

Régis Sandro Bazuco

**UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO PARA PRODUÇÃO DE NOVOS
CONCRETOS**

**Dissertação apresentada ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.**

**Florianópolis
1999**

UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO PARA PRODUÇÃO DE NOVOS CONCRETOS

Régis Sandro Bazuco

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof. Dr. Janaíde Cavalcante Rocha

Florianópolis
1999

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto para Produção de Novos Concretos.** Florianópolis, 1999. 112p. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

Com o objetivo de contribuir para a análise do comportamento dos materiais reciclados em novos materiais, realizou-se um estudo de dosagem e produziu-se concretos contendo agregados graúdos reciclados de concreto, em substituição parcial e total do agregado graúdo natural. Os resultados indicaram reduções na resistência à compressão em torno de 15% à 30% para os concretos produzidos com agregados reciclados, sendo as maiores reduções observadas para os traços com maior consumo de cimento. Na comparação entre os concretos com agregados reciclados secos e os concretos com agregados reciclados saturados, observou-se que ambos apresentaram resultados bastante similares. O abatimento dos concretos com agregados reciclados secos apresentou perdas da ordem de 20% superiores às verificadas para os concretos de referência, após 1 hora de mistura. A evolução das resistências à compressão dos concretos com agregados reciclados se mostrou mais lenta até os 3 dias de idade, e mais rápida no período compreendido entre os 3 e os 7 dias, em relação aos concretos de referência. No estudo realizado, foi possível ainda, o estabelecimento de curvas de dosagem para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, relacionando-se importantes parâmetros, tais como a resistência à compressão, a relação água/cimento, os traços utilizados e o consumo de cimento.

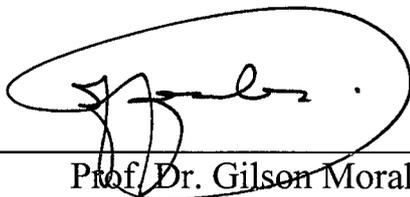
Palavras –chave: Concreto, reciclagem, agregado reciclado, resíduo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

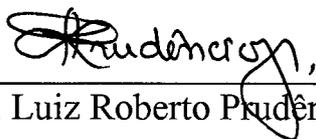
Dissertação defendida e aprovada em 29/04/1999,
pela comissão examinadora



Prof. Dr. Janaíde Cavalcante Rocha (UFSC) – Orientador - Moderador



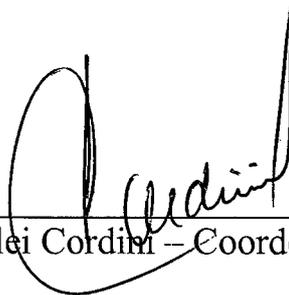
Prof. Dr. Gilson Morales (UEL)



Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr. (UFSC)



Prof. Dr. Malik Cheriaf (UFSC)



Prof. Dr. Jucilei Cordim – Coordenador do CPGEC

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que de maneira direta ou indireta participaram da realização deste trabalho, e de forma especial:

Aos meus pais e minha família, que sempre me apoiaram nos estudos.

À professora e orientadora Janaíde Cavalcante Rocha, pela orientação séria e competente demonstrada ao longo de todo o trabalho.

Ao professor Luiz Roberto Prudêncio Jr., pelas importantes dicas e atenção dispensadas ao trabalho.

Ao professor e amigo Gilson Morales, pelo fundamental incentivo à minha participação no curso de mestrado e grande interesse demonstrado durante esse período.

À minha namorada Alessandra, pelo constante apoio, compreensão e incentivo.

Ao amigo Keller A. Z. de Oliveira, companheiro das horas mais difíceis, por compartilhar todos os momentos de seriedade e descontração vivenciados.

Ao amigo Marconi Oliveira de Almeida, pelo auxílio a qualquer hora e grande amizade iniciada nesse período.

Ao bolsista e agora amigo Leonardo de Brito Andrade, pelo inestimável e importante apoio durante a realização dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais de Construção Civil, Luis Henrique e Renato, pelo apoio e colaboração nas atividades de laboratório.

À Eng. Sílvia Santos e à empresa Concreton, pelo fornecimento de material para os ensaios.

À empresa Pedrita, pela britagem do material, e ao DER, pela disponibilização de seu laboratório.

À Companhia de Cimento Rio Branco, na pessoa do Eng. Evaldo Meneghel, pela doação do cimento utilizado.

Aos amigos Leila Cristina Meneghetti e Rodrigo Campos de Andrade, pelo auxílio na realização dos ensaios.

Ao professor Ivo José Padaratz.

À colega de trabalho Cristina Eliza Pozzobon.

Aos amigos Marco Fábio, Alexandre, Marcelo e José Roberto, companheiros de residência e das horas de lazer.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Breve Histórico	5
2.2. Propriedades dos Agregados Reciclados de Concreto	6
2.2.1. Absorção dos Agregados Reciclados	12
2.2.2. Propriedades dos Agregados Miúdos Reciclados	14
2.2.3. Densidade dos Agregados Reciclados	15
2.2.4. Textura Superficial dos Agregados Reciclados	15
2.2.5. Forma dos Agregados Reciclados	16
2.2.6. Granulometria dos Agregados Reciclados	16
2.2.7. Resistência à Abrasão dos Agregados Reciclados	16
2.2.8. Resistência Mecânica dos Agregados Reciclados	18
2.3. Produção de Concretos com Agregados Reciclados de Concreto	18
2.4. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Fresco	25
2.5. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Endurecido	27
2.6. Durabilidade dos Concretos com Agregados Reciclados de Concreto	33
3. METODOLOGIA	37
3.1. Definição do Concreto a ser Reciclado	37
3.2. Produção do Concreto a ser Reciclado	38
3.2.1. Agregado Miúdo	39
3.2.2. Agregado Graúdo	40

3.3. Britagem do Concreto a ser Reciclado	42
3.4. Caracterização dos Materiais	46
3.4.1. Composição Granulométrica dos Agregados	46
3.4.2. Massa Específica	46
3.4.3. Teor de Matéria Orgânica nos Agregados Miúdos	46
3.4.4. Caracterização do Cimento	46
3.4.5. Abrasão “Los Angeles”	47
3.4.6. Absorção de Água dos Agregados Graúdos Reciclados	47
3.4.7. Índice de Forma dos Agregados Graúdos	48
3.4.8. Quantidade de Argamassa Aderida ao Agregado	48
3.5. Definição dos Traços de Concreto a serem Estudados	49
3.5.1. Ajuste dos Traços	49
3.6. Produção dos Concretos com Agregados Reciclados	50
3.6.1. Mistura dos Materiais	50
3.6.2. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	51
3.6.3. Ensaio de Perda de Abatimento	51
3.7. Verificação das Resistências à Compressão	52
3.8. Determinação do Consumo Aproximado de Cimento	53
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
4.1. Caracterização dos Materiais	55
4.1.1. Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo	55
4.1.2. Caracterização Granulométrica dos Agregados Graúdos	56
4.1.3. Teor de Matéria Orgânica dos Agregados Miúdos	58
4.1.4. Massa Específica	59
4.1.5. Abrasão “Los Angeles”	59
4.1.5.1. Abrasão do Agregado Graúdo Natural	59
4.1.5.2. Abrasão do Agregado Graúdo Reciclado Seco	60
4.1.5.3. Abrasão do Agregado Graúdo Reciclado Saturado	60
4.1.6. Absorção de Água do Agregado Graúdo Reciclado	60
4.1.7. Índice de Forma dos Agregados Graúdos	62
4.1.8. Quantidade de Argamassa Aderida ao Agregado	62
4.2. Produção dos Concretos com Agregados Reciclados e Naturais	63
4.3. Verificação da Perda de Abatimento	65

4.4. Determinação das Relações Água/Cimento Aproximadas nos Concretos com Agregados Reciclados	69
4.5. Determinação da Resistência à Compressão	71
4.5.1. Influência da Substituição de Agregados Graúdos Naturais por Reciclados na Resistência à Compressão	72
4.5.2. Influência da Condição de Umidade dos Agregados Reciclados na Resistência à Compressão	75
4.6. Evolução da Resistência à Compressão	77
4.6.1. Influência da Substituição de Agregados Graúdos Naturais por Reciclados na Evolução da Resistência à Compressão	77
4.6.2. Influência do Traço Utilizado na Evolução da Resistência à Compressão	79
4.6.3. Influência da Condição de Umidade dos Agregados Reciclados na Evolução da Resistência à Compressão	80
4.7. Determinação do Consumo de Cimento Aproximado	82
4.7.1. Relação entre o Consumo de Cimento e a Resistência à Compressão	84
4.8. Curva de Abrams	86
4.9. Lei de Lyse	89
4.10. Lei de Molinari	91
5. <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	93
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	96
6. <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	97
ANEXO I	103
ANEXO II	110

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 -	Composição média do entulho gerado na cidade de Ribeirão Preto	9
FIGURA 3.1 -	Parte das formas utilizadas para moldagem do concreto de origem dos agregados reciclados	39
FIGURA 3.2 -	Aspecto do concreto produzido para ser reciclado, após deformado	42
FIGURA 3.3 -	Instalações da pedreira onde foi realizada a britagem primária do material	43
FIGURA 3.4 -	Blocos de concreto sendo introduzidos no britador	43
FIGURA 3.5 -	Coleta do material britado proveniente da peneira de 1½ polegada	43
FIGURA 3.6 -	Coleta do material britado proveniente da peneira de 4 polegadas	44
FIGURA 3.7 -	Aspecto do material após a britagem primária	44
FIGURA 3.8 -	Britador do laboratório do DER	45
FIGURA 4.1 -	Curvas granulométricas do agregado miúdo utilizado na produção dos concretos com agregados reciclados	56
FIGURA 4.2 -	Curvas granulométricas obtidas para o agregado graúdo natural e para o agregado graúdo reciclado	58
FIGURA 4.3 -	Absorção efetiva de água dos agregados reciclados nos primeiros 120 minutos	61
FIGURA 4.4 -	Variação da porcentagem de argamassa ideal, em massa, conforme o teor de substituição	63
FIGURA 4.5 -	Porcentagem do abatimento inicial após uma hora de mistura ..	67
FIGURA 4.6 -	Resistências à compressão aos 28 dias, para concretos com agregados reciclados saturados	76
FIGURA 4.7 -	Resistências à compressão aos 28 dias, para concretos com agregados reciclados secos	76

FIGURA 4.8 -	Evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o teor de substituição de agregados naturais por reciclados	77
FIGURA 4.9 -	Porcentagem média da resistência à compressão atingida aos 3 e 7 dias de idade, em relação aos 28 dias	78
FIGURA 4.10 -	Evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o traço utilizado	79
FIGURA 4.11 -	Porcentagens médias de resistências alcançadas, aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias	81
FIGURA 4.12 -	Evolução das médias de resistência à compressão dos concretos de acordo com a condição de umidade dos agregados no momento da mistura	82
FIGURA 4.13 -	Relação da resistência à compressão aos 28 dias com o consumo de cimento dos concretos produzidos com agregados reciclados secos	84
FIGURA 4.14 -	Relação da resistência à compressão aos 28 dias com o consumo de cimento dos concretos produzidos com agregados reciclados saturados	84
FIGURA 4.15 -	Porcentagem da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados reciclados secos, em relação aos concretos de referência	85
FIGURA 4.16 -	Porcentagem da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados reciclados saturados, em relação aos concretos de referência	85
FIGURA 4.17 -	Curva de Abrams para concretos produzidos com agregados reciclados secos	88
FIGURA 4.18 -	Curva de Abrams para concretos produzidos com agregados reciclados saturados	88
FIGURA 4.19 -	Curva de Abrams obtida para a média de valores entre os concretos com agregados reciclados saturados e secos	89
FIGURA 4.20 -	Variação da relação água/cimento conforme o traço empregado	90
FIGURA 4.21 -	Consumo de cimento por metro cúbico de acordo com o traço empregado	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 -	Classificação dos agregados graúdos reciclados para concreto (RILEM TC 121-DRG, 1994)	12
TABELA 2.2 -	Relação entre a resistência à compressão dos concretos de origem e a porcentagem de perda por abrasão Los Angeles (YOSHIKANE apud HANSEN, 1992)	17
TABELA 2.3 -	Porcentagens relativas das resistências à compressão para os diversos concretos estudados nas diferentes idades de cura, em relação aos 28 dias (BAIRAGI et al., 1993)	28
TABELA 3.1 -	Levantamento da produção de concreto, em empresa concreteira da região de Florianópolis, no primeiro semestre de 1998	38
TABELA 3.2 -	Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado na produção do concreto que originou os agregados reciclados	40
TABELA 3.3 -	Características do agregado miúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados	40
TABELA 3.4 -	Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado na produção do concreto que originou os agregados reciclados	41
TABELA 3.5 -	Características do agregado graúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados	41
TABELA 3.6 -	Resistências do concreto de origem dos agregados reciclados ..	42
TABELA 3.7 -	Caracterização do cimento utilizado na produção dos concretos	47
TABELA 4.1 -	Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado para a produção dos concretos com agregados reciclados	55
TABELA 4.2 -	Composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizado para a produção dos concretos com agregados reciclados	57
TABELA 4.3 -	Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado utilizado para a produção dos concretos	57

TABELA 4.4 -	Granulometria final dos agregados graúdos utilizados na pesquisa	58
TABELA 4.5 -	Valores de massa específica encontrados para cada um dos agregados utilizados na produção dos concretos	59
TABELA 4.6 -	Absorção efetiva de água dos agregados graúdos reciclados	61
TABELA 4.7 -	Porcentagem de argamassa aderida aos agregados graúdos reciclados	62
TABELA 4.8 -	Traços em massa utilizados para a produção de concretos com agregados reciclados	64
TABELA 4.9 -	Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:3,5 ...	65
TABELA 4.10 -	Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:5,0 ...	66
TABELA 4.11 -	Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:6,5 ...	66
TABELA 4.12 -	Relações água/cimento obtidas para os concretos com agregados reciclados	69
TABELA 4.13 -	Relações água/materiais secos (H), para a média dos 3 valores de m	70
TABELA 4.14 -	Valores de resistência à compressão alcançados pelos concretos ensaiados	71
TABELA 4.15 -	Porcentagem média da resistência à compressão atingida aos 28 dias, em relação às resistências dos concretos de referência .	72
TABELA 4.16 -	Porcentagem média de resistência à compressão atingida aos 28 dias, em relação aos concretos de referência	75
TABELA 4.17 -	Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias	80
TABELA 4.18 -	Resistências médias e porcentagens médias de resistência atingidas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias	81
TABELA 4.19 -	Consumo aproximado de cimento por metro cúbico	83
TABELA 4.20 -	Porcentagem média da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos de referência, conforme o consumo de cimento por m ³	86

TABELA 4.21 - Valores da relação água/cimento obtidos para os concretos produzidos	87
TABELA 4.22 - Resultados obtidos para a Lei de Lyse, conforme sua utilização no Brasil	91

RESUMO

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilização de Agregados Reciclados de Concreto para Produção de Novos Concretos**. Florianópolis, 1999. 112p. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

As pesquisas e o interesse pela reciclagem de materiais de construção têm mostrado constante evolução ao longo dos últimos tempos. É um fato que a utilização de materiais reciclados na construção civil apresenta excelentes perspectivas para o futuro. Contudo, em muitos casos, se verifica satisfatória viabilidade técnica e econômica para o reaproveitamento imediato dos materiais reciclados.

A análise da viabilidade técnica e econômica é uma questão bastante complexa, visto que os materiais, os processos de utilização e os fatores econômicos envolvidos são extremamente variáveis de acordo com cada região e com as diversas atividades da indústria da construção civil.

Nesse contexto, cada país deve procurar o estabelecimento de diretrizes econômicas e especificações técnicas direcionadas aos materiais reciclados de construção, capazes de proporcionar o devido estímulo e segurança necessários ao desenvolvimento da atividade de reciclagem na construção civil.

Com o objetivo de contribuir para a análise do comportamento dos materiais reciclados em novos materiais, realizou-se um estudo de dosagem e produziu-se concretos contendo agregados graúdos reciclados de concreto, em substituição parcial e total do agregado graúdo natural.

Os resultados indicaram reduções na resistência à compressão em torno de 15% à 30% para os concretos produzidos com agregados reciclados, sendo as maiores reduções observadas para os traços com maior consumo de cimento. Na comparação entre os concretos com agregados reciclados secos e os concretos com agregados reciclados saturados, observou-se que ambos apresentaram resultados bastante similares.

O abatimento dos concretos com agregados reciclados secos apresentou perdas da ordem de 20% superiores às verificadas para os concretos de referência, após 1 hora de mistura. A evolução das resistências à compressão dos concretos com agregados reciclados se mostrou mais lenta até os 3 dias de idade, e mais rápida no período compreendido entre os 3 e os 7 dias, em relação aos concretos de referência.

No estudo realizado, foi possível ainda, o estabelecimento de curvas de dosagem para os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, relacionando-se importantes parâmetros, tais como a resistência à compressão, a relação água/cimento, os traços utilizados e o consumo de cimento.

ABSTRACT

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilization of Recycled Concrete Aggregates for the Production of New Concretes**. Florianópolis, 1999. 112p. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina.

The research and the interest in the recycling of construction materials has shown constantly evolution in the past years. It is true that the use of recycled materials in civil construction presents excellent perspectives for the future. However, in many cases, it has been verified technical and economic viability satisfactory enough for the immediate re-use of the recycled materials.

The analysis of the technical and economic viability is a quite complex matter, once the materials, the utilization processes and the economic factors involved are extremely variable depending on the region and the various activities in civil construction industry.

Therefore, each country must establish economic guidelines and technical specifications aimed at the recycled construction materials, capable of providing the stimulus and security necessary for the development of the recycling activity in the construction industry.

In order to contribute for the behaviour analysis of the recycled materials on new materials, a mixture proportioning study was carried out and concretes containing coarse recycled concrete aggregates were produced, having replaced partially or completely the coarse natural aggregates.

The results showed compressive strength reductions of about 15% to 30% for the concretes produced with recycled aggregates. The greatest reductions were observed for the mixtures with greater content of cement. When comparing the concretes with dry recycled aggregates and concretes with saturated recycled aggregates, it was observed that both showed similar results.

The workability of the dry recycled aggregate concretes has shown losses of the order of 20% more than those verified for the reference concretes, after 1 hour of mixing. The evolution of compressive strength of the concretes with recycled aggregates was slower than the reference concretes until the age of 3 days, and faster in the period ranging from 3 to 7 days.

In this study, it was also possible to establish mixtures proportioning curves for the concretes made with coarse recycled concrete aggregates, linking important parameters such as compressive strength, water/cement factor, mixtures employed and cement content.

1. INTRODUÇÃO

A reutilização de materiais na construção civil pode ser considerada uma realidade nos dias atuais, muito embora ainda haja, sem dúvida, um longo caminho a ser percorrido.

- Segundo HANSEN (1992), muito pouco concreto demolido é atualmente reciclado ou reutilizado em qualquer parte do mundo. A pequena quantidade recuperada é principalmente reutilizada como base de estabilização ou sub-base em construções rodoviárias.

Porém, tem-se notado um crescente aumento no interesse de empresários pela reciclagem das sobras que as várias atividades da construção civil proporcionam. Além das inegáveis vantagens ambientais relacionadas ao reaproveitamento desses materiais, O'MAHONY (1997) ressalta que o aumento do uso de agregados reciclados em aplicações na engenharia civil apresenta-se como alternativa para a redução do atual consumo de agregados naturais requerido pela indústria da construção.

A disponibilidade de agregados naturais com propriedades satisfatórias tem-se tornado crítica em muitas áreas urbanas, e as distâncias entre os depósitos de material natural e os locais de novas construções têm aumentado, ocasionando custos de transporte correspondentemente maiores (HANSEN, 1992).

Além disso, os custos de deposição dos materiais residuais são geralmente elevados. Fatores ambientais forçam as autoridades a procurarem locais específicos de deposição, a fim de se evitar a poluição urbana e a obstrução de rios, córregos, mangues e vales. VRIES (1993) destaca que, desde que esses custos aumentem, torna-se mais prático separar os vários materiais na fase de demolição ou construção, com vistas a um futuro reaproveitamento.

A obtenção de licenças para exploração de pedreiras junto aos órgãos de controle ambiental tem se tornado cada vez mais difícil. SHULZ (1993) ressalta que alguns

donos de pedreiras estão reduzindo sua produção para possibilitar a exploração desses depósitos a longo prazo.

Este fato é especialmente verdadeiro nos países europeus e no Japão, onde as leis são severas e a disponibilidade de recursos naturais é mais escassa. Mas é um fato que, a médio prazo, países como os Estados Unidos e até mesmo o Brasil devem sofrer tais restrições. No Brasil, este fenômeno já começa a ser sentido nos grandes centros urbanos.

Portanto, os agregados naturais precisam de um planejamento detalhado e cuidadoso de sua utilização. SHULZ (1993) defende que agregados naturais não deveriam ser utilizados para propósitos menores, tais como fundações e sub-bases, de modo a mantê-los para tarefas onde fossem extremamente necessários, por exemplo, pontes e outros elementos estruturais altamente carregados.

Em princípio, fontes primárias valiosas podem ser economizadas pelo uso de produtos alternativos. BROWN (1996) afirma que o uso de fontes marginais e alternativas, algumas vezes referidas como agregados secundários, deveria levar em consideração os seguintes itens:

- Desempenho satisfatório, de acordo com as especificações;
- Custo e viabilidade comercial quando usado como um agregado de concreto ou como um uso alternativo como material de preenchimento ou sub-base;
- Benefícios ambientais.

Ocorre que as fontes de materiais alternativos são, de forma geral, bastante restritas. A demanda de agregados para concreto é muito maior que a oferta de substitutos. SHULZ (1993) afirma que materiais como a escória, por exemplo, já vêm sendo utilizados à taxas bastante altas, próximas de 100%.

Existem os agregados leves artificiais, que são bastante utilizados para a produção de blocos e paredes divisórias de concreto poroso, melhorando seu desempenho na isolamento térmica e, muitas vezes, com a finalidade de aliviar o carregamento de edificações de porte. Porém, são pouco usados para a produção de concreto estrutural. Apesar de todo

o seu potencial de utilização para a produção de concretos em geral, esbarra-se no inevitável alto consumo de energia primária dispendido em sua fabricação.

Neste contexto, os agregados reciclados de construção apresentam-se como excelente alternativa. Existe um bom número de pesquisas experimentais mostrando que esses agregados podem ter excelente desempenho no concreto, porém COLLINS (1996) ressalta que seu uso prático na indústria da construção civil tem sido restringido basicamente pelas seguintes questões:

- Carência de especificações;
- Maior risco envolvido no processo;
- Pouca disponibilidade de material, em virtude de sua deposição em locais variados;
- Necessidade de estudos específicos de viabilidade econômica.

Embora a reutilização de resíduos de demolição em concretos pareça ser a reintrodução de uma velha prática, a formulação de novas e modernas especificações é o novo desafio. (PAUW, 1996).

De acordo com PERA (1996), pesquisadores da área concordam que concretos de resistência satisfatória podem ser produzidos utilizando-se agregados reciclados miúdos ou graúdos. Deve-se atentar ao fato, porém, de que a produção de bons concretos confeccionados com agregados reciclados está associada a um rigoroso controle de dosagem e produção, apresentando muitas dificuldades adicionais em relação aos concretos convencionais.

Se, por um lado, a qualidade do concreto não deve ser comprometida, por outro lado é necessário encontrar-se meios efetivos, econômicos e vantajosos de utilização de agregados reciclados, de forma a superar as dificuldades inerentes ao processo. É portanto, importante tarefa avaliar o comportamento do concreto com substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados (BAIRAGI et al., 1993).

Como afirma BROWN (1996), a utilização de concretos reciclados, pelo menos em parte como uma fonte de agregados no futuro, mostra significativo potencial. O grande desafio é estabelecer uma política de utilização desses materiais em escala,

possibilitando assim uma redução de custos e um planejamento estratégico de sua produção, de acordo com os materiais disponíveis e as necessidades de cada região.

No presente trabalho foram elaborados concretos com diferentes consumos de cimento e diferentes teores de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto, visando verificar o desempenho dos vários concretos, possibilitando assim uma otimização da utilização de agregados reciclados de concreto.

Tem-se como objetivo geral do trabalho, analisar a influência da utilização de agregados graúdos reciclados de concreto, em substituição parcial ou total aos agregados graúdos naturais, na produção e nas propriedades de novos concretos.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Verificar o efeito, na resistência à compressão dos concretos, da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto;
- Estabelecer curvas de dosagem para os concretos com agregados reciclados de concreto;
- Comparar as propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados secos com as propriedades dos concretos produzidos com agregados reciclados saturados;
- Avaliar a perda de abatimento nos instantes iniciais dos concretos produzidos com agregados reciclados secos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Breve Histórico

A reciclagem de materiais de construção tem se desenvolvido basicamente nos últimos anos, porém há registros de sua prática na antigüidade. De acordo com LEVY (1997), diversos autores alemães relatam que há notícias de obras executadas com agregados reciclados já nas cidades do Império Romano. Na Alemanha, por volta de 1860, foram utilizadas sobras de blocos de concreto de cimento Portland, na produção de artefatos de concreto.

Entretanto, WEDLER e HUMMEL (1946) apud LEVY (1997), relatam que só a partir de 1928 começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática, para avaliar o efeito do consumo de cimento, da quantidade de água e da granulometria dos agregados, oriundos de alvenaria britada.

Porém, a primeira aplicação significativa do uso de entulho reciclado só foi registrada após o final da Segunda Guerra Mundial, na reconstrução de diversas cidades européias que tiveram seus edifícios totalmente demolidos e os escombros ou entulho resultante, britados para a produção de agregados. Assim, pode-se dizer que a partir de 1946 teve início o desenvolvimento da tecnologia de reciclagem do entulho de construção civil. PERA (1996) também relata que os desenvolvimentos na tecnologia da reciclagem de concreto de demolição começaram na década de 40.

Desde então os estudos e a utilização de agregados reciclados vêm ganhando espaço e importância gradativamente. Estima-se que, aproximadamente 50 milhões de toneladas de concreto sejam demolidas todo ano na Comunidade Econômica Européia (E. R. L., 1979, apud HANSEN, 1992). Nos Estados Unidos estima-se um total de 60 milhões de toneladas de concreto demolido a cada ano (WILSON et al. 1976 e 1979, apud HANSEN, 1992). No Japão o total estimado gira em torno de 10 à 12 milhões de toneladas (KARAA, 1986, apud HANSEN, 1992).

Em 1988, foi realizado no Japão o Segundo Simpósio Internacional do RILEM em Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria. Segundo KASAI (1989), na seção de reutilização de concreto e alvenaria foram estabelecidas as seguintes diretrizes:

- O concreto de origem dos agregados reciclados deve estar isento de solo e grandes quantidades de impurezas;
- A forma e o tamanho do agregado reciclado podem ser controlados pelo processo de britagem;
- Os métodos de dosagem dos concretos reciclados podem ser melhorados, tendo como base os resultados apresentados em artigos desse simpósio;
- Agregados reciclados graúdos são adequados para reutilização, enquanto a qualidade dos concretos reciclados geralmente torna-se inferior se o agregado reciclado miúdo é utilizado;
- É necessário estabelecer normas de qualidade para agregados reciclados e concretos reciclados;
- Especificações e recomendações devem ser desenvolvidas de maneira a encorajar o uso de concreto reciclado, em conformidade com códigos e normas de cada país;

2.2. Propriedades dos Agregados Reciclados de Concreto

Os agregados reciclados podem apresentar impurezas no seu conteúdo, que devem ser devidamente identificadas, quantificadas e, se possível, eliminadas, pois estas podem comprometer significativamente o seu desempenho na produção de novos materiais.

Os principais componentes, além dos resíduos de concreto e materiais cerâmicos, contidos nos resíduos de demolição e construção de casas e outras edificações são, segundo HENDRIKS (1996), madeira, metais, borracha, vidro, papel, papelão, têxteis, materiais sintéticos, solo e tintas. O gesso é um material extremamente deletério e sua presença também é frequente, portanto não deve ser desprezada.

YANAGI et al. (1993) produziram concretos com agregados reciclados contendo impurezas bastante comuns associadas aos materiais de construção, tais como telhas de plástico, membranas de asfalto à prova d'água, gesso e tinta, e concluíram que sua presença afeta duramente as propriedades dos concretos produzidos com esses agregados, e mais drasticamente quando utilizados com teores de substituição superiores a 50%.

De acordo com HANSEN (1992), conforme especificações estabelecidas para agregado natural e rocha britada, é igualmente requerido que o agregado reciclado esteja isento de terra, torrões de argila, gesso, asfalto, madeira, papel, plásticos, tintas, têxteis, concretos leves, bem como outras impurezas.

VRIES (1993) relata que há na Holanda, desde 1984, regulamentações para testes de controle e limites de aceitação para agregados de concreto e alvenaria britados. As regulamentações são a Recomendação CUR-VB 4, específica para agregado britado de concreto, e a Recomendação CUR-VB 5, específica para agregado britado de alvenaria.

A Recomendação CUR-VB 4 estabelece que o principal constituinte, o agregado britado de concreto, deve representar mais que 95% do total. Não mais que 5% deve consistir de materiais secundários tais como tijolos de argila, tijolos de areia calcária, concreto leve, concreto espumoso, materiais cerâmicos e argamassa de alvenaria, com a clara exclusão de gesso e materiais contendo gesso. Além disso, não mais que 1% do agregado de concreto britado deve consistir de constituintes tais como madeira, papel, vidro, têxteis, materiais betuminosos, etc.

Os resíduos de materiais de construção apresentam, de um modo geral, grande quantidade de componentes. Estes resíduos podem ser provenientes dos restos dos materiais utilizados em uma construção, da demolição de construções, ou ainda, das sobras advindas da fabricação de materiais para a construção civil fora dos canteiros de obras, como é o caso por exemplo, das usinas de concreto.

RASHWAN e ABOURIZK (1997) constataram que, em uma usina de concreto típica, concretos retornados representam de 1 a 3% da produção diária de concreto. Dentre as razões para o retorno do concreto podem ser incluídas a não conformidade com as

especificações técnicas, bem como o material excedente não utilizado em algumas concretagens.

Ressalva-se ainda a existência de materiais testados pelas usinas, como os corpos de prova que, após serem submetidos aos testes, não apresentam utilidade alguma. Eles também representam uma quantidade considerável de material descartado com potencial de reutilização.

Quanto aos resíduos de entulho, provenientes de demolições e sobras de construções, sua composição é bastante variada, tanto em relação aos materiais constituintes como em relação aos diferentes locais de geração. A composição variada do entulho se verifica devido à grande quantidade de materiais envolvidos na indústria da construção civil. A geração de resíduos varia de acordo com as características da construção civil em cada região do país e do mundo.

Na região de Flanders, Holanda, por exemplo, SIMONS e HENDERIECKX (1993) afirmam que cerca de 40% dos resíduos de construção consistem de concreto enquanto outros 40% de alvenaria; os 20% restantes consistem de materiais betuminosos (12%), cerâmicos (3,4%) e vários outros resíduos. Outros pesquisadores europeus apresentam números um pouco distintos para as várias regiões da Europa, mas com uma característica comum, a grande quantidade de resíduos de concreto e alvenaria.

Esta grande quantidade de resíduos de concreto e alvenaria presente no entulho europeu, pode ser explicada pelo elevado número de edificações demolidas no continente. As demolições podem ser entendidas como o principal fator gerador de resíduos de construção na Europa.

Conforme UCHIKAWA e HANEHARA (1996), no ano de 1992, a quantidade de resíduos de materiais de construção descartados no Japão foi de 86 milhões de toneladas. Deste total, 29 milhões de toneladas, ou 34%, são correspondentes aos resíduos de concreto endurecido.

No Brasil de um modo geral, o número de demolições, embora tendendo a aumentar bastante no futuro, ainda é relativamente baixo, ocasionando assim uma predominância de resíduos provenientes de sobras das construções. Por este motivo o concreto e a

alvenaria possuem presença menos marcante no total de resíduos da construção civil brasileira, mas ainda assim apresentam quantidades consideráveis.

Em estudo realizado com os resíduos de construção da cidade de Ribeirão Preto, ZORDAN (1997) encontrou a composição média para o entulho gerado na cidade paulista constante na figura 2.1.

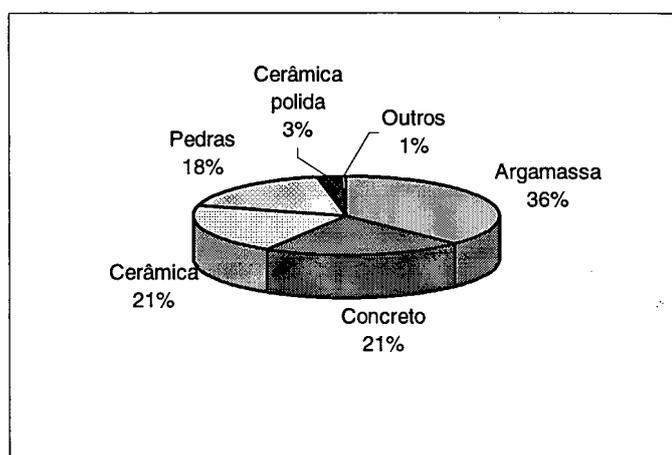


FIGURA 2.1 - Composição média do entulho gerado na cidade de Ribeirão Preto.

Pode-se perceber aí, como já constatado por outros pesquisadores como PINTO (1987), uma predominância da argamassa no entulho gerado em cidades brasileiras. Contudo, mesmo assim o concreto e a alvenaria se fazem presentes de forma representativa, com cerca de 21% cada. ZORDAN (1997) relata ainda que a cidade de Ribeirão Preto produz aproximadamente 970 t/dia de entulho. Somente de concreto, baseando-se nos valores da composição média apresentada na figura 2.1, teria-se então cerca de 200 t/dia de material descartado com possibilidade de reaproveitamento.

Os resíduos de construção e demolição são os agregados secundários mais amplamente utilizados, embora não exista muito registro de seu uso. Conforme relatado por BACMI (1993), do potencial total de utilização de agregados secundários na Europa, os resíduos de demolição e construção representavam aproximadamente 33% do total em 1989. Previsões indicam que até 2011 esse número se aproxime de 50%.

Os resíduos de construção civil podem encontrar um grande número de finalidades para reutilização, desde que devidamente tratados e analisados. Segundo HANSEN (1992),

uma vez que o agregado tenha sido britado, peneirado e, se necessário, descontaminado, pode-se encontrar aplicações tais como:

- 1 – Enchimentos em geral;
- 2 – Enchimento em projetos de drenagem;
- 3 – Sub-base ou material de base para construção rodoviária;
- 4 – Agregado para novos concretos.

Dentre essas finalidades, a que vem despertando mais interesse e que talvez seja a mais nobre delas é a utilização dos agregados reciclados para a produção de novos concretos. É, contudo, a aplicação que exige mais cuidados e estudos, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento dos concretos.

Para a produção de novos concretos com agregados reciclados tem-se utilizado diversos resíduos oriundos de demolição e construção, e o que parece ter as melhores propriedades para tal são os resíduos de concreto. BACMI (1993) descreve que, dos vários tipos de resíduos de demolição e construção, somente o concreto britado pode ser satisfatoriamente reutilizado como agregado de concreto.

Entretanto, agregados reciclados de alvenaria também têm sido utilizados com essa finalidade, mas conforme observado em HANSEN (1992), algumas de suas propriedades são significativamente inferiores às dos agregados reciclados de concreto. Quando se utilizam agregados reciclados de alvenaria para a produção de novos concretos, há consideráveis reduções de resistência e maiores problemas relacionados à absorção de água e à trabalhabilidade, dentre outros, em relação aos concretos produzidos somente à partir de agregados reciclados de concreto.

Uma das grandes dificuldades encontradas para a produção de agregados reciclados de concreto é a seleção e a caracterização das propriedades destes materiais. O concreto demolido pode estar misturado com solo ou outros resíduos de materiais de construção, ou ainda pode conter impurezas. Contudo, de acordo com HANSEN (1992), com a observação de poucas e simples precauções durante o processo de demolição, o

potencial para reciclagem do concreto demolido pode ser melhorado e o valor do resíduo aumentado.

A seleção dos materiais na recepção pelas usinas de reciclagem é a chave para a qualidade dos estoques e assim também dos agregados reciclados (MOREL, 1993). Para o sucesso de uma usina de reciclagem de materiais de construção, se faz essencial o cumprimento de determinados passos, como os a seguir descritos:

- Definição de critérios para seleção dos materiais residuais;
- Definição dos testes necessários para se verificar a qualidade dos agregados produzidos, e da frequência com que devem ser realizados;
- Definição dos limites de aceitabilidade para as propriedades dos agregados.

O grupo do comitê técnico da RILEM TC 121-DRG apresentou, no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria em 1993, as seguintes especificações para classificação e utilização de agregados reciclados (RILEM TC 121-DRG, 1994) :

Tipo I – Agregados oriundos de material constituído predominantemente por entulho de alvenaria.

Tipo II – Agregados oriundos de material constituído predominantemente por entulho de concreto.

Tipo III – Agregados constituídos por mistura de agregados naturais e agregados reciclados.

Os agregados do tipo III devem atender às exigências adicionais abaixo:

- Conteúdo mínimo de agregados naturais de 80% em massa.
- Conteúdo máximo de agregados Tipo I de 10% em massa.

As especificações são apresentadas na tabela 2.1.

TABELA 2.1 - Classificação dos agregados graúdos reciclados para concreto (RILEM TC 121-DRG, 1994).

Tipo de agregado Especificações	Tipo I CARG	Tipo II CARG	Tipo III CARG	Método de ensaio
Massa específica mínima material seco (kg/m ³)	1500	2000	2400	ISO6783&7033
Absorção de água máxima (%)	20	10	3	ISO6783&7033
Quantidade máxima de material SSS < 2200 kg/m ³ (%)	-	10	10	ASTM C 123
Quantidade máxima de material SSS < 1800 kg/m ³ (%) ^a	10	1	1	ASTM C 123
Quantidade máxima de material SSS < 1000 kg/m ³ (%)	1	0,5	0,5	ASTM C 123
Quantidade máxima de impurezas (vidro, betume, plásticos) (%)	5	1	1	Visual
Quantidade máxima de metais (%)	1	1	1	Visual
Quantidade máxima de matéria orgânica (%)	1	0,5	0,5	NEM 5933
Quantidade máxima de finos < 0,063 mm (%)	3	2	2	PrEN 933-1
Quantidade máxima de areia < 4 mm (%) ^b	5	5	5	PrEN 933-1
Quantidade máxima de sulfatos (%) ^c	1	1	1	BS 812, parte 118

^a Condição saturada com superfície seca

^b Se for excedido limite da fração areia, esta parte do agregado deverá ser considerada como parte da areia total a ser utilizada.

^c Quantidade de sulfato deverá ser calculada como SO₃.

As porcentagens constantes da tabela, referem-se a massa/massa.

CARG – Concreto de Agregado Graúdo Reciclado.

SSS – Agregado na condição Superfície Saturada Seca.

Os agregados reciclados de concreto, tipo II, conforme RILEM TC 121-DRG (1994), apresentam uma característica bastante peculiar em relação aos agregados naturais; possuem uma camada de argamassa, do concreto antigo, aderida às suas partículas, o que faz com esses agregados possuam características um pouco distintas dos agregados convencionais.

2.2.1. Absorção dos Agregados Reciclados

Devido à camada de argamassa do concreto original aderida à superfície dos agregados reciclados de concreto, os mesmos apresentarão propriedades diferentes das apresentadas pelos agregados naturais, principalmente maior absorção de água e maior deformabilidade (LEVY, 1997).

Diversos autores, tais como HANSEN (1992), NIRO et al. (1996) e SAEKI e SHIMURA (1996), relatam que valores típicos para absorção de água de agregados reciclados de concreto situam-se numa faixa que varia de 5 a 10%. Valores

relativamente menores são encontrados para agregados graúdos reciclados e maiores para agregados reciclados miúdos.

HANSEN e NARUD (1983) apud HANSEN (1992), encontraram taxas de absorção de água de 8,7% para agregados entre 4mm e 8mm e de até 3,7% para materiais entre 16mm e 32mm. Já a Building Contractors Society in Japan, B.C.S.J. (1978) apud HANSEN (1992), encontrou valores de absorção de água para agregados graúdos reciclados de concreto entre 3,6% e 8,0% e entre 8,3% e 12,1% para agregados miúdos reciclados de concreto.

Parece não haver diferença significativa nos valores de absorção de água de agregados reciclados de concreto em virtude das propriedades dos concretos de origem. De acordo com LEVY (1997), agregados reciclados obtidos à partir de concretos e argamassas com relação água/cimento variando de 0,40 à 1,20 apresentaram valores muito próximos de absorção. Para os agregados reciclados de concreto os valores variaram entre 6% e 7%, enquanto que para os agregados reciclados de argamassa os valores de absorção se situaram entre 15% e 17%.

De modo geral a literatura técnica indica que quanto maior for o período de endurecimento do concreto antes de sua britagem, maior será o valor da absorção apresentada pelos agregados reciclados. RASHWAN e ABOURIZK (1997) afirmam que isso pode ser atribuído à perda de umidade para a hidratação do cimento e formação do gel.

Os mesmos autores relatam ainda que a duração da estocagem dos agregados reciclados de concreto por mais de um dia não tem efeito na umidade dos mesmos. A umidade parece estar ligada então, somente às condições de temperatura e umidade a que esses agregados ficam expostos.

A absorção de água fornece indicações da quantidade de argamassa aderida às partículas de agregados reciclados de concreto, e o inverso também é verdadeiro, ou seja, quanto maior a quantidade de argamassa aderida aos agregados naturais, maior será a absorção de água dos agregados reciclados.

De acordo com vários registros, a quantidade de argamassa aderida às partículas dos agregados reciclados é maior para aqueles de dimensões características menores.

HANSEN & NARUD (1983) apud HANSEN (1992), encontraram um volume porcentual de argamassa aderida às partículas naturais de brita entre 25% e 35% para agregados reciclados com dimensão entre 16mm e 32mm, em torno de 40% para agregados reciclados com dimensão entre 8mm e 16mm e em torno de 60% para agregados reciclados com dimensão entre 4mm e 8mm.

Esses dados parecem ser coerentes, uma vez que, para uma superfície específica maior, como é o caso dos agregados menores, a quantidade de argamassa deve mesmo ser maior, já que a área a ser recoberta é maior.

2.2.2. Propriedades dos Agregados Miúdos Reciclados

Os agregados reciclados miúdos não são normalmente recomendados para a produção de novos concretos, pois apresentam diversos inconvenientes. O Comitê Técnico RILEM TC 121-DRG (1994) alerta para o fato de que os agregados reciclados miúdos frequentemente contém grande quantidade de contaminantes.

MOREL (1993) afirma que a absorção e o conteúdo de matéria orgânica são geralmente maiores para areia que para pedrisco e pedras. HUISMAN & BRITSON apud HANSEN (1992) relatam ainda que os agregados reciclados miúdos são mais grossos e angulares que o desejável para a produção de boas misturas de concreto.

Essas características dos agregados reciclados miúdos, mais grossos e angulares, e certamente com maiores valores de absorção de água, provavelmente resultarão em concretos pouco trabalháveis, sendo necessária a adição de grande quantidade de água, o que acarretaria um maior consumo de cimento para a produção de concretos com características semelhantes, inviabilizando-os economicamente em grande parte dos casos.

Além disso, a maior dificuldade de controle dos contaminantes pode trazer problemas referentes à durabilidade do material. A maioria absoluta dos pesquisadores consultados, tais como CABRERA e WAINWRIGHT (1994), HANSEN (1992) e VRIES (1993), trata com ressalvas a utilização de agregados miúdos reciclados para a produção de novos concretos. Neste contexto, parece bastante razoável estudar e

analisar mais detalhadamente o comportamento dos agregados reciclados miúdos em novos concretos, antes de se decidir pela sua utilização.

2.2.3. Densidade dos Agregados Reciclados

A densidade dos agregados reciclados normalmente é menor que a densidade dos agregados naturais, devido à densidade relativamente menor da argamassa aderida às partículas do agregado original. Contudo, conforme relata HANSEN (1992), para um mesmo cimento e agregado original, a densidade do agregado reciclado de concreto não varia muito, mesmo para grandes variações de relação água/cimento adotadas na produção do concreto original.

BAIRAGI et al. (1993), constatam que normalmente os agregados reciclados são mais porosos, possuem alta capacidade de absorção e baixa massa específica, características essas que influem no comportamento do concreto produzido com esses agregados, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Os valores da massa específica dos agregados reciclados são geralmente de 5 a 10% menores que os valores de massa específica dos agregados naturais, sendo que esses números podem variar um pouco, de acordo com o concreto de origem e a granulometria do material. De um modo geral, como afirma MACHADO JR. (1998), o agregado graúdo reciclado pode ser considerado, aproximadamente, como um agregado leve.

Entretanto, convém ressaltar que, considerando-se que um agregado leve deve apresentar valores de massa específica inferiores a $2,0 \text{ kg/dm}^3$, os agregados graúdos reciclados de concreto dificilmente poderão ser classificados como leves, uma vez que normalmente suas massas específicas, apesar de inferiores às dos agregados naturais, são superiores à este valor.

2.2.4. Textura Superficial dos Agregados Reciclados

Os agregados reciclados de concreto possuem uma superfície bastante porosa, com uma textura mais rugosa que a dos agregados naturais, que possuem uma textura geralmente

lisa. HAMASSAKI et al. (1996) classifica a superfície dos agregados naturais como praticamente polida e a superfície dos agregados reciclados como áspera e muito áspera.

Este fato é também devido à argamassa aderida aos agregados reciclados, pois a argamassa é mais rugosa e porosa que a brita natural. Possivelmente uma segunda britagem seja capaz de reduzir a quantidade de argamassa aderida às partículas e com isso, conseqüentemente, reduzir a porosidade do material. MOREL (1993) relata que o material pode ser britado uma segunda vez para reduzir a porosidade das partes miúda e graúda obtidas pela primeira operação.

PIETERSEN et al. (1998) também afirmam que o conteúdo de argamassa aderida às partículas é de certa forma determinado pelo nível de britagem do material. Assim sendo, grande atenção deve ser dispensada ao tipo de britagem utilizada.

2.2.5. Forma dos Agregados Reciclados

A forma dos agregados reciclados tende a ser bastante angular, não raro mais angular que a dos agregados naturais. Esta propriedade pode variar de acordo com o concreto de origem dos agregados reciclados e com o tipo de equipamento utilizado para britagem. Geralmente o britador de mandíbula acentua a forma angular, enquanto que o britador giratório torna as partículas mais arredondadas.

2.2.6. Granulometria dos Agregados Reciclados

A granulometria dos agregados reciclado e natural parece seguir as mesmas tendências, com os agregados reciclados graúdos e miúdos tendendo a uma granulometria ligeiramente mais grossa, o que resulta em um módulo de finura um pouco maior. Mas isto pode também depender das características do concreto de origem dos agregados reciclados e do sistema de britagem.

2.2.7. Resistência à Abrasão dos Agregados Reciclados

Com respeito às propriedades mecânicas, tais como resistência ao impacto e resistência à abrasão, se observou que os agregados reciclados são mais fracos que os agregados

naturais. Isso é esperado, por causa do componente de argamassa aderida e sua fraca ligação com as partículas de agregado (BAIRAGI et al., 1993).

Os valores obtidos no ensaio de abrasão Los Angeles com os agregados reciclados são normalmente maiores que os valores obtidos com os agregados naturais. Este fato, segundo TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996), é decorrente parcialmente da quantidade de argamassa aderida à brita original. De acordo com LEVY (1997), pesquisa realizada por HANSEN & (e) NARUD (1983) relata valores de Abrasão Los Angeles de 20% a 50% maiores para agregados reciclados em relação aos agregados originais.

Agregados reciclados de mesma composição, porém produzidos a partir de concretos com diferentes valores de relação água/cimento, costumam apresentar variação na resistência à abrasão, sendo que esta tende a diminuir à medida em que a relação água/cimento do concreto de origem se eleva.

De forma geral, quanto maior a resistência dos concretos de origem, maior a resistência à abrasão dos agregados reciclados. A Tabela 2.2 mostra a relação entre a resistência à compressão dos concretos de origem e a porcentagem de perda por abrasão Los Angeles dos correspondentes agregados reciclados, conforme YOSHIKANE apud HANSEN (1992).

TABELA 2.2 – Relação entre a resistência à compressão dos concretos de origem e a porcentagem de perda por abrasão Los Angeles (YOSHIKANE apud HANSEN, 1992).

Amostra	A	B	C	D	E	F
Resistência à compressão (MPa)	15	16	21	30	38	40
Perda por Abrasão Los Angeles (%)	28,7	27,3	28,0	25,6	22,9	20,1

HANSEN e NARUD (1983) chegaram a resultados semelhantes aos observados na tabela 2.2.

A norma brasileira NBR 6465, “Agregados - Determinação da abrasão “Los Angeles”, de abril de 1984, considera apto a ser utilizado para a produção de concretos os agregados que apresentarem valores de abrasão Los Angeles inferiores a 50%.

De acordo com a ASTM C-33 "Standard Specification for Concrete Aggregates", o valor da Abrasão Los Angeles deve ser menor que 50% para agregados usados para a produção de concreto, e deveria ser menor que 40% para agregados usados em rodovias. TOPÇU (1997).

Os agregados reciclados podem ser usados para produção de concreto sem serem lavados, segundo a norma americana pois, conforme relato de HANSEN (1992), a ASTM C 33 permite 1,5% de pó de fratura em agregados graúdos e 5% em agregados finos para concretos sujeitos à abrasão e 7% para todos os outros concretos.

2.2.8. Resistência Mecânica dos Agregados Reciclados

Se a resistência à compressão do concreto original que está sendo reciclado é maior que a do concreto de referência, com agregados naturais, então o concreto de agregados reciclados pode também ser feito para ter uma resistência à compressão maior que a do concreto de referência (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996). Convém ressaltar porém, que a resistência dos agregados reciclados não será a mesma do concreto que os originou. Possivelmente apresentará valores mais baixos, pois foi submetido a um processo de britagem, o que ocasionará o aparecimento de microfissuras ao longo da argamassa aderida e pode ainda ter consequências negativas na zona de interface agregado natural – argamassa aderida.

2.3. Produção de Concretos com Agregados Reciclados de Concreto

Concretos com agregados reciclados apresentam propriedades distintas dos concretos convencionais, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Por isso, como afirma KASAI (1993), testes de dosagem são necessários para determinar os traços adequados.

Se, para a produção de concretos convencionais, já se faz necessário um estudo de dosagem com os materiais disponíveis, de acordo com as aplicações pretendidas, para concretos com agregados reciclados essa necessidade é ainda maior e mais imprescindível, em virtude do grande número de variáveis envolvidas no processo.

Some-se a isso, um maior grau de incertezas, decorrentes da utilização ainda incipiente dos materiais reciclados na construção civil e, ainda, à falta de normas e especificações, bem como parâmetros advindos do uso corrente dos materiais, já existentes para o concreto convencional.

Portanto deve-se encontrar valores ideais de utilização para cada caso em particular. LEVY (1997) afirma que, para quantificar corretamente esses valores, seria necessário preparar um estudo de dosagem para cada tipo de concreto e assim poder-se-ia interpretar fisicamente o fenômeno que ocorre à medida que são substituídos os agregados naturais pelos reciclados.

VRIES (1993), destaca que, para um projeto de dosagem, a exemplo dos concretos convencionais, deve-se levar em conta para a produção de concretos com agregados reciclados, dentre outros, basicamente os seguintes fatores:

- Trabalhabilidade da mistura fresca;
- Resistência à compressão do concreto endurecido;
- Durabilidade.

Deve-se atentar para o fato de que o material residual da construção civil é, na grande maioria dos casos, um material muito heterogêneo e que o comportamento apresentado pelos concretos de agregados reciclados é bastante distinto em função da origem do agregado reciclado utilizado. Por esse motivo faz-se necessário caracterizar bem os materiais recicláveis da construção civil. LEVY (1997) classifica os resíduos em duas categorias principais, que devem ser estudadas separadamente:

- resíduos provenientes de concreto;
- resíduos provenientes de alvenaria.

No caso de resíduos provenientes de concreto, as propriedades do concreto original parecem restringir as propriedades atingíveis por concretos de agregados reciclados. Contudo, com os efeitos complexos e as interações de muitas variáveis, torna-se difícil fazer previsões sobre o comportamento de agregados reciclados em concretos sem a condução de testes sob as circunstâncias de utilização (TAVAKOLI e SOROUSHIAN, 1996).

Para produção em escala de concretos com agregados reciclados, certos cuidados de separação e armazenagem de agregados devem ser tomados. Tipos de agregados diferentes requerem capacidade de armazenagem adicional.

Conforme SHULZ (1993), existe um certo risco em trocar frequentemente o local destinado à armazenagem dos agregados, em virtude da possibilidade de mistura dos agregados reciclados com naturais ou com reciclados de diferentes propriedades. Para evitar arranjos complicados e problemas como os acima mencionados, o número de locais de estocagem deve ser aumentado.

Como medida preventiva, recomenda-se homogeneizar os agregados por lotes de produção, expediente ou estocagem, pois os agregados reciclados podem apresentar características bastante variáveis, prejudicando assim o processo de dosagem e a precisão do controle da produção desses concretos.

As qualidades da pasta e da zona de interface dos agregados reciclados, bem como o conteúdo da pasta do concreto original, influenciam as propriedades do concreto com agregados reciclados. HANSEN (1992) atesta que existe apenas limitada evidência, e alguma discordância, sobre o efeito do concreto original na resistência do novo concreto feito com este agregado, mas parece provável que, quando o concreto rompe, isto acontece na argamassa aderida ao agregado de concreto britado que é a ligação mais fraca.

A presença de agregados cria zonas mais fracas, as interfaces, lugar onde as fissuras começam. As diferenças de deformabilidade entre os agregados e a matriz produzem concentrações de tensão nas interfaces, que podem diferir bastante das deformabilidades médias do material. Convém lembrar aqui que, no caso dos concretos com agregados reciclados de concreto, haverá pelo menos duas zonas de interface, ou seja, a ligação agregado natural – argamassa antiga e a ligação argamassa antiga – argamassa nova. Pode ocorrer ainda uma terceira interface, a ligação agregado natural – argamassa nova, visto que muitas vezes a argamassa antiga não recobre completamente o agregado natural.

GIACCIO et. al. (1992) relatam que a resistência do agregado afeta a resistência do concreto porque a probabilidade de fratura e propagação de fissuras depende da sua

própria resistência. Assim, a presença de agregados mais fracos reduz significativamente a resistência.

A influência das características dos agregados aumenta em concretos de alta resistência. Como a resistência da matriz é próxima da resistência da rocha, a probabilidade do desenvolvimento de fissuras através dos agregados aumenta, e os mecanismos de fissura são modificados, em comparação com o concreto convencional.

A pasta de cimento do concreto original, que fica aderida ao agregado reciclado, tem um importante papel na determinação do desempenho do concreto de agregado reciclado com relação à retração. Segundo TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996) maiores quantidades de pasta de cimento aderidas às partículas de agregado reciclado levam a maiores movimentos de retração nos concretos de agregados reciclados, principalmente quando são utilizados agregados reciclados secos. Isso ocorre devido à maior absorção de água característica desses agregados.

Durante o processo de produção, cuidados especiais devem ser tomados com relação ao controle da massa específica dos agregados reciclados. HANSEN (1992) lembra que qualquer variação deste parâmetro dos agregados reciclados durante a produção, dará margem à variações, não apenas nas proporções da mistura e, conseqüentemente, nas propriedades do concreto, mas também no rendimento do concreto produzido.

Diferenças entre os agregados reciclados e naturais ocorrem ainda com relação à forma, com o reciclado geralmente mais lamelar, e à superfície, normalmente mais rugosa nos reciclados. Isso afeta sensivelmente a trabalhabilidade dos concretos com esses agregados, aumentando o consumo de água requerido para produzir concretos com mesmos valores de consistência e resistência.

Caso o concreto seja preparado exclusivamente com agregados reciclados, de acordo com as pesquisas anteriores, haverá necessidade de se elevar em cerca de 15% a relação água/cimento para se manter a mesma consistência. Caso seja preparado com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais, a elevação da relação água/cimento será da ordem de 5%. Isso evidentemente obrigará a um aumento no consumo de cimento ainda maior para se manter a resistência à compressão. (LEVY, 1997).

Salienta-se que os agregados reciclados miúdos, a princípio, não parecem adequados à produção de novos concretos, pois prejudicam sensivelmente a trabalhabilidade e possuem altos índices de absorção de água, levando a um aumento excessivo no consumo de cimento e inviabilizando financeiramente o seu emprego em muitas situações. LEVY (1997) destaca que quando a dimensão máxima do agregado reciclado for menor que 2mm, será economicamente inviável a sua utilização.

Um grande problema decorrente das altas e variáveis taxas de absorção dos agregados reciclados é a dificuldade encontrada para a quantificação da água disponível para a hidratação do cimento pois, desde que os poros não estejam saturados, eles podem extrair água da pasta ou absorver nata de cimento, principalmente nos instantes iniciais. Desta forma, a precisão da dosagem de concretos contendo esses agregados pode ser prejudicada.

KASHINO e TAKAHASHI (1988) apud LEVY (1997), tentaram produzir concreto usinado utilizando agregado reciclado de concreto e concluíram que seria necessário umedecer previamente os agregados antes de sua utilização. Com o objetivo de minimizar os efeitos dos elevados e variáveis teores de absorção de água por parte dos agregados reciclados, a maioria dos pesquisadores recomenda a saturação destes antes de sua utilização.

Esse procedimento evitaria a incerteza da quantidade de água existente nos agregados, desde que os mesmos estivessem na condição saturada superfície seca. Essa condição é, porém, bastante difícil de ser atingida na prática, pois sempre haverá um filme de água envolvendo as partículas, difícil de ser quantificado. Assim sendo, a quantidade de água adicionada voltará a ser imprecisa.

Conforme atesta SHULZ (1993), outra desvantagem desse processo são os equipamentos e a capacidade de armazenamento adicionais que fatalmente serão necessários para preparar o agregado durante um período maior e mantê-lo em uma condição saturada homogênea. Umedecer os agregados requer um tamanho e forma específico das pilhas de estocagem e um subsolo drenado.

Para os agregados leves de superfície porosa, a absorção de água após 24 horas de imersão fornece a informação necessária sobre o comportamento de saturação, e isso

também parece verdadeiro para os agregados reciclados. Porém esse comportamento de absorção pode ser diferente, uma vez que os agregados reciclados estejam em contato com a pasta de cimento e não diretamente com a água.

Segundo SCHULZ (1993), a quantidade de água absorvida depende da consistência do concreto. Por essa razão, os valores de absorção de água dos agregados reciclados testados não correspondem diretamente ao comportamento da absorção no concreto. Quanto mais fluido é o concreto fresco, mais água será absorvida.

Aditivos plastificantes e redutores de água também podem ser utilizados, conforme destaca MOREL (1993). Em concretos de agregados reciclados eles mantêm basicamente os mesmos efeitos produzidos em concretos de agregados naturais. O principal fator limitante de seu uso é o custo adicional embutido na produção dos concretos de agregados reciclados, na grande maioria das vezes não compensatório para os produtores.

É geralmente aceito que, quando areia natural é usada, até 30% de agregado britado natural pode ser substituído por agregados reciclados graúdos sem mudanças significativas das propriedades do concreto (HANSEN, 1992). Conforme relata VRIES (1993), de acordo com a especificação holandesa, a substituição de até 20% do agregado graúdo é permitida e a sua aplicação não afeta as propriedades do concreto fresco e endurecido.

De acordo com LEVY (1997), diversos pesquisadores japoneses KIKUCHI et al. (1988); KASHINO E TAKAHASHI (1988); YANAGI (1988) E YAMAMOTO (1988), concordam que a substituição de 30% dos agregados graúdos naturais não altera significativamente as propriedades dos concretos produzidos, portanto esta seria a forma mais simples e econômica de se utilizar agregados reciclados para usos gerais.

Perdas de resistências são observadas para os concretos de agregados reciclados, mas são significativamente maiores para teores de substituição superiores à 50%. A razão para tal redução poderia ser atribuída, em geral, às propriedades inferiores do agregado reciclado. Além disso, a resistência do concreto depende parcialmente das interfaces entre a argamassa e o agregado.

O concreto de agregado reciclado tem que sustentar áreas de ligação entre agregado natural - argamassa antiga, agregado natural - argamassa nova e argamassa antiga - argamassa nova. Em consequência disto, o número de áreas de ligação mais fracas será maior no concreto contendo maiores proporções de agregados reciclados e, portanto, isso pode também levar à menores resistências. Em estudo realizado, conclui-se que até 50% de agregado natural poderia ser substituído por agregado reciclado de concreto, sem afetar seriamente a qualidade dos novos concretos (BAIRAGI et al., 1993).

Quanto à granulometria dos agregados reciclados, não há registro de estudos padronizados e comparáveis, utilizando diversas faixas granulométricas. Porém, o método DOE (TEYCHENNE et al., 1975 apud HANSEN, 1992), largamente utilizado no Reino Unido, recomenda que agregados reciclados tenham tamanho máximo entre 16mm e 20mm. Recomenda ainda que, para a estimativa da taxa de agregados miúdos por agregados graúdos, pode ser assumido que a granulometria ótima de agregados reciclados seja a mesma que para agregados convencionais.

Como os agregados reciclados podem muitas vezes conter determinada quantidade de gesso residual, MOREL (1993) alerta que cimentos com alto conteúdo de C_3A devem ser evitados porque podem reagir com qualquer impureza de gesso. Por isso cimentos Portland com adição de escória e cimentos de escória são recomendados.

Especial atenção deve ser dada à cura dos concretos com agregados reciclados, que deve ser feita logo nos períodos iniciais para se evitar retração, especialmente quando o concreto contém superfícies livres, como pisos e lajes por exemplo. MOREL et al. (1993) destacam que o concreto com agregados reciclados é muito sensível à evaporação. Por isso, é requerida uma proteção ou um umedecimento adicional logo nos momentos iniciais.

Normas, códigos e métodos de ensaio para agregados reciclados e concretos com agregados reciclados estão sendo elaboradas ou reavaliadas no Japão, Estados Unidos, Países Baixos, Reino Unido e Dinamarca (LEVY, 1997). Há ainda recomendações de utilização na ex-USSR e Alemanha (HANSEN, 1992).

2.4. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Fresco

As propriedades distintas apresentadas pelos agregados reciclados em relação aos agregados naturais conferem ao concreto produzido com agregados reciclados um comportamento substancialmente diferente daquele apresentado pelo concreto convencional.

Conforme diversos estudos analisados, onde as propriedades do concreto fresco foram estudadas, percebe-se que, em geral, o material reciclado produziu misturas menos trabalháveis comparadas com aquelas feitas com agregados naturais.

Em consequência da forma mais angular e a maior absorção de água do agregado reciclado, a demanda de água total do concreto fresco será maior quando comparada ao concreto de agregados naturais (VRIES, 1996). Este aumento na demanda de água normalmente significa redução de resistências para misturas semelhantes ou aumento do consumo de cimento, quando se desejar manter os mesmos níveis de resistências.

Outro fator que afeta a trabalhabilidade é a textura dos agregados reciclados. Como ela é mais rugosa, a fricção interna tende a aumentar, requerendo mais argamassa para se manter a trabalhabilidade destes concretos nos mesmos patamares de concretos convencionais com traços semelhantes.

A velocidade de perda de abatimento do concreto com agregados reciclados parece ser maior do que aquela observada para os concretos convencionais, especialmente quando se substituem todos os agregados naturais por reciclados, inclusive os miúdos. Conforme BAIRAGI et al. (1993), a perda de trabalhabilidade nos primeiros dez minutos é progressivamente maior com o aumento do teor de substituição.

MACHADO JR et al. (1998) afirma que, quando todos os agregados são substituídos, a alta absorção e o maior índice de vazios aumentam a velocidade de perda de abatimento do concreto, conferindo trabalhabilidade durante, apenas, 60 minutos.

A trabalhabilidade é um dos principais entraves para a utilização dos agregados miúdos reciclados. Segundo HANSEN (1992), eles parecem reduzir a trabalhabilidade significativamente, visto que, quando somente agregado graúdo de concreto britado é

usado, a trabalhabilidade é apenas um pouco diferente das misturas produzidas exclusivamente com agregados naturais.

De acordo com o Comitê Técnico RILEM TC 121-DRG (1994), o uso de agregados reciclados miúdos tem levado à problemas na produção, como por exemplo, no controle da água livre e na segregação de materiais durante a produção.

HANSEN (1992) afirma que, para se manter a coesão e a trabalhabilidade do concreto fresco, é necessário que haja de 25% a 40% em massa de agregado miúdo em relação ao agregado total existente, dependendo do tipo de areia e do seu módulo de finura, da relação água/cimento e da dimensão máxima do agregado graúdo.

A massa específica, menor no caso dos agregados reciclados, influi na massa específica do concreto produzido com esses agregados, podendo-se caracterizá-los como intermediários entre concretos leves e convencionais.

KIKUCHI et al. (1993) verificaram uma diminuição gradual da massa específica do concreto conforme o teor de substituição de agregados naturais por reciclados aumentou. Por outro lado, o conteúdo de ar aumentou gradualmente conforme o teor de substituição aumentou.

Há muita incerteza em relação ao tempo de pega dos concretos com agregados reciclados, mas parece que ele é menor, especialmente quando todos os agregados naturais são substituídos. RAVINDRARAJAH et al. (1987) apud LEVY (1997), analisaram o tempo de pega de concretos com agregados reciclados e chegaram à conclusão de que há redução de 30 minutos no tempo de início de pega e de 35 minutos no tempo de fim de pega quando todos os agregados naturais são substituídos por agregados reciclados.

Os aditivos parecem seguir mais ou menos os mesmos mecanismos de atuação que possuem nos concretos convencionais, quando utilizados nos concretos com agregados reciclados. Porém, existem poucos relatos sobre o assunto, mesmo porque a grande maioria dos estudos se refere a concretos reciclados de baixa resistência, onde talvez não se justifique, economicamente, a utilização de aditivos.

CABRERA e WAINWRIGHT (1994), concluem em seus estudos que superplastificantes permitem uma redução da relação água/cimento, mas não melhoram a permeabilidade dos concretos reciclados na mesma proporção que o fazem com a resistência. O mesmo pode ser dito para a utilização de cinzas volantes em substituição aos agregados miúdos. Alertam porém para o fato de que, para concretos com agregados reciclados, o efeito dos superplastificantes não parece ser tão previsível quanto para concretos com agregados naturais.

2.5. Propriedades dos Concretos com Agregados Reciclados no Estado Endurecido

O desempenho de um concreto está diretamente relacionado ao desempenho dos materiais utilizados para a sua produção. Os agregados, como parte fundamental das misturas, possuem influência determinante nas propriedades finais dos concretos. Portanto, parece razoável que as propriedades finais dos concretos se modifiquem quando se substituem os agregados naturais por reciclados.

A resistência à compressão é uma das mais importantes propriedades de um concreto, pois dela depende a sustentação das estruturas. Assim sendo, todas as decisões de utilização de um concreto passam por uma análise criteriosa dessa propriedade.

A resistência à compressão depende diretamente da resistência e do desempenho dos agregados no concreto. Por isso, não é de se estranhar que as resistências dos concretos com agregados reciclados sejam menores que as resistências de concretos de referência, com traços semelhantes, preparados exclusivamente com agregados naturais.

Comumente, a resistência à compressão de concretos com agregados reciclados de concreto é de 5% a 10% mais baixa do que à de correspondentes concretos confeccionados com agregados convencionais (HANSEN, 1992). De acordo com TOPÇU (1997), a B.C.S.J. explica que no Japão a taxa de decréscimo de resistências de concretos com agregados reciclados de concreto fica entre 14 e 32%.

Deve-se levar em conta, porém, que esses números são bastante genéricos e podem variar muito de acordo com alguns fatores importantes, como as propriedades dos agregados reciclados utilizados, o teor de substituição empregado e os níveis de

resistências em que se está trabalhando, visto que para níveis de resistência inferiores, as suas reduções tendem a ser menores.

A resistência à compressão parece sempre ser afetada quando se utiliza agregados miúdos reciclados. WAINWRIGHT et al. (1993) encontraram reduções de resistências superiores a 20% para concretos com agregados graúdos e miúdos reciclados, em comparação aos concretos produzidos com areia natural e apenas agregados graúdos reciclados.

Poucos pesquisadores fazem referência ao desenvolvimento da resistência à compressão com a idade de cura. HANSEN (1992) relata que autores como BUCK (1973), MALHOTRA (1976) e RAVINDRARAJAH e TAM (1985) encontraram para concretos com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais, índices de desenvolvimento de resistências similares aos dos concretos produzidos somente com agregados naturais.

Já WAINWRIGHT et al. (1993) encontraram um menor desenvolvimento de resistências à compressão até os 7 dias de idade para concretos com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais, em relação aos concretos com agregados naturais.

BAIRAGI et al. (1993) também encontraram resistências relativamente menores aos 3 e 7 dias de idade, para concretos com agregados reciclados graúdos e miúdos naturais, em relação aos concretos convencionais. A tabela 2.3 mostra a porcentagem relativa das resistências à compressão para as idades de 3, 7, 14 e 28 dias para todos os concretos ensaiados por BAIRAGI et al.

TABELA 2.3 – Porcentagens relativas das resistências à compressão nas diferentes idades de cura, em relação aos 28 dias (BAIRAGI et al., 1993).

Traço (massa)	Idade (dias)	Teor de substituição				
		0%	25%	50%	75%	100%
1 : 2,1 : 3,8	3	52	49	47	46	45
	7	69	65	64	64	63
	14	87	83	81	80	80
1 : 1,7 : 3,3	3	59	55	54	52	52
	7	72	71	70	70	69
	14	89	88	87	86	86
1 : 1,4 : 2,9	3	62	62	60	59	57
	7	76	74	73	72	70
	14	92	91	89	88	87

BAIRAGI et al. (1993) acreditam que este comportamento, com maior desenvolvimento de resistências dos 3 aos 14 dias para os concretos com agregados reciclados seja devido provavelmente à interferência do cimento da camada de argamassa antiga aderida às partículas do agregado reciclado, na formação de um sistema contínuo de gel na matriz.

MACHADO JR. (1998) acredita que quando se utiliza agregados reciclados secos, a absorção de água dos mesmos pode diminuir a água livre, aumentando assim a resistência à compressão dos concretos.

Ressalta-se porém que existe a possibilidade de que os agregados reciclados secos, uma vez adicionados à uma nova mistura, absorvam nata de cimento, e não apenas água, fato que poderia contribuir para a melhoria das propriedades desses agregados, ocasionando um aumento da resistência dos mesmos.

Os agregados reciclados oriundos de concretos novos parecem contribuir para um aumento das resistências dos concretos com eles produzidos. Tal fato pode ser talvez atribuído ao cimento ainda não hidratado contido nos agregados reciclados de concretos de baixas idades. RASHWAN e ABOURISK (1997) confeccionaram concretos com agregados reciclados provenientes de concretos com idades de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 dias. Notaram que as resistências são maiores para concretos mais novos, chegando até mesmo a atingir resistências maiores que as dos concretos de controle.

Os mesmos autores afirmam ainda que, concretos feitos com agregados reciclados britados 24 horas após a moldagem podem atingir valores 25% maiores de resistência à compressão do que as misturas de controle feitas com a mesma porcentagem de cimento. Já concretos feitos com agregados reciclados que permaneceram estocados por 7 dias após a britagem, contudo, atingiram apenas 93% da resistência à compressão aos 28 dias da mistura de controle.

Isso sugere que a britagem do concreto em estágios iniciais e sua utilização na fabricação de novos concretos pode melhorar as propriedades de resistência do concreto, pois, quanto maior a estocagem do concreto antes da britagem, menor será o ganho de resistência, até se tornar comparável ou menor àquela do concreto feito com agregados naturais.

A resistência à tração nos concretos com agregados graúdos reciclados de concreto parece seguir a mesma tendência dos concretos convencionais. Já quando se utiliza agregados reciclados miúdos se verifica uma tendência de redução de resistências da ordem de 10% a 20%. MACHADO JR et al. (1998) afirmam que o agregado graúdo reciclado não influencia a resistência à tração, e o concreto com este produzido obedece às mesmas relações teóricas, entre resistência à tração e resistência à compressão simples, que os concretos convencionais de mesma classe.

HANSEN (1992) cita que autores como RAVINDRARAJAH e TAM (1985), MUKAI et al. (1978) e B.C.S.J. (1978) encontraram mesmas relações entre resistência à compressão e tração para concretos com agregados graúdos reciclados de concreto e concretos convencionais. Já BAIRAGI et al. (1993) encontraram resistências à tração ligeiramente menores para concretos com agregados graúdos reciclados, em relação aos concretos convencionais.

Com relação ao módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados, a tendência é de que este apresente valores mais baixos do que os de correspondentes concretos de controle, fato devido à grande quantidade de argamassa endurecida aderida às partículas de agregado natural nos concretos reciclados. HANSEN (1992) constata que valores de 15% a 40% mais baixos são reportados. Valores relativamente um pouco maiores do módulo de elasticidade são encontrados para concretos produzidos com agregados graúdos reciclados e miúdos naturais, e valores menores para concretos produzidos exclusivamente com agregados reciclados.

Conseqüentemente os concretos com agregados reciclados tendem a ser sempre mais deformáveis do que os concretos com agregados naturais. Conforme MACHADO JR (1998), o concreto com agregados reciclados pode apresentar deformações bem maiores.

A retração por secagem e a fluência dos concretos de agregados reciclados tendem a ser sempre maiores que em concretos produzidos com agregados convencionais. Isto pode ser atribuído à grande quantidade de argamassa endurecida aderida às partículas de agregado natural nos concretos reciclados.

HANSEN (1992) reporta valores de retração por secagem e fluência de cerca de 40% a 80% maiores para os concretos de agregados reciclados. Esses valores, porém, são maiores quando se utilizam agregados reciclados miúdos e tendem a ser menores para concretos reciclados com agregados miúdos naturais e apenas graúdos reciclados. A magnitude desses aumentos pode depender ainda das propriedades do concreto original, do agregado reciclado e do concreto de agregados reciclados.

Para BAIRAGI et al. (1993), o teor de substituição possui influência marcante na relação tensão-deformação do concreto, especialmente nos altos teores de substituição. A presença de interfaces entre o agregado natural e a nova argamassa de cimento, agregado natural e a antiga argamassa de cimento e a antiga argamassa de cimento e a nova argamassa de cimento, levam a um progressivo desenvolvimento de fissuras entre essas interfaces, que tendem a ocorrer em maior número no concreto contendo maiores proporções de agregado reciclado.

De modo geral, sabe-se que a resistência dos concretos que dão origem aos agregados influencia a resistência dos novos concretos produzidos com estes agregados. Porém, segundo CABRERA e WAINWRIGHT (1994), a resistência do concreto de origem dos agregados reciclados não afeta significativamente as relações entre porosidade e resistência, e permeabilidade e resistência dos novos concretos.

O total de ar incorporado em concretos com agregados reciclados parece ser ligeiramente maior do que em concretos com agregados naturais, o que pode levar, conforme LEVY (1997), a uma redução de sua massa específica entre 5% e 15%.

Quanto à utilização de ensaios não destrutivos em concretos com agregados reciclados, há poucos relatos na literatura. No ensaio de ultra-som, o valor de sua velocidade de propagação parece diminuir em concretos de agregados reciclados, o que pode ser consequência da menor densidade do material, com maior número de vazios de ar incorporados. RAVINDRAJAH et al. (1988) relatam em seus estudos que, para um mesmo valor de velocidade de pulso ultra-sônico, o concreto com agregados reciclados mostrou maior resistência do que os concretos com agregados naturais, ou seja, há uma diminuição da velocidade de pulsos ultra-sônicos para uma mesma resistência.

Os aditivos, apesar de relativamente ainda pouco estudados neste tipo de aplicação, aparentemente melhoram as propriedades dos concretos endurecidos, não apresentando efeitos deletérios ao concreto.

Segundo DELWAR et al. (1997), a Administração Federal de Rodovias (FHWA), algumas agências rodoviárias estaduais e a corporação de engenheiros do exército americano conduziram diversos estudos para verificar a adequabilidade de utilização de agregados reciclados de concreto para a confecção de novos concretos. A seguir tem-se algumas de suas conclusões:

- O uso de aditivos redutores de água efetivamente aumenta as resistências dos concretos com agregados reciclados;
- Aditivos incorporadores de ar e cinzas volantes podem ser usados para melhorar a durabilidade e trabalhabilidade de concretos com agregados reciclados;
- A lavagem dos agregados graúdos reciclados não afeta os níveis de resistência e portanto não é considerada necessária.

A lavagem muitas vezes é considerada necessária em virtude do excesso de pó ou de contaminantes que possam estar presentes nos agregados reciclados graúdos. Na maioria dos casos porém, não tem sido observada essa necessidade, visto que a quantidade de pó presente nos agregados é geralmente baixa e os contaminantes podem ser eliminados com uma pré-seleção do material. Além do mais, este pode ser um processo trabalhoso, capaz de onerar consideravelmente os custos desses agregados.

O comportamento do concreto com agregados reciclados em vigas e estruturas pré-moldadas parece ser tecnicamente satisfatório. NIRO et al. (1996) produziram vigas com concreto reciclado e concluíram que esses elementos podem ter desempenho mecânico satisfatório e previsível em tal situação.

A produção de concretos com agregados reciclados, como visto, não parece sofrer objeções técnicas fundamentais capazes de inviabilizá-la. Como afirmam TAVAKOLI e SOROUSHIAN (1996), concretos de alta qualidade podem ser produzidos usando agregados de concreto reciclados, quando determinadas as propriedades do concreto original.

AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ (1996) produziram concretos com agregados reciclados oriundos de concretos de alta resistência com três anos de idade. Esses concretos atingiram resistências superiores às dos concretos de referência, produzidos com agregados naturais.

Porém, mesmo não se sabendo as propriedades do concreto original, desde que adotados os procedimentos adequados, concretos reciclados de boa qualidade podem ser produzidos. A utilização de agregados reciclados dependerá então basicamente de fatores sociais e econômicos associados à sua prática.

Já é normalmente aceito pela maioria dos pesquisadores e até mesmo por regulamentações de alguns países, que para todos os tipos de concreto é permitida a substituição de até 20% do agregado graúdo por agregado de concreto britado ou por agregado misto, sendo que o agregado misto deve conter pelo menos 50% de concreto britado e não mais que 50% de agregado de alvenaria britado.

VRIES (1993) ressalta porém que, do ponto de vista econômico e ambiental, a substituição de apenas 20% de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados não é suficiente.

Há portanto ainda, um longo caminho a ser trilhado na área de reciclagem de materiais na construção civil. Estudos realizados até aqui indicam caminhos a seguir, mas ainda não conseguiram estabelecer de forma definitiva a necessária confiança, de forma a viabilizar uma utilização em escala dos materiais reciclados.

2.6. Durabilidade dos Concretos com Agregados Reciclados de Concreto

Em virtude das muitas dúvidas ainda existentes em torno da questão, a durabilidade dos concretos com agregados reciclados tem sido um dos fatores mais limitantes da sua utilização até o presente momento.

A durabilidade dos produtos sempre foi uma questão vital para empresários e governantes dos países mais desenvolvidos, preocupados com a satisfação dos clientes e as duras penas que podem ser impostas no caso de problemas futuros. No Brasil porém,

nem sempre foi assim, com parte dos empresários e governantes acostumados ao lucro imediato e o descaso em relação aos clientes e à população em geral.

Felizmente pode-se notar grandes avanços nesta área, com o surgimento de leis mais severas, com a competição em busca do cliente e com a conscientização da importância do planejamento a longo prazo. Por isso, também em nosso país, pode-se dizer que a durabilidade dos produtos é uma questão vital nos dias atuais.

Como já visto, sabe-se que, para a produção de concretos duráveis, uma condição básica é que os agregados estejam livres de impurezas e contaminações. Para o concreto, uma das principais impurezas, e talvez a mais nociva, é o gesso, muitas vezes presente nos restos de construção e demolição utilizados para a produção de novos agregados.

O gesso pode reagir com o cimento e formar a etringita no concreto em seu estado endurecido, que é um fator extremamente nocivo, pois causa expansão e conseqüente fissuração do mesmo. MOREL, A. et. al. (1993), relatam que a presença de gesso nos agregados tem sido culpada por certos defeitos em bases de rodovias e fundações onde agregados reciclados foram tratados com cimento. Portanto todo cuidado é pouco quando se trata da presença de gesso nos agregados.

Outro fator de durabilidade importante, especialmente em países de clima frio, é o comportamento ao gelo/degelo, alvo de algumas controvérsias na literatura. KIBERT (1993), reporta que testes indicam que os agregados reciclados são superiores em durabilidade em relação aos agregados naturais, quando submetidos à ação de gelo/degelo. Já KASAI (1989) relata que NISHIBAYASHI et. al. e KOBAYASHI et. al. constataram uma resistência ao gelo/degelo para os concretos com agregados reciclados geralmente inferior àquela dos concretos com agregados naturais.

Talvez possa-se atribuir tais controvérsias na literatura às diferentes metodologias empregadas nos estudos, basicamente em relação à saturação ou não dos agregados antes de sua utilização. Teoricamente espera-se que concretos com agregados reciclados não saturados tenham melhor resistência ao gelo/degelo, em relação aos concretos com agregados naturais, em virtude de uma rede de vazios existente nos agregados reciclados que poderia absorver melhor às variações dimensionais. O contrário ocorreria

com agregados reciclados saturados, que com os vazios preenchidos por água, ficariam mais suscetíveis à fissuração devido às variações dimensionais.

Segundo HANSEN (1992), FERGUS investigou um caso onde agregados foram produzidos a partir de um concreto com agregados reciclados que experimentou 300 ciclos em uma câmara de gelo-degelo, comumente usada em testes de durabilidade. Em outras palavras, FERGUS analisou uma nova reciclagem dos concretos já reciclados. Os resultados dos testes para as propriedades dos agregados e do concreto mostraram que tal prática proporcionou concretos reciclados duráveis e de boa qualidade em todos os aspectos.

Quanto à permeabilidade à água e a taxa de carbonatação, para uma mesma relação água/cimento, seus valores parecem ser maiores para concretos com agregados reciclados comparativamente aos concretos convencionais. Deve haver portanto, um maior risco de corrosão de armaduras. Contudo, segundo HANSEN, (1992), parece que tais efeitos indesejáveis podem ser banidos se os concretos com agregados reciclados forem produzidos com relações água/cimento levemente menores que os correspondentes concretos convencionais .

Nos concretos com agregados convencionais a penetração do dióxido de carbono da água se dá através da argamassa, contornando o agregado. Os agregados graúdos compactos funcionam como barreiras, reduzindo a superfície permeável a estes agentes. BARRA e VAZQUEZ (1997), relatam que nos concretos com agregados reciclados esta barreira se reduz uma vez que parte do agregado é argamassa velha e portanto, permeável. O processo de carbonatação e o desenvolvimento da frente de carbonatação depende dos valores relativos de permeabilidade entre a argamassa nova e a argamassa do agregado reciclado.

Supõe-se que, em concretos pobres, a permeabilidade da argamassa nova é praticamente a mesma da argamassa aderida aos agregados reciclados. Portanto, principalmente para concretos ricos, o risco de carbonatação no concreto de agregados reciclados é maior que no concreto convencional (BARRA e VAZQUEZ, 1997).

Pouco se sabe sobre a suscetibilidade à penetração de cloretos, sulfato e reações álcali-sílica. HANSEN (1992), relata que não há registros de estudos que comparem as taxas

de penetração de cloretos em concretos de agregados reciclados e correspondentes concretos convencionais. Também não há registros de estudos que reportem a suscetibilidade à reações com álcali de concretos de agregados reciclados produzidos à partir de agregados reciclados que se originaram de concretos que sofreram tais reações.

GOTTFREDSSEN e THØGERSEN (1993) submeteram concretos com agregados reciclados à um teste acelerado em ambiente agressivo e concluíram que, com apenas 20% de agregados graúdos reciclados de concreto, as expansões obtidas devidas às reações álcali-agregado são tão pequenas que não levam o concreto à fissuração.

Quanto à dureza superficial, da qual depende a abrasão, MACHADO JR. (1998) constatou que ela é, no mínimo, igual à dos concretos convencionais, de mesma classe de resistência. Já TOPÇU (1997), observou que os valores de dureza superficial dos concretos diminuiu quando agregados reciclados foram incorporados na mistura.

ZORDAN (1997) verificou a resistência ao desgaste por abrasão e a permeabilidade ao ar de diversos concretos com agregados reciclados de entulho, com diferentes níveis de incorporação de agregados reciclados, e constatou valores muito semelhantes aos obtidos para os concretos de referência, com agregados naturais.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia empregada no presente trabalho foi desenvolvida de acordo com as seguintes etapas:

- a) Definição e produção do concreto a ser reciclado;
- b) Britagem do concreto a ser reciclado;
- c) Caracterização dos materiais;
- d) Definição dos traços de concreto a serem estudados;
- e) Produção dos concretos com agregados reciclados;
- f) Realização de ensaios de laboratório;
- g) Tabulação e análise dos resultados.

3.1. Definição do Concreto a ser Reciclado

Optou-se pela utilização, neste estudo, de um concreto que pudesse representar grande parte do material disponível para reciclagem na região metropolitana de Florianópolis, tanto atual como futuramente.

Existe grande dificuldade em traçar o perfil do concreto disponível para a reciclagem junto à construção civil, considerando-se que o mesmo procede de demolições de estruturas com as mais diferentes características possíveis, como as propriedades dos materiais constituintes, o traço utilizado, o consumo de cimento e a idade. Mesmo os concretos recém produzidos apresentam uma variação bastante grande em suas características.

Por isso, decidiu-se utilizar um tipo de concreto que estivesse sendo produzido em grande quantidade atualmente na região de Florianópolis, pois existe tanto a possibilidade de reciclagem imediata das sobras destes materiais, como a perspectiva de reciclagem posterior de suas futuras demolições.

Como não há a possibilidade de um controle total da qualidade dos concretos produzidos atualmente, decidiu-se fazer uma consulta à algumas empresas concreteiras da região, procurando se estabelecer um tipo de concreto que possuísse uma boa representatividade de produção. Foram consultadas três empresas concreteiras com forte atuação no mercado, junto às quais pôde-se constatar que o concreto com produção mais significativa era o concreto com fck de 18 MPa.

Com o intuito de confirmar esta verificação, foi realizado um levantamento de produção em uma das empresas, no período compreendido entre janeiro de 1998 e junho de 1998 cujos resultados estão apresentados na tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Levantamento da produção de concreto, em empresa concreteira da região de Florianópolis, no primeiro semestre de 1998.

Fck (MPa)	Jan/98 (%)	Fev/98 (%)	Mar/98 (%)	Abr/98 (%)	Mai/98 (%)	Jun/98 (%)
15-C	9,66	7,22	7,82	12,05	8,36	7,57
15-B	9,27	5,46	13,40	20,37	7,18	5,86
18-C	6,98	14,43	*	13,21	16,71	14,27
18-B	24,04	20,41	18,98	17,80	34,38	24,74
21-C	9,32	*	*	*	*	7,52
21-B	*	7,65	8,66	8,03	17,55	17,47
25-C	*	6,41	5,15	6,07	*	*
25-B	12,37	19,89	16,43	*	10,49	8,80

C: Concreto Convencional

B: Concreto Bombeável

* volume inferior a 5% da produção mensal

Da tabela 3.1 percebe-se que no primeiro semestre de 1998, o maior volume de concreto produzido foi o referente aos concretos com fck 18 MPa.

3.2. Produção do Concreto a ser Reciclado

Com a definição do tipo de concreto a ser reciclado, partiu-se então para a próxima etapa, ou seja, a produção do concreto que daria origem aos agregados reciclados. Este concreto foi produzido por uma empresa concreteira e moldado em 36 formas de madeira de 30×30×30cm, conforme figura 3.1, para britagem, e mais 6 corpos de prova cilíndricos metálicos de 15×30cm, para verificação da resistência à compressão, totalizando 1m³ de concreto.

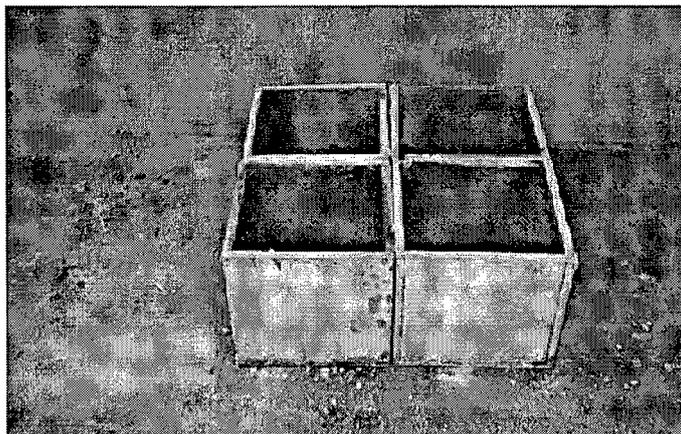


FIGURA 3.1 – Parte das formas utilizadas para moldagem do concreto de origem dos agregados reciclados.

O fck do concreto utilizado foi de 18 MPa, com Slump de 10cm, sendo produzido com cimento CPI-S 32 e aditivo plastificante Reax RX 822N.

O traço unitário em massa utilizado foi 1:2,26:2,80, com uma relação água/cimento igual a 0,58 e um consumo de cimento de 348 kg/m³ de concreto, sendo a quantidade aditivo igual a 1,04 l/m³ de concreto.

A areia e a brita utilizadas foram caracterizadas pelo Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal de Santa Catarina, apresentando os resultados expostos nas tabelas 3.2 a 3.5.

3.2.1. Agregado Miúdo

Nas tabelas 3.2 e 3.3 são mostradas respectivamente a composição granulométrica e as características físicas do agregado miúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados.

TABELA 3.2 – Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado na produção do concreto que originou os agregados reciclados.

Peneiras # (mm)	Massa (g)	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	5,70	1	1
6,3	6,34	1	2
4,8	4,52	0	2
2,4	44,04	4	6
1,2	288,95	28	34
0,6	326,80	31	65
0,3	280,40	27	92
0,15	69,18	7	99
Fundo	14,38	1	100
Total	1040,31	100	

Analisando-se os dados da distribuição granulométrica, constantes na tabela 3.2, o agregado miúdo encontra-se na zona 3 e pode ser classificado como uma areia média.

TABELA 3.3 – Características do agregado miúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados.

Módulo de Finura	2,99
Dimensão Máxima	4,8 mm
Massa Específica	2,62 kg/dm ³
Material Pulverulento	0,92%
Matéria Orgânica	< 300 ppm
Massa Unitária	1,44 kg/dm ³

3.2.2. Agregado Graúdo

Nas tabelas 3.4 e 3.5 são mostradas respectivamente a composição granulométrica e as características físicas do agregado graúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados.

TABELA 3.4 – Composição granulométrica do agregado graúdo utilizado na produção do concreto que originou os agregados reciclados.

Peneiras # (mm)	Peso (g)	% Retida	% Retida Acumulada
19	150	1	1
9,5	13225	97	98
4,8	275	0,19	99,19
2,4	0	0	99,19
1,2	0	0	99,19
0,6	0	0	99,19
0,3	0	0	99,19
0,15	0	0	99,19
Fundo	25	-	100
Total	13675	100	

De acordo com os limites granulométricos de agregado graúdo, o agregado foi classificado como brita 1.

TABELA 3.5 – Características do agregado graúdo utilizado na produção do concreto de origem dos agregados reciclados.

Módulo de Finura	6,94
Dimensão Máxima	19 mm
Massa Específica	2,65 kg/dm ³
Material Pulverulento	1,06%
Massa Unitária	1,40 kg/dm ³

Após a moldagem do concreto, foi realizada a cura ao ar, dentro das próprias formas, as quais foram retiradas após 28 dias. Os blocos de concreto de 30×30×30cm, após desformados, podem ser observados na figura 3.2.

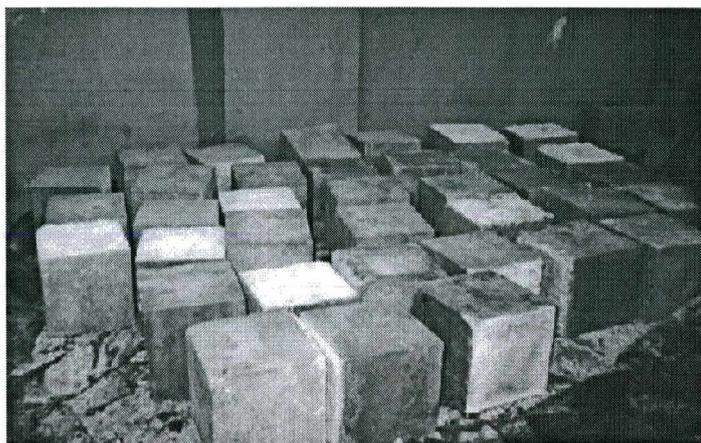


FIGURA 3.2 – Aspecto do concreto produzido para ser reciclado, após desformado.

Os corpos de prova cilíndricos foram curados em água saturada de cal com temperatura de $\pm 23^{\circ}\text{C}$. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial nos mesmos aos 7 e 28 dias, cujos resultados estão relacionados na tabela 3.6.

TABELA 3.6 – Resistências do concreto de origem dos agregados reciclados.

Corpos de Prova	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)
CP 1	12,15	17,10
CP 2	11,63	16,50
CP 3	11,10	15,12
Média *	11,89	16,80

* Média dos dois valores mais altos de resistência.

Como pode-se perceber, o concreto não atingiu a resistência esperada aos 28 dias. A resistência média de 16,80 MPa aos 28 dias projeta um fck muito menor do que o fck esperado de 18 MPa, visto que para atingi-lo, as resistências obtidas deveriam situar-se em um intervalo de 21 a 25 MPa.

3.3. Britagem do Concreto a ser Reciclado

O concreto foi desformado aos 28 dias e, após cerca de 30 dias, passou pela operação de britagem convencional. Como os blocos de 30×30×30cm eram muito grandes, a britagem primária foi realizada em um britador de mandíbula, sendo o material separado em duas frações distintas, através do peneiramento em peneiras de abertura de 1½ e 4 polegadas. O processo de britagem primária pode ser observado nas figuras 3.3 a 3.6.

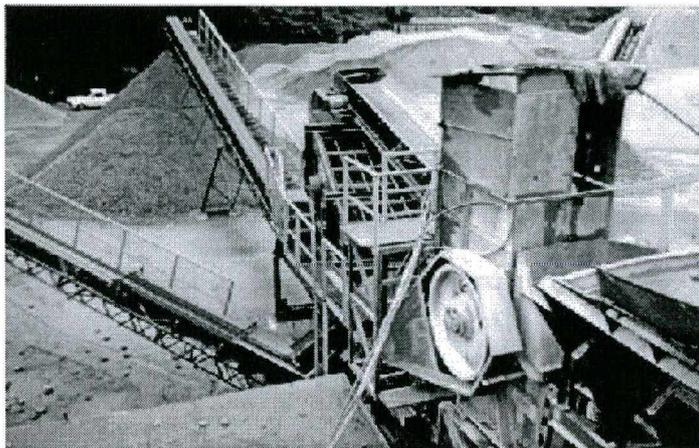


FIGURA 3.3 – Instalações da pedra onde foi realizada a britagem primária do concreto.



FIGURA 3.4 – Blocos de concreto sendo introduzidos no britador.



FIGURA 3.5 – Coleta do material britado proveniente da peneira de 1½ polegada.

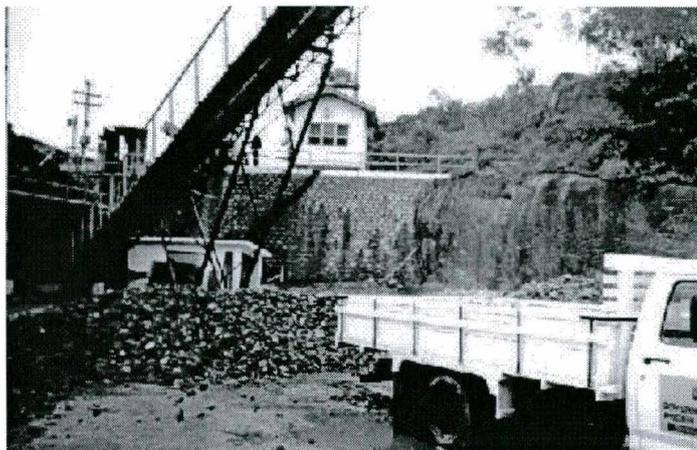


FIGURA 3.6 - Coleta do material britado proveniente da peneira de 4 polegadas.

Na figura 3.7 pode ser observado o material após a britagem primária. Essa britagem originou dois montes de material, um proveniente da peneira de 1½ polegadas (esquerda) e outro proveniente da peneira de 4 polegadas (direita).



FIGURA 3.7 – Aspecto do material após a britagem primária.

Após esta britagem primária do material, realizada nas instalações de uma pedreira, o material foi levado para o laboratório do DER, onde foi submetido a uma segunda britagem em um britador de menor dimensão e ajuste regulável de britagem, conforme pode ser observado na figura 3.8.



FIGURA 3.8 – Britador do laboratório do DER.

Britou-se uma pequena quantidade de material de cada monte separadamente e fez-se a composição granulométrica dos mesmos. Observou-se que o material proveniente da peneira de 1½ polegadas gerava uma quantidade muito grande de finos após ser rebitado, da ordem de 25% de material passante na peneira 4,8mm e 40% passante na peneira 9,5mm, contra cerca de 11% e 23% do material rebitado proveniente da peneira de 4 polegadas, nas respectivas peneiras.

A faixa granulométrica para os agregados grãos utilizados no trabalho compreendeu o material passante na peneira de 19mm até o material retido na peneira de 9,5mm. Por isso foi realizada a britagem de parte do material proveniente da peneira de 4 polegadas, por apresentar maior quantidade de material dentro desta faixa granulométrica. Foi realizado então o peneiramento mecânico do material, sendo todo o material passante na peneira de malha 19mm e retido na peneira de malha 9,5mm recolhido em sacos e transportado até o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.4. Caracterização dos Materiais

3.4.1. Composição Granulométrica dos Agregados

O estudo da composição granulométrica dos agregados foi realizado de acordo com a NBR 7217/87 – “Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio”, que prescreve o método para análise granulométrica de agregados para concreto.

3.4.2. Massa Específica

A massa específica pode ser definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas. Este parâmetro é muito importante para a dosagem dos concretos, pois seus valores são utilizados no cálculo dos traços e consumo de materiais dos mesmos.

Os ensaios para a determinação da massa específica dos materiais foram realizados de acordo com a NBR 9776/87 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos – Método de Ensaio”.

3.4.3. Teor de Matéria Orgânica nos Agregados Miúdos

Este ensaio visa detectar o nível de presença de matéria orgânica nos agregados miúdos e foi desenvolvido de acordo com a NBR 7220/87 - “Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo - Método de ensaio”. Esta mesma norma prescreve que substâncias orgânicas são deletérias ao concreto quando presentes em níveis superiores a 300ppm.

3.4.4. Caracterização do Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi o CPI-S 32. A caracterização fornecida pelo fabricante é expressa na tabela 3.7.

TABELA 3.7 - Caracterização do cimento utilizado na produção dos concretos.

Ensaio Físicos	Unidade	Média	Ensaio Químicos	Unidade	Média
Peneira 200	%	0,79	Perda ao fogo	%	3,58
Peneira 325	%	7,39	SiO ₂	%	18,57
Superfície Específica	m ² /kg	329,36	Al ₂ O ₃	%	4,45
Massa Específica	g/cm ³	3,15	Fe ₂ O ₃	%	3,37
Água de consistência	%	27,01	CaO	%	60,80
Início de pega	hs/min	03:40	MgO	%	5,63
Fim de pega	hs/min	04:51	K ₂ O	%	0,89
Expansão a quente	mm	0,47	Na ₂ O	%	0,00
Resistência a 1 dia	MPa	13,37	SO ₃	%	2,61
Resistência a 3 dias	MPa	27,29	Resíduos insolúveis	%	0,70
Resistência a 7 dias	MPa	34,07	Equivalente alcalino	%	0,29
Resistência a 28 dias	MPa	41,96			

3.4.5. Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão dos agregados graúdos naturais e reciclados foi realizado de acordo com a NBR 6465/84 – “Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” – Método de ensaio”. Os agregados reciclados foram submetidos ao teste de abrasão em dois estados: secos e saturados.

3.4.6. Absorção de Água dos Agregados Graúdos Reciclados

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a capacidade de absorção é definida como a quantidade total de água requerida para trazer um agregado da condição seca em estufa para a condição saturado superfície seca. Já a absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para trazer o agregado da condição seca ao ar para a condição saturado superfície seca.

Para a determinação da absorção efetiva de água dos agregados graúdos reciclados, primeiramente pesou-se duas amostras de agregados no estado seco ao ar. Em seguida as amostras foram imersas em água por um período de 24 horas, quando foram novamente pesadas. Realizaram-se ainda pesagens das amostras após os intervalos de 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos de imersão.

Para a realização das pesagens, verteu-se a água presente nas amostras, tomando-se o cuidado de não se perder material, e então secou-se levemente a superfície dos agregados com papel toalha, com o intuito de retirar a água excedente da superfície.

Ao final das 24 horas, após a última pesagem, o material foi levado à estufa, onde foi mantido por 24 horas, à uma temperatura de 110°C. As amostras foram então novamente pesadas para a determinação de suas massas secas, a fim de se determinar a capacidade de absorção dos agregados.

3.4.7. Índice de Forma dos Agregados Graúdos

O ensaio do índice de forma dos agregados foi realizado de acordo com a NBR 7809, sendo definido como a relação entre o comprimento e a espessura do grão. Em virtude da metodologia especificada por esta norma para medida da espessura dos grãos ser passível de causar grande variabilidade de resultados no caso dos agregados reciclados, decidiu-se fazer as medições da espessura na porção central dos agregados reciclados e naturais, não se efetuando medidas no seu quarto inferior e superior.

3.4.8. Quantidade de Argamassa Aderida ao Agregado

Para a determinação da quantidade de argamassa aderida ao agregado graúdo obtido a partir do concreto reciclado, utilizou-se uma solução de ácido clorídrico, com concentração de 10%. Separou-se duas amostras de agregados, que foram secas em estufa até a constância de massa, pesadas e imersas separadamente na solução de ácido clorídrico até a completa desagregação da argamassa dos agregados.

Posteriormente, os agregados das amostras foram lavados em água corrente, para certificar-se da retirada total da argamassa aderida. Colocou-se o material na estufa, onde ficou até que se observasse constância da massa. As amostras foram pesadas novamente, e, por diferença de massa, encontrou-se a porcentagem de argamassa aderida aos agregados.

3.5. Definição dos Traços de Concreto a serem Estudados

Um dos objetivos do presente trabalho é a verificação do desempenho de diferentes traços de concreto utilizando agregados reciclados em substituição aos agregados convencionais. Foram adotados os seguintes teores de substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Decidiu-se pela utilização de agregados e de um tipo de cimento que fossem de uso corrente para a produção de concretos na região de Florianópolis, com materiais de fácil obtenção. Por isso utilizou-se areia média, brita 1 e cimento CPI-S 32. Com o intuito de se obter materiais dentro de uma mesma faixa granulométrica, podendo-se melhor comparar os efeitos das substituições, peneirou-se a brita 1 e o agregado reciclado, utilizando-se no trabalho somente o material passante na peneira de malha 19mm e retido na peneira de malha 9,5mm.

A elaboração dos traços de concreto baseou-se na metodologia do IPT com algumas adaptações, como será exposto a seguir. Foram adotados valores de m (kg de agregado total por kg de cimento) fixos e iguais a 3,5; 5,0 e 6,5, pelo fato de que estes valores abrangem desde concretos relativamente pobres ($m=6,5$), até concretos com potenciais de resistências bastante razoáveis ($m=3,5$).

3.5.1. Ajuste dos Traços

O primeiro passo foi o ajuste da quantidade de argamassa dos concretos, com o objetivo de se atingir uma porcentagem de argamassa ideal (α_i), ou seja, aquela quantidade capaz de proporcionar a melhor trabalhabilidade e coesão, assim como um bom envolvimento da brita nas misturas, para o valor de abatimento pré-estabelecido em 8 ± 1 cm. Encontrou-se a porcentagem de argamassa ideal e os traços, em massa, para os concretos com m igual a 5, para todos os teores de substituição a serem estudados.

Com o objetivo de se estabelecer os traços para os valores de m iguais a 3,5 e 6,5, transformou-se as porcentagens de argamassa ideal encontradas de massa para volume, uma vez que os agregados reciclados possuem menor massa específica que os agregados naturais. Com as porcentagens em volume, encontrou-se equações em função de m para todos os teores de substituição. Através da substituição do valor de m nestas equações,

chegou-se aos traços em massa, para todos os concretos com m iguais a 3,5 e 6,5. Os cálculos realizados para a obtenção de todos os traços estão apresentados de forma detalhada no anexo I.

3.6. Produção dos Concretos com Agregados Reciclados

3.6.1. Mistura dos Materiais

Para a realização da mistura dos materiais na betoneira, utilizou-se a seguinte sequência: brita natural, 50% da água, areia, cimento, brita reciclada e o restante da água, até que se atingisse o abatimento desejado, determinado pelo ensaio de abatimento ou “slump test”. Decidiu-se adicionar o agregado reciclado por último, em virtude da alta absorção de água, basicamente nos instantes iniciais, esperada para este agregado na condição seca.

Este procedimento visava diminuir o tempo de contato do agregado seco com a água, desde sua introdução na betoneira até a obtenção do abatimento desejado. Além do que, com isso, os outros materiais já estariam misturados com a água, diminuindo a quantidade de água livre disponível para absorção.

O tempo de mistura foi fixado em 4 minutos até a verificação do primeiro abatimento. A água foi colocada na mistura até a obtenção de abatimento de 8 ± 1 cm. Os ensaios para essas determinações foram realizados de acordo com a NBR 7223, “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio”.

Após a colocação dos materiais secos e 50% da água, foi-se adicionando água até que se atingisse, visualmente, o abatimento desejado. Verificava-se então o primeiro abatimento, caso o valor obtido estivesse dentro do intervalo pré-estabelecido, o concreto seria considerado com consistência ideal. No caso do primeiro ou qualquer outro abatimento ficar acima do desejado, corrigiu-se o concreto com uma determinada quantidade de materiais secos, na mesma proporção do traço original.

Para traços iguais foram realizadas misturas com os agregados reciclados no estado seco e saturado. Para os concretos com agregados secos, foram utilizados os agregados secos ao ar, verificando-se sua umidade a cada mistura. Para os concretos com agregados

saturados, imergiu-se os mesmos em água por 24 horas. Pouco antes de sua utilização, escoou-se a água e espalhou-se os agregados de forma que ficassem expostos ao ar por cerca de 15 minutos, para que se aproximassem o máximo possível da condição de saturados superfície seca.

3.6.2. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

A moldagem e a cura dos corpos de prova de concreto foram realizadas de acordo com a NBR 5738 – “Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos”. Foram moldados para cada traço de concreto estudado, 9 corpos de prova, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Para a cura do concretos, os corpos de prova foram imersos, até a idade de ruptura, em um tanque com uma solução de água e cal, à uma temperatura controlada de $\pm 23^{\circ}\text{C}$.

3.6.3. Ensaio de Perda de Abatimento

A realização deste ensaio foi motivada pela suspeita de que pudesse haver, para os concretos com agregados reciclados secos, uma perda de consistência muito rápida, decorrente da alta absorção de água dos agregados reciclados, o que poderia inviabilizar a utilização de tais agregados para a produção de concretos. Por esta razão, o ensaio foi realizado para os concretos de referência e com agregados reciclados secos, de acordo com a NBR 10342, “Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio”.

Para a perfeita realização deste ensaio, porém, seria necessária a utilização de uma câmara climatizada, visto que as condições de temperatura e umidade relativa do ar têm uma forte influência nos resultados. A norma NBR 10342, prescreve que, para efeitos comparativos, a temperatura ambiente não deve apresentar variações superiores a 2°C e a umidade relativa do ar não deve apresentar variações superiores a 5%.

Em virtude da falta de uma câmara climatizada à disposição, realizou-se o ensaio à temperatura e umidade relativa do ar ambientes, monitorando-se tais variáveis com equipamentos fornecidos pelo Laboratório de Conforto Térmico e Acústico da UFSC. A

análise de seus resultados deve, portanto, ser realizada com cautela, considerando-se as condições climáticas existentes no momento do ensaio.

Após o acerto da consistência pré-determinada de cada concreto, de acordo com a NBR 7223, “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio”, e a primeira leitura de abatimento, foram efetuadas medições a cada 15 minutos, durante o período de 1 hora. Este período de 1 hora foi definido em virtude de observações anteriores, onde ficou constatado que o período crítico de perda de abatimento dos concretos com agregados reciclados secos era a primeira hora após a mistura dos materiais, certamente em virtude da alta absorção de água dos agregados reciclados nos minutos iniciais.

Foram registradas as respectivas temperaturas e umidades relativas do ar a cada intervalo de 15 minutos, através dos aparelhos programáveis digitais HOBBO, os quais eram programados para fazer leituras de 15 em 15 minutos por vários dias. Após a medição, seus dados foram descarregados diretamente em um computador ao qual eram conectados, sendo selecionados os dados referentes aos períodos em que foram realizados os ensaios. Para efetuar a medição, os aparelhos foram dispostos próximos à betoneira, e ali ficavam até o final do ensaio. Foram ainda registradas, no momento da mistura na betoneira, as temperaturas do cimento e da água, com os termômetros disponíveis no laboratório.

3.7. Verificação das Resistências à Compressão

Os corpos de prova foram ensaiados à compressão axial na prensa hidráulica do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSC. A prensa é da marca AMSLER, hidráulica, com acionamento elétrico, capacidade de carga de 500 toneladas e controle de carga manual. Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739, “Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio”. Os corpos de prova foram capeados com enxofre, para que houvesse uma maior regularização da superfície.

3.8. Determinação do Consumo Aproximado de Cimento

O consumo de cimento foi calculado através da seguinte fórmula:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{d_c} + \frac{a}{d_a} + \frac{p}{d_p} + a/c}$$

Onde:

a = kg de agregado miúdo por kg de cimento

p = kg de agregado graúdo por kg de cimento

a/c = relação água/cimento

d_c = massa específica do cimento

d_a = massa específica do agregado miúdo

d_p = massa específica do agregado graúdo

O consumo de cimento assim determinado, foi considerado aproximado porque existe grande dificuldade na determinação da relação água/cimento exata dos concretos com agregados reciclados. Isto ocorre com os agregados reciclados saturados, pois mesmo estando na condição saturada superfície seca, sempre haverá um filme de água de difícil quantificação envolvendo a superfície das partículas. Quanto aos agregados reciclados secos o problema parece ser ainda maior, pois eles contém poros vazios que tendem a se saturar, extraíndo parte da água da mistura que seria utilizada na hidratação do cimento. Além disso, concretos produzidos com agregados reciclados apresentam maior tendência de incorporação de ar nas misturas, em relação aos concretos produzidos com agregados naturais.

Considerou-se a absorção média encontrada em 24 horas como a capacidade de absorção máxima dos agregados reciclados, supondo-se que esse total de água fosse absorvido. Deduziu-se então essa quantidade de água do total adicionado e encontrou-se uma nova relação água/cimento, chamada de efetiva, com o intuito de se aproximar o máximo possível do valor real dessa relação.

Como os agregados reciclados secos não estavam totalmente secos, pois estavam na condição de secos ao ar, foi realizada a medida da umidade contida nesses agregados no

momento da mistura de cada concreto, cujos valores variaram entre 3,80% e 5,60%. A água deduzida foi a diferença entre essa umidade natural e o potencial de absorção dos agregados reciclados secos.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a análise dos materiais utilizados e os resultados de desempenho dos concretos produzidos.

A partir dos resultados obtidos das dosagens experimentais foram estabelecidos os diagramas de dosagem para o concreto com agregados reciclados graúdos de concreto.

4.1. Caracterização dos Materiais

4.1.1. Caracterização Granulométrica do Agregado Miúdo

A tabela 4.1 mostra os valores da composição granulométrica dos agregados miúdos utilizados na pesquisa.

TABELA 4.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo utilizado para a produção dos concretos com agregados reciclados.

Peneira (mm)	Massa (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
9,5	-	-	-	-	-	-
6,3	0,90	0,94	0,18	0,19	0,18	0,19
4,8	3,15	3,74	0,63	0,75	0,81	0,94
2,4	34,01	39,92	6,85	7,98	7,66	8,92
1,2	145,36	150,68	29,29	30,12	36,95	39,04
0,6	157,18	141,92	31,67	28,37	68,62	67,41
0,3	105,90	108,58	21,34	21,71	89,96	89,12
0,15	31,61	36,33	6,37	7,26	96,33	96,38
0,075	10,19	11,41	2,05	2,28	98,38	98,66
Fundo	8,01	6,68	1,61	1,34	100,00	100,00
Total	496,31	500,20				

A amostra 1 apresentou módulo de finura igual a 3,00, enquanto a amostra 2 apresentou módulo de finura igual a 3,04. Portanto a areia utilizada na pesquisa apresentou módulo de finura médio de 3,02. De acordo com os limites granulométricos de agregado miúdo

da NBR 7211/83, “Agregado para concreto – Especificação”, a areia foi enquadrada na zona 4 (grossa).

Com relação ao material pulverulento, a NBR 7219/82, “Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados – Método de Ensaio”, fixa os valores máximos de material passante na peneira 0,075mm em 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e em 5% para os demais concretos. O material analisado está, portanto, dentro dos limites para ambas as situações.

A figura 4.1 mostra as curvas granulométricas do agregado miúdo utilizado na produção dos concretos com agregados reciclados.

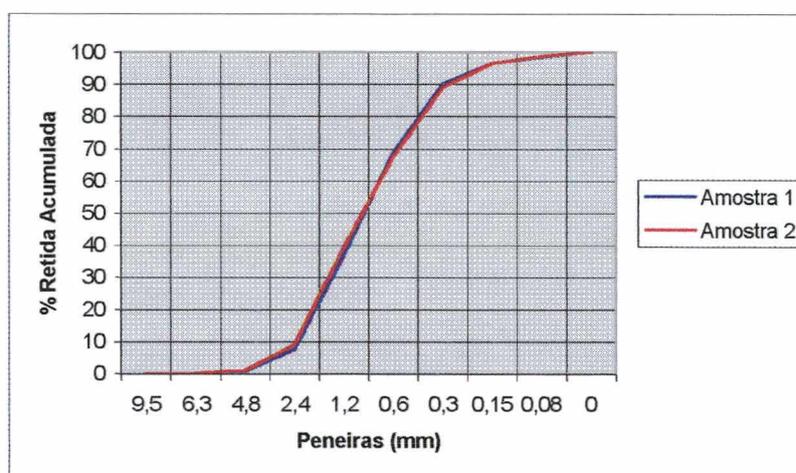


FIGURA 4.1 – Curvas granulométricas do agregado miúdo utilizado na produção dos concretos com agregados reciclados.

4.1.2. Caracterização Granulométrica dos Agregados Graúdos

As tabelas 4.2 e 4.3 mostram, respectivamente, os valores obtidos da composição granulométrica dos agregados graúdos naturais e reciclados.

TABELA 4.2 - Composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizado para a produção dos concretos com agregados reciclados.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
25	-	-	-	-	-	-
19	468,26	733,6	9,34	14,61	9,34	14,61
12,5	2284,90	2168,30	45,56	43,17	54,90	57,78
9,5	1770,20	1526,10	35,30	30,38	90,20	88,16
6,3	283,29	318,40	5,65	6,34	95,85	94,50
4,8	139,11	166,57	2,77	3,32	98,62	97,82
Fundo	69,20	109,85	1,38	2,19	100,00	100,01
Total	5014,96	5022,82	100,00	100,01		

TABELA 4.3 - Composição granulométrica do agregado graúdo reciclado utilizado para a produção dos concretos.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
25	43,34	48,72	2,19	2,47	2,19	2,47
19	449,39	444,31	22,73	22,50	24,92	24,97
12,5	821,72	801,12	41,57	40,56	66,49	65,53
9,5	208,51	196,51	10,55	9,95	77,04	75,48
6,3	168,00	173,08	8,50	8,76	85,54	84,24
4,8	70,28	74,78	3,56	3,79	89,10	88,03
Fundo	215,43	236,49	10,90	11,97	100,00	100,00
Total	1976,67	1975,01	100,00	100,00		

A figura 4.2 mostra as curvas granulométricas obtidas para o agregado graúdo natural e para o agregado graúdo reciclado.

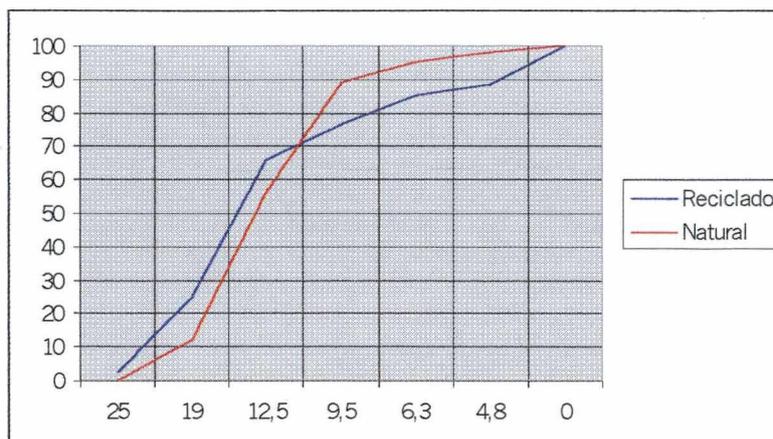


FIGURA 4.2 - Curvas granulométricas obtidas para o agregado graúdo natural e para o agregado graúdo reciclado.

Pela análise da figura 4.2, percebe-se significativa diferença entre a granulometria do material natural e do material reciclado. Para efeito comparativo, utilizou-se no trabalho apenas a faixa granulométrica compreendida entre as peneiras 19mm e 9,5mm. A tabela 4.4 mostra a distribuição final da granulometria dos agregados graúdos utilizados.

Tabela 4.4 – Granulometria final dos agregados graúdos utilizados na pesquisa.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)		% Retida		% Retida Acumulada	
	Natural	Reciclado	Natural	Reciclado	Natural	Reciclado
19	0	0	0	0	0	0
12,5	1120,47	1463,15	56,31	73,32	56,31	73,32
9,5	861,40	507,87	43,29	25,45	99,60	98,77
Fundo	7,96	24,55	0,40	1,23	100,00	100,00
Total	1989,83	1995,57	100,00	100,00		

4.1.3. Teor de Matéria Orgânica dos Agregados Miúdos

Por este ensaio detectou-se a presença de matéria orgânica na areia em quantidade inferior à permitida pela NBR 7220/87, ou seja, 300ppm.

4.1.4. Massa Específica

Na tabela 4.5 estão expostos os valores de massa específica aparente encontrados para os agregados utilizados.

TABELA 4.5 – Valores de massa específica encontrados para cada um dos agregados utilizados na produção dos concretos.

Agregado	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)
	Amostra 1	Amostra 2	Média
Agregado miúdo	2,53	2,57	2,55
Agregado graúdo natural	2,63	2,63	2,63
Agregado graúdo reciclado	2,30	2,32	2,31

Os valores encontrados para as massas específicas da areia e da brita natural estão dentro da média de valores dos materiais normalmente utilizados na produção de concretos convencionais na região de Florianópolis.

Quanto aos agregados reciclados, foram encontrados valores, em torno de 13% mais baixos. Isto confirma que os agregados reciclados são geralmente mais leves que os agregados naturais, basicamente em virtude da camada de argamassa velha, de menor massa específica, que fica aderida aos agregados.

4.1.5. Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão realizado de acordo com a NBR 6465/84 forneceu os seguintes resultados:

4.1.5.1. Abrasão do Agregado Graúdo Natural

Peso total = 4584 g

Peso retido na peneira 1,7 mm = 3405 g

Abrasão = $(4584 - 3405 / 4584) \times 100 = 25,72 \%$

4.1.5.2. Abrasão do Agregado Graúdo Reciclado Seco

Peso total = 4584 g

Peso retido peneira 1,7 mm = 2543 g

Abrasão = $(4584 - 2543 / 4584) \times 100 = 44,52 \%$

4.1.5.3. Abrasão do Agregado Graúdo Reciclado Saturado

Peso total = 4584 g

Peso retido peneira 1,7 mm = 2627 g

Abrasão = $(4584 - 2627 / 4584) \times 100 = 42,69 \%$

Todos os agregados ensaiados apresentaram alto desgaste por abrasão, inclusive os agregados naturais, de origem granítica, que apresentaram números relativamente altos.

Os agregados reciclados apresentaram valores elevados de perda por abrasão, superiores a 40%, e se mostraram mais suscetíveis a esse tipo de desgaste. Seu desgaste foi cerca de 60% maior do que o desgaste dos agregados naturais. Apesar destes resultados, os agregados reciclados de concreto foram considerados aptos a serem utilizados na produção de concretos, tendo em vista que a NBR 6465/84 só considera inadequados para esse fim, os agregados que apresentarem perdas por abrasão superiores a 50% em massa. De acordo com TOPÇU (1997), a ASTM C-33 também estabelece este limite, porém fixa em 40% o valor máximo de perda por abrasão para agregados usados em rodovias.

Quando saturados, os agregados reciclados apresentaram valores de desgaste por abrasão bastante similares aos apresentados pelos mesmos no estado seco.

4.1.6. Absorção de Água do Agregado Graúdo Reciclado

A tabela 4.6 mostra a absorção efetiva de água do agregado graúdo reciclado ao longo de 24 horas de imersão em água.

TABELA 4.6 – Absorção efetiva de água dos agregados graúdos reciclados.

Tempo (min)	Massa (g)		Absorção (%)	
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 1	Amostra 2
0	481,59	493,66	-	-
15	494,47	508,52	2,67	3,01
30	496,93	509,96	3,19	3,30
60	497,52	510,52	3,31	3,42
90	497,84	510,99	3,37	3,51
120	498,25	511,54	3,46	3,62
24 horas	502,30	515,59	4,30	4,44

No início do ensaio os agregados estavam secos ao ar e apresentavam a seguinte umidade: 3,71% para a amostra 1 e 4,11% para a amostra 2. A água inicialmente contida nos agregados mais a água absorvida durante as 24 horas resultou na seguinte umidade total: 8,17% para a amostra 1 e 8,73% para a amostra 2, ou seja, a capacidade média de absorção encontrada para os agregados reciclados foi de 8,45%.

Na figura 4.3 pode-se observar a absorção efetiva de água dos agregados reciclados ao longo dos primeiros 120 minutos.

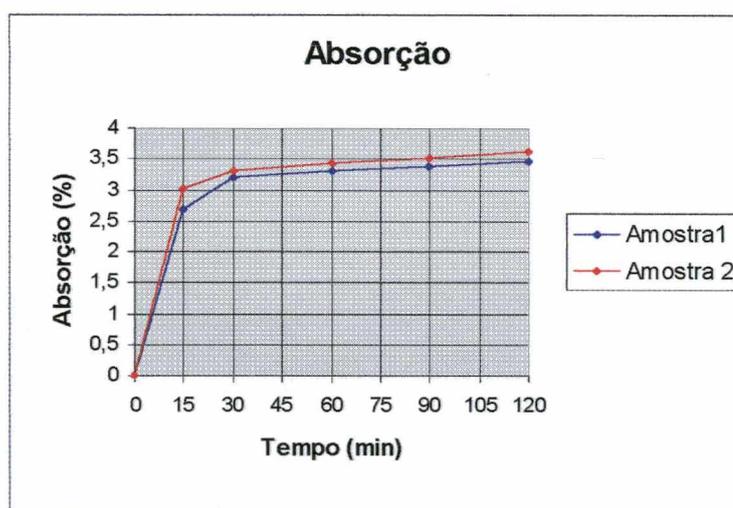


FIGURA 4.3 – Absorção efetiva de água dos agregados reciclados nos primeiros 120 minutos.

De acordo com o gráfico da figura 4.3, os agregados reciclados apresentam maior absorção efetiva na primeira hora em que ficam em contato com a água. A partir de então, os valores praticamente se estabilizam. Nos primeiros 30 minutos a absorção chega a quase 75% do valor atingido com 24 horas de imersão. No período

compreendido entre 2 horas e 24 horas de imersão, foi absorvida pequena quantidade de água e de forma bastante lenta.

4.1.7. Índice de Forma dos Agregados Graúdos

Para o agregado graúdo natural, o índice de forma encontrado foi de 2,68, enquanto que para o agregado graúdo reciclado, o índice de forma encontrado foi de 2,26. Esses resultados indicam que ambos podem ser classificados como lamelares, pois apresentam relação entre comprimento e espessura superior a 2. Contudo, os agregados naturais se mostraram mais lamelares que os agregados reciclados, atenuando uma das grandes desvantagens dos agregados reciclados, apontadas por diversos pesquisadores, a forma mais lamelar.

Os agregados utilizados na pesquisa estão de acordo com a NBR 7211/83, visto que a mesma especifica que os agregados para concreto tenham, em média, valores de índice de forma inferiores a 3, quando calculados pela NBR 7809.

4.1.8. Quantidade de Argamassa Aderida ao Agregado

Para a realização do ensaio foi fixado um período de 24 horas de repouso dos agregados reciclados imersos em ácido clorídrico. Contudo, ao final das 24 horas, notou-se ainda haver uma determinada quantidade de argamassa aderida, por isso trocou-se o ácido por uma nova solução e deixou-se as amostras imersas por mais 24 horas.

O ácido atacou os agregados por mais 24 horas e, então, pode-se observar uma completa separação entre a argamassa e os agregados presentes no concreto utilizado como material reciclado. A tabela 4.7 mostra os valores encontrados para a argamassa aderida aos agregados graúdos reciclados.

TABELA 4.7 – Porcentagem de argamassa aderida aos agregados graúdos reciclados.

Amostras	Massa antes do ataque do ácido (g)	Massa após o ataque do ácido (g)	% de argamassa aderida
Amostra 1	227,95	135,30	40,64
Amostra 2	239,35	140,52	41,29
Média das amostras	-	-	40,97

A quantidade de argamassa aderida nos agregados reciclados, cerca de 41% em massa, é bastante parecida com à média encontrada na literatura para agregados dessa mesma faixa granulométrica.

4.2. Produção dos Concretos com Agregados Reciclados e Naturais

O primeiro passo foi a determinação dos traços, para a qual foi adotada a metodologia do IPT, com algumas adaptações, tal qual exposto no capítulo anterior. O início do estudo experimental partiu da avaliação preliminar das misturas de traço 1:5. Baseando-se nas informações destas misturas foram desdobrados mais dois traços, 1:3,5 e 1:6,5, a serem estudados para cada teor de substituição.

Foi constatado que à medida que os agregados naturais foram sendo substituídos, à taxas crescentes, a porcentagem ideal de argamassa das misturas teve que ser aumentada, de modo a se manter a mesma trabalhabilidade, de 8 ± 1 cm, e coesão previamente atingidas. A figura 4.4 mostra a variação da porcentagem de argamassa ideal, em massa, conforme o teor de substituição dos agregados graúdos naturais por reciclados.

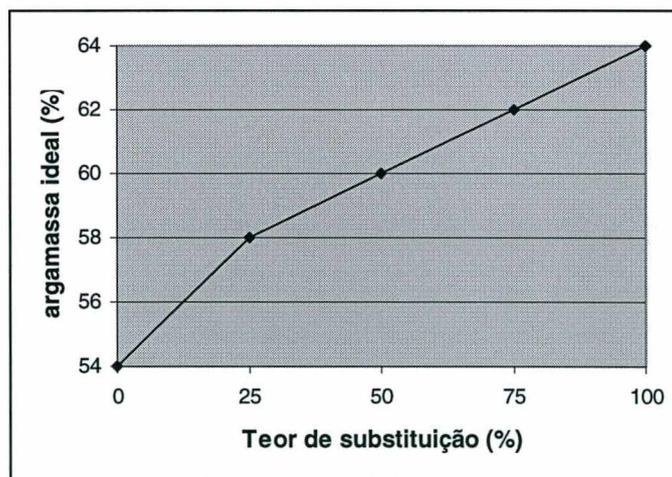


FIGURA 4.4 – Variação da porcentagem de argamassa ideal, em massa, conforme o teor de substituição.

A forma e a textura superficial dos agregados são basicamente os fatores que podem alterar a trabalhabilidade de misturas de concreto com traços iguais. Com relação à forma, os ensaios mostraram que os agregados reciclados obtidos podem ser

classificados como lamelares, pois apresentam relação entre comprimento e espessura superior a 2. Porém, os agregados naturais se revelaram mais lamelares que os reciclados, com relação entre comprimento e espessura igual a 2,68, contra 2,26 dos agregados reciclados.

Portanto, o aumento da necessidade de argamassa nas misturas, com o aumento do teor de substituição, pode ser atribuído basicamente à textura superficial dos agregados reciclados, muito mais rugosa, necessitando uma adição maior da quantidade de materiais finos para envolver completamente os grãos e proporcionar a mesma interação entre os materiais, de modo a se obter uma trabalhabilidade equivalente.

Para a textura superficial não há ensaios específicos, mas através apenas da análise visual e do tato, pode-se facilmente comprovar a textura extremamente rugosa, áspera e repleta de pequenas reentrâncias dos materiais reciclados, em contraste com a superfície do material natural, muito mais lisa e regular.

Os resultados dos estudos de dosagem realizados, com os traços finais obtidos, estão expostos na tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Traços em massa utilizados para a produção de concretos com agregados reciclados.

Teor de substituição (%)	αi em massa (%)	αi em volume (%)	m = 3,5	m = 5,0	m = 6,5
0	54	53,26	1:1,46:2,04	1:2,24:2,76	1:3,04:3,46
25	58	56,55	1:1,63:1,40:0,47	1:2,48:1,89:0,63	1:3,33:2,38:0,79
50	60	57,81	1:1,72:0,89:0,89	1:2,60:1,20:1,20	1:3,48:1,51:1,51
75	62	59,53	1:1,83:0,42:1,25	1:2,72:0,57:1,71	1:3,66:0,71:2,13
100	64	60,48	1:1,90:1,60	1:2,84:2,16	1:3,79:2,71

A partir dos traços expostos na tabela 4.8 foram realizadas as misturas experimentais, para avaliação das propriedades dos concretos com agregados reciclados graúdos de concreto.

4.3. Verificação da Perda de Abatimento

Este ensaio foi realizado para os concretos de referência e para os concretos produzidos com agregados reciclados secos, devido à suspeita de que pudesse haver uma rápida perda na trabalhabilidade dos concretos com agregados secos, tendo em vista os valores de absorção mais altos desses agregados, para a primeira hora após a mistura.

A perda de abatimento pode ser definida como a perda de fluidez do concreto fresco com o passar do tempo. Ela ocorre quando a água livre de uma mistura é consumida pelas reações de hidratação, por adsorção na superfície dos produtos de hidratação e por evaporação (MEHTA e MONTEIRO, 1994). No caso de concretos com agregados reciclados, o principal fator de consumo da água livre parece ser a absorção por parte dos agregados.

Os principais fatores que afetam os valores de perda de abatimento são a temperatura dos materiais e ambiente, velocidade e umidade relativa do ar, bem como a composição do cimento e dos aditivos utilizados.

As tabelas 4.9 a 4.11 mostram os abatimentos obtidos para cada mistura e as condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento dos concretos. Foram registradas a temperatura da água e do cimento, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

TABELA 4.9 - Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:3,5.

Tempo (min)	Abatimento (cm) – Traços 1:3,5				
	Teor de substituição dos agregados				
	0%	25%	50%	75%	100%
0	8	7	8,5	9	8
15	8,5	6,5	8,5	8,5	7,5
30	8,5	6	7,5	8,5	7,5
45	8	5,5	7	7,5	7,5
60	8	5,5	7	7,5	7
Temp. da água °C	20	21	18	23	23
Temp. do cimento °C	22	20	19	24	22
Temp. média do ambiente °C	21,8	18,9	18,9	24,2	23,2
Umidade relativa do ar média %	73,7	82,5	82,6	81,2	82,5

TABELA 4.10 - Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:5,0.

Tempo (min)	Abatimento (cm) – Traços 1:5,0				
	Teor de substituição dos agregados				
	0%	25%	50%	75%	100%
0	8	7	7,5	7,5	8,5
15	8	6,5	7,5	7,5	8
30	8	5,5	7,5	6,5	7,5
45	7,5	5,5	7,5	6,5	7
60	7	5	6,5	6	6,5
Temp. da água °C	19	21	20	22	20
Temp. do cimento °C	20	20	21	22	21
Temp. média do ambiente °C	18,1	20,9	19,6	23,0	19,3
Umidade relativa do ar média %	51,1	72,5	90,3	73,8	82,5

TABELA 4.11 - Abatimentos obtidos e condições de ensaio verificadas para os ensaios de perda de abatimento de concretos com traço 1:6,5.

Tempo (min)	Abatimento (cm) – Traços 1:6,5				
	Teor de substituição dos agregados				
	0%	25%	50%	75%	100%
0	8	7	9	8	7
15	8	6,5	9	7	6
30	8	5,5	8	7	5
45	8	5,5	7,5	6,5	4,5
60	7,5	5	7	5,5	4,5
Temp. da água °C	20	20	18	20	18
Temp. do cimento °C	21	20	19	21	19
Temp. média do ambiente °C	24,8	20,5	20,1	23,1	20,4
Umidade relativa do ar média %	61,8	76,5	81,5	58,3	58,3

A figura 4.5 mostra a porcentagem do abatimento inicial verificada após uma hora de mistura.

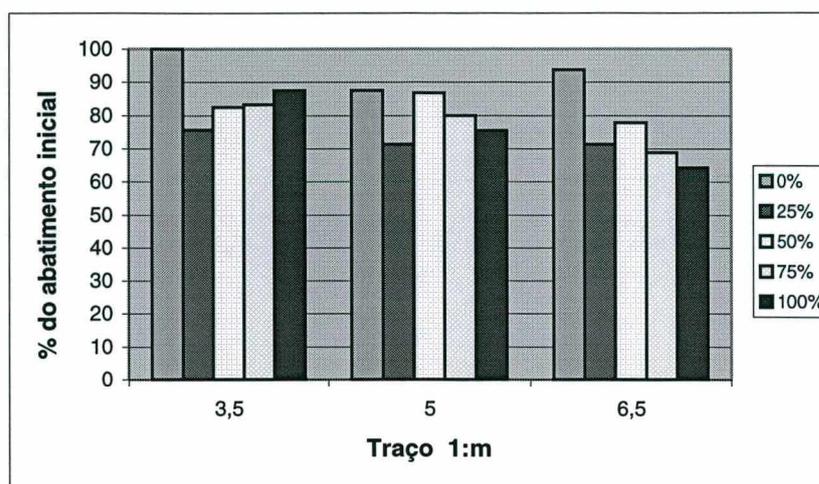


FIGURA 4.5 – Porcentagem do abatimento inicial após uma hora de mistura.

Analisando-se as tabelas 4.9, 4.10 e 4.11, e a figura 4.5, percebe-se que ocorreu uma perda de abatimento mais acentuada para os traços mais pobres, aqueles que incorporam maior quantidade de agregados em termos relativos. Isto parece fazer sentido, pois quanto maior a quantidade de agregados reciclados secos incorporados, mais água os mesmos devem extrair da mistura, fazendo com que haja uma perda mais acentuada de abatimento nos instantes iniciais. Os concretos com agregados reciclados secos apresentaram perdas médias após uma hora de mistura de cerca de 15%, 21% e 30%, respectivamente para os traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5. Em relação aos concretos de referência as perdas foram cerca de 15%, 10% e 25% maiores, também para os traços 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5.

Convém ressaltar porém que, ao se analisar os valores de umidade relativa do ar, que podem influir de forma decisiva nos resultados do ensaio, percebe-se que seus valores foram significativamente mais baixos durante a realização dos ensaios dos concretos com traço 1:6,5, nos teores de substituição de 75% e 100%, e 1:5,0, no concreto de referência. Com isso uma parcela da perda de abatimento observada nestes concretos pode ser atribuída à uma maior perda de umidade para o ambiente.

O teor de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados não influenciou significativamente as perdas de abatimento desses concretos. Os concretos produzidos com traços 1:3,5 e 1:5,0 apresentaram pequena variação de perda de abatimento entre os concretos com substituições variando de 25% a 100%. Note-se que os níveis de

umidade relativa do ar, de um modo geral, mantiveram-se elevados e relativamente próximos, facilitando as comparações de resultados.

Já para os concretos produzidos com traço 1:6,5 nota-se uma perda de abatimento ligeiramente maior conforme se aumenta o teor de substituição. O concreto com 50% de substituição apresentou menor perda em relação ao concreto com 25% de substituição, porém tal fato pode ser atribuído à umidade relativa do ar, relativamente bem mais alta durante a realização do seu ensaio.

Considerando-se que as perdas de abatimento são função da temperatura dos materiais e indiretamente, da temperatura ambiente, e também da umidade relativa do ar, supõe-se que os altos valores de umidade do ar medidos, bem como as temperaturas registradas, em torno de 20°C, comuns para a região de Florianópolis, contribuam para a ocorrência de baixos valores de perda de abatimento nos concretos.

De um modo geral, as perdas de abatimento dos concretos com agregados reciclados secos foram sempre maiores do que aquelas obtidas para os concretos de referência, durante a primeira hora após a mistura. Embora as perdas de abatimento verificadas para os concretos com agregados reciclados secos não tenham sido tão importantes a ponto de inviabilizar sua utilização, o fato de terem ocorrido certamente indica um comportamento que deve ser seriamente considerado, principalmente em locais com clima quente e seco. Desta forma, deve-se tomar cuidado em locais onde a umidade relativa do ar possa estar muito baixa e a temperatura ambiente muito alta, fatores que podem acelerar a perda de abatimento dos concretos.

Como medida de precaução, considera-se prudente produzir, no caso de concretos pré-misturados com agregados reciclados secos, concretos com abatimentos iniciais mais altos que os necessários para a concretagem, a fim de se prevenir qualquer tipo de perda de trabalhabilidade significativa.

Deve-se tomar cuidado também com a utilização de aditivos aceleradores de pega e cimentos com elevados teores de C_3S , de alta resistência inicial, pois estes aumentam a temperatura do concreto nos primeiros instantes, em virtude do calor de hidratação liberado pelo cimento.

MEHTA e MONTEIRO (1994) citam ainda a precaução quanto à utilização de cimentos com altos teores de C_3A , pois este composto tem pega instantânea e desenvolve altíssimo calor de hidratação.

4.4. Determinação das Relações Água/Cimento Aproximadas nos Concretos com Agregados Reciclados

O maior problema dos concretos com agregados reciclados é a determinação relação água/cimento efetiva, ou seja, aquela calculada a partir da quantidade de água que ocupa um espaço exterior às partículas de agregado quando o volume total do concreto se estabiliza. No caso dos agregados reciclados secos, a água correspondente à absorção efetiva foi descontada da água de amassamento, para efeito de cálculo das relações água/cimento, simulando uma situação mais próxima da real, com a parcela da água correspondente à absorção efetiva sendo absorvida pelos agregados reciclados.

A tabela 4.12 mostra todas as relações água/cimento obtidas para os concretos produzidos.

TABELA 4.12 - Relações água/cimento obtidas para os concretos com agregados reciclados.

Teor de substituição	Traço	Relação a/c Agregados secos com água total	Relação a/c Agregados secos descontando-se absorção (efetiva)	Relação a/c Agregados saturados
25%	1:3,5	0,47	0,46	0,47
	1:5,0	0,63	0,61	0,58
	1:6,5	0,78	0,77	0,80
50%	1:3,5	0,48	0,44	0,40
	1:5,0	0,65	0,60	0,59
	1:6,5	0,72	0,66	0,69
75%	1:3,5	0,52	0,48	0,47
	1:5,0	0,62	0,56	0,59
	1:6,5	0,78	0,69	0,69
100%	1:3,5	0,50	0,46	0,44
	1:5,0	0,71	0,64	0,60
	1:6,5	0,83	0,72	0,77

A análise da tabela 4.12 confirma que, descontando-se a água de absorção efetiva nos cálculos das relações água/cimento dos concretos com agregados secos, as mesmas se tornam mais próximas dos valores obtidos para os concretos com agregados saturados, indicando que a redução da água de absorção efetiva nas relações água/cimento fornece uma estimativa confiável da quantidade da água de amassamento que é absorvida pelos agregados.

Vale ressaltar que as relações água/cimento são chamadas “aproximadas” em virtude das dificuldades de sua determinação. Um estudo aprofundado sobre o comportamento da absorção dos agregados reciclados secos em contato com a água e em contato com a argamassa, analisando-se detalhadamente os mecanismos de transporte e interações físicas existentes, poderá, no futuro, tornar mais claro o processo de absorção dos agregados reciclados secos, quando adicionados ao concreto. A relação água/cimento dos concretos com agregados reciclados saturados tampouco pode ser considerada exata, pois a água presente na superfície e nos poros superficiais pode atuar aumentando a relação água/cimento da argamassa, principalmente nas regiões em contato com o agregado.

A tabela 4.13 mostra as relações água/materiais secos (H) médias obtidas para os todos os concretos produzidos. No caso dos concretos com agregados reciclados secos, descontou-se a água relativa à absorção efetiva verificada.

TABELA 4.13 - Relações água/materiais secos (H), para a média dos 3 valores de m.

Tipos de concretos	H (%)				
	0%	25%	50%	75%	100%
Concretos com agregados reciclados secos	10,13	10,22	9,53	9,73	10,16
Concretos com agregados reciclados saturados	-	10,12	9,32	9,78	9,96
Média	10,13	10,17	9,43	9,76	10,06

Através da análise da tabela 4.13, observa-se os valores médios de H ficaram bem próximos para os concretos produzidos com teores iguais de substituição e, de um modo geral, ficaram próximos também na comparação entre todos os teores de substituição. Isto significa que, a quantidade de água necessária para atingir o abatimento pré-fixado

de 8 ± 1 cm variou pouco com a elevação do teor de substituição de agregados naturais por reciclados, conforme a metodologia adotada.

4.5. Determinação da Resistência à Compressão

A tabela 4.14 mostra os valores de resistência à compressão alcançados pelos concretos ensaiados, de acordo com o traço, o teor de substituição e a condição dos agregados utilizados.

TABELA 4.14 - Valores de resistência à compressão alcançados pelos concretos ensaiados.

Traço	Teor de substituição	Agregados	Resistência aos 3 dias (MPa)	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)
1:3,5	0%	Referência	29,29	32,25	41,48
1:5,0	0%	Referência	19,23	23,94	30,43
1:6,5	0%	Referência	12,67	15,19	20,53
1:3,5	25%	Secos	25,69	30,40	36,73
1:5,0	25%	Secos	16,78	23,69	26,58
1:6,5	25%	Secos	11,21	16,33	19,29
1:3,5	25%	Saturados	22,06	28,52	30,46
1:5,0	25%	Saturados	16,24	20,95	25,91
1:6,5	25%	Saturados	7,96	11,72	14,10
1:3,5	50%	Secos	18,75	25,40	27,12
1:5,0	50%	Secos	10,28	17,32	20,85
1:6,5	50%	Secos	9,71	14,93	19,13
1:3,5	50%	Saturados	21,27	26,87	30,37
1:5,0	50%	Saturados	13,25	20,18	22,28
1:6,5	50%	Saturados	10,25	14,07	16,87
1:3,5	75%	Secos	20,95	27,57	30,88
1:5,0	75%	Secos	17,70	21,33	25,40
1:6,5	75%	Secos	8,03	11,51	14,83
1:3,5	75%	Saturados	19,58	24,19	28,55
1:5,0	75%	Saturados	14,90	18,47	23,72
1:6,5	75%	Saturados	9,39	12,26	15,79
1:3,5	100%	Secos	21,46	26,01	29,19
1:5,0	100%	Secos	12,19	17,99	19,80
1:6,5	100%	Secos	8,15	13,72	15,79
1:3,5	100%	Saturados	21,20	23,46	28,33
1:5,0	100%	Saturados	11,46	16,68	21,17
1:6,5	100%	Saturados	10,15	13,40	16,11

4.5.1. Influência da Substituição de Agregados Graúdos Naturais por Reciclados na Resistência à Compressão

A tabela 4.15 mostra as resistências à compressão atingidas, em porcentagem, pelos concretos produzidos com agregados reciclados, tendo-se como referência os concretos produzidos somente com agregados naturais.

TABELA 4.15 - Porcentagem média da resistência à compressão atingida aos 28 dias, em relação às resistências dos concretos de referência.

Teor de substituição de agregados	% de resistência Traço 1:3,5	% de resistência Traço 1:5,0	% de resistência Traço 1:6,5
0%	100	100	100
25%	80,99	86,25	81,32
50%	69,30	70,87	87,68
75%	71,64	80,71	74,58
100%	69,34	67,32	79,19
% de resistência média	72,82	76,29	80,69

Pela análise da tabela 4.15 verifica-se que, conforme se enriquece a mistura, há um distanciamento maior entre as resistências dos concretos com agregados reciclados e as resistências dos concretos de referência.

Esta tendência pode ser explicada pelo fato dos agregados reciclados terem sido obtidos à partir de um concreto de baixa resistência, média de 16,80 MPa aos 28 dias, logo devem possuir baixas resistências também. Assim sendo, nos concretos com maiores níveis de consumo de cimento, a resistência da pasta tende a superar a resistência dos agregados, em um comportamento semelhante ao que ocorre em concretos de alta resistência. Desta forma os agregados passam a limitar a resistência do concreto à sua própria resistência, pois são eles os primeiros a se romperem.

A resistência do concreto de origem é, portanto, um fator limitante da resistência potencial de concretos produzidos com agregados reciclados. Este fato foi observado durante os ensaios de ruptura à compressão. Especialmente nas maiores solicitações, a ruptura ocorreu nos agregados reciclados, basicamente na zona de interface argamassa antiga - agregado natural. Logo, não parece interessante a utilização de agregados

reciclados para a produção de concretos com resistências significativamente superiores às resistências dos concretos de origem desses mesmos agregados.

Contudo, os agregados reciclados se revelaram capazes de produzir concretos com resistências significativamente maiores que a de seu concreto de origem. Podem ser destacadas por exemplo, as resistências de 29,19 MPa e 28,33 MPa atingidas respectivamente pelos concretos com agregados reciclados secos e saturados, com 100% de substituição. Isto pode ser explicado pela nova interação física dos materiais no novo concreto e por uma nova distribuição de tensões, absorvidas parcialmente pela pasta. Portanto, conclui-se que podem ser produzidos concretos contendo agregados reciclados de concreto com resistências significativamente superiores à resistência do concreto de origem dos agregados, muito embora essa não seja uma alternativa economicamente vantajosa.

Os concretos de traço 1:6,5, mais fracos, também apresentaram significativa redução de resistências em relação aos concretos de referência. Suas resistências ficaram abaixo inclusive, da resistência verificada para o concreto de origem. Isso deve ocorrer pelo fato de que os agregados reciclados não apresentam exatamente a mesma resistência do seu concreto de origem. Essa resistência é possivelmente mais baixa, em virtude da britagem do concreto, que pode causar microfissurações na argamassa aderida aos agregados naturais e ter consequências negativas inclusive na zona de interface agregado natural – argamassa aderida.

Notou-se ainda uma tendência de redução de resistências conforme o aumento do teor de substituição de agregados naturais por reciclados. Porém essas reduções não ocorreram de forma progressivamente linear. Observou-se uma tendência de redução de resistências da ordem de 15% a 20% para teores de substituição de 25%. A partir deste teor, para o traço mais pobre, 1:6,5, não se observou tendência de redução de resistências conforme se aumentou a porcentagem de agregados reciclados nos concretos.

Já os traços 1:3,5 e 1:5,0 apresentaram reduções de resistência da ordem de 30% para substituição de até 50% de agregados naturais por reciclados e, a partir deste teor, as reduções praticamente se estabilizaram nesse patamar, conforme pode ser observado na figuras 4.6 e 4.7.

Pode-se concluir que, para os traços mais pobres, há pequena influência na resistência dos teores de substituição a partir de 25%. Do ponto de vista da resistência à compressão, parece não haver grande prejuízo pelo fato de se utilizar maiores teores de agregados reciclados, com as reduções de resistência se mantendo na faixa dos 20% para os concretos com traço 1:6,5. Para os traços 1:3,5 e 1:5,0 parece haver pequena influência na resistência à compressão, a substituição de agregados naturais à teores superiores que 50%, pois a partir deste nível, as reduções praticamente estabilizaram-se na faixa de 30%.

De um modo geral, a redução de resistências em virtude do aumento dos teores de substituição foi pequena à partir do teor de substituição de 25%. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato dos concretos com maiores teores de incorporação de agregados reciclados terem sido produzidos, em virtude do abatimento pré-estabelecido e da coesão verificada, com maior porcentagem de argamassa. Conforme se aumentou o teor de substituição, os agregados graúdos se tornaram responsáveis por uma parte relativamente menor da resistência total, já que a argamassa passou a ocupar um volume maior das misturas, conseqüentemente absorvendo uma parte maior das solicitações. Desta forma, o prejuízo proveniente da utilização de agregados mais fracos pode ter sido parcialmente compensado pelo fato de os mesmos terem sido menos solicitados.

Acredita-se que, nos concretos com agregados reciclados de concreto, a microfissuração que leva à ruptura à compressão tenha, na grande maioria dos casos, início na interface agregado natural – argamassa antiga aderida, devido basicamente aos seguintes fatores: a baixa resistência característica da maioria dos concretos de origem dos agregados reciclados, a influência negativa da britagem do concreto de origem nesta interface e a superfície relativamente mais áspera dos agregados reciclados, que pode melhorar a aderência mecânica na zona de interface argamassa antiga aderida – argamassa nova.

De acordo com NEVILLE (1997) os seixos lisos conduzem à uma fissuração a tensões menores do que as britas ásperas, provavelmente porque a aderência mecânica seja influenciada pelas características da superfície. Da mesma forma, a textura superficial bastante rugosa e cheia de reentrâncias dos agregados reciclados deve favorecer a aderência, proporcionando um melhor travamento mecânico na interface argamassa aderida – argamassa nova. Essa textura superficial característica dos agregados reciclados, resultando em uma maior área específica, pode favorecer ainda uma maior

deposição de cimento na região de superfície dos mesmos, melhorando as suas propriedades.

No caso dos agregados reciclados secos, pode ocorrer também uma diminuição da relação água/cimento da pasta, em virtude da absorção de água dos mesmos, especialmente nas regiões próximas aos agregados. Esse fato deve proporcionar uma maior concentração de cimento na região próxima à superfície dos agregados e, conseqüentemente, uma maior resistência mecânica nesta região.

4.5.2. Influência da Condição de Umidade dos Agregados Reciclados na Resistência à Compressão

A tabela 4.16 mostra a porcentagem média de resistência aos 28 dias, atingida pelos concretos com agregados reciclados secos e saturados, em relação aos concretos de referência.

TABELA 4.16 - Porcentagem média de resistência à compressão atingida aos 28 dias, em relação aos concretos de referência.

	0% (%)	25% (%)	50% (%)	75% (%)	100% (%)
Concretos com agregados reciclados secos	100	89,36	72,59	76,93	70,01
Concretos com agregados reciclados saturados	100	76,23	75,21	73,63	70,98
Média	100	82,80	73,90	75,28	70,50

As figuras 4.6 e 4.7 mostram as resistências à compressão aos 28 dias, obtidas respectivamente para os concretos com agregados saturados e secos.

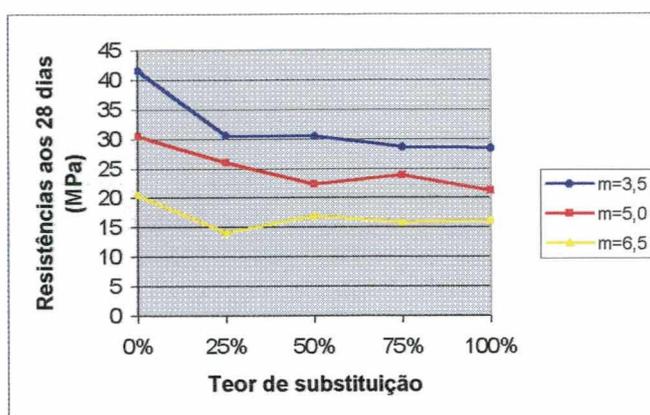


FIGURA 4.6 - Resistências à compressão aos 28 dias, para concretos com agregados reciclados saturados.

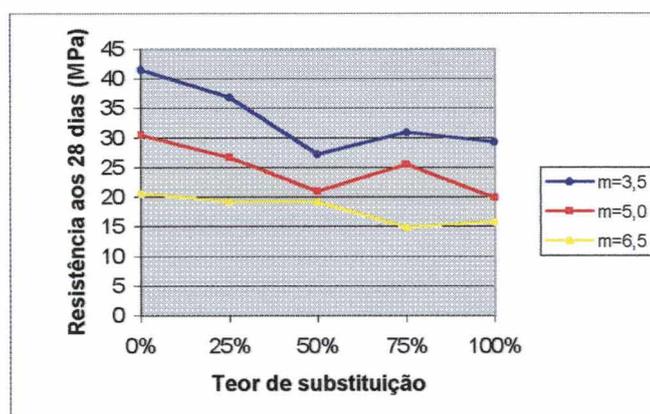


FIGURA 4.7 - Resistências à compressão aos 28 dias, para concretos com agregados reciclados secos.

Pela análise da tabela 4.16 e das figuras 4.6 e 4.7 percebe-se que não há diferenças significativas de resistência entre os concretos produzidos com agregados secos e os concretos produzidos com agregados saturados, pois ambos seguem as mesmas tendências de comportamento em relação aos traços elaborados e teores de substituição. Nota-se que há grande proximidade nos valores de resistência à compressão obtidos para os concretos com agregados reciclados secos e saturados, com exceção do teor de substituição de 25%, onde os valores de resistência dos concretos com agregados secos foram significativamente mais elevados.

4.6. Evolução da Resistência à Compressão

4.6.1. Influência da Substituição de Agregados Graúdos Naturais por Reciclados na Evolução da Resistência à Compressão

A figura 4.8 mostra a evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o teor de substituição de agregados naturais por reciclados.

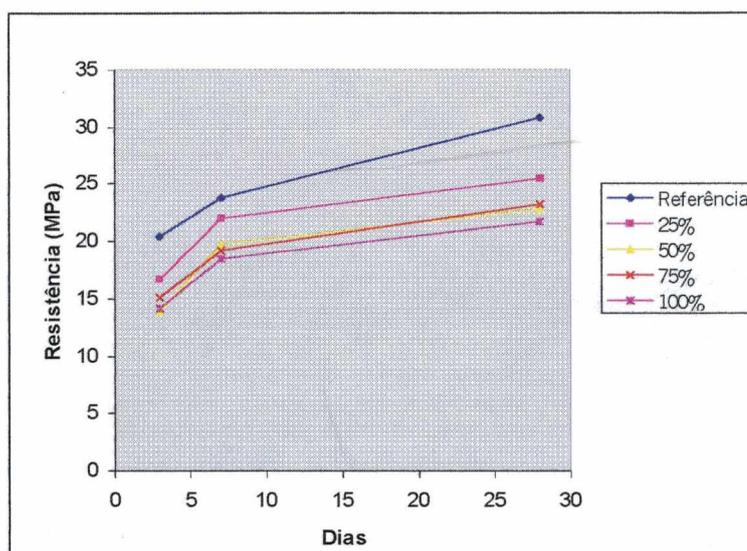


FIGURA 4.8 - Evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o teor de substituição de agregados naturais por reciclados.

A figura 4.9 mostra a porcentagem média da resistência à compressão atingida aos 3 e 7 dias de idade, em relação aos 28 dias.

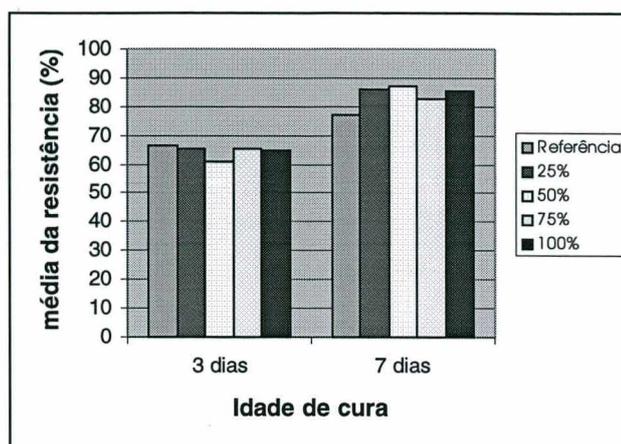


FIGURA 4.9 - Porcentagem média da resistência à compressão atingida aos 3 e 7 dias de idade, em relação aos 28 dias.

Pelas figuras 4.8 e 4.9 percebe-se que os concretos contendo agregados reciclados apresentaram resistências médias relativamente mais baixas até os 3 dias de idade. No período compreendido entre 3 e 7 dias os concretos com agregados reciclados apresentaram maior ganho de resistências, ultrapassando os valores dos concretos de referência. Dos 7 aos 28 dias, os concretos de referência voltam a ter um maior ganho porcentual de resistência. Pode-se concluir que os concretos com agregados reciclados apresentaram maior desenvolvimento de resistências no período compreendido entre 3 e 7 dias de idade, em relação aos concretos com agregados naturais.

Na literatura técnica são encontradas pouquíssimas referências sobre este comportamento peculiar dos concretos agregados com agregados reciclados. Parece que as propriedades da superfície dos agregados reciclados de concreto, mais rugosa e porosa, podem favorecer uma melhor ligação mecânica da argamassa nova com os agregados reciclados, proporcionando maior ancoragem e maior deposição de pasta de cimento na interface argamassa nova – argamassa antiga aderida, devido à maior área específica desses agregados.

Supõe-se que essa ligação melhore de forma mais acentuada a partir dos 3 dias, por isso observa-se um maior desenvolvimento de resistências dos concretos com agregados reciclados a partir dessa idade, em relação aos concretos com agregados convencionais. Desta forma, aos 7 dias de idade, a resistência dos concretos com agregados reciclados se apresenta mais próxima da resistência dos concretos com agregados naturais. Aos 28 dias a resistência dos concretos com agregados naturais volta a aumentar em relação a

resistência dos concretos com agregados reciclados, pois nesta idade, a resistência dos concretos com agregados reciclados passaria a ser limitada pelo agregado reciclado, ou seja, a ruptura não mais ocorreria na argamassa nova, mas sim na argamassa antiga aderida ou na interface agregado natural – argamassa antiga aderida.

Nos concretos com agregados reciclados secos existe ainda um outro fator a ser considerado, a absorção de água dos agregados, que poderia ocasionar uma concentração maior de cimento nas regiões próximas à superfície dos mesmos.

4.6.2. Influência do Traço Utilizado na Evolução da Resistência à Compressão

A figura 4.10 mostra a evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o traço utilizado.

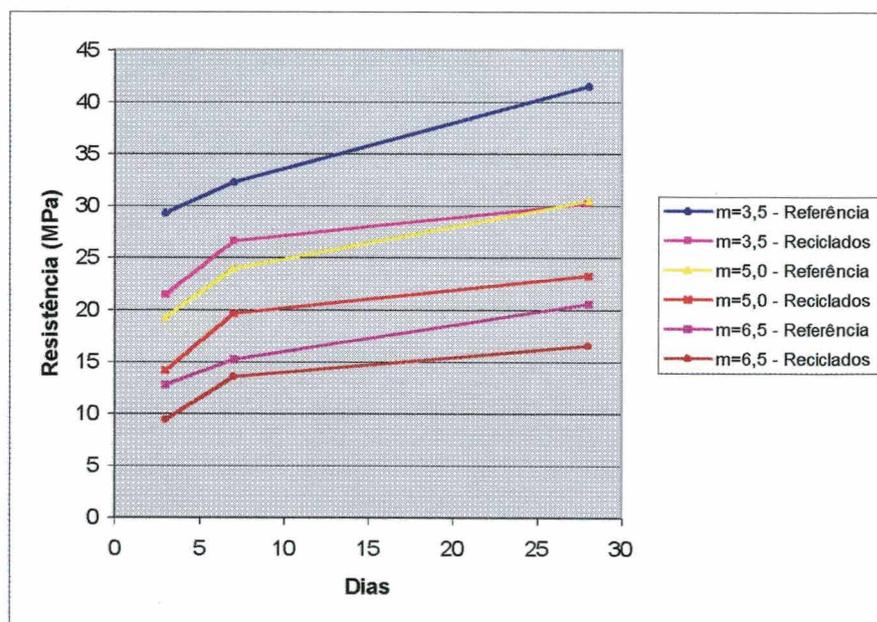


FIGURA 4.10 - Evolução da resistência à compressão dos concretos de acordo com o traço utilizado.

A tabela 4.17 mostra os valores das porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias, de acordo com os traços utilizados.

TABELA 4.17 – Porcentagens de resistência à compressão alcançadas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias.

Tipos de concretos	Idade de ruptura	Traço 1:3,5 (%)	Traço 1:5,0 (%)	Traço 1:6,5 (%)
Média de todos os concretos	3 dias	70,72	61,07	57,38
	7 dias	86,43	83,51	80,76
Concretos de referência	3 dias	70,61	63,19	61,71
	7 dias	77,75	78,67	73,99
Concretos com agregados reciclados	3 dias	70,74	60,72	56,70
	7 dias	87,92	84,32	81,81

Observa-se que os traços mais ricos atingiram maiores resistências nas primeiras idades, principalmente até os 3 dias, como já era esperado em virtude da maior quantidade de cimento destes concretos, pois desta forma os grãos de cimento estão mais próximos entre si e são capazes de estabelecer mais rapidamente um sistema contínuo de gel. No período compreendido entre os 3 e os 7 dias, se observa que houve um ganho de resistência significativamente maior para os concretos com agregados reciclados, para todos os traços. Contudo, esta tendência é mais acentuada para os traços com maior incorporação de agregados. Por isso, pode-se concluir que os agregados graúdos reciclados de concreto de fato interferem no desenvolvimento da resistência à compressão dos concretos com eles produzidos.

4.6.3. Influência da Condição de Umidade dos Agregados Reciclados na Evolução da Resistência à Compressão

A figura 4.11 mostra as porcentagens médias de resistências alcançadas, aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias, dos concretos produzidos com agregados reciclados secos e saturados, de acordo com os respectivos traços.

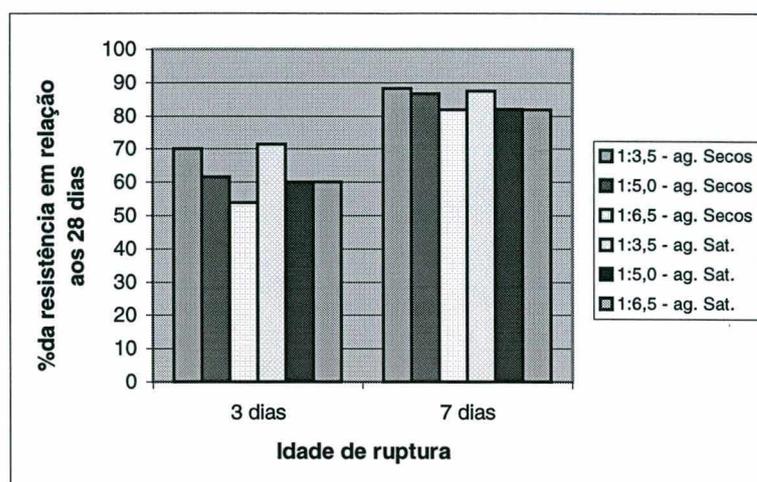


FIGURA 4.11 - Porcentagens médias de resistências alcançadas, aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias.

A tabela 4.18 mostra as resistências médias e as porcentagens médias de resistência alcançadas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias, para os concretos produzidos com agregados reciclados secos e saturados.

TABELA 4.18 – Resistências médias e porcentagens médias de resistência atingidas aos 3 e 7 dias, em relação aos 28 dias.

Tipos de concretos	Idade de ruptura	Resistências médias (MPa)	Porcentagem de resistência em relação aos 28 dias
Concretos com agregados reciclados secos	3 dias	15,08	63,36
	7 dias	20,52	86,22
	28 dias	23,80	100
Concretos com agregados reciclados saturados	3 dias	14,81	64,93
	7 dias	19,23	84,31
	28 dias	22,81	100

A figura 4.12 mostra a evolução das médias de resistência à compressão dos concretos de acordo com a condição de umidade dos agregados no momento da mistura.

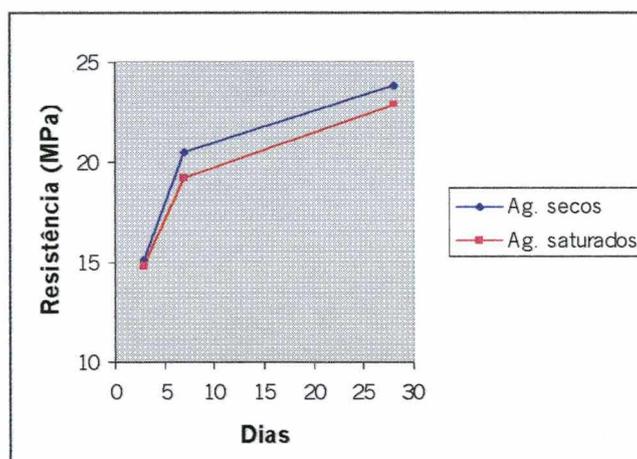


FIGURA 4.12 - Evolução das médias de resistência à compressão dos concretos de acordo com a condição de umidade dos agregados no momento da mistura.

Através da análise da tabela 4.18 e das figuras 4.11 e 4.12, percebe-se uma tendência de desenvolvimento de resistências ligeiramente maior, no período compreendido entre os 3 e os 7 dias, para os concretos com agregados reciclados secos, em relação aos concretos com agregados reciclados saturados. Esta tendência não pode, contudo, ser considerada estatisticamente significativa, com 95% de confiabilidade, havendo a necessidade da realização de novos estudos para a análise da diferença do desenvolvimento das resistências entre os concretos com agregados reciclados secos e saturados.

4.7. Determinação do Consumo de Cimento Aproximado

A tabela 4.19 mostra o consumo aproximado de cimento por metro cúbico de concreto, em função do traço empregado e dos teores de substituição.

TABELA 4.19 - Consumo aproximado de cimento por metro cúbico.

Traço	Teor de substituição	Agregados	Consumo de cimento por m³
1:3,5	0%	Referência	461,75
1:5,0	0%	Referência	353,95
1:6,5	0%	Referência	281,27
1:3,5	25%	Secos	464,58
1:5,0	25%	Secos	345,86
1:6,5	25%	Secos	274,71
1:3,5	25%	Saturados	462,45
1:5,0	25%	Saturados	349,47
1:6,5	25%	Saturados	272,46
1:3,5	50%	Secos	463,90
1:5,0	50%	Secos	343,31
1:6,5	50%	Secos	280,11
1:3,5	50%	Saturados	472,66
1:5,0	50%	Saturados	344,49
1:6,5	50%	Saturados	277,78
1:3,5	75%	Secos	451,28
1:5,0	75%	Secos	344,69
1:6,5	75%	Secos	275,13
1:3,5	75%	Saturados	453,32
1:5,0	75%	Saturados	341,16
1:6,5	75%	Saturados	275,13
1:3,5	100%	Secos	451,43
1:5,0	100%	Secos	332,65
1:6,5	100%	Secos	270,49
1:3,5	100%	Saturados	455,55
1:5,0	100%	Saturados	337,13
1:6,5	100%	Saturados	266,88

O consumo de cimento dos concretos produzidos variou de acordo com cada traço, devido a não fixação da relação água/cimento. Porém os valores de consumo de cimento, como já era esperado, se mostraram bastante próximos nos concretos com traços similares, apresentando em geral variações inferiores a 3% do consumo individual. Foi utilizada a relação água/cimento efetiva para o cálculo do consumo de cimento.

4.7.1. Relação entre o Consumo de Cimento e a Resistência à Compressão

Nas figuras 4.13 e 4.14 tem-se uma relação entre a resistência à compressão aos 28 dias e o consumo de cimento de cada concreto produzido, com agregados reciclados secos e saturados, respectivamente.

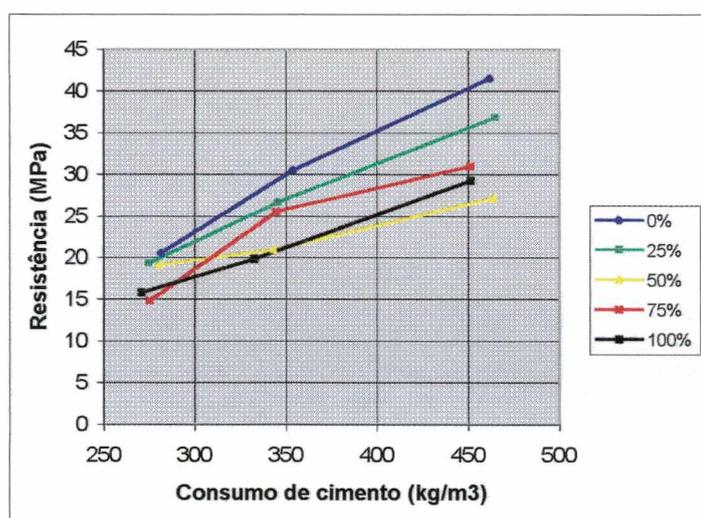


FIGURA 4.13 - Relação da resistência à compressão aos 28 dias com o consumo de cimento dos concretos produzidos com agregados reciclados secos.

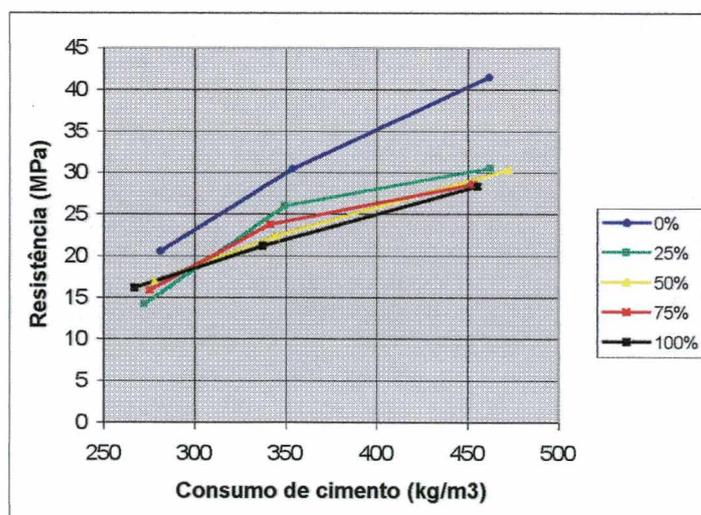


FIGURA 4.14 - Relação da resistência à compressão aos 28 dias com o consumo de cimento dos concretos produzidos com agregados reciclados saturados.

Nas figuras 4.13 e 4.14 percebe-se um distanciamento maior de resistências entre os concretos de referência e os concretos com agregados reciclados, conforme os concretos se tornam mais ricos.

Para efeito comparativo, obteve-se por interpolação direta, os valores de resistências dos concretos para os níveis de consumo de 300, 350, 400 e 450 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Tomou-se a referência 100 para os concretos produzidos somente com agregados naturais e plotou-se em histogramas as respectivas resistências dos concretos produzidos com agregados reciclados. Os resultados encontram-se representados nas figuras 4.15 e 4.16.

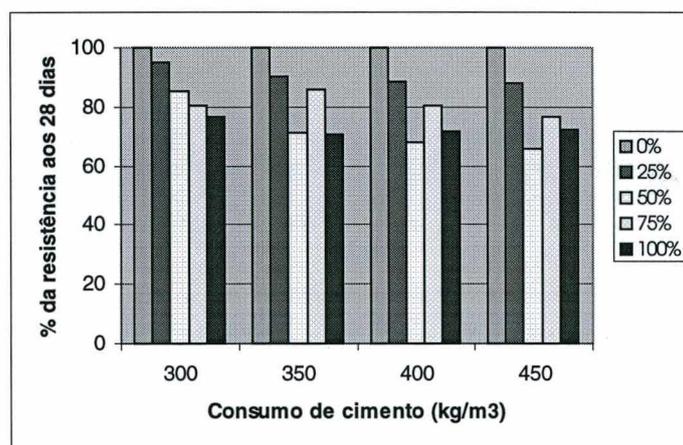


FIGURA 4.15 - Porcentagem da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados reciclados secos, em relação aos concretos de referência.

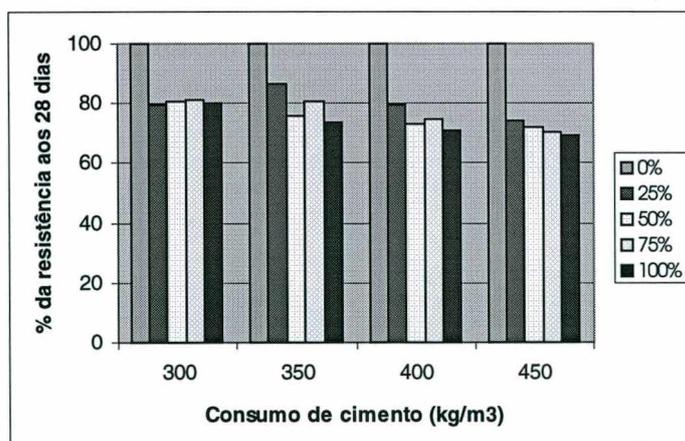


FIGURA 4.16 - Porcentagem da resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados reciclados saturados, em relação aos concretos de referência.

Percebe-se claramente que as perdas de resistência, em termos percentuais, são menores para os concretos mais pobres com igual consumo de cimento. De um modo geral, os concretos com agregados reciclados contendo 300 kg/m^3 de cimento apresentaram uma resistência média de 82,40% em relação aos concretos de referência, ao passo que para concretos com consumos de 450 kg/m^3 esse índice caiu para 73,57%.

Isto deve ocorrer em virtude da menor resistência dos agregados em relação à pasta. Conforme o concreto se torna mais rico, conseqüentemente sua pasta se torna mais resistente, se aproximando da resistência dos agregados. À medida que a resistência da pasta se torna maior que a dos agregados, é nestes que a ruptura tende a ocorrer. Nota-se ainda que os concretos com agregados reciclados secos sofreram menores reduções de resistência em relação aos concretos de referência para os teores mais baixos de substituição, para consumos de cimento iguais.

A Tabela 4.20 mostra a média das porcentagens, de todos os teores de substituição, da resistência à compressão em relação aos concretos de referência, obtidas para os concretos com agregados reciclados saturados e secos, de acordo com o consumo de cimento analisado.

TABELA 4.20 - Porcentagem média da resistência à compressão aos 28 dias, em relação aos concretos de referência, conforme o consumo de cimento por m^3 .

Condição dos agregados	300 kg/m^3 (%)	350 kg/m^3 (%)	400 kg/m^3 (%)	450 kg/m^3 (%)
Saturados	80,45	79,13	74,64	71,56
Secos	84,35	79,43	77,08	75,58
Média	82,40	79,28	75,86	73,57

Por esta análise observa-se que as resistências dos concretos com agregados reciclados secos foram ligeiramente superiores às resistências dos concretos com agregados reciclados saturados para consumos de cimento iguais.

4.8. Curva de Abrams

A curva de Abrams é a relação entre as resistências à compressão e suas respectivas relações água/cimento. É de grande importância o formato dessa curva, pois ela pode indicar tendências e ser utilizada para futuras dosagens de concreto. A Lei de Abrams

admite que a resistência de um concreto é inversamente proporcional à sua relação água/cimento, segundo a fórmula:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}}$$

Onde:

f_c = resistência

a/c = relação água/cimento

K_1 e K_2 = constantes empíricas

Na tabela 4.21 são mostradas as relações água/cimento efetivas, ou seja, aquelas utilizadas para análise dos resultados, onde se descontou a absorção dos agregados.

TABELA 4.21 - Valores da relação água/cimento obtidos para os concretos produzidos.

Traço	Teor de substituição	Agregados	Resistência aos 28 dias (MPa)	Relação a/c Efetiva
1:3,5	0%	Referência	41,48	0,50
1:5,0	0%	Referência	30,43	0,58
1:6,5	0%	Referência	20,53	0,73
1:3,5	25%	Secos	36,73	0,46
1:5,0	25%	Secos	26,58	0,61
1:6,5	25%	Secos	19,29	0,77
1:3,5	25%	Saturados	30,46	0,47
1:5,0	25%	Saturados	25,91	0,58
1:6,5	25%	Saturados	14,10	0,80
1:3,5	50%	Secos	27,12	0,44
1:5,0	50%	Secos	20,85	0,60
1:6,5	50%	Secos	19,13	0,66
1:3,5	50%	Saturados	30,37	0,40
1:5,0	50%	Saturados	22,28	0,59
1:6,5	50%	Saturados	16,87	0,69
1:3,5	75%	Secos	30,88	0,47
1:5,0	75%	Secos	25,40	0,56
1:6,5	75%	Secos	14,83	0,69
1:3,5	75%	Saturados	28,55	0,47
1:5,0	75%	Saturados	23,72	0,59
1:6,5	75%	Saturados	15,79	0,69
1:3,5	100%	Secos	29,19	0,46
1:5,0	100%	Secos	19,80	0,64
1:6,5	100%	Secos	15,79	0,72
1:3,5	100%	Saturados	28,33	0,44
1:5,0	100%	Saturados	21,17	0,60
1:6,5	100%	Saturados	16,11	0,77

As figuras 4.17 e 4.18 representam as curvas de Abrams obtidas respectivamente para os concretos com agregados reciclados secos e saturados.

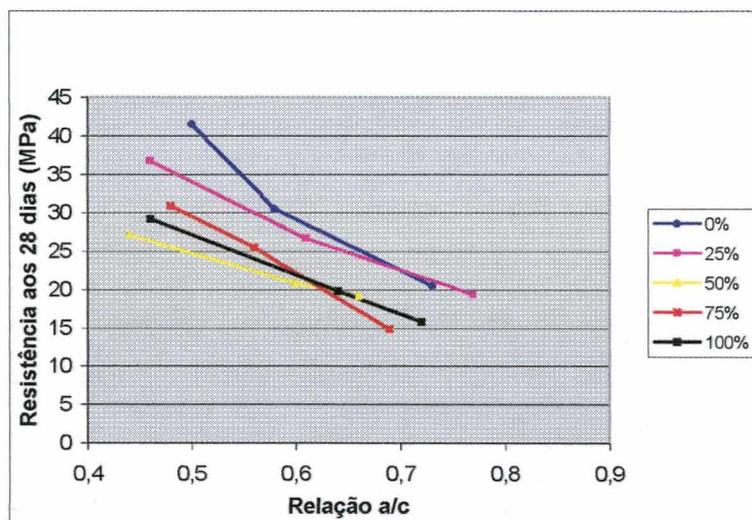


FIGURA 4.17 - Curva de Abrams para concretos produzidos com agregados reciclados secos.

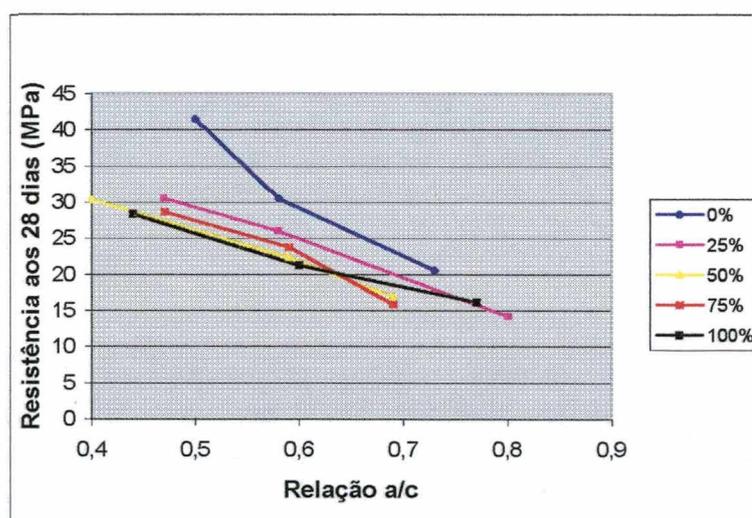


FIGURA 4.18 - Curva de Abrams para concretos produzidos com agregados reciclados saturados.

A figura 4.19 representa a curva de Abrams obtida para a média de valores entre os concretos com agregados reciclados saturados e secos.

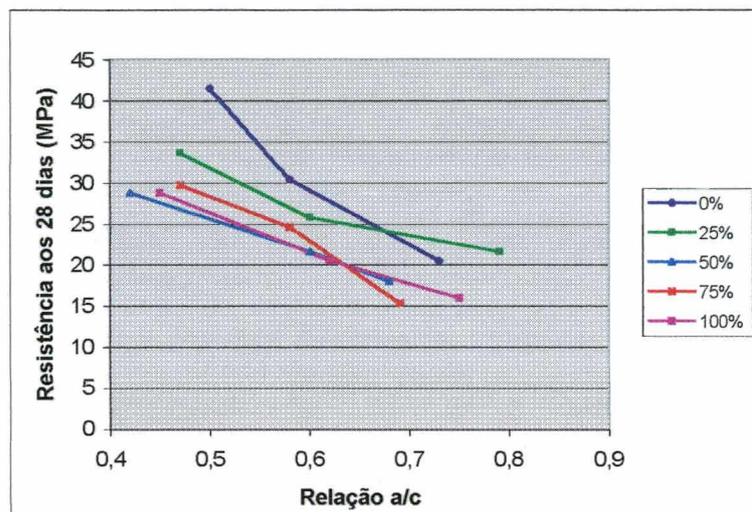


FIGURA 4.19 - Curva de Abrams obtida para a média de valores entre os concretos com agregados reciclados saturados e secos.

Através da análise das figuras 4.17, 4.18 e 4.19, percebe-se que para os concretos com agregados reciclados há uma maior redução das resistências dos concretos com relações água/cimento mais baixas, em relação aos concretos de referência. Isso faz com que a curva de Abrams para os concretos com agregados reciclados apresente uma tendência de ser menos inclinada, aproximando-se bastante de uma reta. A redução da relação água/cimento nestes casos, proporciona aumentos de resistência relativamente menores do que para os concretos com agregados naturais, porque o agregado reciclado limita a resistência do concreto com ele produzido.

4.9. Lei de Lyse

A Lei de Lyse utilizada no Brasil enuncia que a consistência de um concreto, medida pelo abatimento do tronco de cone (slump) permanece constante independente da riqueza da mistura se for mantido constante o tipo e graduação dos agregados, o teor de argamassa e a relação água/materiais secos (H). A partir desta consideração, o método admite que a relação entre a variação do traço (m) em função da relação água/cimento é linear, apresentando uma reta para cada valor de H.

Objetivando a verificação destas relações para os concretos produzidos com agregados reciclados, bem como comparar os resultados das diferentes dosagens de concretos com agregados reciclados com as dosagens dos concretos de referência, plotou-se na figura

4.20 os resultados obtidos para a relação entre o traço empregado e a relação água/cimento, para todos os teores de substituição analisados.

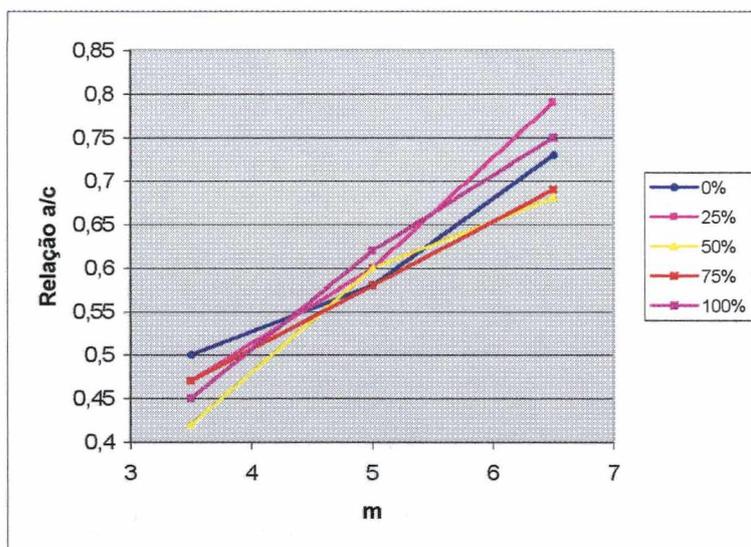


FIGURA 4.20 – Variação da relação água/cimento conforme o traço empregado.

Através da análise da figura 4.20, percebe-se que as variações dos traços m com as respectivas relações água/cimento seguem uma tendência de linearidade. Os valores de correlação linear r^2 encontrados, respectivamente para os teores de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, foram os seguintes: 0,97, 0,988, 0,953, 1,0 e 0,994. Nota-se que todos os valores ficaram bastante próximos de 1, confirmando a tendência de linearidade.

Pela análise dos resultados da Lei de Lyse, observou-se que a relação H , água/materiais secos, apresentou variações bastante pequenas para os diferentes traços. Os resultados obtidos estão expostos na tabela 4.22.

TABELA 4.22 - Resultados obtidos para a Lei de Lyse, conforme sua utilização no Brasil.

Teor de substituição	Traço	Relação água/cimento	Água (l/m ³)	Água/materiais secos H (%)
0%	1:3,5	0,50	230,88	11,1
	1:5,0	0,58	205,29	9,6
	1:6,5	0,73	205,33	9,7
25%	1:3,5	0,47	217,85	10,1
	1:5,0	0,60	208,60	10,0
	1:6,5	0,79	216,13	10,5
50%	1:3,5	0,42	196,68	9,4
	1:5,0	0,60	206,34	9,9
	1:6,5	0,68	189,68	9,0
75%	1:3,5	0,47	212,58	10,5
	1:5,0	0,58	198,90	9,6
	1:6,5	0,69	189,84	9,2
100%	1:3,5	0,45	204,07	10,0
	1:5,0	0,62	207,63	10,2
	1:6,5	0,75	201,51	10,0

Portanto, pode-se concluir através da análise da figura 4.20 e da tabela 4.22, que a Lei de Lyse é válida para os concretos produzidos com agregados reciclados de concreto, seguindo as mesmas tendências verificadas para os concretos produzidos com agregados naturais.

4.10. Lei de Molinari

A Lei de Molinari relaciona o consumo de cimento por metro cúbico com o traço utilizado para os concretos. A figura 4.21 mostra o comportamento verificado para os concretos com agregados reciclados e naturais.

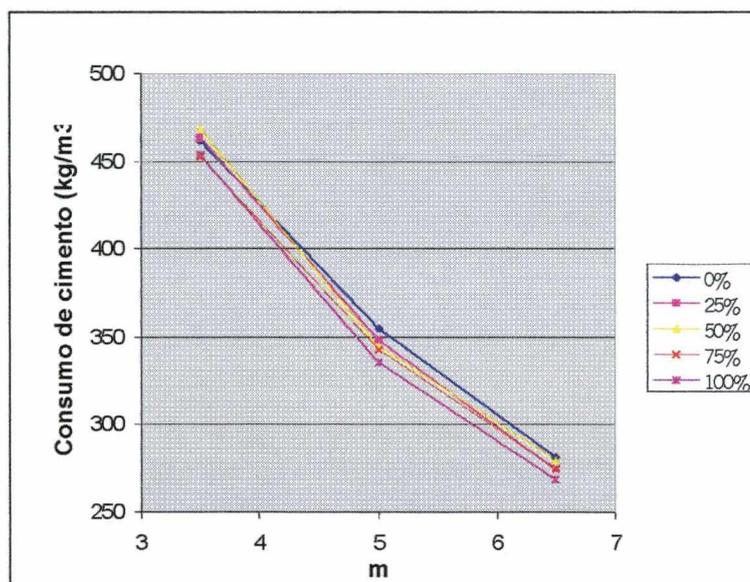


FIGURA 4.21 – Consumo de cimento por metro cúbico de acordo com o traço empregado.

A análise da figura 4.21 revela que os concretos com agregados reciclados seguiram a mesma tendência de comportamento dos concretos produzidos com agregados naturais, no que se refere à relação entre o consumo de cimento e o traço empregado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste trabalho possibilitou a análise de algumas variáveis que interferem no desempenho do concreto produzido com agregados reciclados graúdos de concreto. Estas análises permitiram o estabelecimento de algumas considerações sobre o efeito da substituição de agregados graúdos naturais por reciclados de concreto, na produção de novos concretos.

Com relação à trabalhabilidade e coesão do concreto, verificou-se considerável prejuízo com o aumento do teor de substituição de agregados naturais por reciclados. Embora o agregado reciclado utilizado fosse menos lamelar que o natural, sua textura superficial extremamente rugosa e porosa influenciou o comportamento do concreto no estado fresco. Para a produção dos concretos foi necessária a utilização de maior quantidade de argamassa para os traços com maior incorporação de agregados reciclados. Em massa, a quantidade de argamassa ideal determinada para os teores de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, foi de 54%, 58%, 60%, 62% e 64%, respectivamente.

A perda de abatimento verificada para os concretos com agregados reciclados secos após uma hora de mistura foi da ordem de 22% em média. Em relação aos concretos de referência, o decréscimo no abatimento foi cerca de 20% mais elevado para o mesmo período. Deve-se ressaltar que os ensaios foram realizados com valores de umidade relativa do ar elevados, com medidas apresentando médias superiores a 70%, e temperaturas médias em torno de 21°C. Possivelmente com temperaturas mais altas e umidade do ar mais baixa, condições bastante comuns em várias regiões do Brasil, as perdas de abatimento seriam bem mais altas. Portanto recomenda-se a adoção de certas precauções quando da utilização de agregados reciclados secos na produção de novos concretos, no que se refere à trabalhabilidade dos mesmos.

As resistências à compressão foram cerca de 15% a 30% menores para os concretos com agregados reciclados em relação aos concretos com agregados naturais. As maiores reduções foram observadas para os traços mais ricos, onde observou-se que a ruptura

ocorreu nos agregados reciclados, em virtude da baixa resistência dos mesmos. Desta forma, os traços mais pobres, 1:6,5, revelaram-se economicamente mais adequados à produção de concretos com agregados reciclados. As resistências não diminuíram significativamente, para valores iguais de m , conforme se aumentou a porcentagem de agregados reciclados incorporados aos concretos, o que talvez possa ser explicado pelo fato de que os concretos com teores mais altos de agregados reciclados foram produzidos com quantidades mais altas de argamassa.

Os agregados reciclados foram obtidos de um concreto de baixa resistência, por isso também apresentavam baixa resistência, fato comprovado pelas reduções observadas nos concretos mais pobres, com algumas resistências abaixo inclusive das verificadas para o concreto de origem. Porém, mostraram que podem ser utilizados para a produção de concretos com resistências bem superiores às verificadas para o concreto de origem, muito embora essa não seja uma alternativa economicamente vantajosa.

A resistência à compressão não variou em virtude da utilização de agregados reciclados no estado seco ou saturado, com exceção do teor de substituição de 25%, onde os valores de resistência dos concretos com agregados secos foram significativamente mais elevados.

A evolução da resistência à compressão mostrou significativa variação em função da utilização de agregados reciclados. O desenvolvimento das resistências foi maior no período compreendido entre os 3 e os 7 dias para os concretos com agregados reciclados, em relação aos concretos com agregados naturais. As diferenças no desenvolvimento das resistências foram mais acentuadas para os traços com maior incorporação de agregados e com maior teor de substituição de agregados naturais por reciclados. Tal comportamento pode ser devido à textura superficial rugosa e porosa dos agregados reciclados.

Com consumos de cimento mais baixos, as resistências à compressão dos concretos com agregados reciclados ficaram mais próximas às resistências dos concretos de referência. Parece mais interessante portanto, para a utilização de agregados reciclados, a produção de concretos com consumos de cimento inferiores a 300 kg/m^3 , pelo menos para agregados cujos concretos de origem sejam de baixa resistência, que parece ser o caso da maioria dos agregados disponíveis para reciclagem.

Verificou-se que a relação entre a resistência à compressão e a relação água/cimento dos concretos com agregados graúdos reciclados de concreto aproxima-se bastante de uma reta, apresentando uma menor tendência de inclinação em relação à horizontal do que a sugerida pela Lei de Abrams e verificada para os concretos com agregados graúdos naturais. Isso deve ocorrer porque a redução da relação água/cimento nestes casos não é tão vantajosa, com o agregado reciclado limitando a resistência do concreto produzido com relações água/cimento mais baixas.

Quanto à relação entre o traço e a relação água/cimento, verificou-se que a Lei de Lyse, conforme utilizada no Brasil, parece ser válida para os concretos com agregados reciclados de concreto, podendo ser representada por uma reta. A relação entre o consumo de cimento por metro cúbico e o traço empregado para os concretos com agregados graúdos reciclados de concreto seguiu a mesma tendência de comportamento verificada para os concretos com agregados naturais, portanto a Lei de Molinari parece ser válida também para os concretos com agregados reciclados, muito embora o consumo de cimento não tenha sido calculado através da massa específica do concreto no estado fresco.

De um modo geral, conclui-se que os agregados graúdos reciclados de concreto são perfeitamente adequados à produção de novos concretos, principalmente concretos não estruturais e de baixa resistência. A utilização de agregados reciclados secos parece não interferir sensivelmente nas propriedades dos concretos, em relação aos concretos com agregados reciclados saturados. A única precaução recomendada diz respeito à perda de abatimento dos concretos com agregados reciclados secos. No escopo desta pesquisa, as curvas de dosagem utilizadas no método do IPT mostraram-se adequadas à dosagem dos concretos com agregados reciclados de concreto.

5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como já mencionado, há muito a fazer na área de reciclagem de materiais de construção civil, portanto existem muitas alternativas de trabalhos interessantes e necessários para a continuidade do desenvolvimento das pesquisas nesta área. Para trabalhos futuros são recomendados os seguintes estudos:

- Análise do desenvolvimento de resistências para os concretos com agregados reciclados;
- Verificação da retração em concretos com agregados reciclados secos;
- Análise detalhada do processo de absorção, uma vez em contato com a pasta de cimento, dos agregados reciclados de concreto;
- Estudo aprofundado, com ensaios padronizados e comparáveis, da perda de abatimento dos concretos produzidos com agregados reciclados secos;
- Análise micro-estrutural da argamassa nova e da interface argamassa antiga – argamassa nova, dos concretos com agregados reciclados;
- Estudo do efeito da substituição de agregados naturais por reciclados de concreto na durabilidade dos novos concretos;
- Análise do efeito da britagem na qualidade final dos agregados reciclados de concreto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJDUKIEWICZ, A. B.; KLISZCZEWICZ, A. T. Properties of Structural Concrete with Rubble Aggregate from Demolition of RC/PC Structures. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 115-120.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles**. NBR 6465. Rio de Janeiro, 1984, 5p.

____ **Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987, 5p.

____ **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman – Método de Ensaio**. NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987, 3p.

____ **Agregados - Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo - Método de ensaio**. NBR 7220. Rio de Janeiro, 1987, 3p.

____ **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Método de ensaio**. NBR 7223. Rio de Janeiro, 1992, 4p.

____ **Moldagem e cura de corpos de prova de concreto, cilíndricos ou prismáticos – Procedimentos**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 1994, 9p.

____ **Concreto – Perda de abatimento – Método de ensaio**. NBR 10342. Rio de Janeiro, 1992, 2p.

____ **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994, 4p.

____ **Agregados para concreto – Especificação brasileira**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 1983, 1p.

- _____. **Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio.** NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983, 3p.
- BACMI, J. M. A Review of the Prospects for the Greater Use of Recycled and Secondary Aggregates in Construction. **The Concrete Society Journal**, v. 27, nº6, 1993.
- BAIRAGI, N. K. et al. Behaviour of Concrete with Different Proportions of Natural and Recycled Aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, nº 9, 1993. pp. 109-126.
- BARRA, M.; VAZQUEZ E. Particularidades do Processo de Carbonatação em Concretos de Agregado Reciclado. In: **IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções – CONPAT.** UFRGS, Porto Alegre, 1997. pp. 217-224.
- BROWN, B. V. Alternative and Marginal Aggregates Sources. **Concrete For Environment Enhancement and Protection.** London, 1996. pp. 471-484.
- CABRERA, J. G.; WAINWRIGHT, P. J. Use of Demolition Concrete to Produce Durable Structural Concrete. In: **Environmental Aspects of Construction with Waste Materials**, 1994.
- COLLINS, R. J. Increasing the Use of Recycled Aggregates in Construction. **Concrete For Environment Enhancement and Protection.** London, 1996. pp. 73-80.
- DELWAR, M. et al. Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, nº 3, 1997. pp. 251-256.
- GIACCIO, G. et al. High-Strength Concretes Incorporating Different Coarse Aggregates. **ACI Materials Journal**, v. 89, nº 3, 1992. pp. 242-246.
- GOTTFREDSSEN, F. R.; THØGERSEN, F. Recycling of Concrete in Aggressive Environment. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium.** Odense, Denmark, 1993. pp. 309-318.

- HAMASSAKI, L. T. et al. Uso de Entulho como Agregado para Argamassas de Alvenaria. In: **Workshop – Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil**. São Paulo, 1996. pp. 107-115.
- (HANSEN, T. C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry. **RILEM Report 6**. Ed Chapman & Hall, London, 1992. 316p.
- HANSEN, T. C.; NARUD, H. Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate. **Concrete International – Design and Construction**, v. 5, n° 1, pp. 79-83, 1983.
- HENDRIKS, C. F. Recycling and Reuse as a Basis for Sustainable Development in Construction Industry. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 43-54.
- KASAI, Y. The Second International RILEM Symposium on Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. **Revista Materials and Structures**, n° 22, 1989. pp. 312-319.
- KIBERT, C. J. Concrete/Masonry Recycling Progress in the USA. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 83-92.
- KIKUCHI, M. et al. The Total Evaluation of Recycled Aggregate and Recycled Concrete. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 367-378.
- LEVY, S. M. Reciclagem do Entulho de Construção Civil, para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos. **Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. São Paulo, 1997. 146p.
- MACHADO JR. E. F. et al. Influência do Agregado Graúdo, Proveniente da Reciclagem de Rejeitos de Construção e Demolição (entulho), na Perda do Abatimento do Concreto Fresco e nas Propriedades Mecânicas do Concreto Endurecido. **Anais da Reunião do IBRACON**, Rio de Janeiro, 1998.
- ⊙ MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto - Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed. PINI, 1ª edição. São Paulo, 1994.

- MOREL, A. et al. Practical Guideline for the Use of Recycled Aggregates in Concrete in France and Spain. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 71-82.
- ® NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Ed. PINI, 2ª edição. São Paulo, 1997.
- NIRO, G. et al. Recycled Aggregate Concrete (RAC): Properties of aggregate and RC Beams Made from RAC. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 141-149.
- O'MAHONY, M. M. An Analysis of the Shear Strength of Recycled Aggregates. **Revista Materials and Structures**, n° 30, 1997. pp. 559-606.
- PAUW, C. et al. Reuse of Construction and Demolition Waste as Aggregates in Concrete, Technical and Environmental Aspects. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 131-140.
- PERA, J. State of the Art Report – Use of Waste Materials in Construction in Western Europe. In: **Workshop – Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil**. São Paulo, 1996. pp. 1-20.
- PIETERSEN, H. S. et al. Application of Recycled Aggregates in Concrete – Experience from the Netherlands. **Three-Day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry**. Ottawa, Canada, 1998. pp. 131-146.
- º PINTO, T. P. Utilização de Resíduos de Construção. **Dissertação de Mestrado apresentada à USP**. São Carlos, 1987.
- RASHWAN, M. S.; ABOURIZK, S. The Properties of Recycled Concrete. **Revista Concrete International**, v. 19, n° 7, jul 1997. pp. 56-60.
- RAVINDRAJAH, R. et al. Strength Evaluation of Recycled-Aggregate Concrete by in-situ Tests. **Revista Materials and Structures**, n° 21, 1988. pp. 289-295.

- RILEM Committee TC 121-DRG. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates. **Revista Materials and Structures**, n° 27, 1994. pp. 557-559.
- SAEKI, N.; SHIMURA, K. Recycled Concrete Aggregate as a Road Base Material in Cold Regions. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 151-156.
- SHULZ, R. R. The Processing of Building Rubble as Concrete Aggregate in Germany. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 105-116.
- SIMONS, B. P.; HENDERIECKX, F. Guidelines for Demolition with Respect to the Reuse of Building Materials: Guidelines and Experiences in Belgium. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 25-34.
- TAVAKOLI, M.; SOROUSHIAN, P. Strengths of Recycled Aggregate Concrete Made Using Field-Demolished Concrete as Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 93, n° 2, 1996. pp. 182-190.
- TOPÇU, I. B. Physical and Mechanical Properties of Concretes Produced with Waste Concrete. **Elsevier, Cement and Concrete Research**, 1997.
- UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S. Recycling of Construction Waste. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 163-172.
- VRIES, P. Concrete Recycled. **The Concrete Society Journal**, v. 27, n° 3, 1993.
- VRIES, P. Concrete Recycled: Crushed Concrete as Aggregate. **Concrete For Environment Enhancement and Protection**. London, 1996. pp. 121-130.
- WAINWRIGHT, P. J. et al. Modifying the Performance of Concrete Made with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 319-330.

- YANAGI, K. et al. Physical Properties of Recycled Concrete Using Recycled Coarse Aggregate Made of Concrete with Finishing Materials. **Proceedings of the Third International RILEM Symposium**. Odense, Denmark, 1993. pp. 379-390.
- * ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho como Agregado, na Confecção do Concreto**. Dissertação de mestrado apresentada à UNICAMP. Campinas, 1997. 140p.

ANEXO I

Para o estabelecimento dos traços, partiu-se de um traço com m igual a 5, para cada valor de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados e, conduziu-se um estudo de trabalhabilidade e coesão, visando encontrar para cada teor de substituição, a percentagem ideal de argamassa, em massa, a ser empregada. Transformou-se as percentagens ideais encontradas de massa para volume e foram então desdobrados mais dois traços para cada teor de substituição, com valores de m iguais a 3,5 e 6,5. O desenvolvimento das equações é exposto a seguir, com a utilização da seguinte notação:

a = kg de agregado miúdo por kg de cimento
 p = kg de agregado graúdo por kg de cimento
 pn = kg de agregado graúdo natural por kg de cimento
 pr = kg de agregado graúdo reciclado
 m = kg de agregado total por kg de cimento
 da = massa específica do agregado miúdo
 dp = massa específica do agregado graúdo natural
 dr = massa específica do agregado graúdo reciclado
 dc = massa específica do cimento
 α_i = percentagem de argamassa ideal em massa
 α_{vol} = percentagem de argamassa ideal em volume

1) Traços com 0% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados.

$$\alpha_i = 54\% \Rightarrow 1 : 2,24 : 2,76$$

$$\alpha_{vol} = \frac{(1/dc + a/da)}{(1/dc + a/da + p/dp)} \times 100 = \frac{(1/3,15 + 2,24/2,55)}{(1/3,15 + 2,24/2,55 + 2,76/2,63)} \times 100 = 53,26\%$$

Substituindo α_{vol} em:

$$a = (\alpha \times (1 + m) / 100) - 1$$

$$a/da = (\alpha_{vol} \times (1/dc + a/da + p/dp) / 100) - 1/dc$$

$$a/2,55 = (53,26 \times (1/3,15 + a/2,55 + p/2,63) / 100) - 1/3,15$$

$$a/2,55 = 0,169 + 0,209a + 0,203p - 0,317$$

$$a = 0,431 + 0,533a + 0,518p - 0,808$$

$$a - 0,533a = 0,518p - 0,377$$

$$0,467a = 0,518p - 0,377$$

$$\text{tendo } p = m - a$$

$$0,467a + 0,518(m - a) - 0,377$$

$$0,467a + 0,518a = 0,518m - 0,377$$

$$0,985a = 0,518m - 0,377$$

$$p/m = 3,5:$$

$$0,985a = 0,518 \times 3,5 - 0,377 \rightarrow a = 1,46$$

$$\rightarrow p = 2,04$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 1,46 : 2,04}$$

$$p/m = 6,5:$$

$$0,985a = 0,518 \times 6,5 - 0,377 \rightarrow a = 3,04$$

$$\rightarrow p = 3,46$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 3,04 : 3,46}$$

2) Traços com 25% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados.

$$\alpha_i = 58\% \Rightarrow \mathbf{1 : 2,48 : 1,89 : 0,63}$$

$$\alpha_{vol} = \frac{(1/dc + a/da)}{(1/dc + a/da + pn/dp + pr/dr)} \times 100 =$$

$$\frac{(1/3,15 + 2,48/2,55)}{(1/3,15 + 2,48/2,55 + 1,89/2,63 + 0,63/2,31)} \times 100 = 56,55\%$$

Substituindo α_{vol} em:

$$a = (\alpha \times (1 + m) / 100) - 1$$

$$a/da = (\alpha_{vol} \times (1/dc + a/da + 0,75pn/dp + 0,25pr/dr) / 100) - 1/dc$$

$$a/2,55 = (56,55 \times (1/3,15 + a/2,55 + 0,75pn/2,63 + 0,25pr/2,31) / 100) - 1/3,15$$

$$a/2,55 = 0,180 + 0,222a + 0,161pn + 0,061pr - 0,317$$

$$a = 0,459 + 0,566a + 0,411pn + 0,156pr - 0,808$$

$$0,434a = 0,411pn - 0,349 + 0,156pr$$

$$\text{tendo } pn + pr = m - a$$

$$0,434a = 0,567(m - a) - 0,349$$

$$0,434a + 0,567a = 0,567m - 0,349$$

$$1,001a = 0,567m - 0,349$$

$$p/m = 3,5:$$

$$1,001a = 0,567 \times 3,5 - 0,349 \rightarrow a = 1,63$$

$$\rightarrow pn = 1,40$$

$$\rightarrow pr = 0,47$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 1,63 : 1,40 : 0,47}$$

$$p/m = 6,5:$$

$$1,001a = 0,567 \times 6,5 - 0,349 \rightarrow a = 3,33$$

$$\rightarrow pn = 2,38$$

$$\rightarrow pr = 0,79$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 3,33 : 2,38 : 0,79}$$

3) Traços com 50% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados.

$$\alpha_i = 60\% \Rightarrow \mathbf{1 : 2,60 : 1,20 : 1,20}$$

$$\alpha_{vol} = \frac{(1/dc + a/da)}{(1/dc + a/da + pn/dp + pr/dr)} \times 100 =$$

$$\frac{(1/3,15 + 2,60/2,55)}{(1/3,15 + 2,60/2,55 + 1,20/2,63 + 1,20/2,31)} \times 100 = 57,81\%$$

Substituindo α_{vol} em:

$$a = (\alpha \times (1 + m) / 100) - 1$$

$$a/da = (\alpha_{vol} \times (1/dc + a/da + 0,50pn/dp + 0,50pr/dr) / 100) - 1/dc$$

$$a/2,55 = (57,81 \times (1/3,15 + a/2,55 + 0,75pn/2,63 + 0,25pr/2,31) / 100) - 1/3,15$$

$$a/2,55 = 0,184 + 0,227a + 0,110pn + 0,125pr - 0,317$$

$$a = 0,468 + 0,578a + 0,280pn + 0,319pr - 0,808$$

$$0,422a = 0,280pn - 0,340 + 0,319pr$$

$$\text{tendo } pn + pr = m - a$$

$$0,422a = 0,599(m - a) - 0,340$$

$$0,422a + 0,599a = 0,599m - 0,340$$

$$1,021a = 0,599m - 0,340$$

$$p/m = 3,5:$$

$$1,021a = 0,599 \times 3,5 - 0,340 \rightarrow a = 1,72$$

$$\rightarrow pn = 0,89$$

$$\rightarrow pr = 0,89$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 1,72 : 0,89 : 0,89}$$

$$p/m = 6,5:$$

$$1,021a = 0,599 \times 6,5 - 0,340 \rightarrow a = 3,48$$

$$\rightarrow pn = 1,51$$

$$\rightarrow pr = 1,51$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 3,48 : 1,51 : 1,51}$$

4) Traços com 75% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados.

$$\alpha_i = 62\% \Rightarrow \mathbf{1 : 2,72 : 0,57 : 1,71}$$

$$\alpha_{vol} = \frac{(1/dc + a/da)}{(1/dc + a/da + pn/dp + pr/dr)} \times 100 =$$

$$\frac{(1/3,15 + 2,78/2,55)}{(1/3,15 + 2,78/2,55 + 0,57/2,63 + 1,71/2,31)} \times 100 = 59,53\%$$

Substituindo α_{vol} em:

$$a = (\alpha \times (1 + m) / 100) - 1$$

$$a/da = (\alpha_{vol} \times (1/dc + a/da + 0,50pn/dp + 0,50pr/dr) / 100) - 1/dc$$

$$a/2,55 = (59,53 \times (1/3,15 + a/2,55 + 0,25pn/2,63 + 0,75pr/2,31) / 100) - 1/3,15$$

$$a/2,55 = 0,189 + 0,233a + 0,057pn + 0,193pr - 0,317$$

$$a = 0,482 + 0,594a + 0,145pn + 0,492pr - 0,808$$

$$0,406a = 0,145pn - 0,326 + 0,492pr$$

$$\text{tendo } pn + pr = m - a$$

$$0,406a = 0,637(m - a) - 0,326$$

$$0,406a + 0,637a = 0,637m - 0,326$$

$$1,043a = 0,637m - 0,326$$

$$p/m = 3,5:$$

$$1,043a = 0,637 \times 3,5 - 0,326 \rightarrow a = 1,83$$

$$\rightarrow p_n = 0,42$$

$$\rightarrow p_r = 1,25$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 1,83 : 0,42 : 1,25}$$

$$p/m = 6,5:$$

$$1,043a = 0,637 \times 6,5 - 0,326 \rightarrow a = 3,66$$

$$\rightarrow p_n = 0,71$$

$$\rightarrow p_r = 2,13$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 3,66 : 0,71 : 2,13}$$

5) Traços com 100% de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados.

$$\alpha_i = 64\% \Rightarrow \mathbf{1 : 2,84 : 2,16}$$

$$\alpha_{vol} = \frac{(1/d_c + a/d_a)}{(1/d_c + a/d_a + p_r/d_r)} \times 100 = \frac{(1/3,15 + 2,84/2,55)}{(1/3,15 + 2,84/2,55 + 2,16/2,31)} \times 100 = 60,48\%$$

Substituindo α_{vol} em:

$$a = (\alpha \times (1 + m) / 100) - 1$$

$$a/d_a = (\alpha_{vol} \times (1/d_c + a/d_a + p_r/d_r) / 100) - 1/d_c$$

$$a/2,55 = (60,48 \times (1/3,15 + a/2,55 + p_r/2,31) / 100) - 1/3,15$$

$$a/2,55 = 0,192 + 0,237a + 0,262p_r - 0,808$$

$$a = 0,604a + 0,490 + 0,668p_r - 0,808$$

$$a - 0,604a = 0,668p_r - 0,318$$

$$0,396a = 0,668p_r - 0,318$$

$$\text{tendo } p = m - a$$

$$0,395a = 0,668(m - a) - 0,318$$

$$1,063a = 0,668m - 0,318$$

$$p/m = 3,5:$$

$$1,063a = 0,668 \times 3,5 - 0,318 \rightarrow a = 1,90$$

$$\rightarrow p = 1,60$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 1,90 : 1,60}$$

$$p/m = 6,5:$$

$$1,063a = 0,668 \times 6,5 - 0,318 \rightarrow a = 3,79$$

$$\rightarrow p = 2,71$$

$$\Rightarrow \mathbf{1 : 3,79 : 2,71}$$

ANEXO II

Valores de resistência à compressão, em MPa, de todos os corpos de prova ensaiados.

Teor de Substituição	m	Resistência (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
0%	3,5	29,58	32,44	41,89
		29,00	32,06	41,06
		28,74	31,95	40,30
	5,0	19,87	24,11	30,49
		16,93	23,77	29,22
		18,59	22,83	30,37
	6,5	13,01	15,47	20,24
		12,33	14,91	20,82
		12,14	14,33	18,46
Agregado seco 25%	3,5	25,27	30,62	35,71
		25,91	30,18	37,75
		25,46	24,83	33,04
	5,0	16,42	23,62	26,10
		15,98	23,75	25,40
		17,13	21,20	27,06
	6,5	11,52	15,28	19,99
		10,89	16,42	18,59
		10,82	16,23	17,06
Agregado Saturado 25%	3,5	22,22	27,50	28,83
		20,05	24,64	29,78
		21,90	29,54	31,13
	5,0	13,75	20,50	25,40
		15,41	21,39	24,64
		17,06	17,57	26,42
	6,5	6,49	10,95	13,75
		7,77	11,84	12,35
		8,15	11,59	14,45
Agregado Seco 50%	3,5	19,29	25,53	22,47
		17,63	25,27	25,85
		18,21	20,63	28,39
	5,0	10,50	17,13	21,14
		10,06	17,51	20,56
		9,57	16,04	20,12
	6,5	9,74	15,09	18,84
		9,04	12,73	19,42
		9,68	14,77	17,00
Agregado Saturado 50%	3,5	20,31	21,26	30,69
		21,01	27,12	26,55
		21,52	26,61	30,05
	5,0	12,86	19,86	22,15
		12,99	19,61	20,31
		13,50	20,50	22,41
	6,5	9,99	13,37	17,06
		10,50	14,58	14,90
		9,87	13,56	16,68

Teor de Substituição	m	Resistência (MPa)		
		3 dias	7 dias	28 dias
Agregado Seco 75%	3,5	21,21	25,21	28,52
		20,69	26,99	30,69
		20,13	28,14	31,07
	5,0	17,57	21,58	24,06
		17,83	20,37	24,57
		16,93	21,07	26,23
	6,5	7,38	11,71	15,02
		8,28	11,33	14,64
		7,77	11,08	13,94
Agregado Saturado 75%	3,5	19,72	25,40	29,92
		19,44	22,98	27,18
		19,03	22,73	25,59
	5,0	13,75	18,88	23,94
		15,02	18,06	23,49
		14,77	17,21	22,15
	6,5	9,29	11,65	16,17
		9,04	12,86	14,90
		9,49	11,59	15,41
Agregado Seco 100%	3,5	20,44	25,27	28,33
		21,84	26,74	28,52
		21,07	24,70	29,86
	5,0	12,67	18,59	19,67
		11,46	16,87	19,86
		11,71	17,38	19,74
	6,5	8,02	13,98	16,53
		6,18	13,46	15,05
		8,28	12,97	14,77
Agregado Saturado 100%	3,5	19,86	24,06	28,68
		20,69	21,77	27,98
		21,71	22,85	26,40
	5,0	11,59	16,36	21,50
		11,20	17,00	20,84
		11,33	15,53	20,23
	6,5	10,31	13,56	16,35
		9,55	13,24	15,87
		9,99	12,54	15,49