	96

A massa específica do agregado miúdo reciclado é em torno de 4% menor em relação ao agregado miúdo natural e a variação da massa específica do agregado graúdo reciclado em relação ao natural ficou em torno de 7%.

Como foi observado, o valor das massas específicas dos agregados reciclados foram menores que os agregados convencionais. Na dosagem dos concretos, as massas desses materiais precisarão passar por uma compensação, para que não haja diferenças nos volumes de material quando forem utilizados agregados reciclados e convencionais nas misturas de concreto.

#### 3.1.4.2.3 Absorção de água dos agregados reciclados

Os agregados reciclados, diferentemente dos naturais, têm uma alta taxa de absorção de água devido a sua porosidade, no caso do agregado graúdo, e o percentual de materiais finos, no caso do agregado miúdo. Determinar essa taxa é imprescindível, pois ela determina o percentual de água que deverá ser suprido minutos antes de sua utilização nas concretagens para que não ocorram problemas como redução na relação água/cimento, abatimento e moldabilidade do concreto devido à falta de água.

Neste trabalho, o ensaio de absorção do agregado graúdo foi feito utilizando uma proposta de norma desenvolvida por Leite (2001), em seu trabalho. As normas NBR 9777 (ABNT, 1987) e NBR 9937 (ABNT, 1987), que determinam as taxas de absorção dos agregados naturais miúdos e graúdos, respectivamente, não puderam ser utilizadas, devido, principalmente, à grande porosidade e à fácil desagregação do material graúdo e a grande quantidade de finos do agregado miúdo, dificultando o procedimento normal do uso dessas normas.

O procedimento de ensaio foi realizado utilizando-se um recipiente com fundo e tampa revestidos com uma malha de 0,044 mm de abertura (figura 13a). A amostra foi seca em estufa por 24 horas e resfriada à temperatura ambiente. A fração do agregado foi posta no recipiente e submersa em água para verificação do ganho de massa (figura 13b). Esse monitoramento foi feito com auxílio de uma balança hidrostática com precisão de 0,1 g e realizado num período de 24 horas.

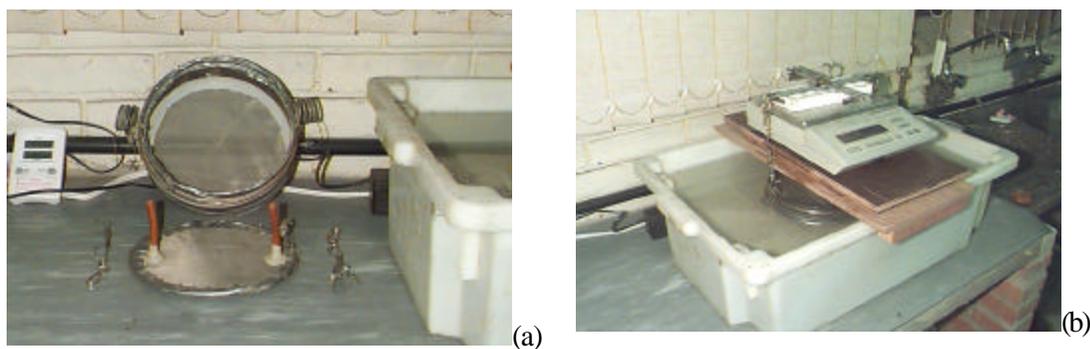


Figura 13: ensaio de absorção do agregado reciclado. (a) Recipiente utilizado no ensaio. (b) Execução do ensaio e balança hidrostática utilizada para anotação das medidas

O procedimento de cálculo foi o mesmo tanto para o agregado miúdo como para o graúdo. A taxa de absorção do material foi calculada através das equações 3.2 e 3.3 (LEITE, 2001).

$$A_{\text{sec } a} (\%) = \frac{M_{\text{sub-}f} - M_{\text{sub-}0}}{M_{\text{sec } a}} \quad (\text{equação 3.2})$$

$$A_{sub}(\%) = \frac{M_{sub-f} - M_{sub-0}}{M_{sub-0}} \quad (\text{equação 3.3})$$

onde:

$A_{seca}(\%)$  = taxa de absorção do material seco

$A_{sub}(\%)$  = taxa de absorção do material submerso

$M_{sub-f}(\%)$  = massa do material submerso no instante final em g

$M_{sub-0}(\%)$  = massa do material submerso no instante inicial em g

$M_{seca}(\%)$  = massa do material seco em estufa

Na tabela 17 estão apresentados os valores das taxas de absorção calculadas a partir das equações 3.2 e 3.3.

Tabela 17: taxa de Absorção dos agregados reciclados

Agregado reciclado	Absorção (%)		Absorção Média (%)
	Seco	Submerso	
Miúdo	7,50	14,65	11,08
Graúdo	4,07	8,00	6,04

De acordo com os resultados deste ensaio, pode ser observada uma taxa de absorção bastante alta para os agregados reciclados. Isso explica a necessidade de pré-umedecimento dos mesmos minutos antes da execução das concretagens. Ficou estabelecido que as taxas de absorção seriam compensadas para que os agregados não absorvessem toda a água do traço e as misturas se tornassem pouco trabalháveis devido à falta de água. Entretanto, esse procedimento precisa ser feito cuidadosamente, para que não haja um excesso de água na mistura, ocasionando um aumento da relação água/cimento e, conseqüentemente, uma diminuição nas resistências mecânicas dos concretos produzidos. Para evitar que fatos como esses ocorram, a compensação de água foi empregada na ordem de 50% da taxa de absorção dos agregados, tirada a partir da curva de absorção em 24 horas, e adicionada à água do traço para que não houvesse uma diminuição da relação água/cimento das misturas.

### 3.1.4.3 Água

A água utilizada nesta pesquisa foi água com condições de potabilidade proveniente da rede de abastecimento público.

### 3.1.4.4 Aditivo

O aditivo químico utilizado foi do tipo *superplastificante* à base de condensado de naftaleno sulfonado e seu uso é recomendado em teores de 0,5 a 3% sobre a massa de cimento.

Sua utilização foi indispensável na produção dos concretos que tem baixo consumo de água, como é o caso dos traços com relação água/cimento de 0,40. Ele terá a função de conservar a mistura com uma mesma quantidade de água, previamente estabelecida no estudo da dosagem, sem alterar as condições de trabalhabilidade fixadas pelo abatimento do concreto.

### 3.1.4.5 Armadura

Para os ensaios de durabilidade foram produzidos corpos-de-prova prismáticos com barras de aço inseridas neles. Também por razões práticas e dimensionais foram utilizadas barras de aço CA 60B e com diâmetro de 5 mm. Cada uma das barras tinha 12 cm de comprimento e foram feitos furos em uma das extremidades para que se pudesse fixar um fio de cobre para realização dos ensaios eletroquímicos. Para a limpeza das barras de aço foi utilizada uma Proposta de Norma desenvolvida por Lima, M., Lima, R. e Helene (1999), que prescreve a metodologia para limpeza das barras, para utilização em ensaios de laboratório, cuja função é avaliar a corrosão em armaduras. As barras foram submetidas à limpeza com uso de uma solução de ácido clorídrico e água deionizada na proporção de 1:1 de solução, como pode ser visto na figura 14. Este procedimento foi necessário, para que não houvesse nenhuma interferência de uma possível oxidação inicial, proveniente da própria barra, antes de serem utilizadas nas concretagens.



Figura 14: limpeza das barras de aço com solução de ácido clorídrico e água deionizada

### 3.1.5 Dosagem Experimental

Na produção dos concretos foi utilizado o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Neste método foi necessário montar um diagrama de dosagem que permite correlacionar a resistência à compressão do concreto, relação água/cimento, consumo de cimento e o abatimento do concreto. O traço é realizado fazendo-se um ajuste no teor ideal de argamassa para um determinado traço, chamado de traço intermediário, e fixando-se um valor de abatimento. Logo após são executados mais dois traços, um mais pobre e outro mais rico em cimento.

#### 3.1.5.1 Ajuste do teor ideal de argamassa

Para esta pesquisa a determinação do teor ideal de argamassa foi feita utilizando-se um traço médio de 1:5 (cimento:agregados) em massa. Com o concreto produzido com este ajuste a mistura obteve um teor ideal de argamassa de 47% e uma relação água/cimento de 0,56. Posteriormente foram feitos mais dois traços, sendo um mais rico (1:3) e outro mais pobre (1:7,5). A escolha desses traços foi realizada para que todos os níveis de relação água/cimento definidos pelo projeto estatístico, que varia de 0,4 a 0,8, fossem contemplados. A trabalhabilidade foi estabelecida conforme prescreve a NBR 7223 (ABNT, 1982), e fixado seu valor em  $70 \pm 10$  mm. Depois de estabelecidos os traços auxiliares foram realizadas as

dosagens experimentais com a moldagem de dois corpos-de-prova para cada traço. A realização dos ensaios de resistência à compressão foi feita aos 7 e 28 dias para a obtenção do diagrama de dosagem, como pode ser visto na figura 15.

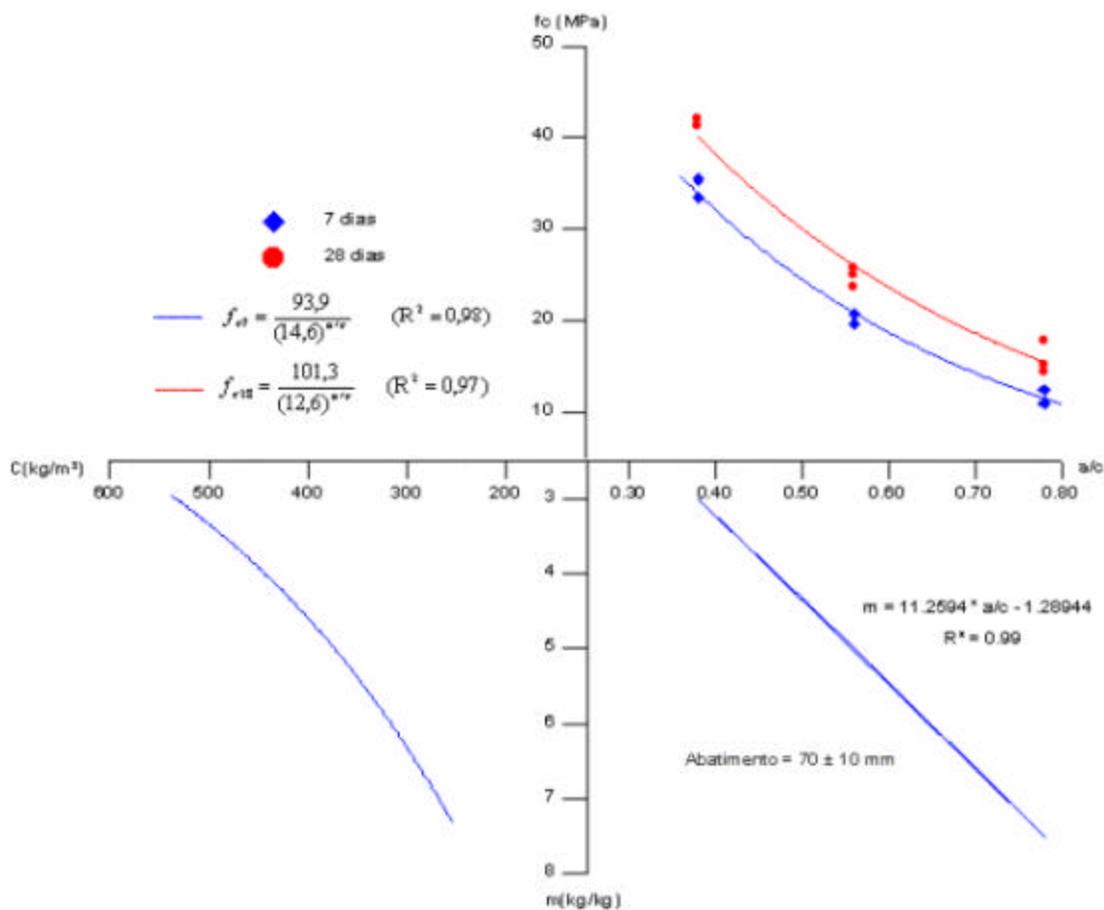


Figura 15: diagrama de dosagem dos concretos realizados

### 3.1.5.2 Definição dos traços e produção dos concretos com agregados naturais e reciclados

Foram realizados 27 traços ao todo, sendo que 3 deles são do concreto de referência, obtidos a partir do diagrama de dosagem. Na tabela 18 encontram-se os traços unitários para as três relações água/cimento utilizadas nesta pesquisa para o concreto de referência, bem como seus respectivos consumos de cimento.

Tabela 18: traços unitários em massa, quantitativos de materiais (kg) e consumo de cimento por metro cúbico de concreto para o concreto de referência

Teor de argamassa (%)	a/c	m	a	p	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )
47	0,40	3,24	0,99	2,25	511,44
	0,60	5,46	2,04	3,43	334,55
	0,80	7,69	3,08	4,60	248,57

Para os agregados reciclados também foram determinados traços unitários a partir dos concretos de referência, levando-se em conta o percentual de substituição e a compensação dos volumes pela redução das massas dos agregados reciclados. Essa redução é necessária porque os agregados reciclados possuem uma massa específica menor que os agregados naturais e se não houvesse essa compensação o volume de material reciclado seria maior comparado ao material natural, e o traço, por consequência, seria alterado. A compensação é calculada através da equação 3.4, que envolve os valores das massas específicas de cada material.

Os valores das massas específicas dos agregados são:

$$\text{Agregado miúdo natural: } \gamma_{\text{amn}} = 2,62 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Agregado miúdo reciclado: } \gamma_{\text{amr}} = 2,51 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Agregado graúdo natural: } \gamma_{\text{agn}} = 2,70 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{Agregado graúdo reciclado: } \gamma_{\text{agr}} = 2,52 \text{ kg/dm}^3$$

Os valores da compensação do volume são feitos pela equação 3.4:

$$M_{\text{ag reciclado}} = M_{\text{ag natural}} \times \frac{\tilde{a}_{\text{ag reciclado}}}{\tilde{a}_{\text{ag natural}}} \quad (\text{equação 3.4})$$

onde:

$M_{\text{ag reciclado}}$  = Massa do agregado reciclado em kg

$M_{\text{ag natural}}$  = Massa do agregado natural em kg

$\gamma_{\text{ag reciclado}}$  = Massa específica do agregado reciclado em kg/dm<sup>3</sup>

$\gamma_{\text{ag natural}}$  = Massa específica do agregado natural em kg/dm<sup>3</sup>

Essa equação foi usada tanto para o agregado miúdo quanto para o agregado graúdo reciclado e seus valores estão dispostos na tabela 19.

Tabela 19: traços unitários e quantitativos de materiais utilizados para os concretos com 50% e 100 % de substituição do agregado natural pelo reciclado (kg)

Traços unitários				50% Agregados reciclados				100% agregados reciclados	
a/c	m	a	p	Areia Natural	Areia Reciclada	Brita Natural	Brita Reciclada	Areia Reciclada	Brita Reciclada
0,40	3,24	0,99	2,25	3,32	3,18	7,5	7,00	6,35	14,00
0,60	5,46	2,04	3,43	4,46	4,27	7,5	7,00	8,55	14,00
0,80	7,69	3,08	4,60	5,02	4,81	7,5	7,00	9,62	14,00

### 3.1.5.2.1 Mistura dos materiais e moldagem dos corpos-de-prova

Na mistura dos materiais seguiu-se a ordem empregada: após imprimação da betoneira coloca-se a brita, metade da água, o cimento, metade da água com o aditivo superplastificante e finalmente, a areia. O aditivo foi colocado misturado à água e antes da areia para que seu efeito fosse mais eficaz sobre os grãos de cimento.

Devido à alta absorção dos agregados reciclados seu efeito também foi compensado fazendo-se uma pré-umidificação dos agregados antes dos mesmos serem utilizados na concretagem. O processo se dava cerca de dez minutos antes da mistura dos materiais para a concretagem, e o percentual variou de acordo com a taxa de absorção do material.

A trabalhabilidade dos concretos produzidos foi avaliada de acordo com as prescrições da NBR 7223 (ABNT, 1982) - *Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. A trabalhabilidade foi considerada como um parâmetro de caráter qualitativo nos ensaios cujo objetivo é de apenas controlar a produção dos concretos produzidos

A determinação do abatimento foi feita seguindo as recomendações da NBR 7223 (ABNT, 1982). O abatimento foi fixado em  $70 \pm 10$  mm, tanto para o concreto de referência quanto para o reciclado, embora o material reciclado muitas vezes não atingia o valor do abatimento ficando muitas vezes abaixo desse intervalo. Porém, na maioria dos casos as misturas se mostravam trabalháveis mesmo não obtendo o valor do abatimento fixado. As medidas dos abatimentos podem ser vistas na figura 16.

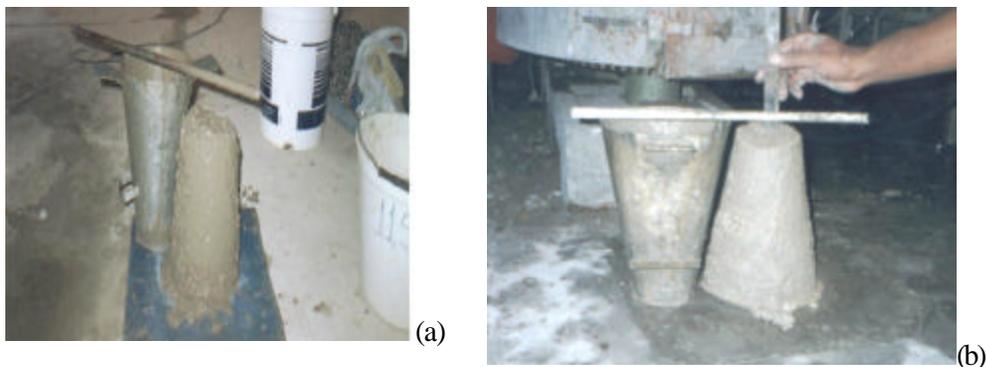


Figura 16: medida do abatimento em concretos com agregados naturais e reciclados. (a) concreto com agregados naturais. (b) concreto com agregados reciclados

A tabela 20 apresenta os valores dos abatimentos obtidos para todos os traços produzidos, bem como o percentual de aditivo superplastificante utilizado nas concretagens.

Tabela 20: quantitativos dos percentuais de aditivo e abatimento dos concretos produzidos

a/c	%AMR	%AGR	Aditivo (%)	Abatimento (mm)
0.4	0	0	-	75
0.4	50	0	0.3	70
0.4	0	100	2.0	10
0.4	100	100	2.0	15
0.4	100	0	1.0	110
0.4	0	50	2.0	125
0.4	50	50	3.0	0
0.4	50	100	2.1	25
0.4	100	50	2.0	45
0.6	0	0	-	75
0.6	50	0	1.0	65
0.6	0	100	2.0	25
0.6	100	100	3.0	0
0.6	100	0	0.3	65
0.6	0	50	0.2	80
0.6	50	100	3.0	0
0.6	100	50	3.0	25
0.8	0	0	-	65
0.8	50	0	0.8	65
0.8	0	100	3.0	0
0.8	100	100	3.0	0
0.8	100	0	0.2	50
0.6	50	50	2.5	20
0.8	0	50	2.0	15
0.8	50	50	1.2	25
0.8	50	100	3.0	0
0.8	100	50	3.0	0

Após as concretagens foram moldados corpos-de-prova de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 1994). Para cada traço de concreto foram moldados 4 corpos-de-prova, sendo dois cilíndricos de dimensões 9,5 x 19,5 cm (diâmetro x altura) e dois prismáticos de dimensões 10 x 10 x 6 cm (comprimento x largura x altura). O adensamento dos corpos-de-prova foi feito através de processo mecânico. A cura dos mesmos foi feita armazenando-os em um local seco e cobertos com um saco plástico para evitar a saída de água por evaporação nas primeiras 24 horas. Após esse período os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados em câmara úmida até a idade de 28 dias nos quais seriam ensaiados.

### 3.1.6 Propriedades avaliadas – ensaios

#### 3.1.6.1 Resistência à compressão axial

Os corpos-de-prova submetidos ao ensaio de compressão axial seguiram os padrões estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 1994) - *Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*, na idade de 28 dias.

#### 3.1.6.2 Ensaio de durabilidade

Para a avaliação do comportamento dos concretos produzidos com agregados reciclados sob o processo de corrosão da armadura iniciada por ação de íons cloreto, foram realizados ensaios de resistência de polarização e potencial de corrosão em corpos-de-prova prismáticos.

A despassivação da armadura do concreto reciclado por íons cloreto foi obtida através de ciclos alternados de imersão e secagem dos corpos-de-prova em uma solução agressiva de 3,5% de NaCl, simulando um ambiente marinho que contém teores suficientes de sais que possam despassivar as barras de aço do concreto. Os ciclos de imersão e secagem aceleram o processo de corrosão, pois uma vez imersos e saturados de cloretos, quando postos em um ambiente para secagem, ocorre uma diminuição da umidade e possibilitam a entrada e difusão de oxigênio. Com isso, a água evapora e permanecem nos poros do concreto os sais que se

transformam em cloretos livres, atingindo a armadura e destruindo sua camada de proteção (filme óxido), podendo provocar o fenômeno de corrosão.

Os corpos-de-prova permaneceram neste ciclo por um período de 150 dias ficando dois dias imersos na solução e cinco dias expostos num painel de lâmpadas para a secagem. As figuras 17a e 17b apresentam os corpos-de-prova nos ciclos de imersão e secagem respectivamente.

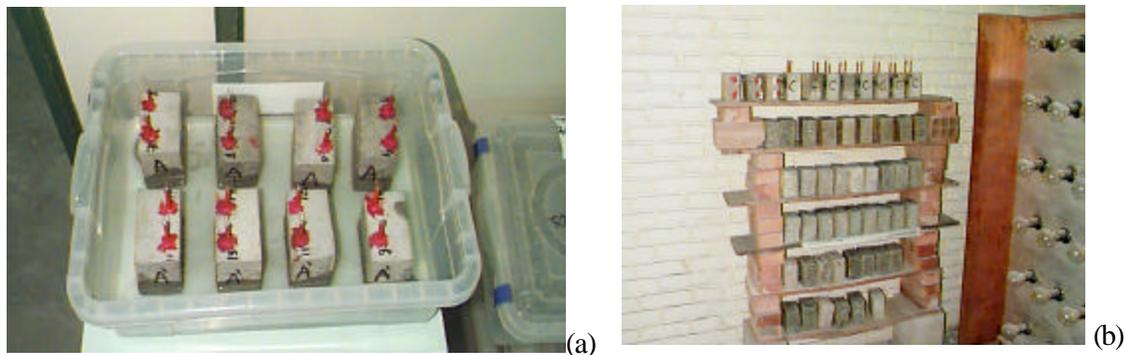


Figura 17: ciclos de imersão e secagem dos CP's. (a) Imersão na solução de cloretos. (b) painel para secagem dos corpos-de-prova

#### 3.1.6.2.1 Resistência de polarização, potencial de corrosão

Depois de curados em câmara úmida, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios de corrosão de forma acelerada.

A resistência de polarização ( $R_p$ ) representa o quanto um sistema formado por concreto e aço pode desenvolver um processo eletroquímico de corrosão. De acordo com Cascudo (1997), para o estudo particular da corrosão de armaduras, o referido sistema é o conjunto aço/eletrólito/concreto, sendo, que, quanto maior a resistência de polarização, menor será a velocidade de corrosão encontrada. Esta técnica infere, de forma quantitativa, sobre a taxa ou velocidade de corrosão e baseia-se na utilização de um estímulo de uma corrente contínua aplicada à armadura, exercendo uma polarização ao redor do potencial de corrosão livre ( $E_{corr}$ ). Este potencial está no estado estacionário de corrosão, ou seja, todos os elétrons liberados nas reações anódicas são consumidos nas reações catódicas, formando um equilíbrio.

O ensaio de resistência de polarização, segundo Gonzalez (1989), consiste em fazer uma varredura aplicando pequenos valores de potencial em torno do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), registrando a medida da corrente de polarização. Com isso, os valores para a resistência de polarização ( $R_p$ ) do aço são calculados com a relação entre a variação do potencial, a partir do potencial de corrosão ( $\Delta E_{corr}$ ) e a intensidade de corrente medida ( $\Delta I$ ) e se expressa pela fórmula da equação 3.5:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I} \quad (\text{equação 3.5})$$

As medidas eletroquímicas dos ensaios de resistência de polarização ( $R_p$ ), potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ), foram feitas usando um potenciostato da ACM Instruments (Modelo Gill AC) e um eletrodo de referência de CU/CuSO<sub>4</sub>. Como contra eletrodo, foi usada uma chapa de aço inoxidável. O contato eletroquímico entre o eletrodo de referência e o concreto é feito usando uma esponja umedecida em uma solução feita com detergente diluído em água (ASTM C876/91). Um potencial variável é aplicado, indo de -10mV a +10mV em relação ao potencial de corrosão, a uma taxa de 10 mV/min. Os valores da corrente de polarização são medidos em aproximadamente 20 leituras por teste, e a partir daí é calculada a resistência de polarização, a qual mede a intensidade instantânea de corrosão das barras de aço submetidas ao ensaio (ABREU, 2001). A técnica eletroquímica utilizada neste ensaio assume um caráter pouco perturbativo no processo. Independente do valor do potencial que está sendo aplicado na barra, o potencial do eletrodo que está sendo analisado retorna a um valor, próximo do seu valor inicial, inerente ao valor do potencial de corrosão que está submetido a barra. O monitoramento da despassivação da armadura seguiu os critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão, de acordo com a ASTM C 876/91, cuja tabela de comparação da probabilidade de corrosão das armaduras poderá ser visualizada na tabela 22 do item 5.2.1.

O dado principal e mais relevante neste ensaio está na obtenção do valor da intensidade de corrosão que é obtida calculando-se primeiramente o valor da corrente de corrosão. Depois de obtido o valor de  $R_p$ , experimentalmente, faz-se uso da equação de Stern-Geary (CASCUDO, 1997) para a obtenção desse valor. A corrente de corrosão instantânea é calculada pela equação 3.6:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,3 \cdot (\beta_a + \beta_c)} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta E} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{equação 3.6})$$

onde:

$I_{\text{corr}}$  = corrente de corrosão

$\beta_a$  e  $\beta_c$  = constantes anódicas e catódicas determinadas experimentalmente por métodos gráficos

$\Delta I$  = variação na corrente aplicada

$\Delta E$  = variação no potencial

$B$  = constante de Stern-Geary, dependente das contribuições das reações anódicas e catódicas

O valor de  $B$ , segundo Andrade et al. (1988), citados por Cascudo (1997), pode ser adotado de acordo com o estado, passivo ou ativo, de corrosão das armaduras dentro do concreto. Os valores de  $B$  situam-se entre 13 e 52 mV, obtidos pelos autores a partir de ensaios de polarização com barras de aço numa solução saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Assim, os valores assumidos para a referida constante foram de 26 mV, para a armadura no estado ativo (mais negativo que  $-350$  mV) de corrosão, e 52 mV, para a armadura em estado passivo (mais positivo que  $-200$  mV). Para valores entre  $-200$  e  $-350$  mV, que estabelece uma probabilidade incerta da atividade de corrosão, o valor de  $B$  foi adotado de acordo com o valor obtido para a resistência de polarização ( $R_p$ ). Sendo assim, quanto maior o valor de  $R_p$ ,  $B$  assumia de 26 mV, e quanto menor  $R_p$ , o valor de  $B$  estabelecido foi 52 mV.

Nesta pesquisa foram utilizados esses mesmos valores para a determinação da corrente de corrosão instantânea.

Dividindo-se o valor de  $I_{\text{corr}}$  pela área da barra polarizada tem-se a taxa ou velocidade de corrosão, caracterizada pela densidade de corrente de corrosão. Este valor é o parâmetro mais importante para a avaliação do estado de corrosão das barras de aço do concreto. Ele determina o estado em que se encontra a armadura e ainda é uma ferramenta importante para

a previsão de vida útil nas estruturas que têm esse tipo de problema. O valor da densidade de corrente é dado pela equação 3.7.

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{corr}}}{A} \quad (\text{equação 3.7})$$

onde:

$i_{\text{corr}}$  = densidade de corrente, taxa ou velocidade de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

$I_{\text{corr}}$  = corrente de corrosão ( $\mu\text{A}$ )

$A$  = área da barra que foi polarizada ( $\text{cm}^2$ )

As figuras 18a e 18b apresentam a realização do ensaio de resistência de polarização onde é aplicada a técnica descrita neste item.

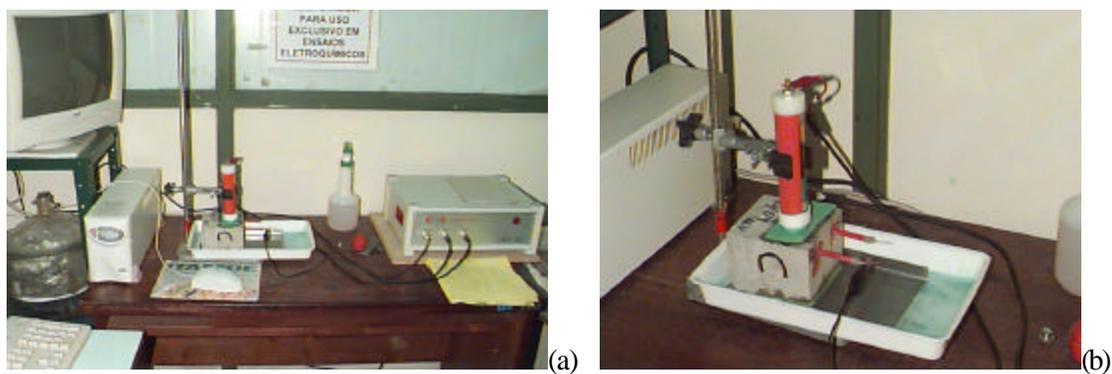


Figura 18: ensaio de resistência de polarização. (a) equipamentos utilizados no ensaio. (b) aplicação da técnica no corpo-de-prova

## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CONCRETO**

Neste capítulo foram analisados os resultados dos ensaios de resistência à compressão de todos os concretos produzidos. A análise dos resultados foi feita realizando uma separação nos níveis de resistência e nos diferentes percentuais de substituição do agregado natural pelo reciclado. Esse critério foi estabelecido em virtude dos concretos possuírem classes distintas de resistências e para que se pudesse ter uma noção do comportamento do teor de substituição do agregado reciclado nos concretos confeccionados.

### **4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL**

Essa propriedade é de grande relevância na avaliação do desempenho de estruturas de concreto. Nos projetos estruturais e no controle da qualidade é a resistência que se apresenta como o parâmetro mais valorizado e está diretamente ligada à capacidade dos elementos de resistir a esforços sem que haja ruptura. Além disso, é a propriedade mais especificada em projetos de estruturas de concreto. Isso se deve pela relativa facilidade de realizar o ensaio, quando comparado com os de outras propriedades como, por exemplo, módulo de elasticidade, permeabilidade, resistência a intempéries, entre outras.

Os projetistas mais antigos imaginavam que obras realizadas em concreto possuíam uma vida útil infinita, e não se preocupavam com os critérios de durabilidade e manutenção dessas estruturas. Embora esse pensamento tenha permanecido por algum tempo, atualmente existe uma grande conscientização, por parte dos profissionais da área, da necessidade de construir obras duráveis e de qualidade, com acompanhamento constante.

Em materiais como o concreto, que possui várias fases, existem outras propriedades que podem tornar limitante a resistência do concreto. Em muitos casos a durabilidade e a impermeabilidade podem ser mais importantes. Porém, a resistência dá uma indicação da qualidade do concreto pelo fato de estar relacionada com a pasta de cimento endurecida. A porosidade da matriz, que é a estrutura da pasta de cimento endurecida, e a zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo, são os fatores que determinam a resistência dos concretos mais utilizados (NEVILLE, 1997).

Neste trabalho a resistência à compressão dos ensaios experimentais foi analisada estatisticamente, estudando-se a influência dos fatores independentes nos concretos produzidos. Foram eles, a relação água/cimento ( $a/c$ ), o percentual de agregado miúdo reciclado (%AMR) e o percentual de agregado graúdo reciclado (%AGR). Os resultados foram analisados através do método de análise de variância e análise de regressão múltipla, para testar se os fatores controláveis ( $a/c$ , %AMR, %AGR) e suas interações seriam significativos, ou não, na variável de resposta (resistência à compressão) medida. Com base nessa análise, chegou-se a um modelo, cuja função pode ser mostrada através da equação 4.1.

A equação 4.1 está ajustada para valores codificados das variáveis utilizadas e cujos valores, reais e codificados, estão apresentados na tabela 21.

$$f_c = 23,13 + \frac{12,76}{a/c} + 14,43 \times AMR - \frac{3,45 \times AMR}{a/c} - 12,71 \times AMR \times AGR - \frac{7,51 \times a/c}{AMR \times AGR}$$

(equação 4.1)

Onde:

AMR – percentual de agregado miúdo reciclado, codificado segundo a tabela 21

AGR – percentual de agregado graúdo reciclado, codificado segundo a tabela 21

$a/c$  – relação água/cimento, codificado segundo a tabela 21

De acordo com a equação 4.1 os fatores significativos foram  $a/c$ , AMR e suas interações,  $a/c \times AMR$ ,  $AMR \times AGR$  e  $a/c \times AMR \times AGR$ . O coeficiente de correlação ( $r^2$ ) do modelo foi de 0,9987.

Tabela 21: níveis reais e codificados para as variáveis utilizadas

Relação a/c	Nível real	0,40	0,60	0,80
	Nível codificado	0,5	1,0	1,5
% AMR	Nível real	0%	50%	100%
	Nível codificado	0,5	1,0	1,5
% AGR	Nível real	0%	50%	100%
	Nível codificado	0,5	1,0	1,5

#### 4.1.1 Efeito da relação a/c na resistência à compressão axial do concreto

Sob a ótica da resistência à compressão, a relação água/cimento é, normalmente, o fator mais importante. A relação água/cimento afeta a porosidade tanto da matriz como da zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo.

A figura 19 mostra o gráfico do comportamento da relação água/cimento sobre a resistência do concreto. O gráfico foi obtido com os valores médios dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, na análise de variância.

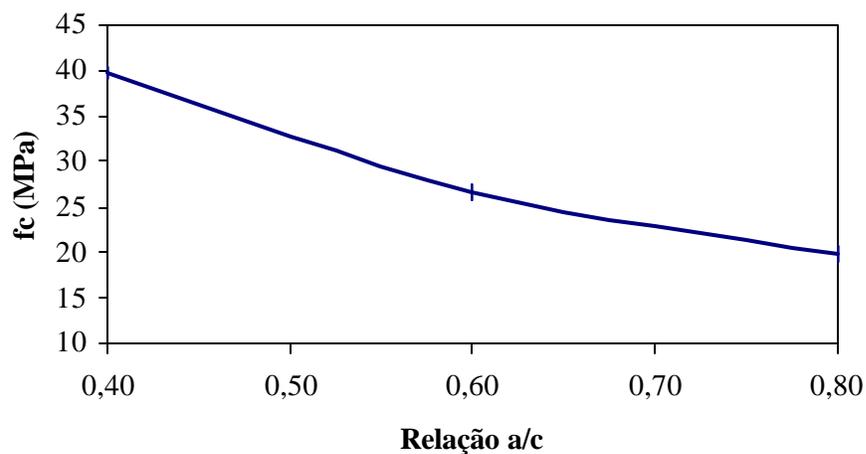


Figura 19: efeito isolado da relação água/cimento sobre a resistência à compressão aos 28 dias.

De acordo com o gráfico, quanto menor a relação água/cimento maior a resistência à compressão, conforme esperado. As leis que regem o comportamento do concreto em função da relação a/c, e mundialmente conhecidas e difundidas, são comprovadas. Como foi dito anteriormente, a relação a/c afeta a porosidade da matriz. Com o seu aumento, acarreta uma quantidade de água livre no concreto, que não foi aproveitada nas reações de hidratação do cimento. Essa água livre é responsável pela formação da porosidade, e com isso uma diminuição na resistência. Vale ressaltar, entretanto, que o gráfico obtido mostra apenas uma tendência desse comportamento e que outros fatores também estão envolvidos, como %AMR, que apresentou resultado significativo, e será mostrado a seguir.

#### 4.1.2 Efeito isolado do %AMR e do %AGR sobre a resistência à compressão axial do concreto

Quando uma mistura de concreto feito com agregados reciclados é realizada, é preciso levar em conta fatores como porosidade e resistência do próprio agregado. Com agregados convencionais, o concreto tem sua ruptura normalmente na zona de transição. Para os agregados reciclados, isso dificilmente acontecerá devido a sua baixa resistência, ocasionando a ruptura do concreto no próprio agregado. O gráfico da figura 20 apresenta os efeitos isolados dos percentuais de substituição do AMR e do AGR, calculados a partir da equação 4.1, bem como a tendência de comportamento dos agregados reciclados com o aumento do percentual de substituição, considerando os níveis codificados dos percentuais e fixando no ponto médio (0,60), também em níveis codificados, o valor da relação a/c.

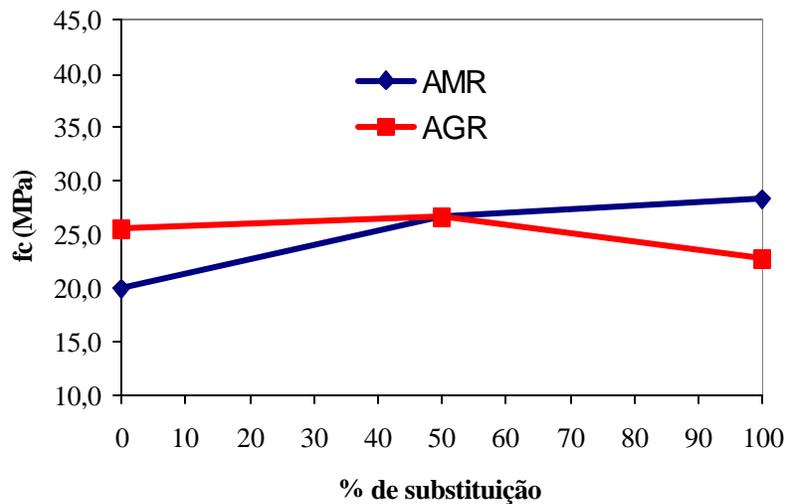


Figura 20: efeito isolado do percentual de substituição do agregado sobre a resistência do concreto

De acordo com o gráfico, quanto maior o percentual de agregado miúdo reciclado, maior tende a ser a resistência. O contrário acontece com o agregado graúdo reciclado, ou seja, quanto maior o percentual, a partir de 50%, menor a resistência. Como já foi dito anteriormente, isso pode ser explicado devido a sua baixa resistência e alta porosidade. Para os agregados miúdos, o aumento da resistência pode ser explicado por fatores como, textura, granulometria contínua e grande quantidade de finos, possibilitando misturas mais compactas.

O comportamento do percentual dos agregados reciclados sobre a resistência do concreto, também foi observado por Leite (2001). Em seus estudos, a autora concluiu que o aumento do teor de substituição do agregado graúdo reciclado diminuía a resistência à compressão. Com relação ao agregado miúdo reciclado, o aumento do percentual de substituição provocou aumento da resistência, motivo pelo qual, segundo a autora, deve-se a influência da granulometria mais contínua, da maior quantidade de finos, que diminuem a segregação e contribuem para o fechamento dos vazios, além de um possível efeito pozolânico.

### 4.1.3 Efeito da interação $a/c \times AMR$ sobre a resistência à compressão do concreto

O gráfico da figura 21 mostra o efeito do percentual de substituição do AMR nos concretos produzidos, em função da relação  $a/c$ . Para a análise estatística foram utilizados os valores codificados dos fatores  $a/c$  e % AMR e fixado no ponto médio o % AGR (50%).

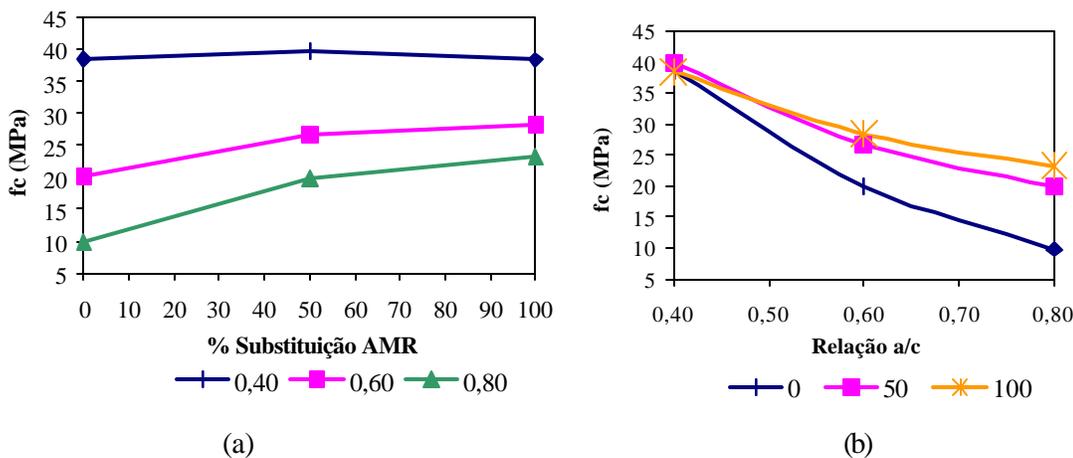


Figura 21: resistência à compressão em função da interação  $a/c \times AMR$ .  
 (a)  $f_c$  em função do %AMR, para as diferentes relações  $a/c$ . (b)  $f_c$  em função da relação  $a/c$  para os diferentes teores de AMR.

De acordo com os gráficos, para as três relações água/cimento estudadas, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado, maior a resistência à compressão, exceto para o percentual de 100% de AMR e relação  $a/c = 0,40$ , em que não houve variação significativa.

O crescimento da resistência aumenta, à proporção que também aumenta a relação água/cimento. Foi observada uma elevação mais acentuada (da ordem de 68,5%) da resistência, para  $a/c = 0,80$ , quando os percentuais variaram de 0 para 100% de substituição. Nesse caso, o efeito dos materiais finos é mais acentuado para compensar o baixo consumo de cimento. Com relações água/cimento menores também houveram ganhos, de menores proporções, mas o suficiente para se tornarem diferenças significativas em relação ao concreto de referência. Para  $a/c = 0,60$  os ganhos foram de 41,3% quando os percentuais também

variaram de 0 para 100% de substituição do agregado miúdo reciclado. Para relação  $a/c = 0,40$  os resultados permaneceram em mesma ordem de equivalência dos concretos de referência.

As características desses agregados, como textura e granulometria, influenciam positivamente o aumento da resistência. Os agregados reciclados apresentam um grande percentual de finos que ajudam a mistura a ter um efeito de empacotamento, de compactação e proporcionam um maior fechamento dos vazios. Além disso, por possuir maior absorção, o agregado reciclado permite uma maior aderência entre a pasta e o agregado, através da absorção da pasta e da precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado. Nos concretos com substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, todos estes aspectos são significativos para o aumento da resistência (LEITE, 2001; NEVILLE, 1997).

Estes resultados contrariam Mehta e Monteiro (1994), que afirmam que a fração miúda do agregado reciclado contém pasta endurecida de cimento e seu uso é inadequado para a produção de concretos, diminuindo a sua resistência.

Ainda de acordo com o gráfico da figura 21b, é possível observar que o comportamento da curva  $f_c \times a/c$  para os concretos produzidos com agregados reciclados é semelhante ao da curva do concreto de referência. Evidentemente, podem ser encontradas algumas variações nos resultados, mas a configuração do comportamento é a mesma, ou seja, quanto maior o percentual de substituição do agregado miúdo reciclado maior é o valor da resistência à compressão.

#### 4.1.4 Efeito da interação $a/c \times AGR$ sobre a resistência à compressão axial do concreto

Na figura 22 é mostrado o gráfico do efeito do teor de substituição do agregado graúdo reciclado na resistência do concreto, para as diferentes relações água/cimento. Apesar de não ter sido um fator significativo na análise estatística, resolveu-se analisar os efeitos do percentual de substituição desse agregado, em função da relação  $a/c$ , sobre a resistência à compressão dos concretos produzidos. Os valores foram calculados a partir da equação 4.1,

cujos fatores controláveis (a/c e %AGR) foram considerados em níveis codificados e fixando o teor de AMR no seu ponto médio (50%), também em níveis codificados.

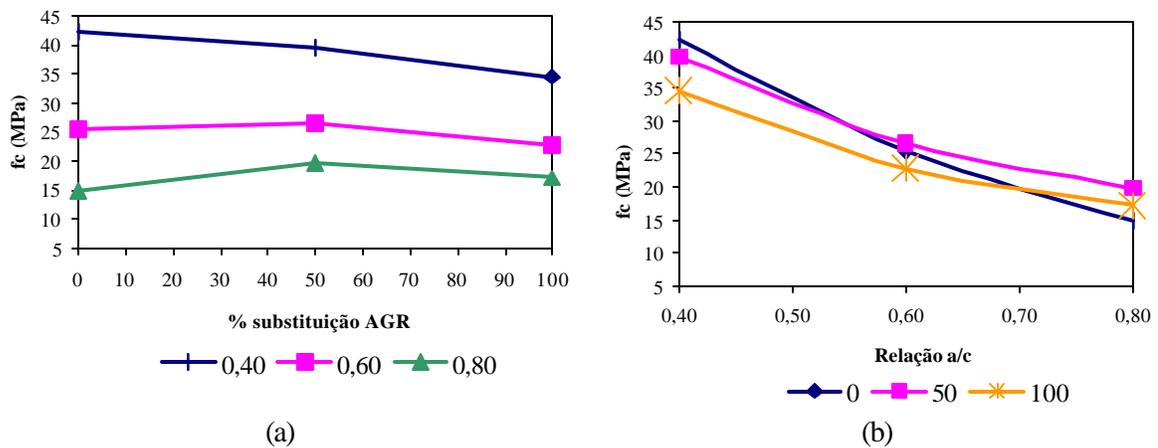


Figura 22: resistência à compressão em função relação água/cimento e do %AGR. (a)  $f_c$  em função do % AGR. (b)  $f_c$  em função da relação a/c para diferentes %AGR.

Para os concretos ensaiados, quanto menor a relação água/cimento e um maior percentual de substituição do agregado graúdo reciclado, menores foram os valores das resistências. Esse resultado pode ser atribuído a alguns fatores, como a baixa resistência e densidade do grão do agregado. Em concretos com relação a/c menores, a resistência tende a ser alta. Por conta disso, o agregado graúdo reciclado torna-se um fator limitante na resistência de misturas com baixa relação a/c, em função da sua baixa resistência. Os concretos com relação a/c mais baixas possuem uma menor demanda de água, e quando se realiza misturas com agregados reciclados, que absorve grande parte da água do traço, dificulta a trabalhabilidade do concreto. Hansen (1992) afirma que o efeito negativo do percentual de agregados graúdos reciclados no concreto, pode ser minimizado se for utilizado em relações a/c maiores, pois, apesar de possuir alta taxa de absorção, a resistência à compressão não fica limitada à resistência do agregado, mas sim, pela resistência da pasta de cimento endurecida.

A grande demanda de água requerida na produção desses concretos deve-se ao fato de que grande parte da composição dos agregados era constituída de material cerâmico e outros tipos de materiais bastante porosos e que, apesar de terem sido submetidos a uma pré-molhagem antes da concretagem, ainda absorvia grande parte da água. Isso dificultou o processo de trabalhabilidade e moldabilidade das misturas. Um outro ponto a ser levantado sobre esse assunto, diz respeito à compensação de água, feita através da taxa de absorção dos materiais

reciclados, na qual poderia ter utilizado um percentual maior do que 50% de compensação da absorção. Porém, como já haviam sido produzidos alguns traços, compensados com este percentual de 50%, optou-se por não alterar o valor da compensação da absorção.

Os concretos realizados com 100% de substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado e relação  $a/c$  de 0,40 e 0,60 se tornaram difíceis no que diz respeito à moldabilidade, possuindo misturas com uma textura bastante áspera e, por consequência, ocorrendo uma diminuição na resistência. A curva de comportamento entre a resistência e a relação água/cimento não seguiu o mesmo padrão da curva com relação ao %AMR, ficando alguns valores abaixo da curva de referência, como pode ser visto na figura 22 b.

Para relações  $a/c$  maiores (0,80) e com os percentuais de 50% e 100%, a técnica da pré-molhagem antes da concretagem possibilitou uma moldabilidade e trabalhabilidade satisfatórios, obtendo na maioria dos casos, valores de mesma equivalência, ou mesmo, acima dos valores dos concretos de referência.

Ajdkiewicz e Kliszczewicz (2002) analisaram concretos com agregados reciclados misturando-se apenas o agregado graúdo reciclado e relação  $a/c$  de 0,4 e 0,55. Os resultados comprovaram que o efeito do agregado graúdo reciclado foi prejudicial para os concretos de relação  $a/c = 0,4$ , obtendo valores de resistência à compressão em torno de 70% dos concretos de referência. Para os concretos de relação  $a/c = 0,55$ , em que o valor da resistência do agregado não é muito solicitado, os concretos com substituição de agregados graúdos ficaram em torno de 85% em relação aos de referência. Segundo os autores, a baixa resistência à compressão dos concretos reciclados deveu-se ao fato da correção na relação  $a/c$ , em virtude da grande taxa de absorção dos agregados.

#### 4.1.5 Efeito da interação $a/c \times AMR \times AGR$ sobre a resistência à compressão axial

No gráfico da figura 23, é apresentado o efeito das substituições conjuntas, totais e parciais, dos agregados naturais pelos reciclados, em função da relação  $a/c$ .

De acordo com o gráfico da figura 23 é possível notar que, em alguns casos, houve redução da resistência e em outros houve aumento dessa mesma propriedade. Para relações  $a/c$  menores (0,4 e 0,6) houve uma redução apenas nos concretos feitos com 100% de substituição

dos agregados miúdo e graúdo utilizados conjuntamente num mesmo traço. Essa redução foi de 16% para os concretos com relação  $a/c = 0,4$  e 11% para os concretos de relação  $a/c = 0,6$ . Nos traços com esse mesmo percentual e relação  $a/c = 0,8$  os valores situaram-se no mesmo patamar que os de referência.

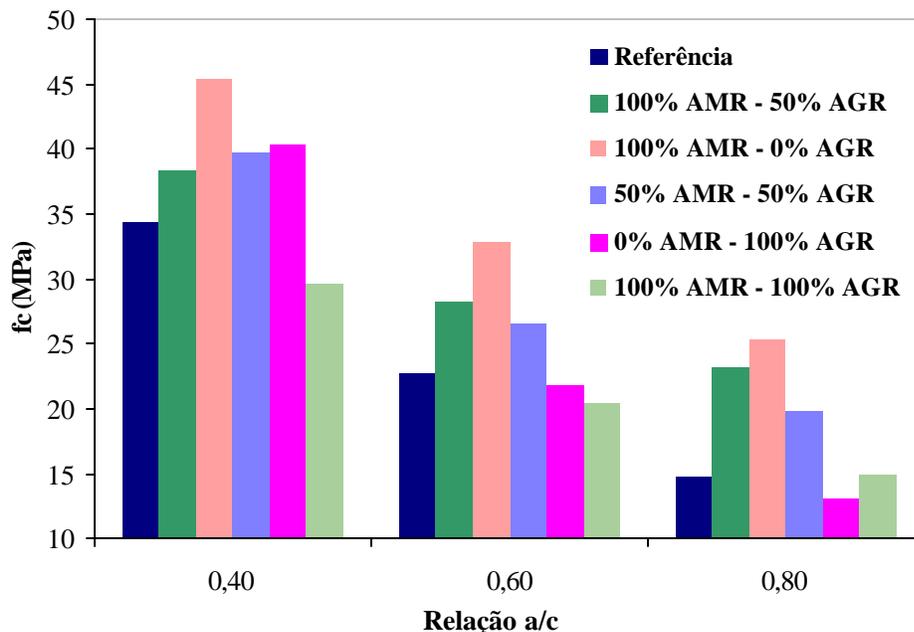


Figura 23: resistência à compressão em função da relação  $a/c$  para os diferentes percentuais de substituição do AMR e do AGR aos 28 dias.

A redução do nível de resistência para concretos com 100% de substituição pode ser explicada pela grande dificuldade de se obter misturas adensáveis. Mesmo com a técnica da pré-molhagem dos agregados a moldagem ficou bastante prejudicada. Além de agregados muito porosos, que absorvem grande quantidade de água, o uso de relações água/cimento baixas também proporcionou essa situação, obtendo, com isso, misturas com grande carência de água, excessivamente ásperas e pouco adensáveis, mesmo com a ajuda de aditivo superplastificante.

Hansen (1992) avaliou resistência mecânica em suas pesquisas e encontrou uma diminuição em torno de 20% em concretos com 100% de AMR e 100% AGR, trabalhando com relação  $a/c$  baixa (0,45). Esse aspecto de perda da resistência quando se trabalha com 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados também foi constatado nesta pesquisa, embora a sua taxa máxima de redução tenha ficado em torno de 16%.

O melhor desempenho da atuação conjunta dos agregados miúdo e graúdo reciclados se deu nos concretos com 50% de substituição de AGR e 100% de AMR e com 50% de ambos, porque não houve perda de resistência. O ganho foi observado para todas as classes de resistências, tendo seu maior valor obtido para o traço 100% de AMR e 50% de AGR e relação  $a/c = 0,80$ , em que o aumento da resistência foi de 56% em relação ao concreto de referência.

Pode ser observado, também, um aumento da resistência para o traço com 100%AMR e 0%AGR, para as três relações  $a/c$  estudadas. Uma explicação para o bom desempenho desse traço pode estar associado a um fator de ordem química, devido a um possível efeito pozolânico do material cerâmico finamente moído. Leite (2001) estudou a pozolanicidade de resíduos contendo material cerâmico e constatou que as amostras apresentaram índices de atividade pozolânica e que isso pode ter contribuído para o aumento das resistências nos concretos que continham altos percentuais de agregado miúdo reciclado. A autora ressalta ainda, que o aumento da resistência pode não ter sido apenas devido ao efeito pozolânico, devendo, portanto, ser estudado em outras propriedades.

De acordo com Limbachyia (2000), citado por Levy (2001), os concretos produzidos com agregados reciclados permanecem seguindo a tendência de comportamento da curva de Abrams, ou seja, à proporção que aumenta a relação água/cimento diminui a resistência e está representada num gráfico cuja curva segue um comportamento exponencial. Nesta pesquisa pode se observar que os concretos de agregados reciclados se inserem nessa mesma tendência, tendo apenas uma translação nos valores em relação à curva do concreto de referência. Esses detalhes podem ser visualizados na figura 24.

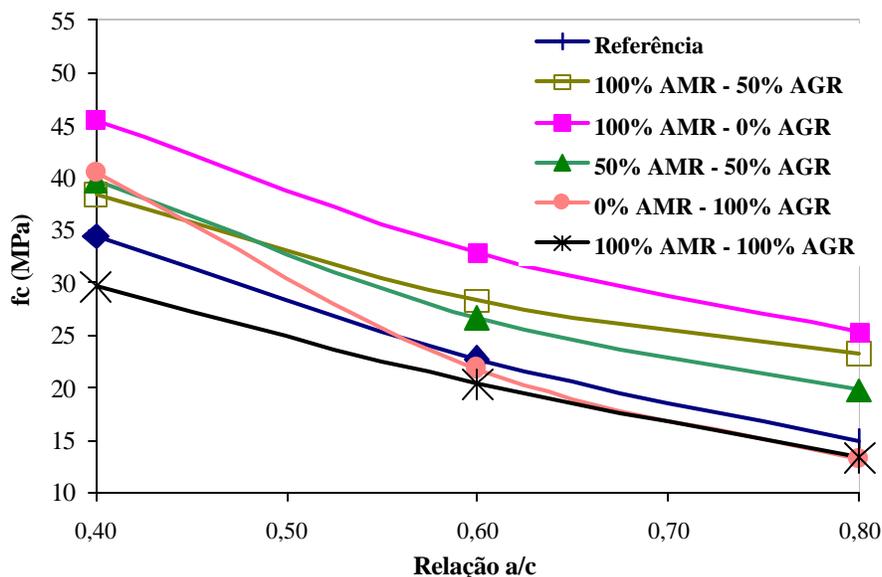


Figura 24: curvas do comportamento da resistência à compressão em função da relação a/c dos concretos com agregados reciclados aos 28 dias.

#### 4.1.6 Considerações gerais

Algumas considerações precisam ser feitas sobre a análise dos resultados realizados neste capítulo. O objetivo central desta pesquisa é avaliar aspectos de durabilidade desses concretos. Isso pode justificar a forma superficial com que foi tratada a propriedade mecânica de resistência à compressão, não sendo estudada mais em profundidade em outras características, como por exemplo, evolução da resistência com a idade e outros aspectos de igual interesse para essa propriedade. Entretanto, algum ponto dessa linha de pesquisa precisava ser estudado, para que pudesse servir como um parâmetro de controle da produção e comprovar que esses concretos seguem o mesmo comportamento técnico de outros já conhecidos. Além de ter uma medida de referência, para que a análise dos resultados de durabilidade possa ser feita com confiabilidade e segurança.

Das considerações gerais e de acordo com os resultados é possível concluir que:

- Dos fatores principais, além da relação água/cimento, somente o %AMR foi significativo nas análises feitas. O %AGR foi significativo apenas quando era utilizado em uma interação juntamente com o percentual de agregado miúdo reciclado. Mesmo assim, seu efeito isolado foi estudado para mostrar a

tendência de que, quanto maior o percentual de substituição do agregado graúdo, menor seria a resistência;

- nos concretos onde houve apenas a substituição do agregado miúdo reciclado ocorreu aumento da resistência, tendo seu melhor desempenho no traço com 100% de AMR e 0% AGR e relação  $a/c = 0,80$ , em que o crescimento da resistência ficou em torno de 68% em comparação ao concreto de referência. Esse percentual possibilitou aumento de resistência em todas as relações água/cimento trabalhadas;
- nas misturas em que houve uma substituição combinada dos agregados reciclados, o melhor resultado foi conseguido com os traços de 50%AMR/50%AGR e 100%AMR/50%AGR, em que o aumento da resistência foi observado para todas as relações  $a/c$ . Para relação  $a/c = 0,60$  e 50% de substituição de ambos os agregados, o aumento da taxa de resistência foi de cerca de 17%. Para  $a/c = 0,8$ , com esse mesmo traço, o aumento foi de 33%;
- o pior desempenho dos concretos produzidos ficou para os traços com 100% de substituição dos agregados miúdo e graúdo conjuntamente. Além das dificuldades de conseguir misturas moldáveis e trabalháveis, houve uma diminuição na resistência. Essa redução foi de 16% para relação  $a/c = 0,40$ , e 11% para relação  $a/c = 0,60$ . Não houve redução na taxa para relação  $a/c = 0,80$ , mas também não houve ganho considerável.

Diferentemente do que diz a Mehta e Monteiro (1994), o uso do AMR não constitui uma ação prejudicial à resistência do concreto. Ficou comprovado neste estudo que quando havia apenas a substituição da fração miúda, o aumento da resistência era significativo, independente da relação  $a/c$  utilizada. Porém, é perfeitamente viável se utilizar o %AMR combinado com %AGR, principalmente em traços médios, com 50% de substituição de ambos os agregados, obtendo-se concretos de resistências acima dos valores de referência. Contudo, vale ressaltar que alguns cuidados precisam ser tomados para que esses resultados aconteçam. Uma seleção e caracterização criteriosa dos agregados são necessárias, além de cuidados como a pré-molhagem, de acordo com a taxa de absorção que possui esse agregado, adotando apenas o procedimento de compensação parcial dessa taxa, para que não haja saturação da mistura, ocasionando uma diminuição da resistência.

## **5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ELETROQUÍMICOS DE DURABILIDADE DOS CONCRETOS**

São apresentados, neste capítulo, os resultados dos ensaios eletroquímicos de durabilidade dos concretos produzidos com agregados reciclados. Foi analisada a atuação dos agregados miúdo e graúdo isoladamente, assim como a utilização conjunta de ambos.

### **5.1 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS**

Como já foi descrito no item 3.1.6.2, os corpos-de-prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem por um período de 150 dias. Dentro desse tempo foram registradas as leituras eletroquímicas de potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) e resistência de polarização ( $R_p$ ) das barras de aço contidas nos corpos-de-prova, com o objetivo de monitorar e avaliar o processo de despassivação e propagação da corrosão provocada por cloretos. A taxa ou velocidade de corrosão ( $i_{corr}$ ) foi calculada utilizando-se a equação 3.7 do item 3.1.6.2.1.

A seguir são apresentados os gráficos dos resultados desses ensaios para as três relações a/c utilizadas e para os três percentuais de substituição dos agregados reciclados.

#### **5.1.1 Resultado dos ensaios com ação isolada do agregado miúdo reciclado**

Nas figuras 25, 26 e 27 são mostrados os gráficos do desempenho do agregado miúdo utilizado isoladamente nos concretos, ou seja, sem substituição de agregado graúdo reciclado, ao longo de 150 dias.

Os valores da resistência ôhmica e do potencial de corrosão foram tirados das leituras dos ensaios feitos ao longo desse período. Não foram plotados os gráficos dos valores da resistência de polarização ao longo do tempo porque estes foram utilizados no cálculo da taxa da corrosão.

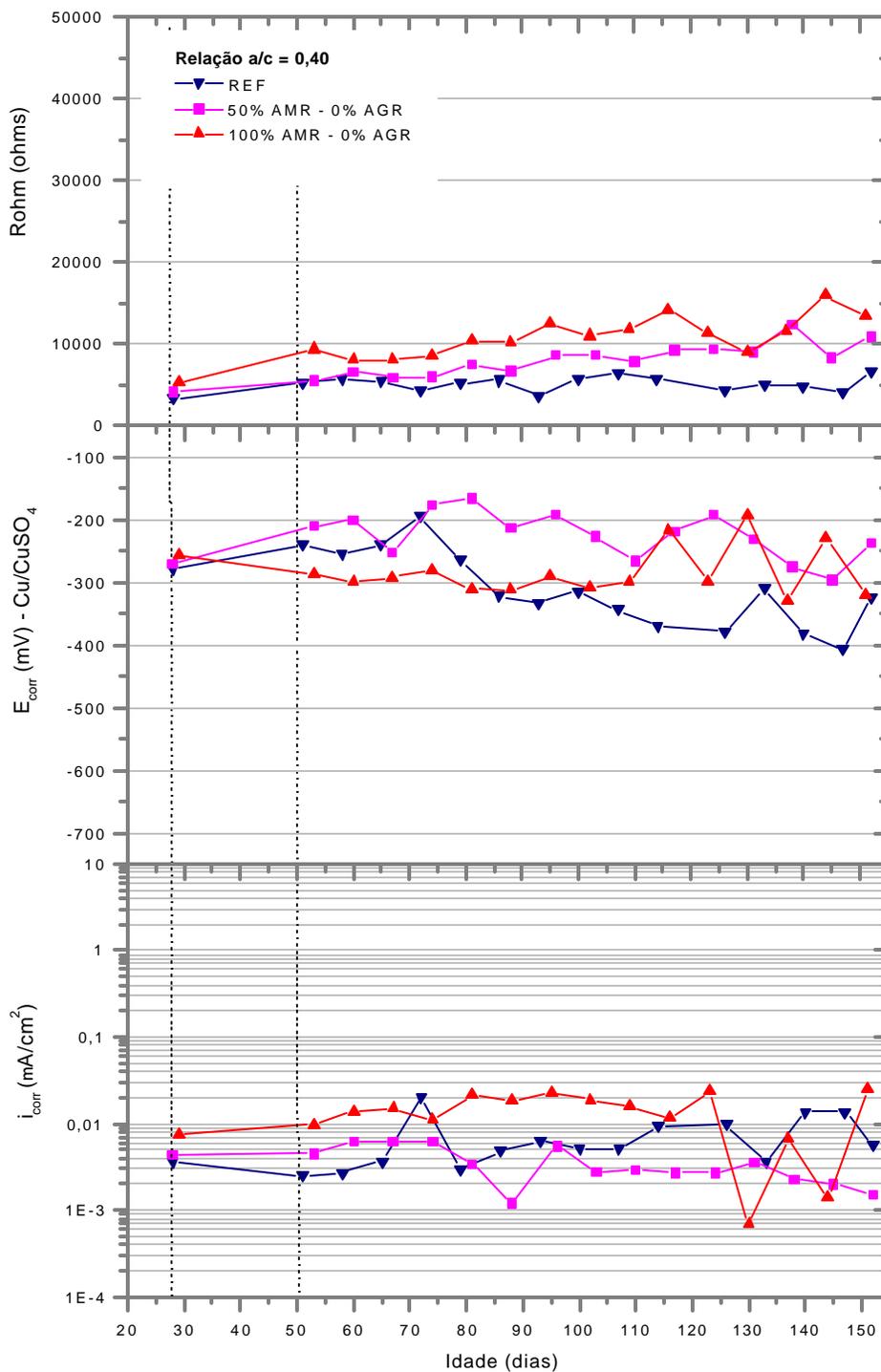


Figura 25: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,40 para o %AMR.

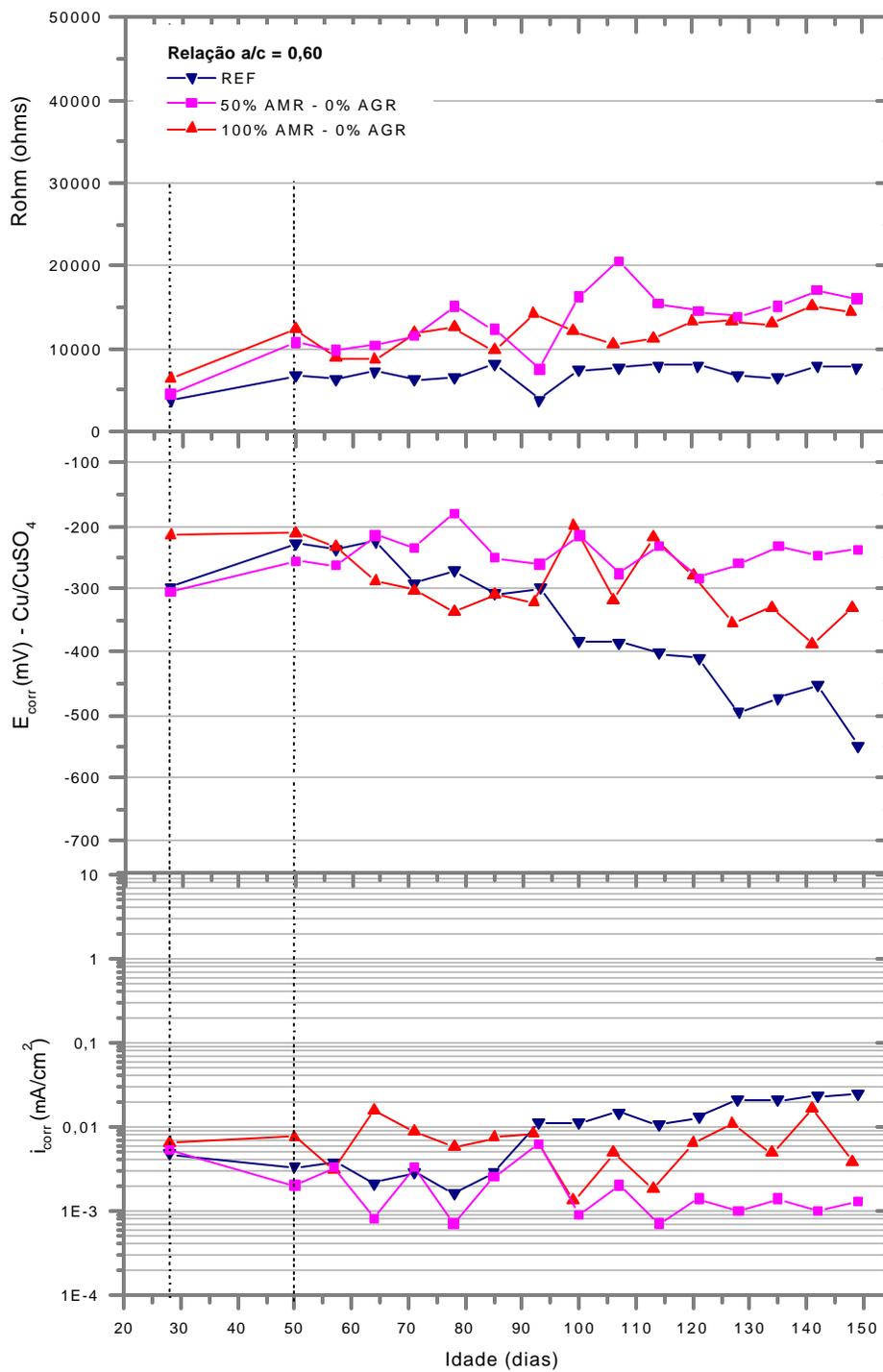


Figura 26: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,60 para o %AMR.

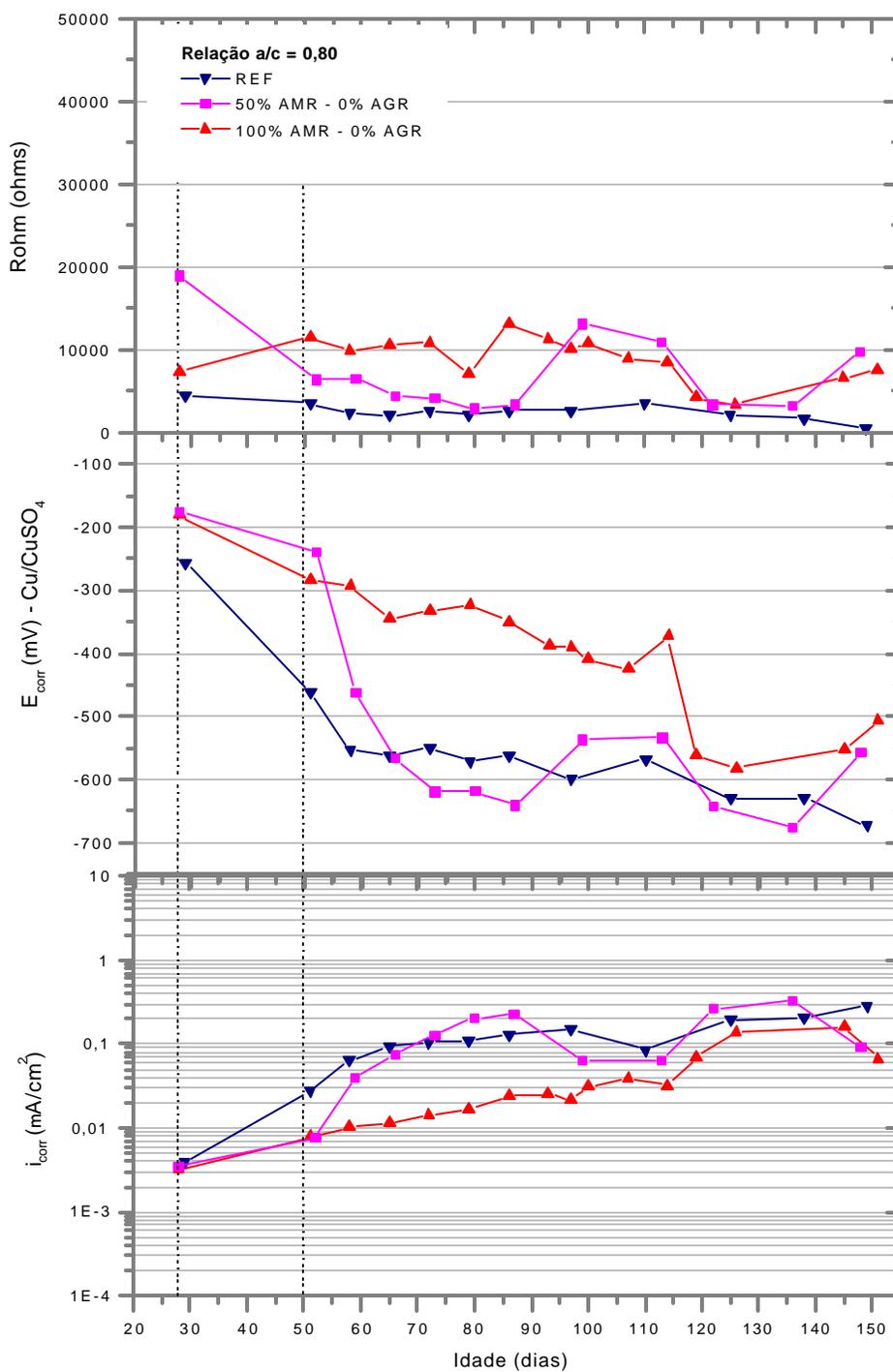


Figura 27: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,80 para o %AMR.

Como pode ser visto nas figuras 25, 26 e 27, a substituição de agregado miúdo natural por reciclado não prejudica e em alguns casos melhora o desempenho do concreto frente à corrosão. Para relações a/c de 0,40 e 0,60, a substituição parcial de 50% provoca níveis de potencial de corrosão e velocidade de corrosão menores, com relação ao concreto de referência, ao longo do tempo.

Pode-se observar também que, ao longo do período de ensaio, os concretos com relação a/c= 0,40 e com 50% e 100% de substituição de AMR situaram-se num patamar aceitável de potencial de corrosão (entre  $-200$  e  $-350$  mV), como visto na figura 25. Apesar desses valores apresentarem uma probabilidade incerta da atividade de corrosão (segundo os critérios de avaliação da norma internacional ASTM C-876) e o percentual de 100% de AMR tenha ficado acima dos valores de referência, os valores da taxa de corrosão correspondentes a esses percentuais apresentaram valores de grau desprezível, possibilitando também a não despassivação da armadura ( $E_{\text{corr}}$  mais negativo que  $-350$  mV) contida nesses concretos.

A figura 26 mostra que para 50% de substituição de AMR, em concretos com relação a/c = 0,60, o resultado é bastante satisfatório, por não ter ocorrido a despassivação da armadura e os valores da velocidade de corrosão situarem-se abaixo dos de referência.

À proporção que aumenta a relação a/c, o aumento do %AMR infere positivamente no desempenho do concreto. O gráfico da figura 27 comprova que com 100% de substituição os níveis de potencial de corrosão e taxa de corrosão são menores que os níveis do concreto de referência. Isso pode ser explicado pelo fato de que um concreto com relação a/c = 0,80 e agregados naturais, por exemplo, possui uma estrutura bastante porosa, possibilitando a entrada de agentes agressivos com mais facilidade. Com a entrada ou substituição de um agregado com alto teor de finos, como é o caso do agregado miúdo reciclado, os vazios presentes no concreto são preenchidos por esses finos, que absorvem a água presente nos poros e, conseqüentemente, dificultam a passagem de agentes causadores de deterioração da armadura.

Entretanto, apesar de um desempenho satisfatório e ter a propriedade de absorver a água livre presente nos poros, o aumento do %AMR em concretos com relação a/c alta não impede que a armadura seja despassivada. Compete ao cimento a formação do filme óxido que protege a armadura de danos. Em um concreto rico em água e pobre em cimento essa atividade se torna

bastante complicada devido a pouca quantidade dos álcalis responsáveis pela alcalinidade do concreto e por manter a armadura protegida da corrosão (NEVILLE, 1997).

### 5.1.2 Resultado dos ensaios com ação isolada do agregado graúdo reciclado

Nos gráficos das figuras 28, 29 e 30 são mostrados os resultados dos ensaios dos concretos que tiveram apenas a substituição de agregado graúdo reciclado.

Para as três relações a/c utilizadas observa-se que o desempenho isolado do agregado graúdo reciclado é um pouco diferente do comportamento do agregado miúdo reciclado. Em todas as relações a/c trabalhadas, a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado provocou um aumento da resistência ôhmica, do potencial de corrosão e da taxa de corrosão, simultaneamente.

A sobretensão ôhmica ou resistência ôhmica ( $R_{ohm}$ ) é definida como um produto entre uma densidade de corrente ( $i$ ) que circula em uma célula eletroquímica e uma resistência ( $R$ ) existente no condutor (que no caso de corrosão de armaduras de concreto é a própria barra por onde flui a corrente eletrônica), e o eletrólito que é o maior controlador da resistência  $R$ . Esse produto pode ser determinado quantitativamente pela medida da condutividade da solução aquosa no meio (GENTIL, 1996; CASCUDO, 1997).

A resistência ôhmica mede o grau de facilidade ou dificuldade de agentes externos penetrarem no concreto e atingirem a armadura. Essa propriedade é inversamente proporcional à condutividade do meio, ou seja, quanto menor a condutividade maior tende a ser a resistência ôhmica. O aumento da condutividade, por sua vez, é causado pelo efeito do cloreto de sódio (NaCl) contido na água e que funciona como um eletrólito forte, favorecendo o mecanismo eletroquímico de corrosão (GENTIL, 1996).

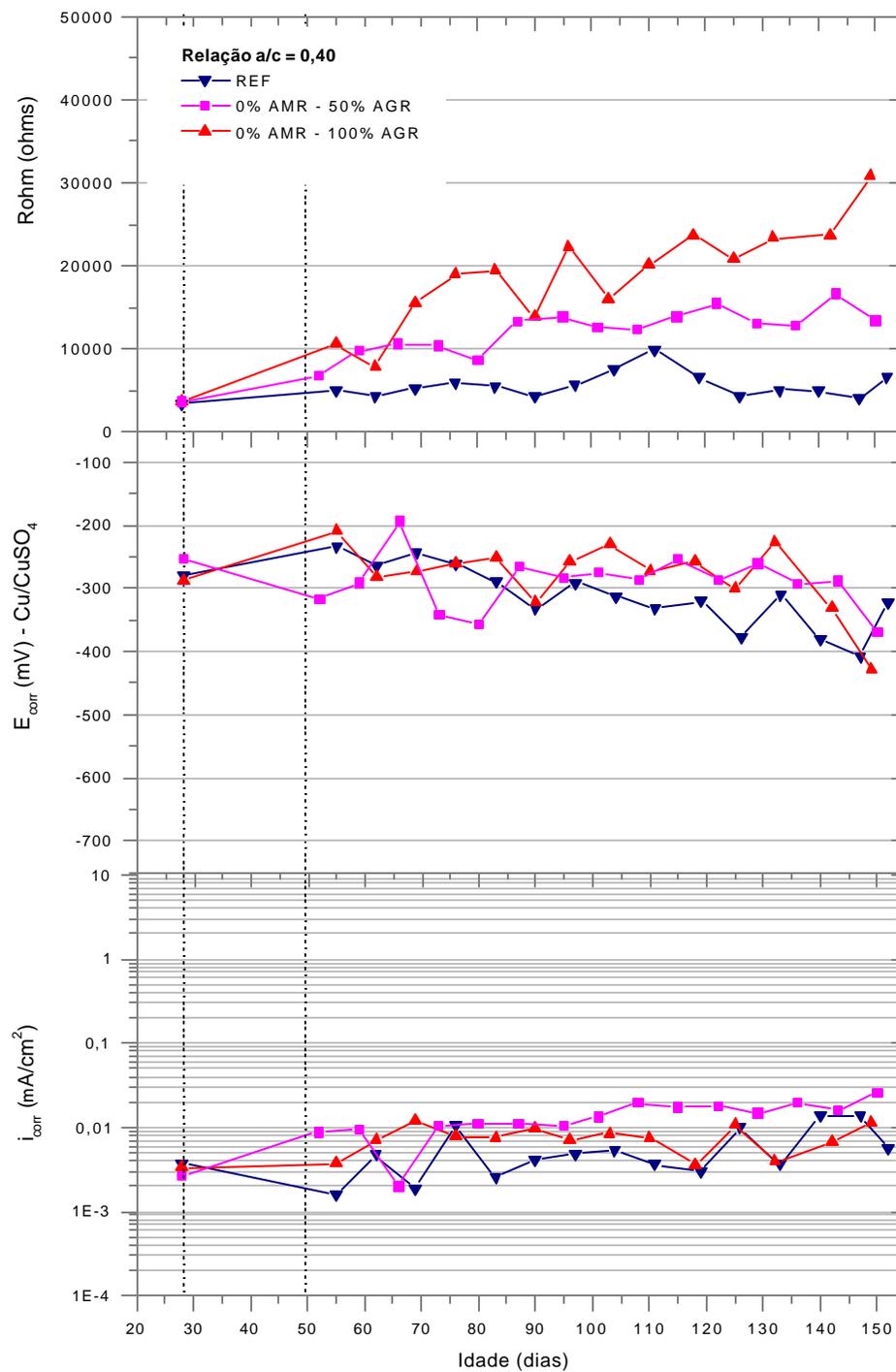


Figura 28: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,40 para o %AGR.

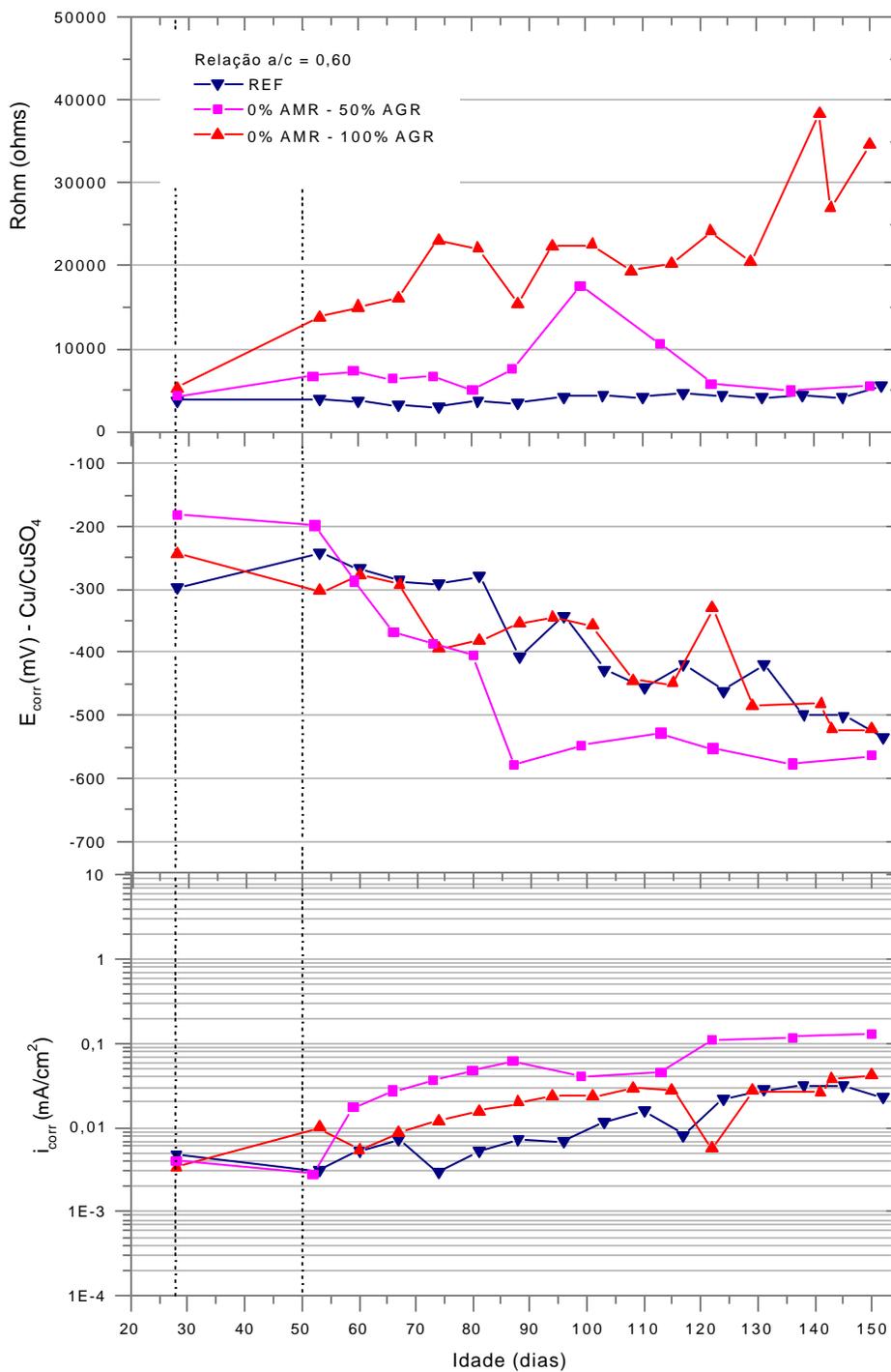


Figura 29: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,60 para o %AGR.

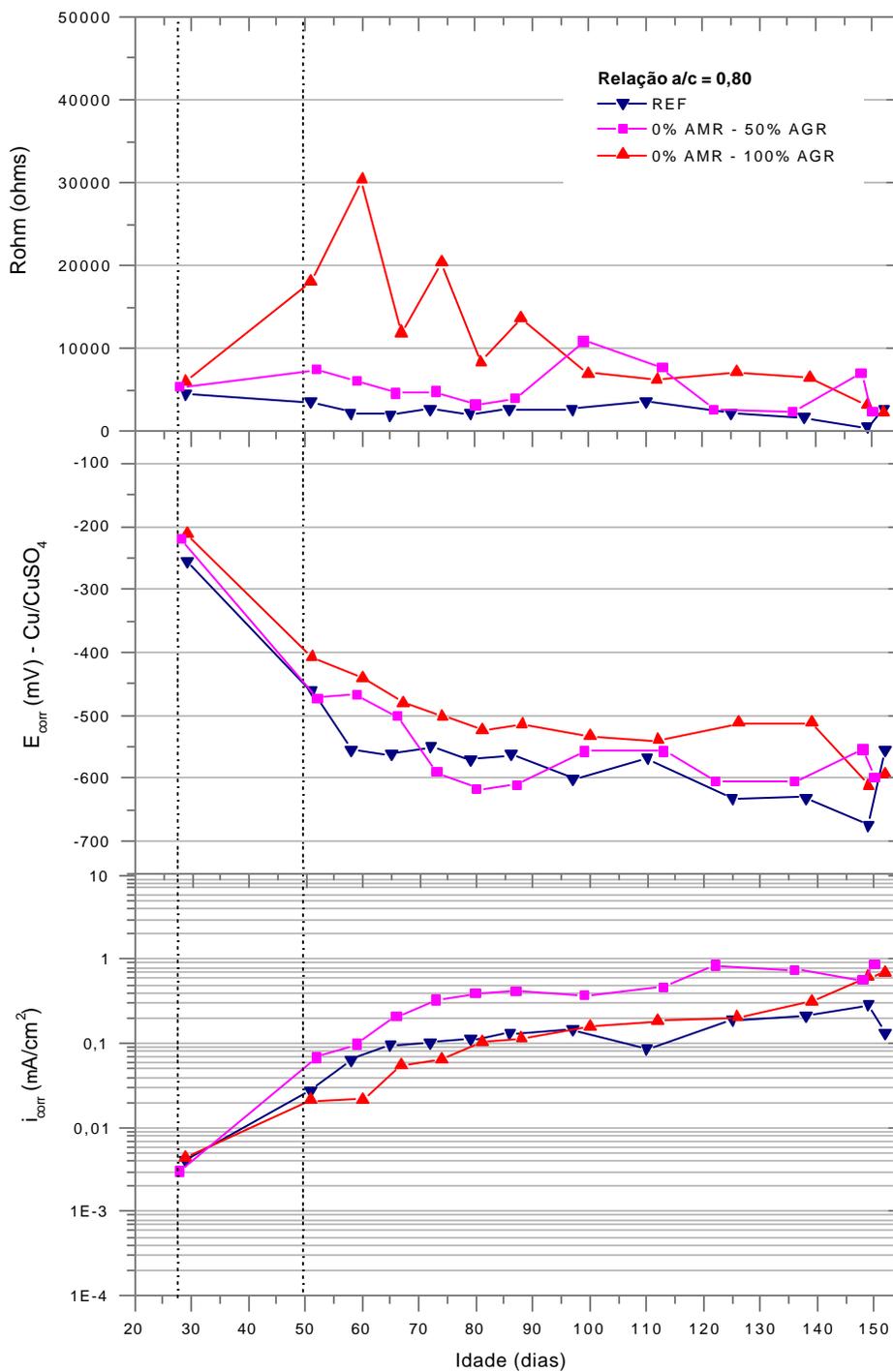


Figura 30: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,80 para o %AGR.

A explicação para o fato de o agregado graúdo reciclado possuir uma maior resistência ôhmica que agregados naturais pode estar fundamentada sob dois aspectos: um aspecto de ordem física e outro de ordem química, para os quais o fator principal para essas justificativas reside na porosidade do agregado. Segundo Metha e Monteiro (1994), agregados naturais possuem um volume de poros normalmente abaixo de 3%, enquanto que agregados reciclados possuem um percentual muito maior. Buyle-bodin e Mesbah (1999), fizeram uma análise petrográfica de agregados reciclados de concreto e argamassa e detectaram um volume de vazios no interior do agregado da ordem de 15%, cerca de cinco vezes maior que a porosidade de agregados naturais.

No caso desta pesquisa, o uso do agregado graúdo reciclado possibilitou uma diminuição na condutividade da solução de cloreto de sódio possivelmente devido à densidade de sua estrutura. Um agregado com um índice de vazios muito grande pode ter dificultado o transporte dos íons no concreto, visto que os mesmos, ao tentarem atingir a armadura podem ter ficado presos e confinados na estrutura porosa do agregado, diminuindo a condutividade do meio. Isso pode ser observado nas baixas taxas de corrosão e alta de resistência ôhmica encontradas para concretos com relação  $a/c = 0,40$ , como pode ser visto na figura 28.

Uma explicação de ordem química para esse fenômeno reside na possibilidade de o agregado ter desenvolvido alguma atividade pozolânica no concreto. Segundo Price (1975), citado por Leite (2001), utilizar pozolanas combinadas com cimento e em quantidades ideais promove a melhoria de diversas propriedades do concreto, entre elas aumento da trabalhabilidade, redução da permeabilidade e aumento da resistência ao ataque de agentes agressivos. Dessa forma, utilizar agregados reciclados com grandes teores de material cerâmico, que possibilitam algum tipo de atividade pozolânica, pode ter contribuído para a diminuição da condutividade e, conseqüentemente, um aumento da resistência ôhmica nesses concretos.

Para relação  $a/c = 0,80$  o comportamento foi muito similar ao concreto de referência. Apesar de terem apresentado valores de resistência ôhmica maiores que o concreto de referência nas primeiras idades, a atuação constante de íons cloreto nos ciclos de molhagem e secagem, aliado à baixa resistência desses concretos, favoreceu o aumento da condutividade desse eletrólito, resultando numa diminuição na resistência ôhmica, o potencial de corrosão indicando que a armadura já tinha sido despassivada e os índices de velocidade de corrosão com valores muito mais altos ( $\sim 1 \mu A/cm^2$ ) indicando atividade de corrosão nas barras.

### 5.1.3 Resultado dos ensaios com ação combinada dos agregados graúdo e miúdo reciclados

A seguir são apresentados os resultados da utilização combinada de agregados reciclados. Foram apresentados os concretos com proporções parciais de 50% de agregado miúdo reciclado e 50% de agregado graúdo reciclado, numa mesma mistura. Também são apresentados os resultados com as misturas com 100% de agregado miúdo reciclado e 50% de agregado graúdo reciclado, assim como 100% de agregado graúdo reciclado e 50% de agregado miúdo reciclado. Os percentuais de 100% de ambos os agregados numa mesma mistura também são apresentados, para as diferentes relações *a/c* trabalhadas.

Os resultados mostram que, à proporção que aumenta o percentual de ambos os agregados numa mesma mistura de concreto, maior tende a ser a taxa de corrosão imposta para essa mistura. Isso se deve ao fato de que, os concretos com 100% de substituição, se tornaram muito difíceis de se moldar e de se conseguir uma mistura compacta e homogênea, resultando em concretos pouco resistentes e bastante porosos, e conseqüentemente mais suscetíveis à deterioração da armadura contida nele.

Entretanto, em alguns casos, o uso combinado de agregados miúdo e graúdo possibilitou uma diminuição tanto nos níveis de potencial de corrosão como nos níveis da taxa de corrosão calculados. Para o traço com 50% de AMR e 100%AGR e relação  $a/c = 0,80$  esses valores foram percebidos de forma bastante acentuada.

As figuras 31, 32 e 33 mostram o comportamento desses concretos para as relações *a/c* estudadas, assim como os percentuais de substituição para os agregados reciclados.

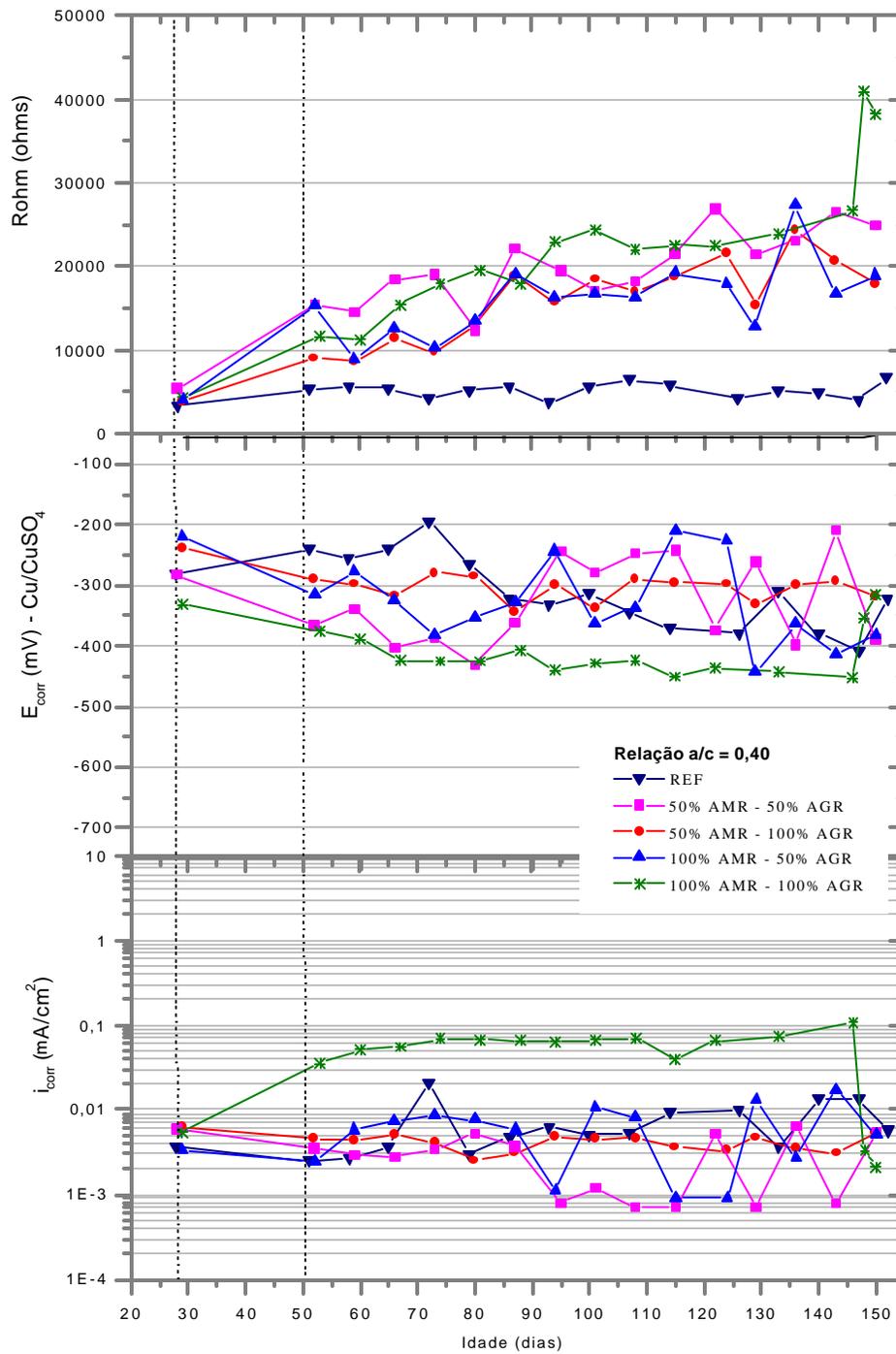


Figura 31: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,40 para %AMR e %AGR.

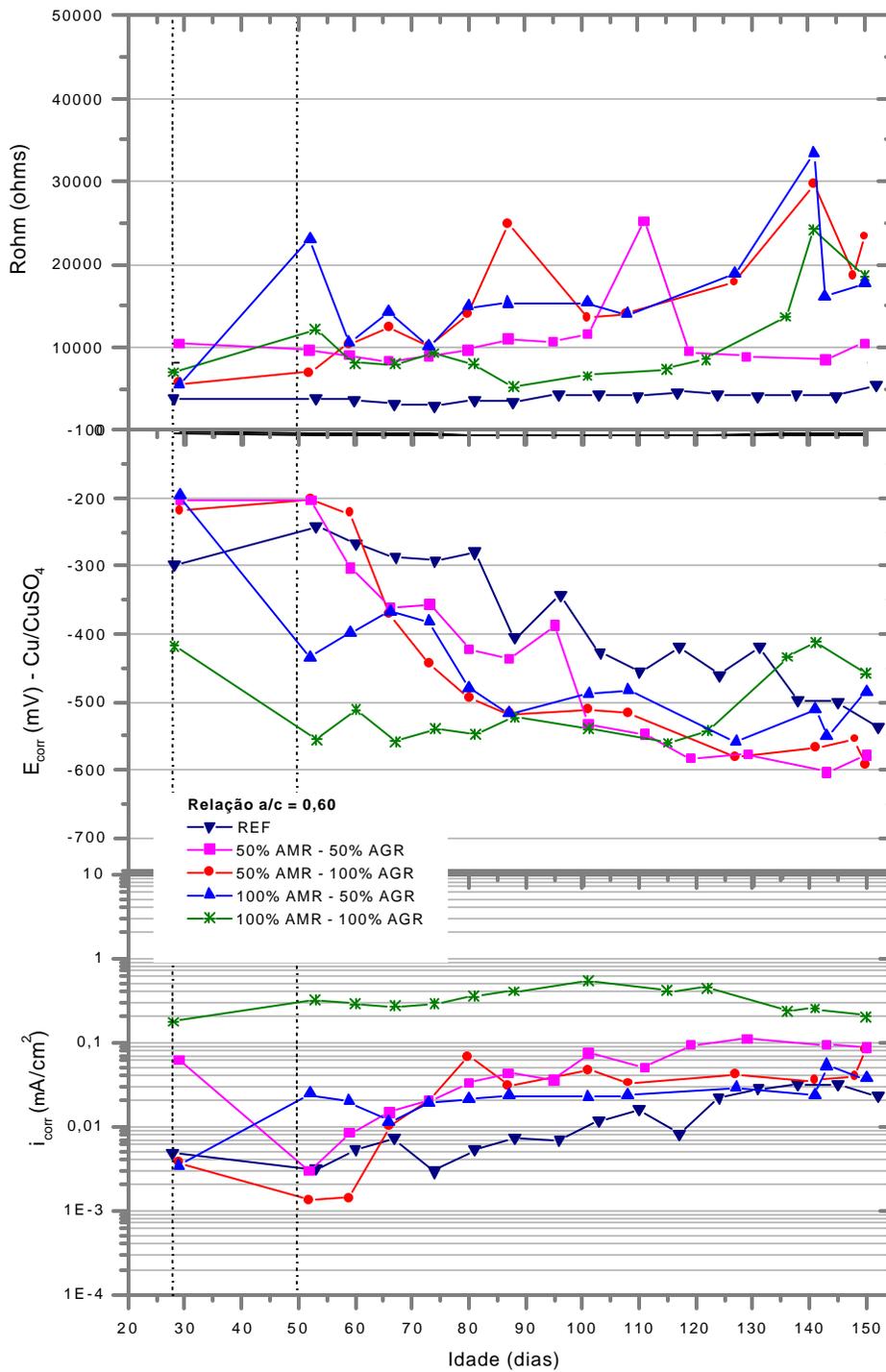


Figura 32: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,60 para %AMR e %AGR.

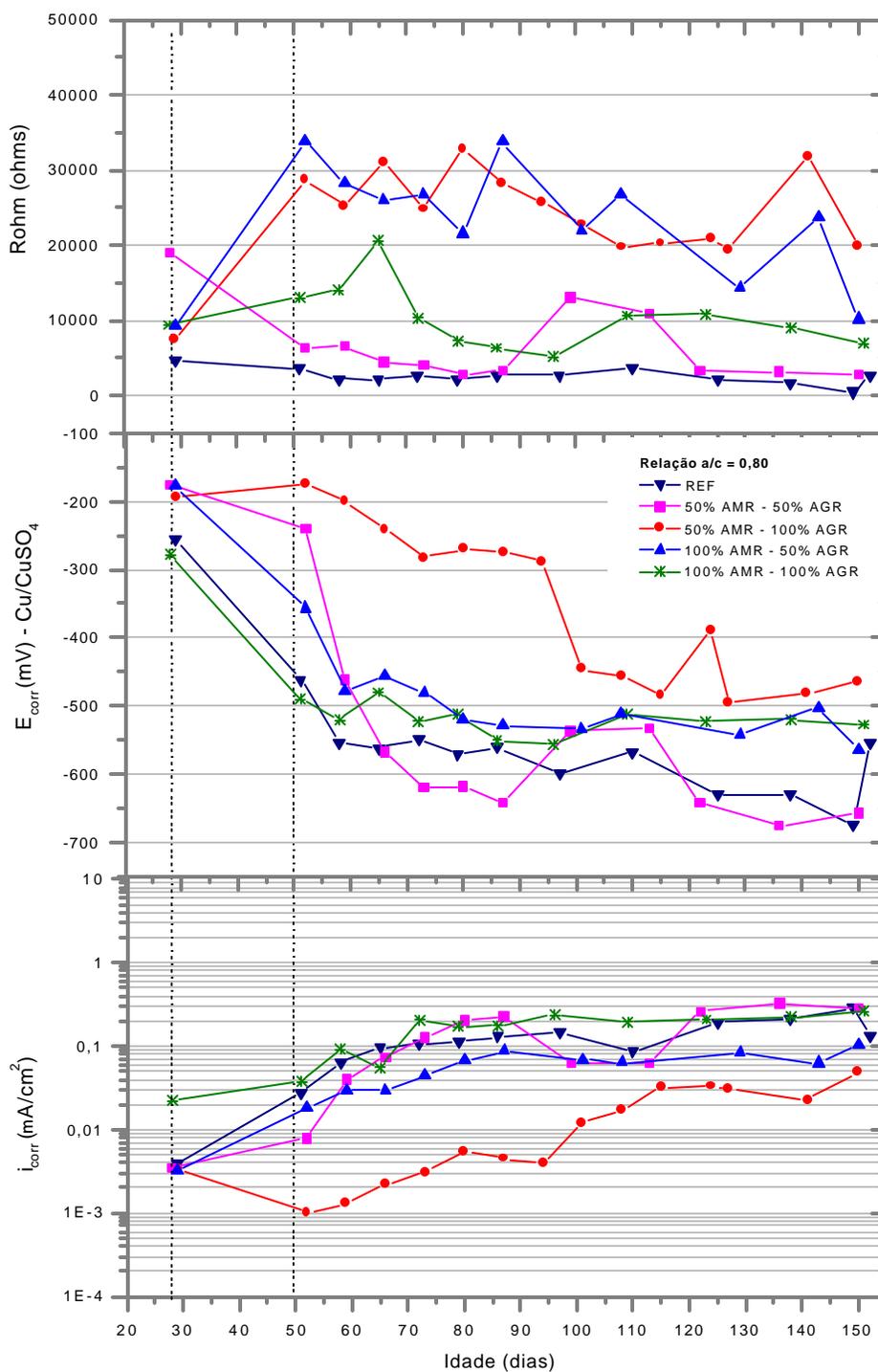


Figura 33: gráficos da resistência ôhmica, potencial de corrosão e taxa de corrosão e relação a/c = 0,80 para %AMR e %AGR.

Como pode ser observado nas figuras 31, 32 e 33, os concretos com substituições totais e parciais de agregados naturais pelos reciclados podem, de alguma forma, resistir a agentes agressivos como cloretos. Entretanto, a grande variabilidade dos resultados dos ensaios não permite que se chegue a um resultado conclusivo a respeito do uso desses agregados no concreto.

Dessa forma, optou-se por fazer uma modelagem matemática a fim de estudar mais especificamente o efeito isolado de cada percentual de substituição dos agregados reciclados, bem como o efeito de suas interações na avaliação da durabilidade desses concretos.

## 5.2 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE POTENCIAL DE CORROSÃO E TAXA DE CORROSÃO

Para o estudo de durabilidade dos concretos produzidos foi realizada uma modelagem dos resultados experimentais, através de análise de regressão múltipla, cujo objetivo é o de explicar grande parte da variabilidade dos resultados apresentados anteriormente.

Foi realizada análise de regressão múltipla tanto para o potencial de corrosão quanto para a taxa de corrosão nas armaduras dos concretos produzidos.

Apesar de o potencial de corrosão ser um dado meramente qualitativo na avaliação da corrosão (com seus valores não é possível extrair informações sobre a taxa de corrosão real da armadura), suas medidas evidenciam mais claramente uma possível iniciação de atividade de corrosão nas barras, através da detecção, ou não, da despassivação da armadura, como sugere a ASTM C-876/91.

Assim como o potencial de corrosão, a resistência ôhmica também infere de forma qualitativa na avaliação da corrosão. Entretanto, pelo mesmo motivo de não extrair dados sobre o valor real da velocidade de corrosão e de não se ter o conhecimento sobre faixas de valores aceitáveis dentro da atividade de corrosão, sua modelagem não foi realizada.

### 5.2.1 Análise de regressão múltipla para os concretos reciclados sobre o potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) das armaduras

Como já foi dito anteriormente, o potencial de corrosão é um dado meramente qualitativo na análise de avaliação de corrosão das armaduras. Segundo Hansson (1984), citado por Cascudo (1997), este dado é uma medida de maior ou menor facilidade de transferência da carga elétrica entre o aço e a solução contida nos poros do concreto e é uma propriedade da interface *concreto-aço*. Mas esta maior ou menor facilidade não deve ser confundida com dados quantitativos de corrosão, que informam dados cinéticos do processo. A este respeito não se pode deduzir velocidade de corrosão a partir de potenciais medidos isoladamente.

Estes dependem de inúmeras variáveis, como umidade, tipo de cimento, aditivo, tipo de agregado, idade, cobrimento do concreto, entre outros. Por outro lado, o levantamento de potenciais de corrosão em estruturas constitui-se, ainda, na técnica mais utilizada para monitorar estruturas de concreto armado com vistas à corrosão das armaduras e constitui-se num instrumento que, se rigorosa e cuidadosamente utilizado, permite identificar de forma não destrutiva as áreas com corrosão (CASCUDO, 1997).

A American Society for Testing and Materials (ASTM C876/91) prescreve o método de ensaio para a obtenção dos potenciais de corrosão em concreto e estabelece a avaliação da probabilidade de corrosão em armaduras de concreto.

Como foi visto nos gráficos do item 5.1, o potencial de corrosão medido nas barras variou de acordo com os percentuais de substituição do agregado, com a relação a/c e com a idade durante o período de ensaio. Partindo do princípio de que a variação do potencial de corrosão depende destas variáveis, um estudo foi desenvolvido no sentido de analisar a influência destes fatores sobre seus valores.

A equação 5.1 foi obtida através dos resultados dos ensaios experimentais e descreve o comportamento do potencial de corrosão ( $E_{\text{corr}}$ ) em função das variáveis principais e de suas interações.

$$E_{corr} = -95,46 - 390,22 \times a/c + 119,94 \times AGR - \frac{71,06}{AMR} - 104,36 \times AMR \times AGR +$$

$$+ \frac{38,99 \times a/c \times AMR}{AGR} + \frac{10785,0 \times a/c}{Idade} - \frac{79401,2 \times AMR}{Idade^2}$$

(equação 5.1)

Onde:

a/c – relação água/cimento, com valores codificados segundo tabela 21

AMR – percentual de agregado miúdo reciclado, com valores codificados segundo tabela 21

AGR – percentual de agregado graúdo reciclado, com valores codificados segundo tabela 21

Idade – idade dos corpos -de-prova monitorados, em valores reais

De acordo com a equação 5.1, os efeitos significativos são a/c, AGR e AMR, assim como as interações AMRxAGR, a/cxAMRxAGR, a/cxIdade e AMRxIdade. O modelo está ajustado para explicar mais de 85% da variabilidade no potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ), cujo coeficiente de determinação ( $r^2$ ) é igual a 0,854.

De posse desses dados e calculados os valores dos potenciais em função das variáveis estabelecidas no modelo de regressão, os resultados obtidos foram comparados com os da ASTM C876/91, que estabelece a probabilidade de corrosão das armaduras de concreto, como pode ser visualizado na tabela 22.

Tabela 22: critérios de avaliação das medidas dos potenciais de corrosão de acordo com a ASTM C876.

Potencial de corrosão em relação ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre - CU/CUSO <sub>4</sub> (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais positivo que -200	5
Mais negativo que -350	95
Entre -200 e -350	Incerta

(fonte: ASTM C-876/91)

### 5.2.1.1 Efeito isolado da relação a/c sobre o potencial de corrosão

A figura 34 mostra o gráfico do comportamento isolado da relação a/c sobre o potencial de corrosão. O gráfico foi obtido da equação 5.1, variando os valores de a/c e deixando as outras variáveis no ponto médio, com os valores codificados de a/c, AMR e AGR e mantendo os valores em níveis reais da idade.

Pelo gráfico pode-se observar que quanto maior a relação a/c, maior, negativamente, é o valor do potencial de corrosão. A influência do aumento da relação a/c sobre o aumento do potencial constata que à proporção que a qualidade do concreto diminui, a armadura fica mais suscetível a danos que nos concretos de boa qualidade, com relação a/c mais baixas. Segundo Cascudo (1997), a iniciação da formação de pilhas eletroquímicas, que são responsáveis pelo processo de corrosão nas armaduras, em concretos com zonas mais aeradas (concreto poroso) tornam-se zonas preferencialmente anódicas, onde o processo corrosivo é mais intenso.

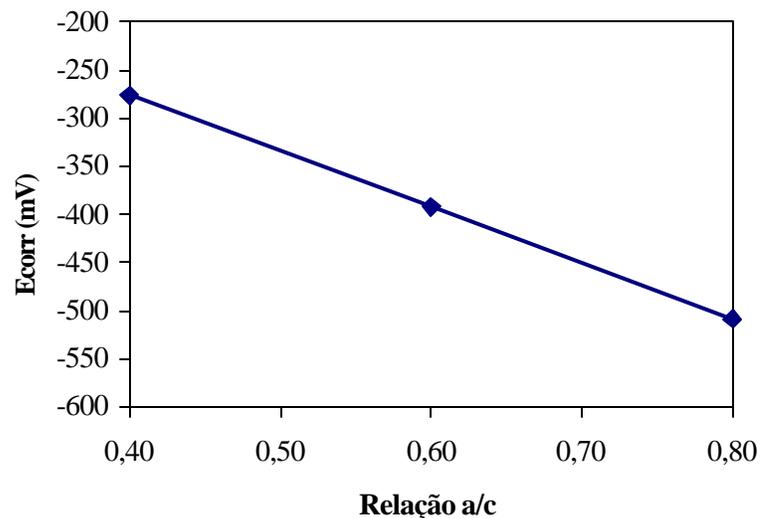


Figura 34: efeito isolado da relação a/c sobre o potencial de corrosão

A partir desta constatação, somada a outros fatores ligados à qualidade do concreto, como espessura do cobrimento, por exemplo, não se pode afirmar que apenas concretos com relação a/c mais altas têm potenciais que sugerem atividade de corrosão. Outros fatores precisam ser

analisados, como por exemplo os percentuais de substituição de agregados reciclados que se mostraram significativos na análise, bem como suas interações com a relação a/c e a idade.

#### 5.2.1.2 Efeito isolado do percentual de agregado miúdo reciclado (AMR) e agregado graúdo reciclado (AGR) sobre o potencial de corrosão

O gráfico da figura 35 mostra o comportamento isolado do teor de substituição dos agregados reciclados no potencial de corrosão. Como já foi dito, o percentual de finos presentes no agregado miúdo reciclado pode fazer com que haja uma diminuição nos níveis de potencial de corrosão. Essa tendência de comportamento, para o caso do AMR, funciona até um certo limite de substituição. O mesmo não acontece para o AGR, que tem seus valores de potencial aumentando negativamente à proporção que aumenta o percentual de substituição. O gráfico que representa o efeito isolado de cada agregado foi obtido a partir da equação 5.1, variando os valores de AMR e AGR e mantendo as outras variáveis no ponto médio.

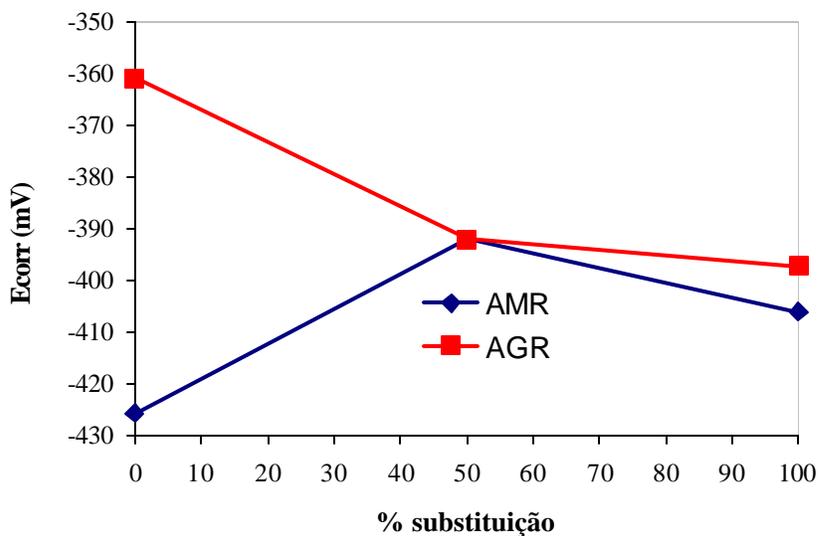


Figura 35: efeito isolado do teor de AMR e AGR sobre o potencial de corrosão

Ainda de acordo com a figura 35 é possível verificar um aumento do potencial para valores acima de 50% de substituição de AMR. Entretanto, esse aumento é ainda menor que os concretos sem substituição desse agregado. Subtende-se que quanto menor o potencial de corrosão menor a taxa de corrosão obtida. Sob esse aspecto o AMR responde positivamente

na diminuição desses valores. Para o agregado graúdo, independente do percentual de substituição, os níveis de potencial aumentam gradativamente.

### 5.2.1.3 Efeito da interação a/cxIdade sobre o potencial de corrosão

O aumento do potencial de corrosão em função da idade e da relação a/c pode ser visualizado no gráfico da figura 36. Para a obtenção desse gráfico variou-se os níveis de idade e relação a/c e manteve-se no ponto médio, os níveis codificados das demais variáveis da equação 5.1.

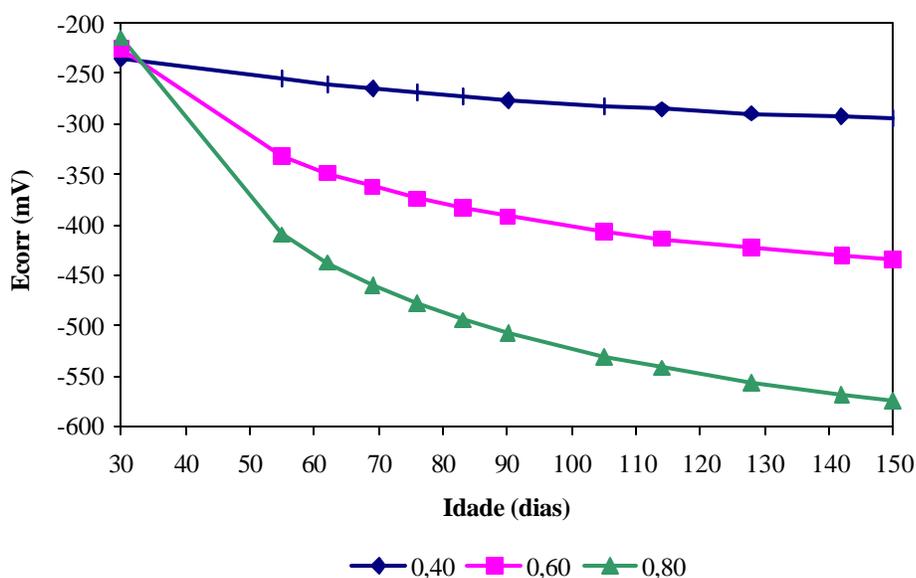


Figura 36: potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxIdade.

À medida que aumenta a idade, o aumento do potencial de corrosão é mais acentuado para relações a/c maiores (0,6 e 0,8). Para relação a/c = 0,8 esse aumento foi da ordem de -350 mV ao longo do período de 150 dias. Com relação a/c = 0,6 esse comportamento também foi percebido, porém com menor magnitude, na qual o aumento do potencial ficou em torno de -200 mV. O aumento do potencial, para relações a/c maiores, implica diretamente na porosidade do concreto, uma vez que concretos com grande número de vazios favorece a propagação da corrosão, pela facilidade com a qual os íons cloreto atingem a armadura e são capazes de despassivá-la.

#### 5.2.1.4 Efeito da interação a/cxAMRxAGR sobre o potencial de corrosão.

A seguir são apresentados os gráficos da interação de segunda ordem a/cxAMRxAGR, obtidos da equação 5.1. O resultado dessa interação foi a obtenção de gráficos cujos percentuais de AMR e AGR variavam de acordo o tipo de substituição feita. Num primeiro momento avaliou-se o percentual isolado de AMR e AGR para as três relações a/c estudadas e depois foi montado um gráfico da substituição de ambos os agregados em um mesmo traço (figura 38), também para as mesmas relações a/c trabalhadas.

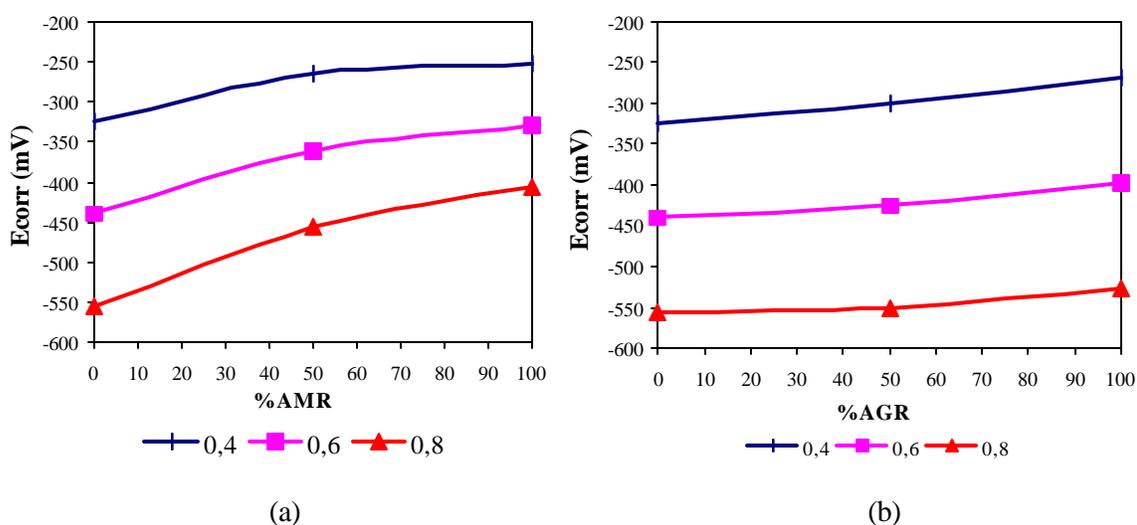


Figura 37: potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxAMRxAGR. (a) Gráfico de  $E_{\text{corr}}$  em função do %AMR. (b) Gráfico de  $E_{\text{corr}}$  em função do %AGR.

De acordo com os gráficos apresentados, pode-se observar que o potencial de corrosão tem seus níveis diminuídos à proporção que aumenta o %AMR para todas as relações a/c utilizadas (figura 37a). Para o %AGR esse comportamento foi observado para todas as relações a/c, mas com uma diferença de menor magnitude. Vale ressaltar que esse gráfico foi obtido mantendo-se o valor real da idade fixada no ponto médio e utilizados os valores codificados de a/c, AMR e AGR.

A figura 38 mostra o resultado do potencial de corrosão para 0%, 50% e 100% de AMR e AGR em função das relações a/c utilizadas.

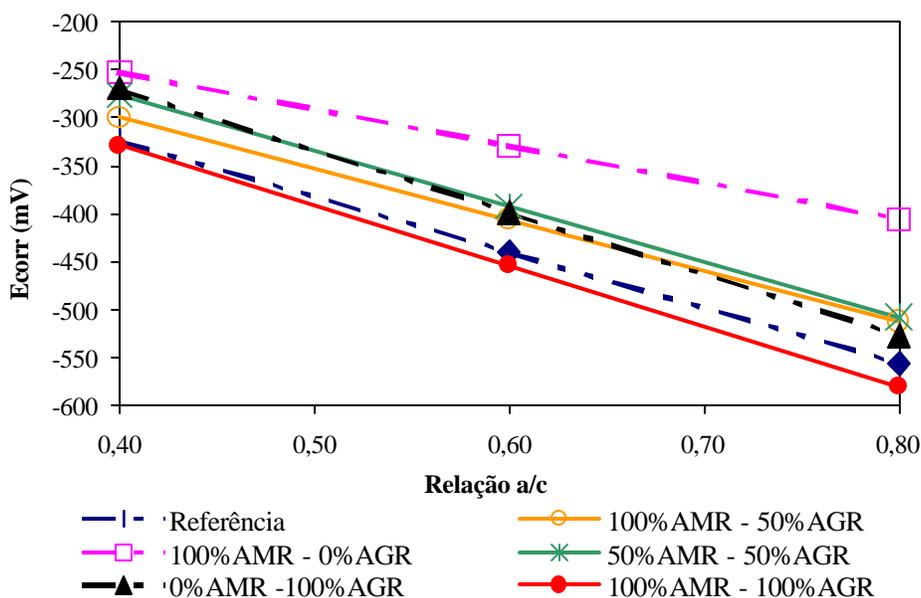


Figura 38: potencial de corrosão em função do efeito da interação a/cxAMRxAGR.

De acordo com o gráfico da figura 38, observa-se um melhor desempenho para o concreto com 100%AMR e 0%AGR, para todas as relações a/c estudadas. Esse mesmo traço possibilitou uma diminuição mais significativa no valor do potencial de corrosão para relação a/c = 0,80 em relação ao concreto de referência, assim como em todos os concretos onde havia substituição total ou parcial do AMR. Por outro lado, os concretos com 100% de substituição de ambos os agregados tiveram o pior desempenho com relação aos outros concretos, obtendo valores de potencial de corrosão acima de todos os outros.

O comportamento descrito anteriormente para os traços com 100% de AMR e 0% de AGR também foi observado nos resultados dos ensaios de resistência à compressão, nos quais os concretos com estes percentuais obtiveram valores acima dos de referência. Em percentuais médios, ou seja, com 50% de substituição dos agregados, graúdo e miúdo, os valores da resistência à compressão também foram bastante satisfatórios, situando-se acima dos valores de referência. Isso corrobora o bom desempenho desses concretos com relação aos ensaios de durabilidade. O mesmo pode ser observado para as misturas com 100% de substituição, cujos valores da resistência à compressão foram menores que os de referência, e, conseqüentemente, obtendo, com isso, um desempenho negativo nos ensaios de durabilidade.

Para os concretos com relação a/c mais baixa (0,40) a diferença do potencial de corrosão torna-se quase irrelevante, situando-se todos os concretos produzidos praticamente numa mesma faixa de potencial (entre  $-250$  mV e  $-350$  mV). Essa constatação também foi comprovada pelo sistema de normalização e padronização de materiais com relação aos agregados reciclados, o B.C.S.J. (1978), citado por Hansen (1992), que afirmam que o risco aliado à corrosão das armaduras de concretos produzidos com agregados reciclados diminui quando se trabalha com relações a/c menores.

### 5.2.2 Análise de regressão múltipla para os concretos reciclados sobre a taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) das armaduras

A partir da análise de regressão da taxa de corrosão para os concretos com agregados reciclados é possível estabelecer uma linha conclusiva a respeito da durabilidade desses concretos, visto que grande parte dos fenômenos de variabilidade é explicada pelo ajuste do modelo desenvolvido.

Ao contrário do potencial de corrosão, a taxa de corrosão, calculada a partir da equação 3.7 do item 3.1.6.2.1, reflete dados quantitativos da atividade de corrosão na armadura do concreto. As taxas de corrosão expressam com qual velocidade está se dando o processo de corrosão. Embora não hajam ainda critérios definidos para relacionar a taxa de corrosão com a importância do ataque e o grau de deterioração da armadura, Andrade e Alonso (2001) propõem critérios de avaliação da corrosão a partir de dados obtidos em experiências de campo e em laboratório através da técnica de resistência de polarização. Estes valores estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23: critérios de avaliação da velocidade de corrosão

<b>Velocidade de corrosão (mA/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Grau de corrosão</b>
< 0,1	Desprezível
Entre 0,1 e 0,5	Iniciação com nível baixo de corrosão
Entre 0,5 e 1,0	Nível moderado, mas não severo
> 1,0	Nível alto de corrosão
> 10	Ataque muito severo

(fonte: ANDRADE e ALONSO, 2001)

No item 5.1 deste capítulo foi possível observar o comportamento dos diferentes percentuais de substituição de agregados reciclados sobre a taxa de corrosão. Como já foi mencionado, os dados apresentados naquele item foram os resultados dos ensaios experimentais realizados. Embora de grande importância na avaliação da durabilidade, estes resultados se mostraram pouco conclusivos a respeito de um comportamento mais generalizado sobre a atuação do agregado reciclado na taxa de corrosão, apresentando grande variabilidade nos resultados. Para minimizar esses efeitos, e ajustar a variável de resposta medida ( $i_{corr}$ ) a um comportamento mais refinado dentro desse trabalho, realizou-se então uma modelagem matemática para explicar com mais clareza os resultados obtidos.

A equação 5.2 descreve o modelo da velocidade de corrosão em função das variáveis principais bem como suas interações.

$$\begin{aligned}
 i_{corr} = & -0,045 - 4,91 \times 10^{-6} \times Idade^2 + \frac{3,13 \times 10^{-4} \times AGR \times Idade}{AMR} + \\
 & + 6,65 \times 10^{-2} \times a/c \times AMR \times AGR - 3,26 \times 10^{-3} \times a/c \times AGR \times Idade - \\
 & - \frac{0,392 \times Idade}{E_{corr}} - 1,28 \times 10^{-8} \times a/c \times AGR \times Idade \times E_{corr}^2
 \end{aligned}
 \tag{equação 5.2}$$

Onde:

$a/c$  – relação água/cimento, com valores codificados de acordo com a tabela 21

$AMR$  – percentual de agregado miúdo reciclado, em valores codificados conforme tabela 21

$AGR$  – percentual de agregado graúdo reciclado, com valores codificados segundo tabela 21

$Idade$  - idade dos corpos-de-prova monitorados nos ensaios, em valores reais

$E_{corr}$  – potencial de corrosão obtido dos ensaios eletroquímicos, em valores reais

De acordo com a equação 5.2, o único fator principal significativo foi a idade, tendo os outros fatores inseridos na análise, como  $a/c$ ,  $AMR$ ,  $AGR$  e  $E_{corr}$ , aliados com interações de segunda e de terceira ordem. Isso mostra o grau de dificuldade em se avaliar aspectos de durabilidade em concretos, principalmente quando são concretos especiais, como os concretos reciclados, que requerem uma atenção especial nesse sentido.

O modelo definido para estas variáveis possui um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,885 e a equação foi ajustada para os níveis codificados de a/c, AMR e AGR apresentados na tabela 21 e para os níveis reais de idade e  $E_{\text{corr}}$ .

#### 5.2.2.1 Efeito isolado da idade sobre a taxa de corrosão das armaduras

A figura 39, apresenta o gráfico do efeito isolado da idade sobre a taxa de corrosão das armaduras dos concretos produzidos. O gráfico foi obtido variando-se os níveis reais da idade e mantendo-se os demais níveis das variáveis da equação 5.2 no ponto médio.

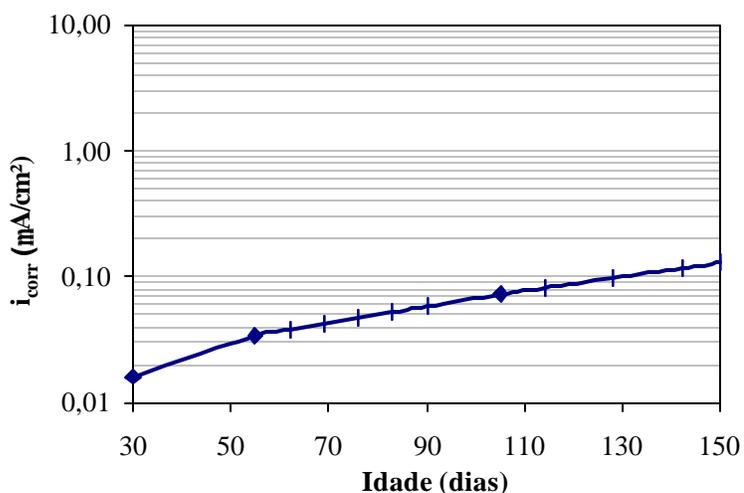


Figura 39: taxa da corrosão em função da idade

De acordo com a figura 39 é possível observar que a taxa de corrosão das armaduras de concretos com agregados reciclados aumenta à proporção que aumenta a idade. Cabe salientar, que nesse período os concretos ficavam submetidos a ciclos constantes de molhagem e secagem, cuja molhagem era composta de uma solução aquosa de 3,5% de NaCl misturado à água, com o objetivo de acelerar o processo de corrosão. Dessa forma, os valores de velocidade de corrosão foram aumentando gradativamente com o tempo. Entretanto, o comportamento desse gráfico mostra apenas que a idade influencia para o aumento da taxa, e que não se pode tirar outras conclusões a respeito desses concretos, como por exemplo, se os mesmos encontram-se em um nível aceitável de corrosão. Estas considerações vão depender

dos outros fatores que também foram significativos na análise de regressão múltipla, como por exemplo a interação entre a idade e os percentuais de AMR e AGR.

#### 5.2.2.2 Efeito da interação $Idade \times E_{corr}$ sobre a taxa de corrosão das armaduras

Na figura 40 pode ser observado o efeito da interação  $Idade \times E_{corr}$  sobre a taxa de corrosão das armaduras dos concretos produzidos. O gráfico foi obtido variando os valores da idade e do potencial de corrosão e mantendo-se no nível médio as demais variáveis da equação 5.2.

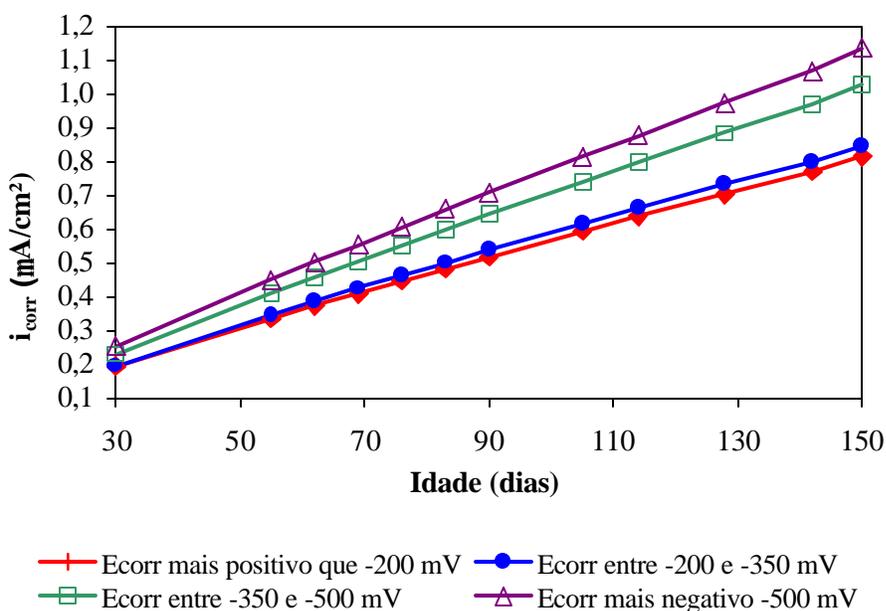


Figura 40: taxa de corrosão em função do efeito da interação entre Idade e  $E_{corr}$

Esse gráfico mostra que os valores da taxa de corrosão variam de acordo com a idade, independente da faixa de potencial medido. Pode ser observado também que para uma mesma faixa de potencial de corrosão medido, as taxas de corrosão apresentaram diferentes valores. Pode acontecer de um determinado concreto apresentar valores de potenciais que acusam uma atividade de corrosão na barra, e no entanto a mesma desenvolve processo de corrosão com velocidade diferente daquela deduzida a partir do potencial. De acordo com Andrade e Gonzalez (1978), citado por Cascudo (1997), diferentes valores de taxa de corrosão foram encontrados para um mesmo potencial medido. Os resultados obtidos nesse trabalho conferem

com os resultados das autoras citadas e reitera o fato de o potencial de corrosão ser um dado meramente qualitativo na avaliação da corrosão.

No entanto, não se pode simplesmente negligenciar os valores dos potenciais de corrosão medidos nos concretos ao longo do tempo devido a essas adversidades, principalmente sob a condição de que o concreto utilizado foi produzido à base de agregados reciclados, que requer um estudo mais ampliado sobre esses aspectos. É sabido que o concreto, seja ele reciclado ou não, nas primeiras idades (de 30 a 50 dias) entra num período de estabilização, possivelmente por causa da formação do filme óxido que protege a armadura. Nesse período os valores dos potenciais tornam-se mais negativos que usualmente são. Isso pode ser constatado na figura 40 na qual, nas primeiras idades, os valores das taxas de corrosão estão muito próximos, apesar de terem potenciais com valores bastante diferentes. Para os concretos com idades acima de 50 dias os valores começam a entrar numa normalidade e a possibilidade de fazer uma avaliação a partir do potencial de corrosão passa a ser válida.

### 5.2.2.3 Efeito da interação a/cxAMRxAGR sobre a taxa de corrosão das armaduras

O gráfico da figura 41 apresenta o efeito da interação de segunda ordem a/cxAMRxAGR sobre a taxa de corrosão das armaduras. O gráfico foi obtido a partir da equação 5.2, mantendo-se constante e no nível médio os valores do potencial de corrosão e a idade, e variando-se, em níveis codificados, os valores da relação a/c, AMR e AGR.

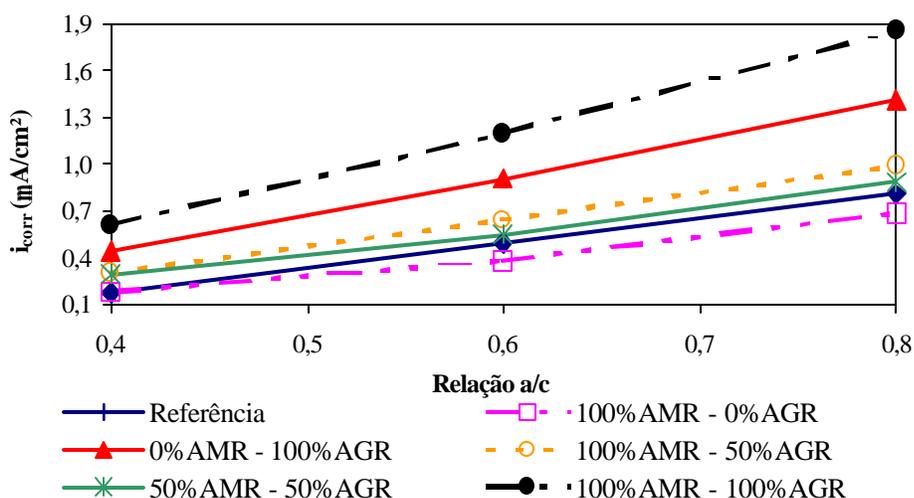


Figura 41: taxa de corrosão das armaduras em função da interação a/cxAMRxAGR

Muitas considerações podem ser feitas a partir desse gráfico. Pode-se fazer uma análise dos concretos com substituição total e parcial de agregados reciclados para todas as relações a/c estudadas. Uma das considerações feitas se insere no comportamento dos traços com 100%AMR e 100%AGR, cujo desempenho foi considerado insatisfatório. Para todas as relações a/c, os níveis de taxa de corrosão ficaram acima dos valores com nenhuma ou com substituição parcial de agregados reciclados e os mesmos corroíam as barras mais rapidamente que os demais. Esses mesmos comentários podem ser feitos para os concretos com 0%AMR e 100%AGR.

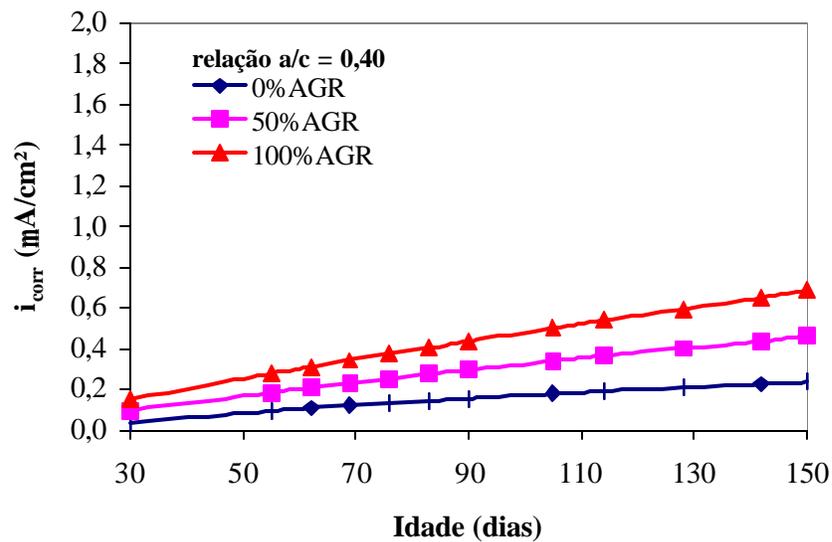
A dificuldade de moldabilidade de concretos com 100% de substituição dos agregados naturais pelo reciclado já foi tratada mais profundamente no capítulo 4. Mas essa mesma dificuldade reflete-se na durabilidade desses concretos, cuja porosidade, causada pela obtenção de misturas excessivamente secas na moldagem, possibilitou uma maior vulnerabilidade das armaduras que estavam sujeitas a inclusões constantes de soluções de cloreto de sódio. O resultado disso, foi a obtenção de valores de altas taxas de corrosão nas armaduras para estes concretos, e acima dos níveis recomendados para um baixo grau de corrosão.

Em contrapartida, nos concretos com substituições parciais ou totais de agregado miúdo reciclado possibilitou um desempenho aceitável nas taxas de corrosão, situando-se muito próximos aos valores do concreto de referência. Para o traço com 100%AMR e 0%AGR os valores das velocidades de corrosão situaram-se abaixo dos concretos sem nenhuma substituição. No item 4.1.5 do capítulo 4 foi verificado que este traço apresentou valores de resistência à compressão maiores que os de referência, devido ao maior preenchimento dos vazios. Isso pode explicar o bom desempenho desses concretos frente à corrosão e também devido a um possível efeito pozolânico, como comentado também no capítulo 4.

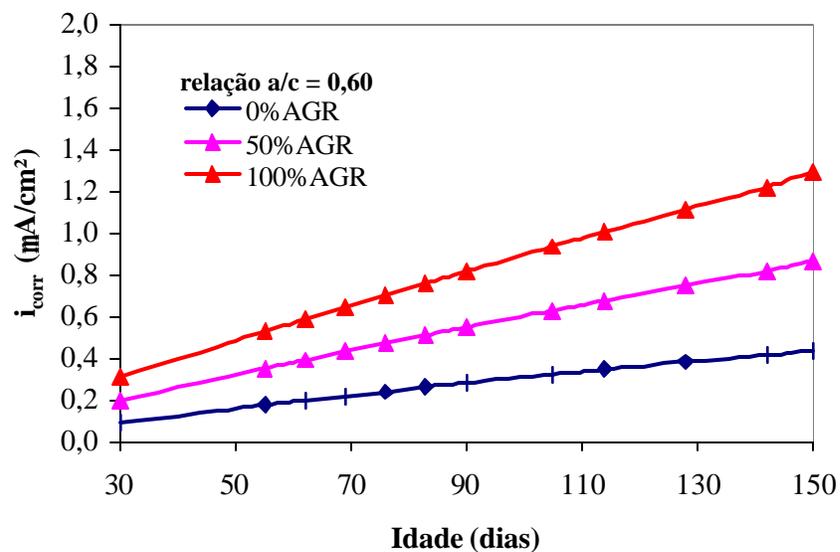
Os traços com 50%AMR e 50%AGR e 100%AMR e 50%AGR também se situaram em níveis aceitáveis de taxa de corrosão, uma vez que todos os valores ficaram muito próximos aos de referência, principalmente para as relações a/c = 0,6 e 0,80.

#### 5.2.2.4 Efeito da interação a/cxAGRxIdade sobre a taxa de corrosão das armaduras

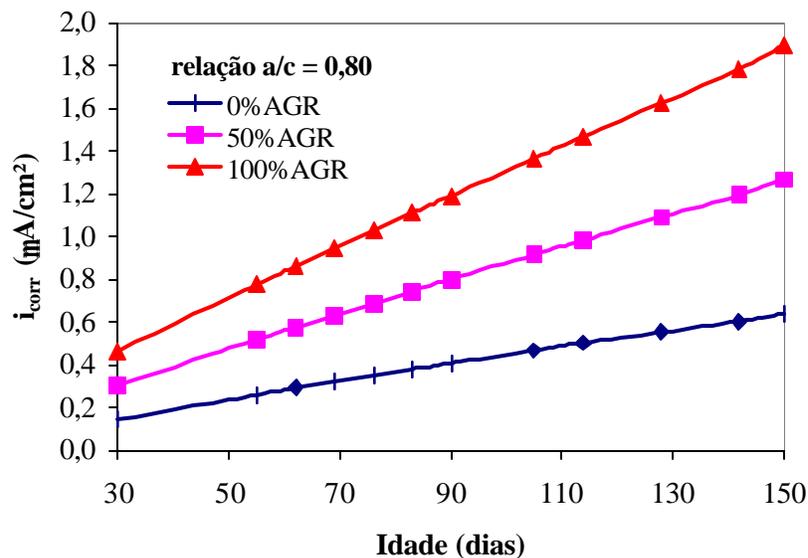
Os gráficos da figura 42 mostram o efeito da interação entre a/cxAGRxIdade sobre a taxa de corrosão das armaduras dos concretos com substituição do AGR. Foi analisado o percentual de substituição para cada relação a/c estudada. Os gráficos foram obtidos a partir da equação 5.2 e foram considerados os valores codificados de a/c e AGR e os valores reais da idade e mantendo-se no ponto médio os valores das demais variáveis.



(a)



(b)



(c)

Figura 42: taxa de corrosão em função da interação a/cxAGRxIdade. (a) relação a/c = 0,40. (b) relação a/c = 0,60. (c) Relação a/c = 0,80.

De acordo com os gráficos é possível observar que à medida que aumenta a relação a/c, aumenta o grau da taxa de corrosão das armaduras e a influência do agregado graúdo reciclado. A diferença entre o concreto com 100% de AGR e o de referência foi maior em todas as relações a/c estudadas. Porém, essa diferença diminui quando diminui também a relação a/c. Isso pode levar a uma conclusão de que a corrosão das armaduras, em concretos com agregados graúdos reciclados, pode acontecer em maior grau e mais rapidamente para relações a/c maiores (0,6 a 0,8). Para relação a/c = 0,40 essa diferença é insignificante.

Rasheeduzzafar e Khan (1984), citado por Hansen (1992), concluíram que concretos com agregados reciclados podem corroer as armaduras mais rapidamente do que concretos convencionais, porém essa perda pode ser compensada se os concretos reciclados forem produzidos com relações a/c menores. Por outro lado, Mulheron (1989), também citado por Hansen (1992), em testes de durabilidade feitos com concretos de agregados reciclados, sob temperatura ambiente (20°C) e ciclos de molhagem e secagem, concluiu que o processo de iniciação da corrosão era independente do tipo de agregado utilizado e que os fatores preponderantes para esta condição era a relação a/c e a profundidade de cobrimento do concreto na barra.

Controvérsias à parte, o fato é que, tanto para as substituições totais ou parciais de agregado graúdo e independente da relação a/c estudada, a taxa de corrosão acontece acima dos valores de referência. O desempenho desse tipo de agregado só melhora quando aliado ao agregado miúdo, porque possibilita uma diminuição na velocidade de corrosão. Concluindo, portanto, que o agregado graúdo não contribui para a melhoria da durabilidade de concretos reciclados frente à corrosão das armaduras iniciada por cloretos, exceto quando misturado ao agregado miúdo reciclado em proporções parciais de ambos ou totais, quando essa substituição se dá apenas por parte do agregado miúdo reciclado.

#### 5.2.2.5 Efeito da interação AMR $\times$ AGR $\times$ Idade sobre a taxa de corrosão das armaduras

A figura 43 apresenta o efeito da interação tripla entre o AMR, AGR e a idade dos concretos produzidos. Primeiramente avaliou-se o efeito isolado do percentual de agregado graúdo e miúdo, depois foi analisado o efeito da combinação de ambos, total e parcial, sobre a taxa de corrosão.

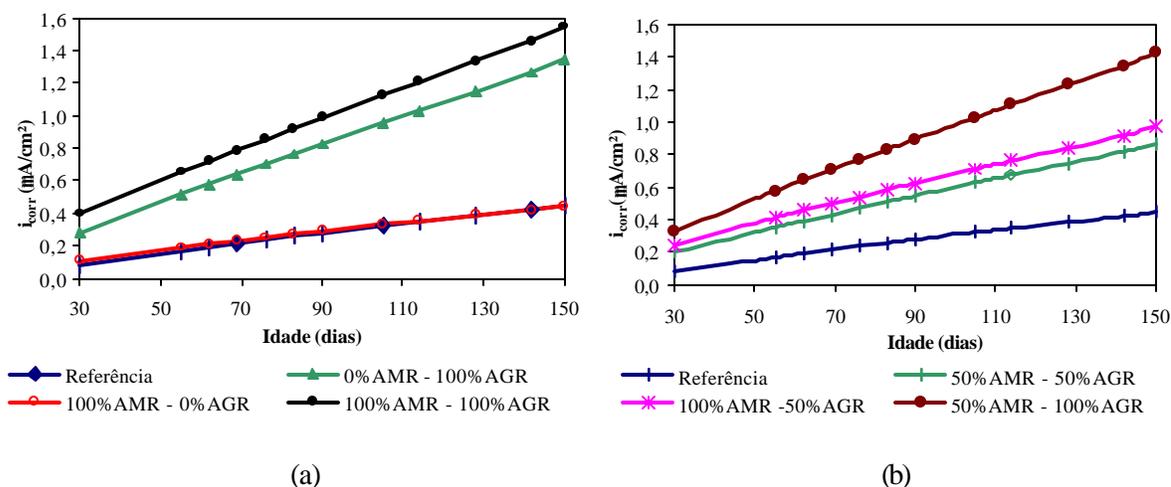


Figura 43: taxa de corrosão em função do efeito da interação AMR $\times$ AGR $\times$ Idade. (a) Efeito isolado do %AMR, %AGR e 100% ambos. (b) Efeito da atuação conjunta de AMR e AGR

De acordo com os gráficos, pode-se observar que nos traços onde não houve substituição do AMR e quando houve substituição total de agregados reciclados, as taxas de corrosão obtidas foram bem maiores que os valores de referência, e os traços com apenas a substituição de

AMR situaram-se praticamente na mesma faixa que os concretos com agregados naturais (figura 43a).

Na figura 43b também são mostrados os concretos com substituição de ambos os agregados. Nota-se que com os traços onde houve um percentual maior de substituição do AGR a corrosão ocorreu bem mais rápido que nos outros concretos. Embora este tipo de agregado tenha, talvez, a propriedade de confinamento dos íons cloreto devido a sua porosidade, como foi visto no item 5.1.2, seu desempenho na durabilidade de concretos reciclados não surte um efeito positivo, exceto quando combinado com agregado miúdo reciclado na mistura.

### 5.2.3 Considerações gerais

Com tudo que foi exposto até aqui, é possível fazer algumas considerações a respeito do uso desses agregados, entre elas:

- o %AMR influi positivamente na durabilidade dos concretos, enquanto que o %AGR possibilita um aumento do risco de corrosão das armaduras;
- para os concretos produzidos, independentemente do tipo de agregado utilizado, o aumento da relação a/c provocou um aumento das velocidades de corrosão nas barras;
- à proporção que aumenta o %AMR, o potencial de corrosão diminui, indicando uma possível queda nos valores das taxas de corrosão. Posteriormente esse resultado foi comprovado, ficando o traço 100%AMR - 0%AGR com os valores das taxas de corrosão abaixo dos valores de referência;
- de uma forma geral, os concretos com substituição de agregados naturais pelo reciclados situaram-se numa faixa aceitável de grau de corrosão, quando comparado aos valores da tabela 21. Com exceção apenas para os traços de 100%AMR - 100%AGR, cujos valores ficaram bem acima dos níveis aceitáveis em todas as relações a/c;
- para o traço com 0%AMR - 100%AGR esse mesmo comportamento foi observado, exceto para relação a/c = 0,40, onde os valores da taxa de corrosão ficaram bastante próximos dos outros concretos produzidos;

- os traços médios, ou com substituição total de apenas um tipo de agregado (50%AMR – 50%AGR e 100%AMR – 50%AGR) também obtiveram valores aceitáveis de velocidades corrosão, principalmente para as relações a/c de 0,6 e 0,8;
- na interação a/cxAGRxIdade sobre a taxa de corrosão das armaduras foi observado que à proporção que aumenta a relação a/c, aumenta também a velocidade de corrosão nas barras contidas no concreto. Devendo, portanto, ser mais recomendável o uso do AGR isoladamente apenas para relações a/c menores (0,40).

De acordo com as considerações feitas neste capítulo, é possível concluir que o uso do agregado reciclado no concreto, em proporções convenientemente dosadas, não afeta a durabilidade do concreto frente à corrosão das armaduras. Exceto quando estes percentuais se inserem de forma total de ambos os agregados numa mesma mistura. Pois a dificuldade de

obter concretos moldáveis nessa proporção faz com que os mesmos fiquem mais suscetíveis à ação de agentes agressivos, devido, logicamente, à alta porosidade existente nesses concretos. Da mesma forma, concretos com apenas substituição de agregado graúdo não teve seu desempenho considerado satisfatório, exceto quando inserido em concretos de baixa relação a/c .

É imprescindível que se faça também uma consideração a respeito dos cuidados a serem tomados ainda na fase de moldagem dessas misturas. A pré-molhagem dos agregado antes da concretagem se constitui numa técnica de fundamental importância na obtenção de misturas moldáveis e trabalháveis. Um possível erro no cálculo da quantidade de água a ser usada na pré-umidificação dos agregados pode levar a mistura tanto à saturação quanto a um concreto seco e conseqüentemente poroso. Sendo assim, medidas bem tomadas ainda na fase do preparo das misturas podem favorecer um bom desempenho desses concretos frente à ação de qualquer agente externo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de contribuir para análise da viabilidade técnica dos resíduos de construção e demolição, este trabalho foi desenvolvido a partir de um planejamento detalhado de atividades que possibilitaram realizar este estudo de forma clara e precisa.

O planejamento das atividades, bem como a realização do planejamento estatístico, são algumas etapas imprescindíveis no processo. Pois a organização dos dados e ensaios possibilitaram uma maior facilidade na avaliação da utilização de resíduos de construção e demolição em concretos.

Foram analisados tanto os efeitos do percentual de substituição do agregado natural pelo reciclado (0, 50% e 100%), como o efeito da relação a/c (0,40, 0,60 e 0,80) nestes percentuais, na propriedade mecânica de resistência à compressão e nas propriedades de durabilidade, avaliando o grau de corrosão das barras de aço contidas nestes concretos. Dessa forma, atingiu-se o objetivo do trabalho.

Algumas conclusões podem ser tiradas da análise desses resultados. A partir do estudo experimental realizado pode-se concluir que:

- a composição do agregado reciclado constituiu-se basicamente de material cerâmico, concreto, argamassa, cerâmica polida e outros materiais de menor percentual;
- com relação à caracterização física dos agregados graúdos reciclados, a composição granulométrica dos mesmos não foi classificada em nenhuma faixa granulométrica como especifica a NBR 7211 (ABNT, 1983);
- a massa específica dos agregados reciclados é em torno de 4% menor para o agregado miúdo reciclado, em relação ao natural. Para o agregado graúdo essa diferença aumenta para 7%;
- os valores das taxas de absorção dos agregados reciclados foram de 11,08% para o agregado miúdo e 6,04% para o agregado graúdo, medidos a partir de uma Proposta de Norma desenvolvida por Leite (2001), em virtude da grande porosidade e da fácil desagregação do material reciclado. Os resultados obtidos

foram bastante altos, evidenciando a necessidade de pré-umedecimento dos agregados antes da concretagem;

- a taxa de compensação de água dos agregados reciclados, equivalente à 50% da taxa de absorção, mostrou-se insuficiente, ocasionando, em algumas traços, um concreto excessivamente seco, como foi o caso das misturas com substituição total (100%AMR – 100%AGR). Como consequência, os concretos resultantes desses traços obtiveram desempenho insatisfatório;
- o desempenho dos concretos com agregados reciclados no que diz respeito à trabalhabilidade foi considerado insatisfatório devido à perda de abatimento sofrida por estes concretos, principalmente com o aumento do percentual de agregado graúdo reciclado nas misturas;
- à proporção que aumenta a relação a/c e o percentual de substituição do agregado graúdo reciclado, a resistência à compressão diminui, principalmente para percentuais de 100% de AGR;
- o contrário aconteceu com o agregado miúdo reciclado, ou seja, à proporção que aumenta o percentual de agregado miúdo aumenta também a resistência. Esse aumento é mais significativo para relação a/c igual a 0,80, cujo ganho de resistência ficou em torno de 68% em relação ao concreto convencional. Para percentual de substituição do AMR, houve um acréscimo da resistência em todas as relações a/c trabalhadas, evidenciando uma possível atividade pozolânica, visto que grande parte da composição do resíduo era constituída de material cerâmico.
- nas misturas onde houve a substituição total dos agregados reciclados, a resistência diminuiu, principalmente para as relações a/c maiores, de 0,60 e 0,80. No concreto com 100% de AMR e 100%AGR houve uma perda de 16% na resistência para relação a/c igual a 0,40 e 11% para relação a/c igual a 0,60;
- para os traços médios (50%AMR – 50%AGR e 100%AMR – 50%AGR), os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram considerados satisfatórios, obtendo valores acima dos concretos de referência;

- os resultados das análises estatísticas puderam comprovar que o AMR influi positivamente na durabilidade dos concretos, enquanto que o AGR tende a aumentar o risco de corrosão das armaduras;
- para os concretos realizados, independente de serem reciclados ou não, o aumento da relação a/c aumenta a velocidade de corrosão nas barras;
- os valores do potencial de corrosão para o concreto diminuíram à proporção que aumentava o percentual de AMR, indicando que poderia haver uma redução na taxa de corrosão. Na análise do grau de corrosão, esse comportamento foi observado, fixando o traço 100%AMR – 0%AGR com valores abaixo dos concretos de referência;
- os valores da taxa de corrosão, em função do efeito da interação entre a idade e o potencial de corrosão, possibilitaram comprovar que os dados obtidos do potencial de corrosão, são meramente qualitativos. Devendo, portanto, não serem utilizados como único parâmetro para a avaliação da corrosão das armaduras. Os resultados mostraram que, para um mesmo potencial de corrosão medido, as taxas de corrosão apresentaram valores diferentes. Podendo, portanto, levar a uma conclusão precipitada da análise da atividade de corrosão nas barras;
- os traços médios, ou com substituição total de apenas um tipo de agregado (50%AMR – 50%AGR e 100%AMR – 50%AGR), também obtiveram valores aceitáveis de velocidades corrosão (semelhantes ao concreto de referência), principalmente para as relações a/c de 0,6 e 0,8;
- para os outros percentuais, os resultados situaram-se numa faixa aceitável de grau de corrosão, excentuando-se apenas o percentual de 100%AMR – 100%AGR numa mesma mistura, cujos valores da taxa de corrosão ficaram acima dos níveis aceitáveis para um baixo grau de corrosão;
- de uma forma geral, os concretos que tiveram substituição do agregado natural pelo reciclado resistiram bem ao ataque de cloretos, sendo substituídos em percentuais convenientemente dosados e sem substituições totais dos agregados, miúdo e graúdo, numa mesma mistura.

Dessa forma, conclui-se que é viável o uso de agregados reciclados no concreto quando o mesmo é utilizado com reforço de armaduras, exceto em percentuais totais dos agregados e com substituições totais por parte do agregado graúdo reciclado em relações a/c maiores. A técnica do pré-umedecimento dos agregados mostrou-se muito satisfatória na moldagem e no desempenho dos concretos.

Entretanto, é imprescindível que se dê importância primária para o tratamento dos resíduos, desde o beneficiamento, passando pela caracterização até a fase de utilização dos agregados no concreto. Assim, o material utilizado fica com suas propriedades conhecidas e a sua utilização não fica limitada.

Muitos estudos, porém, ainda precisam ser feitos para sedimentar a utilização desses materiais nos mais variados tipos de construção. Num momento em que se discute preservação do ambiente e seus recursos naturais, a reciclagem de resíduos de construção e demolição se constitui numa saída para minimização desses impactos. Desde que sejam tomadas medidas rigorosas na especificação, normalização e utilização desses materiais, o seu uso não ficará restrito a utilizações de pouca importância.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Muita coisa há ainda por fazer com relação ao estudo de resíduos de construção e demolição. Os materiais de construção e suas aplicações jamais deixarão de ser estudados. Dentro desse contexto, as pesquisas sobre reciclagem de materiais provenientes de atividades da construção civil também terão que estar sempre em desenvolvimento.

Este trabalho talvez tenha dado uma pequena parcela de contribuição no estudo desses novos materiais. Muitas pesquisas podem e devem ser desenvolvidas no sentido de aprimorar o uso desses materiais e consolidá-lo como um material de boa qualidade. Dessa forma, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- realizar um estudo sobre a influência isolada dos mais variados tipos de composição do resíduo na aplicação em concretos e argamassas;
- avaliar a possibilidade da utilização de agregados reciclados em concretos leves, dada a sua baixa massa específica;

- estudar a possibilidade de aplicação em concreto compactado a rolo, devido à baixa trabalhabilidade desses concretos e a possível atividade pozolânica que combate a reação álcali-agregado;
- avaliar estudos de durabilidade desses concretos, como por exemplo, estudo da corrosão das armaduras afetadas por carbonatação;
- fazer um estudo sobre profundidade de carbonatação em concretos e argamassas de agregados reciclados;
- realizar estudos de absorção e sortividade à água em concretos e argamassas;
- avaliar a resistência desses concretos frente à penetração acelerada por cloretos;
- realizar estudos da influência dos diversos tipos de cimento utilizados em concretos com agregados reciclados;
- realizar estudos de concretos de alta resistência e alto desempenho com agregados reciclados;

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A.G. **Concretos com cinzas volantes: avaliação da capacidade de proteção da armadura frente à corrosão em ambientes com CO<sub>2</sub>**. Porto Alegre, 2001. 35 p. Projeto de Pesquisa – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. The Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cemente & Concrete Composites**. v. 24, p. 269-279, 2002.

AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book of ASTM Standards**. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C 876-91. Philadelphia, 1991. 6 p.

ANDRADE, C.; ALONSO, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. **Construction and Building Materials**. v.15, p. 141-145, 2001.

ANDRADE, A.; SOUZA, U.; PALIARI, J. C.; AGOPYAN, V. Estimativa da quantidade de entulho produzido em obras de construção de edifícios. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 65-74, 2001.

ÂNGULO, S. C.; JOHN, V.M. Determinação dos teores de concreto e argamassa em agregados graúdos de RCD reciclados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu: ENTAC, p.1613-1624, 2002.

ÂNGULO, S. C.; ULSEN, C.; KAHN, H.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 5., 2002, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, CT 206. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 12 p.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 43-56, 2001.

ARM, M. Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial testes and field tests. **Waste Management**. v. 21, p. 235-239, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto**: NBR 11578. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

\_\_\_\_\_. **Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**: NBR 7223. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de ensaio**: NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994. 4 p.

\_\_\_\_\_. **Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto**: NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994. 9 p.

\_\_\_\_\_. **Agregados: determinação da composição granulométrica**: NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

\_\_\_\_\_. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica**: NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

\_\_\_\_\_. **Agregados: determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**: NBR 9937. Rio de Janeiro, 1987. 6 p.

\_\_\_\_\_. **Projeto e execução de obras de concreto armado**: NBR 6118. Rio de Janeiro, 1978. 76 p.

\_\_\_\_\_. **Resíduos sólidos**: NBR 10004. Rio de Janeiro, 1987. 63 p.

CARNEIRO, A.P. et. al. Características do entulho e do agregado reciclado. In: CASSA, J.C.S.; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997. 237 p.

CAVALCANTI, D. K. C. **Políticas para a reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em: <<http://www.federativo.bndes.gov.br>> Acesso em: 12 mar. 2002. 9 p.

CHEN, H.J.; YEN, T.; CHEN, K.H. Use of buildings rubbles as recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**. v. 33, p. 125-132, 2003.

DOLLIMORE, D.; GUPTA, J.D.; LERDJANCHANAPORN, S.; NIPPANI, S. A thermal analysis study of recycled Portland cement concrete (RPCC) aggregates. **Thermochemica acta**. i. 357-358, p. 31-40, 2000.

FONTEBOA, B.G. et. al.;. Investigación sobre hormigones com árido reciclado. Estudos sobre material y propiedades básicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM.

FORMOSO, C.T.; JOBIM, M.S.S.; COSTA, A.L.; ROSA, F.P. Perdas de materiais na construção civil: um estudo em canteiros de obras no Estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS, 1998, São Paulo. **Soluções para o terceiro milênio**. São Paulo: POLI-USP. v. 1, p. 299-307.

FORTES, L.R.; ANDRADE, J.C. **Corrosão na armadura do concreto armado: influência dos agentes cloretos e da carbonatação**. Disponível em: <<http://www.electus.com.br/usuarios/lyttelto>>. Acesso em 12 dez de 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.

GÓMEZ-SOBERON, J.M.V. Porosity of concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. **Cement and concrete research**. v. 32, 2002, p. 1301-1311.

GONZÁLEZ, J.A. **Control de la corrosión**: estudio y medida por técnicas electroquímicas. Madrid: CSCI, 1989. Madrid. 523 p.

GRIGOLI, A.S. Reciclagem de entulho em canteiro de obras – Viabilidade econômica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM.

HANSEN, T.C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. 316 p.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HENDRIKS, C.F.; JANSSEN, G.M.T. Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road construction. **Heron**. v. 46. n. 2 p. 109-117, 2001.

\_\_\_\_\_. Recycling in the building sector. **Heron**. v. 46., n. 2, p. 79-88, 2001.

\_\_\_\_\_. Application of construction and demolition waste. **Henron**. v. 46., n.2, p. 95-108, 2001.

ISATTO, E.L.; FORMOSO, C.T.; CESARE; C.M.; HIROTA, E.H.; ALVES, T.C.L. Lean Construction: diretrizes e ferramentas para o controle de perdas na construção civil. Porto Alegre, 2000. **Série SEBRAE construção civil**. Porto Alegre: SEBRAE, 2000. v. 5, 177 p.

JOHN, V.M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: CASSA, J.C.S; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2000. São Paulo. **Anais...** São Paulo: CETESB, 2000. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 12 p.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**. 2236, p. 1-9, 2002.

LATERZA, L.M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos da construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. São Carlos, 1998. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

LEITE, M.B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. 199 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_. **Pesquisas e normalizações existentes no país e no exterior**. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 3 p.

LEVY, S.M.; HELENE, P.R.L. Influência dos agregados reciclados no módulo de elasticidade de concretos com agregados convencionais e agregados reciclados, da teoria à prática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu: IBRACON, 2001a. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. Agregados reciclados de alvenaria e de concreto, contribuem ou não para a melhoria da durabilidade de novos concretos. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206, 2001b. p. 23-35.

LIMA, M.G.; LIMA R.C.; HELENE, P.R.L. Proposta de metodologia para limpeza de barras para utilização em ensaios laboratoriais de avaliação de corrosão em armaduras. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 19, Rio de Janeiro, 1999. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1999, 9 p.

MESBAH, H.A.; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 13, 1999. p. 141-145.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 5 ed. New York: John Wiley, 2001.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, M.J.E.; ASSIS, C.S. Estudo da deterioração de concreto proveniente de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 1999. 1 CD-ROM.

\_\_\_\_\_. Estudo de resíduo de concreto para reciclagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM

OLIVEIRA, M. J. E.; MATTOS, J. T.; ASSIS, C. S. Resíduos de concreto: classe III versus classe II. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 87-95.

OLIVEIRA, M.B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**. v. 16, n. 1-3, p.113-117, 1996.

OLORUNSOGO, F.T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**. v. 32, p. 179-185, 2002.

OZKAN, S.T.E. Recycling rubble into aggregates: a model for local governments. **Habitat Internation**. v. 25, p. 493-502, 2001.

PINTO, T.P. Gestão dos resíduos de construção e demolição em áreas urbanas – da ineficácia a um modelo de gestão sustentável . In: CASSA, J.C.S; CARNEIRO, A.P.; BRUM, I.A.S (Org.). **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção – Projeto Entulho Bom**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. 311 p.

\_\_\_\_\_. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas**. São Carlos, 1986. 140p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura e Planejamento da Universidade de São Carlos – Universidade de São Paulo.

\_\_\_\_\_. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 189 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.

POLDER, R.B.; PEELLEN, W.H.A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**. v. 24, p. 247-435, 2002.

POON, C.S. Management and recycling of demolition waste in Hong Kong. **Waste Management & Research**. v. 15, p. 561-572, 1997.

QUEBAUD, M.R.; ZAHARIEVA, R.; WIRQUIN, E.; BUYLE-BODIN, F. A influência do teor de agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41, 1999, Salvador. **Anais eletrônicos...** Salvador: IBRACON, 1999. Arquivo: 2-1-18, 16 p. 1 CD-ROM.

RIBEIRO, J.L.D; CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Série Monográfica Qualidade. Porto Alegre, 2000. 130 p. Escola de Engenharia – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Notas de aula.

SILVA, E.F.; COSTA, A.C.N; CANÊDO, V.S. Concreto fabricado com agregado miúdo proveniente da reciclagem do entulho de concreto. In: In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM.

SAGOE-CRENTSIL, K.K.; BROWN, T. TAYLOR, A.H. Performance of concrete made with commercially produced recycled concrete aggregate. **Cemente and Concrete Research**. v. 31, p. 707-712, 2001.

SONG, G. Theoretical analysis of measurement of polarization resistance in reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**. v. 22, p. 407-415, 2000.

SUPERINTERESSANTE: revista mensal de divulgação técnica, científica e curiosidades. São Paulo: Ed. Abril, n. 180, edição extra, set. 2002. 98 p.

TECHNE: Revista de tecnologia da construção. São Paulo: Ed. PINI, ano 3, n. 15, mar/abr. 1995. 56 p.

\_\_\_\_\_ : Revista de tecnologia da construção. São Paulo: Ed. PINI, ano 10, n. 55, out. 2001. 96 p.

TOUHAMIA, M.; SIVAKUMAR, V.; McKELVEY, D. Shear Strength of reinforced-recycled material. **Construction and Building Materials**. v. 16, p. 331-339, 2002.

VAZQUEZ, E. Aplicación de nuevos materiales reciclados en la construcción civil. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, CT 206. p. 11-21.

ZAHARIEVA, R.; BUYLE-BODIN, F.; SKOCZYLAS, F. WIRQUIN, E. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement e & Concrete Composites**. 2002. 10 p.

ZIVICA, V. Utilization of electrical resistance method for the evaluation of the state of steel reinforcement in concrete and the rate of its corrosion. **Construction and Building Materials**. v. 14, p. 351-358, 2000.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil – FEC. Universidade Estadual de Campinas.

\_\_\_\_\_. **Reciclagem de entulho da indústria da construção civil**. Disponível em: <<http://www.reciclagem.pcc.usp.br>> Acesso em: 28 ago. 2002. 12 p.

**Apêndice A – Resultados experimentais dos ensaios de resistência à  
compressão**

Tabela 24: resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias do experimento completo

a/c	% AMR	% AGR	fc (MPa)	fc (MPa)	fc <sub>med</sub> (MPa)
0,40	0	0	33,86	32,02	32,94
	50	0	46,42	22,01	34,21
	100	0	46,7	45,71	46,20
	0	50	33,51	36,05	34,77
	50	50	57,35	49,59	53,47
	100	50	43,38	44,23	43,81
	0	100	33,44	38,3	35,87
	50	100	36,33	34,07	35,20
0,60	100	100	34,28	34,35	32,32
	50	0	22,13	23,65	23,90
	50	50	28,71	31,53	30,12
	50	100	27,79	37,74	32,76
	100	0	32,8	29,56	31,18
	100	50	29,56	30,4	29,98
	100	100	22,36	17,56	19,96
	0	0	21,6	22,75	22,17
	0	50	23,63	22,64	23,14
0,80	0	100	24,83	24,34	24,58
	0	100	9,95	10,44	10,19
	50	100	24,26	23,84	24,05
	100	100	13,97	15,38	14,67
	0	0	14,01	15,72	14,86
	50	0	20,86	21,74	21,30
	100	0	23,84	26,24	25,04
	0	50	16,29	12,69	14,49
	50	50	21,73	22,71	22,22
100	50	27,85	29,84	28,84	

Tabela 25: resultado dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias do experimento fracionado

<b>a/c</b>	<b>% AMR</b>	<b>% AGR</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>fc (MPa)</b>	<b>fc<sub>med</sub> (MPa)</b>
0,40	0	0	35,69	34,69	37,59	35,99
	100	0	46,06	43,31	44,79	44,72
	0	100	39,08	40,07	39,57	39,57
	100	100	20,3	32,44	27,9	26,87
0,60	50	50	22,64	24,34	23,42	23,47
0,80	0	0	13,05	11,43	12,34	12,27
	100	0	24,55	25,18	25,89	25,21
	0	100	14,95	14,95	15,73	15,21
	100	100	13,54	21,16	19,25	17,98