

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MARCELO PEDREIRA DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO CONTENDO
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZANDO UM MODELO DE
DANO ISOTRÓPICO**

FEIRA DE SANTANA/BA

2012

MARCELO PEDREIRA DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO CONTENDO
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZANDO UM MODELO DE
DANO ISOTRÓPICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientadores: Koji de Jesus Nagahama

Anderson de Souza Matos Gadéa

FEIRA DE SANTANA/BA

2012

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
CONTENDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZANDO
UM MODELO DE DANO ISOTRÓPICO

Marcelo Pedreira da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVER-
SIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISI-
TOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊN-
CIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:

Prof. Koji de Jesus Nagahama, D.Sc.

Prof. Anderson de Souza Matos Gadéa, D.Sc.

Prof. Marcos Martinez Silvano, D.Sc.

Prof^a. Cintia Maria Ariani Fontes, D.Sc.

FEIRA DE SANTANA, BA - BRASIL

SETEMBRO DE 2012

Ficha catalográfica: Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

S581e Silva, Marcelo Pedreira da
Estudo do comportamento mecânico do concreto contendo resíduos de construção e demolição utilizando um modelo de dano isotrópico / Marcelo Pedreira da Silva. – Feira de Santana / BA, 2012.
108 f. : il.

Orientadores: Koji de Jesus Nagahama.
Anderson de Souza Matos Gadéa.

Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental)–
Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Tecnologia,
Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2012.

1. Concreto reciclado. 2. Resíduos de construção. 3. Resíduos de demolição. 4. Modelo de dano isotrópico de Mazars. 5. Agregados de RCD. I. Nagahama, Koji de Jesus. II. Gadéa, Anderson de Souza Matos. III. Universidade Estadual de Feira de Santana. IV. Departamento de Tecnologia. V. Título.

CDU: 624.012.45

*Aos meus pais, Paulo Sergio e Maria Lucia,
como retribuição à primorosa educação que
recebi.*

Agradecimentos

À Deus pelas doses diárias de alegria e vontade recebidas ao levantar, pela saúde de pedra para suportar os desafios aceitos e pela paz interior que me permite dormir para recomeçar. São elementos essenciais que me protegem e me dão coragem.

À minha família, sobretudo aos meus pais, Maria Lucia e Paulo Sergio, pela herança da inquietação e curiosidade, qualidades fundamentais aos pesquisadores.

À Maria Elane pelo amor, companheirismo, carinho, compreensão, amizade e incentivo constante, sobretudo nos últimos meses.

Aos orientadores, Anderson de Souza Matos Gadéa e Koji de Jesus Nagahama, pela amizade, incentivo e confiança. Sua dedicação e orientação participativa foram fundamentais para traçar os caminhos desta pesquisa.

À professora Mônica Leite pelo compartilhamento das informações de suas pesquisas experimentais e pronta colaboração nos esclarecimentos que se fizeram necessários.

À COPPE-UFRJ por ter cedido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECEA) a licença para utilização do software TNO-DIANA através do Programa de Cooperação Acadêmica (PROCAD/CAPES).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro fornecido por meio da bolsa Mestrado - GM, essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do PPGECEA pela formação acadêmica e importantes instruções teóricas.

Aos amigos do PPGECEA pelos grandes momentos compartilhados. Agradeço especialmente a Bianca, Dalila, Júlia, Maria Elane, Magno, Rogério e Saulo pelo ambiente de ajuda mútua que convivemos.

Ao amigo Magno pela parceria nos momentos de estudos e produções.

Aos amigos funcionários do PPGECEA Cátia, Mariana e Hebert pelo apoio constante nas rotinas administrativas e pelo bons momentos vividos.

Aos amigos Paulo Peruna e Carlos Parca por entenderem a importância desta etapa profissional e contribuírem para sua realização.

Enfim, aos amigos Cristóvão Cordeiro, Lasaro Lima e Rafael Freitas pelos conselhos e recomendações na vida acadêmica e profissional.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO
CONTENDO RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO UTILIZANDO
UM MODELO DE DANO ISOTRÓPICO

Marcelo Pedreira da Silva

Setembro/2012

Orientadores: Koji de Jesus Nagahama

Anderson de Souza Matos Gadéa

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

Este trabalho objetiva avaliar o comportamento mecânico do concreto contendo agregado reciclado com diferentes teores de resíduos de construção e demolição utilizando um modelo de dano isotrópico. A metodologia apresentada utiliza o modelo isotrópico de Mazars como equação constitutiva para o concreto contendo agregados de RCD submetido à compressão, e adapta seus parâmetros de ajuste, A_c e B_c , como polinômios quadráticos em função do teor de substituição de agregados (TSA). O modelo foi avaliado para o concreto convencional e concretos reciclados com teores de 50% e 100% de substituição de agregados graúdos e miúdos. Foram analisadas misturas com fatores água/cimento iguais a 0,45 e 0,80. A validação do modelo foi realizada através da comparação com curvas experimentais de compressão axial. Um estudo de caso numérico, baseado em ensaios experimentais de tração na flexão, foi realizado para atestar a eficiência e funcionalidade deste modelo adaptado. Os resultados expressam boa aproximação entre valores numéricos e experimentais. Como produto final, este trabalho fornece modelos analíticos para o concreto contendo agregado reciclado estudado.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CONCRETE CONTAINING
CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE USING A MODEL OF
ISOTROPIC DAMAGE

Marcelo Pedreira da Silva

September/2012

Advisors: Koji de Jesus Nagahama

Anderson de Souza Matos Gadéa

Department: Civil Engineering

This paper has as a goal to describe the mechanical behavior of the CDW recycled concrete in compression, using a model of isotropic damage adapted to the variation of contents of substitution of natural aggregates by recycled ones. The methodology that is presented uses the isotropic model by Mazars as a constitutive equation for the CDW concrete writing its adjustment parameters A_c and B_c as square polynomials according to the percentage of the aggregate substitution. Mixtures with water/ciment relationship equal to 0,45 and 0,80 were analyzed. The model was evaluated for conventional concrete and recycled concretes with 50 % and 100 % of aggregate substitution. The results show good approximation between the analytical and numerical values obtained with the adapted isotropic model of damage and experimental tests of axial compression and resistance to split tensile strength in the flexural strength of the concretes.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
1.0 Introdução	14
1.1 Motivação para o uso do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição	14
1.2 Desafios e hipóteses da pesquisa	16
1.3 Objetivos e relevância do estudo	17
1.4 Metodologia e escopo do trabalho	18
2.0 Considerações sobre a utilização do agregado reciclado de RCD em concreto	20
2.1 Breve panorama dos estudos científicos atuais	20
2.2 A variabilidade do agregado reciclado	24
2.3 Concreto contendo agregado reciclado para fins não-estruturais	25
2.4 Concreto contendo agregado reciclado para fins estruturais	28
2.4.1 E 471 (2006) - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos	30
2.4.2 EHE/2008 - Instrucción de Hormigón Estructural	32
2.4.3 German committee for reinforced concrete (DAfStb) - Concrete with recycled aggregates	34
2.4.4 RILEM RECOMMENDATION 121 - DRG - Specifications for concrete with recycled aggregates (1994)	36
3.0 Modelos constitutivos para o concreto	42

3.1	Aspectos gerais	42
3.2	Lei constitutiva baseada na Mecânica do Dano Contínuo	48
3.2.1	Modelo isotrópico de Mazars	48
3.2.2	Estudo da influência paramétrica do modelo de Mazars	52
3.3	Modelos constitutivos adaptados para o concreto contendo agregado reciclado	54
4.0	Modelo constitutivo para o concreto contendo agregado reciclado	58
4.1	Considerações iniciais	58
4.2	Adaptação dos parâmetros A e B ao concreto contendo agregado reciclado	59
4.2.1	Obtenção de curvas experimentais	61
4.2.2	Cálculo das constantes experimentais E , ν e ε_0	64
4.2.3	Identificação paramétrica das curvas experimentais	65
4.2.4	Seleção dos resultados por critérios estatísticos	66
4.2.5	Obtenção das funções para as curvas A x TSA e B x TSA	67
4.2.6	Substituição dos parâmetros do modelo original de mazars pelas funções obtidas	68
5.0	Apresentação e análise dos resultados	69
5.1	Identificação paramétrica e aplicação dos critérios de seleção de amostras	69
5.2	Obtenção das funções para os parâmetros A_c e B_c	77
5.3	Comparação entre o modelo de Mazars adaptado e curvas experimentais	81
5.4	Aplicação numérica do modelo de Mazars adaptado	85
5.4.1	Estudo de caso: Simulação do ensaio de resistência à tração na flexão segundo NBR 12142 (ABNT, 1994)	85
6.0	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	89
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	91

Apêndice A – Curvas experimentais e Gráficos de ajustes por mínimos quadrados	93
Apêndice B – Entrada de dados para o software TNO-DIANA	105
B.1 Estudo de caso	105
Referências	109

Lista de Figuras

1	Padrão de falha de corpos de prova de concreto contendo agregado reciclado, Xiao (2005)	29
2	Curvas tensão-deformação para os concretos reciclados, Xiao (2005)	30
3	Diagrama tensão-deformação idealizado NBR 6118 (ABNT, 2007)	45
4	Diagrama tensão-deformação bilinear na tração NBR 6118 (ABNT, 2007)	47
5	Influência do parâmetro ε_{d0} Álvares (1993)	53
6	Influência do parâmetro A_T Álvares (1993)	53
7	Influência do parâmetro B_T Álvares (1993)	54
8	Influência do parâmetro B_C Álvares (1993)	54
9	Influência dos parâmetros A_C e B_C Álvares (1993)	54
10	Síntese da metodologia do trabalho	61
11	Composição gravimétrica do agregado reciclado utilizado, Leite (2009)	62
12	Curvas tensão-deformação para relação a/c de 0,45, Leite (2009)	63
13	Obtenção das funções A_c x TSA e B_c x TSA	67
14	Ajuste do traço 50% AGR 0,45 CP1	72
15	Comparação entre os intervalos de valores para o parâmetro A_c	74
16	Comparação entre os intervalos de valores para o parâmetro B_c	74
17	Comportamento dos parâmetros A_c e B_c para os fatores água/cimento de 0,45 e 0,80	81
18	Validação do modelo para (a) 0% (referência) e (b) 50% AMR, ambos com fator água/cimento de 0,45	82
19	Validação do modelo para (a) 100% AMR e (b) 50% AGR, ambos com fator água/cimento de 0,45	82

20	Validação do modelo para (a) 100% AGR 0,45 e (b) 0% (referência) fator água/cimento de 0,80	83
21	Validação do modelo para (a) 50% AMR e (b) 100% AMR, ambos com fator água/cimento de 0,80	83
22	Validação do modelo para (a) 50% AGR e (b) 100% AGR, ambos com fator água/cimento de 0,80	83
23	Geometria do ensaio de resistência à tração na flexão (dimensões em centímetros)	86
24	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 0% e fator a/c igual a 0,45	93
25	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e fator a/c igual a 0,45	94
26	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AMR e fator a/c igual a 0,45	95
27	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AGR e fator a/c igual a 0,45	96
28	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AGR e fator a/c igual a 0,45	97
29	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e 50% AGR e fator a/c igual a 0,45	98
30	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 0% e fator a/c igual a 0,80	99
31	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e fator a/c igual a 0,80	100
32	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AMR e fator a/c igual a 0,80	101
33	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AGR e fator a/c igual a 0,80	102

34	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AGR e fator a/c igual a 0,80	103
35	Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e 50% AGR e fator a/c igual a 0,80	104

Lista de Tabelas

1	Composição do RCD de diversas cidades brasileiras (CABRAL, 2007)	24
2	Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação, NBR 15116 (ABNT, 2004) - modificada	26
3	Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação, NBR 15116 (ABNT, 2004) - modificada	27
4	Classes dos agregados reciclados, E 471 (2006) - modificada	31
5	Classes de resistência e classes de exposição ambiental permitidas, E 471 (2006)	32
6	Teores máximos de agregados reciclados em relação ao volume total de agregados, DAfStB (1998)	35
7	Disposições para o uso do concreto contendo agregado reciclado, RILEM (1994)	38
8	Fatores para a adequação das propriedades mecânicas do concreto contendo agregado reciclado, RILEM (1994)	39
9	Restrições ao uso estrutural do concreto contendo agregado reciclado, segundo Gonçalves (2007)	41
10	Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio, NBR 5739 (ABNT,2007) alterada	62
11	Resultados obtidos por Leite (2009) para f_c , E_c e ν	69
12	Resultados obtidos por Leite (2009) para ε_{d0_t} e cálculo de ε_0	70
13	Identificação paramétrica para misturas com fator água/cimento de 0,45	71
14	Identificação paramétrica para misturas com fator água/cimento de 0,80	72

15	Valores médios e respectivos desvios padrão para as misturas	76
16	Amostras selecionadas com fator água/cimento de 0,45	77
17	Amostras selecionadas com fator água/cimento de 0,80	78
18	Novos valores médios para as misturas de concreto contendo agregado reciclado	78
19	Parâmetros utilizados no modelo numérico	86
20	Valores adotados para as energias de fratura (G_f)	87
21	Resultados da modelagem numérica	88

1 Introdução

1.1 Motivação para o uso do agregado reciclado de resíduos de construção e demolição

No mundo contemporâneo, diversos aspectos apresentam tendência progressiva de expansão. As estatísticas de crescimento da população, o avanço territorial das cidades sobre as zonas rurais, além dos consequentes crescimentos industrial e habitacional, permitem a observação deste fato.

O censo populacional do Brasil em 2010 comprova tal tendência, relatando um aumento na população em quase 21 milhões de pessoas (cerca de 12,3%) em relação ao início da última década. Na mesma direção, outro dado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) evidencia a migração da população brasileira para áreas urbanas, constatando o aumento de 3% da população urbanizada no período compreendido entre os anos 2000 e 2010 (IBGE, 2010).

Neste contexto, é observado um proporcional crescimento das atividades ligadas à indústria da construção civil (ICC), uma vez que esta constitui um meio para atender as necessidades relativas a infraestrutura e bem estar social de setores em desenvolvimento. A cadeia produtiva da ICC tem, inerente aos seus processos a utilização de recursos naturais como matéria-prima e a geração de resíduos originados nas atividades de construção e demolição. Sendo assim, observa-se também o aumento do consumo de recursos naturais não-renováveis, assim como a maior geração de resíduos sólidos dentro dos centros urbanos (JOHN, 2000). Nas últimas décadas, constatou-se um esforço crescente pelo desenvolvimento de novos insumos para utilização na construção civil, fato motivado pela necessidade de minimização do impacto ambiental provocado por seus processos de produção.

Com o notável aquecimento da ICC e de setores afins, a legislação federal implementou instrumentos que auxiliam o tratamento organizado e racional dos resíduos sólidos. A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece, desde julho de 2002, os procedimentos necessários para a gestão de resíduos da construção civil, especificamente. Esta resolução, entre outras determinações, atribui aos geradores a inteira responsabilidade pelo gerenciamento adequado dos resíduos de seus processos produtivos, conforme exposto a seguir:

Art. 4º: Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

Com o objetivo de fornecer diretrizes para o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos de forma mais abrangente (exceto rejeitos radioativos), a Lei Nº 12.305 foi sancionada em 2 de agosto de 2010, colocando em prática a Política Nacional de Resíduos Sólidos e corresponsabilizando o poder público, o setor empresarial e demais setores envolvidos pelo seu cumprimento (BRASIL, 2010).

Um dos caminhos que norteia a racionalização da ICC frente às questões ambientais é a reutilização dos seus resíduos como matéria-prima em seu processo produtivo. O reuso de sobras de elementos metálicos para a produção de novas barras e perfis de aço, o reaproveitamento da camada betuminosa de uma pavimentação flexível, assim como a reutilização de resíduos de construção e demolição (RCD) na fabricação de concretos e argamassas, são exemplos do suprimento desta atual necessidade.

Os grandes eventos esportivos previstos para o Brasil nesta década, a Copa do Mundo da *Fédération Internationale de Football Association* (FIFA) em 2014 e os Jogos Olímpicos em 2016, recebem incentivos à implantação de soluções sustentáveis em seus projetos de engenharia, fundamentados na legislação brasileira e em certificadores internacionais. As empresas responsáveis pelas construções das arenas esportivas para a copa do mundo de futebol de 2014 estão buscando a certificação internacional *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), concedida pela organização não governamental *Green Building Council* (GBC), afim de aten-

der às aspirações mundiais por construções sustentáveis. A Arena Fonte Nova em Salvador-BA, por exemplo, está reaproveitando mais de 92% dos resíduos gerados a partir da implosão do antigo estádio, e tem como meta o cumprimento dos 110 itens necessários para a obtenção do selo verde, destes, 45 itens já tinham sido atendidos em fevereiro de 2012 (CIDADES E ..., 2012).

As motivações à utilização do RCD, portanto, surgem por várias vertentes, tais como consciência ambiental, obrigatoriedade legal, marketing, etc. Contudo, a principal delas deve ser a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável, sobretudo através da prática da sustentabilidade ambiental, motivação suficiente para a condução deste novo paradigma.

1.2 Desafios e hipóteses da pesquisa

Os estudos teóricos que objetivam a generalização de modelos constitutivos para concretos produzidos com agregados reciclados encontram obstáculos intrínsecos a este material. A variabilidade na composição física e gravimétrica deste agregado aliada à escassez de dados experimentais para as propriedades mecânicas de concretos reciclados são fatores que dificultam a inter-relação entre os resultados das pesquisas existentes, o que impossibilita uma validação abrangente de modelos analíticos.

Dessa forma, o problema identificado neste contexto está na ausência de uma metodologia que absorva as alterações do teor de substituição de agregados reciclados e as insiram em um modelo analítico a fim de generalizá-lo, proporcionando a adaptação deste modelo às características físicas do agregado reciclado de interesse.

Considera-se como hipótese inicial, portanto, que as propriedades mecânicas dos concretos refletirão a diversidade da composição gravimétrica dos agregados reciclados assim como o teor de substituição dos agregados naturais. A partir deste pressuposto, infere-se que seja possível tornar os parâmetros de ajuste de um modelo analítico sensíveis à variabilidade do agregado reciclado e capazes de ajustar as curvas de comportamento analítico às curvas experimentais.

1.3 Objetivos e relevância do estudo

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico do concreto contendo diferentes teores de resíduos de construção e demolição utilizando um modelo de dano isotrópico.

Como objetivos específicos tem-se:

1. Verificar a capacidade de descrição do comportamento mecânico do concreto contendo agregados reciclados por modelos constitutivos propostos para o concreto convencional;
2. Desenvolver um modelo constitutivo de compressão para o concreto contendo agregados reciclados a partir da adaptação de um modelo de dano isotrópico;
3. Avaliar do modelo constitutivo desenvolvido, por meio da comparação entre resultados analíticos e experimentais;
4. Aplicar o modelo desenvolvido em estudo de caso experimental, através de simulação numérica.

As pesquisas que envolvem a reutilização de resíduos propiciam avanços nos campos tecnológico e ambiental. Do ponto de vista ambiental, este trabalho contribui para o aumento das possibilidades de utilização do RCD. Tendo em vista que o concreto é o material construtivo mais consumido no mundo, com consumo estimado em cerca de 11 bilhões de toneladas por ano (PEDROSO, 2009), a produção de concretos contendo agregados reciclados reduzirá sensivelmente a destinação imprópria destes resíduos, além de possibilitar a reinserção destes na cadeia produtiva da construção civil, o que cria um ciclo autossustentável para esta indústria.

Em termos tecnológicos, sobretudo na engenharia estrutural, esta pesquisa aproxima os estudos experimentais sobre o concreto contendo agregado reciclado à efetiva aplicação deste material para a produção de elementos construtivos estruturais. A importância tecnológica deste trabalho está em propor um modelo constitutivo para o concreto capaz de representar tanto o concreto convencional quanto as alterações

que ocorrem em seu comportamento mecânico à medida em que se substituem na sua composição agregados naturais por reciclados. Tão importante quanto o modelo constitutivo proposto, a metodologia apresentada a seguir possibilita a generalização do modelo, uma vez que permite a avaliação mecânica de concretos com agregados reciclados de qualquer composição gravimétrica, e portanto de propriedades físicas variáveis, desde que sejam atendidos os requisitos experimentais necessários.

1.4 Metodologia e escopo do trabalho

Este trabalho é um estudo teórico, de caráter exploratório, baseado na manipulação de modelos analíticos e simulações numéricas de testes experimentais. O desenvolvimento da pesquisa foi realizado no Laboratório de Métodos Computacionais e Experimentais (LAMCE), pertencente ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica objetivando o aprofundamento no estudo experimental do comportamento mecânico de concretos convencionais e reciclados bem como o conhecimento dos modelos analíticos existentes para sua descrição. Posteriormente, avaliou-se a metodologia apropriada para alcançar os objetivos propostos, validando-a por meio de simulações numéricas de estudos de casos experimentais.

Esta dissertação foi organizada em seis capítulos, conforme mostrado a seguir.

O Capítulo 1 apresenta o tema estudado e faz breve consideração sobre a motivação para a utilização de concretos contendo agregados reciclados e sobre o atual estado de aplicabilidade deste material no Brasil. Neste capítulo ainda são citadas, brevemente, pesquisas que contextualizam os esforços para a utilização deste tipo de concreto para fins estruturais, além da apresentação dos objetivos e da relevância do estudo.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a utilização do RCD em concreto. Inicialmente mostra-se a classificação do resíduo de construção e demolição segundo pesquisas e normas para dimensionamento, assim como aspectos relativos

à sua composição física e sua influência no comportamento do concreto fresco e endurecido. Posteriormente são demonstradas suas principais propriedades mecânicas quando utilizados como agregados em concreto. Finalmente, normas internacionais de dimensionamento de concreto estrutural serão analisadas a fim de comparar os critérios adotados por estas para a permissão do uso estrutural do concreto contendo agregado reciclado.

O Capítulo 3 traz, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre os principais modelos analíticos para a descrição do comportamento mecânico do concreto. São apresentadas leis constitutivas para o concreto, inclusive a lei baseada na Mecânica do Dano Contínuo (MDC), utilizando o modelo isotrópico de Mazars, além de modelos simplificados do comportamento mecânico utilizados no dimensionamento estrutural. O capítulo é encerrado com uma revisão sobre os estudos mais recentes relacionados a modelos constitutivos adaptados para o concreto contendo agregado reciclado.

O Capítulo 4 demonstra a metodologia proposta neste trabalho para a adaptação do modelo isotrópico de Mazars para a aplicação em concretos reciclados. São abordados aspectos sobre a qualidade dos ensaios experimentais para obtenção das curvas tensão-deformação do concreto contendo agregado reciclado, critérios estatísticos para a seleção dos resultados, identificação paramétrica e adaptação do modelo analítico escolhido.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos neste trabalho. Um procedimento para avaliação da qualidade dos resultados é apresentado e a eficácia da metodologia é discutida. Por meio de simulações numéricas de testes experimentais com concreto contendo agregado reciclado, um estudo de caso é realizado para comprovar a eficiência do modelo em representar situações reais.

O Capítulo 6 tece considerações finais sobre a pesquisa realizada, sugerindo as próximas etapas a serem alcançadas para a continuidade desta linha de pesquisa.

2 Considerações sobre a utilização do agregado reciclado de RCD em concreto

O presente capítulo discorre sobre o atual estado da utilização dos agregados reciclados de RCD em concreto. A viabilidade técnica da utilização do concreto contendo agregado reciclado é discutida baseada em resultados de testes experimentais e recomendações normativas. São abordados a potencialidade da utilização deste agregado em concretos sem finalidade estrutural assim como os caminhos científicos buscados para a aplicação do RCD em concretos estruturais.

2.1 Breve panorama dos estudos científicos atuais

A popularização da utilização de agregados reciclados em projetos civis usuais, como obras habitacionais ou comerciais de pequeno e médio porte, depende da regulamentação de procedimentos padrões e seguros através de normas técnicas. Atualmente, o reaproveitamento do RCD como agregado reciclado é permitido pelas normas brasileiras para obras de pavimentação e em concretos sem função estrutural, conforme as diretrizes das normas NBR 15115 - *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos* (ABNT, 2004) e NBR 15116 - *Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos* (ABNT, 2004).

No âmbito estrutural, a norma brasileira para dimensionamento de estruturas de concreto armado e protendido, NBR 6118 (ABNT, 2007), não contempla o uso de agregados reciclados em seu escopo, o que inviabiliza a aplicação estrutural deste

resíduo com amparo técnico. As prescrições dos códigos internacionais para a utilização de agregados deste tipo ainda são bastante restritivas. De maneira geral, as normas internacionais apresentam-se conservadoras em relação aos percentuais de substituição de agregados, ao uso do agregado reciclado miúdo e à classe de resistência mecânica máxima em que a utilização é permitida.

Tal conservadorismo parte do consenso de que a utilização de concreto contendo RCD reduz a capacidade de carga dos elementos construídos com esses materiais. Contudo, estudos experimentais estão sendo desenvolvidos com objetivo de obter a exata noção desta redução e de seu mecanismo. Diversas pesquisas desenvolvidas na última década revelam a variabilidade dos resultados obtidos para o comportamento mecânico do concreto contendo agregado reciclado, assim, justificando a continuidade dos estudos neste campo científico.

Leite (2001) avaliou a possibilidade de utilização de resíduos gerados pela construção civil como substitutos de agregados naturais para a produção de concretos. Foi observada a necessidade de ampliar o conhecimento sobre o comportamento do RCD na produção de novos concretos, uma vez que não existia uma metodologia padronizada nos estudos realizados, resultando na variabilidade dos seus resultados. Segundo Leite (2001), a aplicação do RCD como subproduto da construção civil estaria então condicionada à anulação das incertezas do seu comportamento quando incorporado na produção de novos materiais, assim como à adaptação das técnicas de manuseio deste resíduo. No aspecto mecânico, a autora identificou grande influência da porosidade do agregado reciclado e da zona de transição na resistência à compressão dos concretos contendo RCD, enquanto que na resistência à tração direta, constatou a tendência de redução dos valores da resistência do concreto contendo agregado reciclado com o aumento da relação água/cimento (a/c).

Maruyama et al. (2004) investigaram as propriedades flexionais de vigas de concreto contendo agregado reciclado reforçadas por barras de aço. Observou-se no concreto contendo agregado reciclado a redução dos valores de resistência à compressão axial, de resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasti-

cidade quando comparado a um concreto convencional de mesma relação a/c. No estudo experimental de vigas, Maruyama et al. (2004) constataram que o concreto contendo agregado reciclado apresentou fissuras mais largas que o concreto convencional, além disso, menores espaçamentos entre as fissuras, para o mesmo valor de tensão na viga.

Etxeberria et al. (2007) avaliou a influência da quantidade do agregado graúdo reciclado e do processo produtivo nas propriedades do concreto. Os resultados indicaram que o concreto feito com 100% de agregados reciclados graúdos perde de 20 a 25% de sua resistência à compressão axial, para um mesma relação a/c e mesma quantidade de cimento, em massa. Como consequência, é sugerido que a utilização do concreto com teor de 100% de substituição de agregados seja limitada a concretos de baixa e média resistências (de 20 a 45 MPa), uma vez que o alto consumo de cimento torna a produção de concretos com resistências elevadas economicamente inviável. Entre outras observações, Etxeberria (2007) concluiu que o concreto contendo agregado reciclado estudado tendo até 25% de substituição de agregados e com resistências à compressão entre 30 e 45 MPa apresenta as mesmas propriedades mecânicas que concretos convencionais com relação a/c e quantidade de cimento equivalentes.

Li (2009) estudou o comportamento mecânico de elementos estruturais feitos de concreto contendo agregado reciclado na China. Foram realizados testes experimentais para propriedades de flexão e cisalhamento de vigas, para o comportamento à compressão de pilares, performance das ligações viga-pilar a ações sísmicas, entre outros. Li (2009) notou, entre outros aspectos, a tendência do aumento da deflexão imediata de vigas com a substituição de agregados naturais por reciclados; quando utilizou teor de substituição de 100% constatou acréscimos nas deflexões na ordem de 10 a 24%.

Breccolotti e Materazzi (2010) realizaram uma análise quanto a segurança estrutural de seções excêntrica carregadas de colunas de concreto armado feito com agregados reciclados. Avaliou-se, através de investigação teórica e experimental, a in-

fluência da qualidade e quantidade de agregados reciclados na produção de concretos com diferentes teores de substituição de agregados. Breccolotti e Materazzi (2010) encontraram resultados estatísticos que indicaram dispersão muito maior para a resistência à compressão no concreto contendo agregado reciclado quando comparado ao concreto convencional. Os autores constataram que o concreto produzido com agregados reciclados, originados de resíduos de concreto de alta resistência, pode seguramente ser usado para fins estruturais, mesmo fazendo substituição total dos agregados.

Rao et al. (2011) avaliaram o comportamento do concreto contendo agregado reciclado sob carga de impacto. Foram analisadas acelerações, deformações, históricos das reações de apoio, além das características físicas e mecânicas dos agregados e concretos reciclados. Observou-se que a substituição de 25% de agregados naturais por reciclados não influenciou a resistência do concreto ao impacto. Além disso, para uma dada energia de impacto, foram encontradas maiores deformações para o concreto com teores de substituições de 50 e 100% quando comparados aos valores obtidos para o concreto convencional e reciclado com 25% de substituição.

González et al. (2012) analisaram a influência da substituição de 100% do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado no comportamento estrutural do concreto, quando este é submetido a testes com taxas de carregamento muito baixas. Neste estudo foram aplicadas taxas de cargas, tanto na compressão quanto na tração, cerca de 1000 vezes menores que os carregamentos padrões. Em linhas gerais, os resultados indicaram similaridade entre o concreto convencional e reciclado no que diz respeito à perda de resistência na compressão e na tração quando submetidos a baixas taxas de carregamento, às variações nos diagramas tensão-deformação longitudinal e tensão-deformação volumétrica.

Observa-se, portanto, que a introdução de agregados obtidos a partir do beneficiamento de RCD na composição do concreto altera suas propriedades dos estados fresco e endurecido, em geral negativamente, devido às suas características físicas peculiares. Pode-se atribuir esta influência a diferenças em aspectos como, a maior

heterogeneidade dos agregados reciclados e sua maior porosidade (LEITE, 2001).

2.2 A variabilidade do agregado reciclado

O agregado reciclado de RCD, diferente dos agregados naturais, apresenta composição de grande variabilidade. Esta composição recebe influências das características do seu local de origem, tais como: tipo de construção, técnicas construtivas, materiais utilizados, etapas em execução, etc., além de fatores externos às obras, associados, por exemplo, à região geográfica e época do ano em que foram gerados (LEITE, 2001; CABRAL, 2007).

O estudo comparativo sobre a composição gravimétrica dos RCD de diversas localidades brasileiras, realizado por Cabral (2007), utilizando dados de Pinto (1986) apud Cabral (2007), Zordan (1997) apud Cabral (2007), Brito Filho (1999) apud Cabral (2007), Quadros e Oliveira (2001) apud Cabral (2007), Nóbrega (2002) apud Cabral (2007), Vieira (2003) apud Cabral (2007) e Lovato (2007) apud Cabral (2007), permite constatar características comuns aos resíduos gerados em diferentes locais, apesar da composição variada. Os resultados obtidos por Cabral (2007) estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1: Composição do RCD de diversas cidades brasileiras (CABRAL, 2007)

Constituinte.	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
Argamassa	63,67%	25,20%	44,20%	37,40%	53%	28%	27,82%
Concreto	4,38%	8,20%	18,30%	21,10%		10%	18,65%
Material cerâmico	29,09%	29,6%	35,6%	20,8%	9,0%	34	48,15%
Cerâmica polida	0,39%	-	0,1%	2,5%	5,0%	1,0%	3,06%
Rochas, solos	0,13%	32%	1,8%	17,7%	27,0%	9%	-
Outros	2,34%	5,0%	-	0,5%	6,0%	18%	2,32%

- (a) - São Carlos/Pinto (1986) apud Cabral (2007),
 (b) - São Paulo/Brito Filho (1999) apud Cabral (2007),
 (c) - Porto Alegre/Lovato (2007) apud Cabral (2007),
 (d) - Ribeirão Preto/Zordan (1997) apud Cabral (2007),
 (e) - Salvador/Quadros e Oliveira (2001) apud Cabral (2007),
 (f) - Campina Grande/Nóbrega (2002) apud Cabral (2007),
 (g) - Maceió/Vieira (2003) apud Cabral (2007).

Em linhas gerais, estes resultados permitem observar que:

- Os insumos argamassa, concreto e material cerâmico apresentam-se em maior

quantidade na composição dos RCD em todas as cidades;

- De maneira geral, os resíduos provenientes de argamassas e os materiais cerâmicos apresentam maiores percentuais que o concreto, indicando a influência de maiores perdas na execução destes serviços;
- Existe grande variabilidade na composição dos resíduos, em relação à diversidade de componentes e seus diferentes percentuais.

A composição gravimétrica peculiar do agregado reciclado aliada aos procedimentos necessários à sua produção, resulta na variabilidade de suas características físicas, químicas e mecânicas.

Para o uso em concretos produzidos sob as recomendações da norma NBR 12655 (ABNT, 2006), atualmente, os agregados devem atender aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009), que especifica os limites aceitáveis para suas propriedades. As principais diferenças entre as propriedades físicas e mecânicas de concretos contendo agregados reciclados e naturais, apontadas por testes laboratoriais, estão relacionadas à alterações na massa específica, nas resistências à tração e compressão uniaxiais, módulo de elasticidade e energia de deformação.

Nas últimas décadas, as pesquisas sobre a utilização dos resíduos de construção e demolição como agregados para o concreto aumentaram significativamente. A vasta possibilidade de aplicação do concreto contendo agregado reciclado em substituição ao concreto convencional, conduz tais estudos tanto para o conhecimento do comportamento reológico desses compostos quanto para a análise de suas propriedades do estado endurecido.

2.3 Concreto contendo agregado reciclado para fins não-estruturais

A utilização não-estrutural do concreto contendo agregado reciclado está mundialmente difundida. Atualmente estão em vigência normas nacionais e internacionais que regulamentam seu uso, estabelecendo requisitos e procedimentos para o benefi-

ciamento e aplicação do agregado reciclado. Um procedimento comum aos códigos que normatizam o uso deste agregado em concretos é a sua classificação de acordo com a sua composição física.

No Brasil, por exemplo, a NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece requisitos para a utilização de agregados reciclados em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural classificando-os como resíduos Classe A, segundo a Resolução CONAMA 307. Posteriormente esta norma os separa em agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM). O primeiro refere-se ao agregado reciclado que tem em sua composição no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland ou rochas, o segundo refere-se à composição que não atende ao primeiro critério.

Para a utilização em obras de pavimentação, a NBR 15116 (ABNT, 2004) apresenta exigências mínimas para os agregados reciclados, conforme mostra a tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação, NBR 15116 (ABNT, 2004) - modificada

Propriedades	Agregado Reciclado
Composição granulométrica	Não uniforme e bem graduado $C_u > 10$
Dimensão máxima característica	$\leq 63mm$
Índice de forma	≤ 3
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	entre 10% e 40%

Além destes requisitos gerais, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2004), o agregado reciclado deve atender a parâmetros específicos para o emprego em camadas de pavimentação.

Estes parâmetros referem-se à capacidade de suporte, representado pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC), e expansibilidade, os quais estão apresentados na tabela 3.

Para a utilização em elementos construtivos sem função estrutural, a norma brasileira estabelece como requisitos gerais, para o agregado reciclado, que este seja

Tabela 3: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação, NBR 15116 (ABNT, 2004) - modificada

Aplicação	ISC(CBR)%	Expansibilidade %
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$
Material para execução de revest. primário de sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$
Material para execução de base de pavimento (nota 1)	≥ 60	$\leq 0,5$

1 - Permitido o uso para material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto

proveniente de material classe A e que seu uso não contrarie as determinações das normas pertinentes às aplicações específicas.

Como requisitos específicos, a NBR 15116 (ABNT, 2004) controla as seguintes propriedades dos agregados reciclados: Teor de fragmentos à base de cimento e rochas, absorção de água, contaminantes e teor de material passante na malha 75 μm . Está estabelecido, portanto, que o teor de fragmentos à base de cimento e rochas do ARC graúdo deve ser maior ou igual a 90 % e do ARM graúdo menor ou igual a 90 %. A norma apresenta limites de absorção de água inferiores ou iguais a 7 e 12 % para os ARC graúdos e miúdos, respectivamente, e inferiores ou iguais a 12 e 17 %, para os ARM graúdos e miúdos, respectivamente. No que diz respeito aos contaminantes, é exigido que o agregado apresente teor máximo de 3 % em relação à massa do agregado, sendo considerados contaminantes os cloretos, sulfatos, torrões de argila e materiais não minerais (madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos).

Atendendo as especificações citadas anteriormente, o agregado reciclado estará apto a ser aplicado em concretos sem função estrutural. Alguns trabalhos recentes mostram, experimentalmente, o comportamento deste concreto quando utilizado para a fabricação de elementos construtivos. Poon (2002) desenvolveram uma técnica para produção de tijolos de vedação e blocos pré-moldados para pavimentação utilizando concreto contendo agregado reciclado. Os resultados da pesquisa mostraram que para teores de substituição de agregados naturais por reciclados de 25

e 50 %, existiu uma influência pouco significativa na resistência à compressão nos corpos de prova dos elementos construtivos estudados. Entretanto, para altos teores de substituição, os elementos apresentaram grande redução da sua resistência à compressão. Como resultados positivos, consequentes do aumento do teor de substituição, os corpos de prova apresentaram aumento da resistência ao cisalhamento e comportamento satisfatório em relação aos valores de retração. Poon (2006) utilizou resíduos de tijolos cerâmicos triturados para a produção de blocos pré-moldados para pavimentação. Os resultados mostraram redução tanto na densidade dos blocos, quanto nas suas resistências à tração e compressão.

Vegas (2008) também incorporou RCD ao concreto para uso em pavimentação. Utilizando como referência a *Spanish General Technical Specifications for Road Construction* (PG3) para análise do agregado, o autor encontrou resultados que indicam a possibilidade de uso deste material para compor o subleito de rodovias, e principalmente, para a camada de sub-base.

Soutsos (2011) investigou o potencial de utilização do RCD como agregado na produção de uma gama de produtos pré-fabricados de concreto, mais especificamente nesta pesquisa, foram analisados blocos para pavimentação. Os resultados desse programa experimental indicaram que o agregado de RCD pode ser usado para esse fim, ressaltando a possibilidade do crescimento deste mercado incentivar as empresas especializadas em demolições para o beneficiamento deste resíduo.

2.4 Concreto contendo agregado reciclado para fins estruturais

Em se tratando da utilização estrutural de concretos contendo RCD, estudos científicos mostram que esta aplicação reduz a capacidade de carga dos elementos construtivos, uma vez que a substituição total ou parcial dos agregados naturais por reciclados interfere nas propriedades mecânicas do concreto e modifica o seu mecanismo de falha à medida que o teor de substituição aumenta.

Xiao (2005) investigaram experimentalmente as propriedades mecânicas do con-

creto contendo agregado reciclado quando submetido a carregamento uniaxial. Este trabalho teve como foco estudar o mecanismo de falha assim como a influência dos constituintes do agregado reciclado na resistência à compressão, no módulo de elasticidade e nas deformações de pico e última deste concreto. De forma geral, para concretos com teores de substituição de 30 %, 50 % e 100 %, os autores identificaram um modo de falha cortante nos corpos de prova ensaiados (figura 1), nos quais as inclinações dos planos de falha em relação ao plano de aplicação do carregamento (vertical) tem ângulos variando entre 63-79°, superiores ao intervalo encontrado para o concreto com agregados naturais (concreto de referência), 58-64°. A maior inclinação do plano de falha indica, portanto, uma menor resistência ao cisalhamento do concreto contendo agregado reciclado em relação ao concreto de referência.

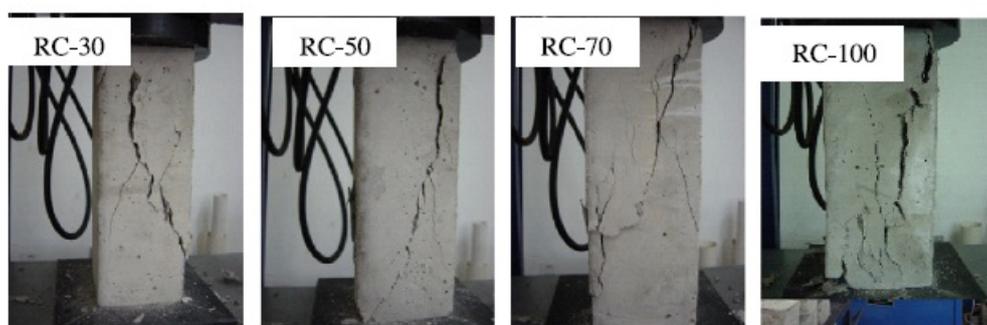


Figura 1: Padrão de falha de corpos de prova de concreto contendo agregado reciclado, Xiao (2005)

Com relação à curva tensão-deformação, os ensaios mostraram um comportamento similar para todos os percentuais de substituição. Observa-se, pela análise da figura 2, o aumento dos valores das deformações de pico com o aumento dos teores de substituição, à medida que ocorre tanto a diminuição da ductilidade do concreto, apresentado pela parte descendente da curva pós-pico, quanto a redução da tensão de compressão de pico.

Ainda pela observação da curva tensão-deformação, nota-se uma redução significativa do módulo de elasticidade do concreto com o aumento dos teores de substituição. Para o percentual de 100 % os resultados apontam para uma redução de 45% no valor desta propriedade.

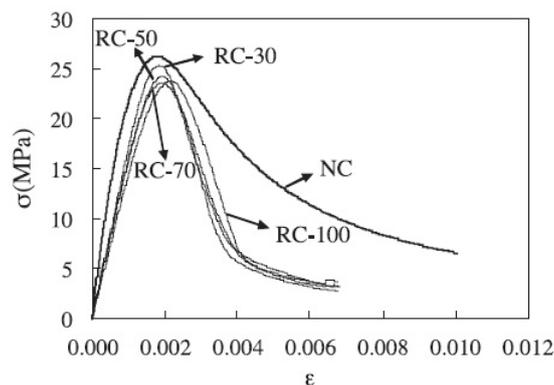


Figura 2: Curvas tensão-deformação para os concretos reciclados, Xiao (2005)

As normas internacionais de dimensionamento do concreto estrutural apresentam, em sua maioria, abordagens conservadoras sobre a utilização do RCD. Neste trabalho serão comparadas as recomendações de quatro normas internacionais que regulamentam o uso do concreto contendo agregado reciclado. A escolha destes códigos obedeceu a critérios como acesso às informações e abrangência dos limites de aplicação do concreto contendo agregado reciclado.

Baseado nesses critérios, serão abordadas a seguir as normas *E 471 (2006)* - *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*, *EHE (2008)* - *Instrucción de Hormigón Estructural*, *German committee for reinforced concrete (DAfStb)(1998)* - *Concrete with recycled aggregates* e *RILEM RECOMMENDATION - Specifications for concrete with aggregates recycled*.

2.4.1 E 471 (2006) - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos

A norma portuguesa E 471 (2006) permite apenas o uso dos agregados reciclados graúdos para a aplicação em concreto. Conforme exposto em seu item 4, estes agregados estão agrupados em três classes: ARB1, ARB2 e ARC. As classes ARB1 e ARB2 tem constituição predominante de resíduos de concreto, misturados ou não com agregados naturais. A classe ARC não define percentuais relativos de cada componente e pode ser composta por resíduos de concreto, agregados naturais e elementos de alvenaria. Destas classes, apenas a ARC não é recomendada para a aplicação em concreto estrutural. Na tabela 4 são apresentadas as proporções dos

constituintes de cada classe de agregado.

Tabela 4: Classes dos agregados reciclados, E 471 (2006) - modificada

Classe	Rc (%)	Rc + Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)
ARB1	≥ 90	≥ 90	≤ 10	≤ 5
ARB2	≥ 70	≥ 70	≤ 30	≤ 5
ARC (nota 1)	≥ 90	≥ 90	≥ 90	≤ 10

1 - Material com massa específica inferior a 1000 kg/m³. No caso das partículas leves serem constituintes minerais não prejudiciais para o concreto nem para o acabamento superficial, aceita-se a categoria FLtotal 3.

Rc - Concreto, produtos de concreto e argamassas

Ru - Agregados, pedras naturais e agregados tratados com ligantes hidráulicos

Ra - Materiais betuminosos

Rb - Elementos de alvenaria de materiais argilosos, elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e concreto celular não flutuante

O item 5 desta norma apresenta os requisitos mínimos exigidos para a utilização do RCD para a fabricação de concreto contendo agregado reciclado. Com relação a parâmetros físicos e químicos, recomenda-se que os agregados reciclados estejam em conformidade com os requisitos da norma portuguesa NP EN 12620 - Agregados para betão. No que diz respeito aos parâmetros mecânicos, a norma E 471 (2006) apresenta no item número 6 (Regras de aplicação), recomendações para o uso dos agregados dos tipos ARB1 e ARB2 na fabricação de concreto contendo agregado reciclado simples ou armado. Para aplicação em concreto armado, está determinado o limite máximo de substituição de agregados naturais por reciclados de 20 e 25%, para agregados das classes ARB2 e ARB1, respectivamente. Para concretos simples, de enchimento ou de regularização, não há limite máximo de substituição de agregados, desde que sejam aplicados em ambientes não-agressivos.

Como forma de sintetizar as informações, a norma apresenta uma relação entre a classe do agregado reciclado, o limite máximo de resistência à compressão e o limite máximo de substituição de agregados, conforme mostra a tabela 5. Observa-se que a resistência à compressão dos concretos reciclados, permitida pela norma portuguesa, pode variar de 35 à 50 MPa. Este intervalo de resistência pode ser considerado bastante abrangente, certamente contemplando grande parte dos projetos estruturais de obras convencionais. Contudo, a norma E 471 (2006) não apresenta uma funda-

mentação teórica explícita ou referência a outras normas que permitam a análise dos critérios adotados, tratando o concreto contendo agregado reciclado como concreto convencional.

Tabela 5: Classes de resistência e classes de exposição ambiental permitidas, E 471 (2006)

Classe do agregado	Classe de resistência	Porcentagem de incorporação	Classe de exposição ambiental
ARB1	C 40/50	25%	X0, XC1, XC2, XC3,
ARB2	C 35/45	20%	XC4, XS1, XA1 (nota 1)

1 - Classes de exposição ambiental conforme definidas na norma NP EN 206-1.

2.4.2 EHE/2008 - Instrucción de Hormigón Estructural

Em seu anexo 15, a norma espanhola EHE-08 apresenta recomendações para a utilização de concretos reciclados. No primeiro parágrafo deste anexo, o concreto contendo agregado reciclado é definido como sendo composto por agregados reciclados graúdos procedentes de resíduos de concreto. Para fins estruturais é recomendada a substituição de até 20% em massa de agregados naturais por reciclados. Além disso, a resistência característica do concreto deve ser menor que 40 MPa, não sendo permitido o emprego deste concreto em estruturas protendidas.

Os requisitos físicos para os agregados reciclados são apresentados de forma detalhada pela norma. Dentre outros, destacam-se as limitações para o tamanho mínimo do agregado reciclado, 4 mm, e o teor máximo de absorção de água, 7%. Para o agregado natural, a norma restringe o teor de absorção de água em 4,5%.

Com relação aos requisitos mecânicos, o anexo 15 apresenta recomendações relativas às propriedades dos materiais e critérios de dimensionamento para os estados limites últimos e de serviço.

Primeiramente, a norma espanhola separa o concreto contendo agregado reciclado em dois tipos, HRM (concreto contendo agregado reciclado simples) e HRA (concreto contendo agregado reciclado armado). Respeitando-se o limite de 20%

no teor de substituição dos agregados, a EHE-08 permite a utilização dos modelos analíticos do concreto produzido com agregado natural, assumindo que representa uma aproximação satisfatória para o comportamento do concreto contendo agregado reciclado. Podem ser utilizados modelos baseados em diagramas teóricos, como o parábola-retângulo.

Para teores acima do limite estabelecido a norma recomenda a realização de estudos específicos, apontando para alterações em alguns aspectos do diagrama tensão-deformação do concreto contendo agregado reciclado:

- Ocorrerá o aumento da deformação de pico com o aumento do teor de substituição de agregados, devido à maior deformabilidade dos agregados reciclados.
- Poderão ser observadas maiores perdas de resistências mecânicas em comparação ao concreto convencional.

O módulo de elasticidade do concreto contendo agregado reciclado, obedecendo os limites tratados anteriormente, pode ser calculado utilizando a mesma formulação utilizada para o cálculo desta propriedade para o concreto convencional. Este método de cálculo está exposto no item 39.6 na norma espanhola e será mostrado a seguir.

O módulo de elasticidade secante E_{cm} aos 28 dias, obtido pela curva σ x ε real será:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2.1)$$

A norma permite aplicar a equação 2.1 sempre que as tensões, em estado de serviço, não ultrapassem o valor de $0,40f_{cm}$, sendo f_{cm} a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias.

Para cargas instantâneas ou variáveis, o módulo de elasticidade inicial do concreto aos 28 dias, pode ser aproximado pela equação 2.2:

$$E_c = \beta_E \cdot E_{cm} \quad (2.2)$$

onde,

$$\beta_E = 1,30 - \frac{f_{ck}}{400} \leq 1,175 \quad (2.3)$$

Os dimensionamentos relativos aos estados limites últimos e de serviço podem seguir os mesmos critérios adotados para o concreto convencional, desde que o limite de 20% de substituição de agregados não seja ultrapassado.

Analisando a abordagem da norma EHE-08 sobre a utilização do concreto contendo agregado reciclado, observa-se um tratamento conservador no que diz respeito ao teor máximo de substituição de agregados assim como para o tipo de agregado reciclado que pode ser empregado. As restrições impostas ao agregado reciclado asseguram que o comportamento mecânico deste concreto esteja próximo do comportamento do concreto convencional, ratificando o caráter conservador desta norma.

2.4.3 German committee for reinforced concrete (DAfStb) - Concrete with recycled aggregates

A norma alemã que regulamenta o uso de agregados reciclados em concretos, *Concrete with recycled aggregates*, foi elaborada em 1998 pelo comitê alemão de cálculo estrutural (DAfStb), como código complementar à norma DIN 1045 (Concrete and Reinforced Concrete; Design and Execution). Esta norma trata especificamente da aplicação de agregados reciclados em concreto, apresentando os requisitos para a sua produção e limitações para o campo de aplicação.

Segundo Gonçalves (2007), a norma alemã restringe, de maneira geral, a utilização de concretos reciclados a classes inferiores a C30/37. Em condições ambientais pouco agressivas e para classes baixas de resistência, admite-se a substituição de agregados naturais por até 35% de agregados reciclados. Para elementos estruturais que tenham contato com o exterior da edificação, esta norma limita a utilização de agregados reciclados a agregados que tenham as origens conhecidas.

Os teores máximos de agregados reciclados em relação ao volume total de agregados, assim como o tipo de agregado permitido são apresentados pela norma alemã através da tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Teores máximos de agregados reciclados em relação ao volume total de agregados, DAfStB (1998)

Aplicação	Agregados graúdo e miúdo de concreto D > 2mm (%)	Agregado miúdo de concreto D < 2mm (%)
Elem. interiores < C25/30	35	10
Elem. interiores C30/37	25	0
Elem. exteriores	0	0
Concreto impermeável	20	0
Concreto resistente a ciclos gelo-degelo	20	0
Concreto resistente a ataques químicos	20	0

De acordo com Gröbl e Rühl (1998), além dos parâmetros mecânicos e situações de aplicação para o concreto, a norma alemã recomenda atentar para a taxa de absorção de água dos agregados reciclados. Está estabelecido que deve haver a compensação da taxa de absorção promovendo o contato do agregado reciclado com água durante 10 minutos. Tal medida é justificada pois, neste tempo, o agregado absorve cerca de 90% do total de água que seria absorvida pelo agregado em 24 horas.

Elementos estruturais feitos com concreto contendo agregado reciclado, podem ser dimensionados com os mesmos valores característicos dos elementos dimensionados com concreto convencional. Abre-se este precedente, uma vez que é permitido pela norma alemã, apenas o uso do agregado reciclado, para fim estrutural, em mistura com agregados naturais.

O dimensionamento de elementos estruturais de concreto contendo agregado reciclado utilizando os critérios de estruturas de concreto convencional obedecem às determinações da norma alemã DIN 1045-1 (*Concrete and Reinforced Concrete; Design and Execution*). Sendo assim, o comportamento mecânico do concreto contendo agregado reciclado é aproximado por um diagrama parábola-retângulo.

Para a consideração do módulo de elasticidade do concreto contendo agregado reciclado, a norma alemã também permite a utilização da formulação proposta para o concreto convencional, desde que sejam asseguradas as condições definidas anteri-

ormente para o tipo e aplicação do agregado reciclado. A equação 2.4, mostrada a seguir, é apresentada na norma DIN 1045-1 para o cálculo do módulo de elasticidade secante aos 28 dias.

$$E_{cm} = 9500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2.4)$$

onde,

f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias.

As limitações impostas pelo código alemão para o uso do concreto contendo agregado reciclado estrutural, permite considerá-lo conservador. Pode-se vislumbrar este caráter, quando se restringe o tipo de agregado reciclado à resíduos predominantemente de concreto, em uma tentativa de aproximar o comportamento mecânico do concreto contendo agregado reciclado ao comportamento do concreto convencional. Um tratamento menos conservador, seria estabelecer coeficientes de correção aos modelos de comportamento mecânico possibilitando o uso mais abrangente de agregados reciclados.

2.4.4 RILEM RECOMMENDATION 121 - DRG - Specifications for concrete with recycled aggregates (1994)

As especificações para o concreto contendo agregados reciclados preparadas pelo comitê técnico 121 - DRG do RILEM, foram apresentadas no 3º Simpósio Internacional sobre Demolição e Reutilização de Concreto e Alvenaria, tomando status de Recomendação RILEM após algumas alterações.

A Recomendação RILEM lida com agregados reciclados com diâmetros maiores que 4mm para o uso em concreto. Esta especificação pressupõe que a fração de agregados finos do concreto (< 4mm) pode ser composta por agregados naturais. Assim como as demais normas citadas, esta recomendação classifica o agregado reciclado em diferentes categorias e indica seu campo de aplicação a partir de critérios de aceitação relativos às classes de exposição ambiental e classes de resistência, de acordo com a norma Eurocode 2 (*Design of concrete Structures*).

Como classificação, a recomendação RILEM apresenta três categorias:

Tipo I - são agregados em que se entende implicitamente como originados majoritariamente de resíduos de alvenaria

Tipo II - são agregados em que se entende implicitamente como originados majoritariamente de resíduos de concreto

Tipo III - são agregados originados de uma mistura entre agregados reciclados e agregados naturais

A RILEM ainda especifica critérios adicionais para a classificação do agregado reciclado do Tipo III:

- Deve ter no mínimo 80% de agregados naturais
- Deve conter no máximo 10% de agregado Tipo I

O campo de aplicação para os agregados reciclados, que estão de acordo com esta classificação, é apresentado no item 3 da recomendação Rilem. Permite-se a utilização destes agregados em concretos simples e reforçados, desde que sejam satisfeitas as condições apresentadas na tabela 7, mostrada a seguir.

Ainda no seu item 3, a recomendação RILEM alerta que para concretos com agregados reciclados submetidos às classes de exposição 2, 3 e 4, deve-se atentar para os aspectos de durabilidade do concreto reforçado. Tal cuidado é justificado pela possível maior velocidade de carbonatação e de penetração de cloretos que ocorrem nos concretos reciclados quando comparados a concretos convencionais.

Quanto aos valores para dimensionamento, recomenda-se a utilização dos mesmos princípios e regras de aplicação prescritas na norma Eurocode 2 (*Design of Concrete Structures*) para o concreto convencional, devendo-se levar em conta, entretanto, a possível influência da densidade dos agregados na resistência e deformação do concreto.

Na ausência de dados experimentais mais precisos, a RILEM apresenta fatores para a adequação das propriedades do concreto contendo agregado reciclado a partir dos valores indicados na Eurocode 2 para o dimensionamento do concreto convenci-

Tabela 7: Disposições para o uso do concreto contendo agregado reciclado, RILEM (1994)

Agregados reciclados	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Classe de resistência máxima	C16/20 (nota 1)	C50/60	sem limites
Testes adicionais quando usados na classe de exposição 1 (nota 2)	nenhum	nenhum	nenhum
Testes adicionais quando usados na classe de exposição 2a e 4a	Ensaio de expansão ARS (nota 3). Não é permitida na classe 4a	Ensaio de expansão ARS	Ensaio de expansão ARS
Testes adicionais quando usados na classe de exposição 2b e 4b	não é permitida a utilização	Ensaio de expansão ARS; ensaio de expansão gelo-degelo	Ensaio de expansão ARS; ensaio de expansão gelo-degelo
Testes adicionais quando usados na classe de exposição 3	não é permitida a utilização	Ensaio de expansão ARS; ensaio de expansão gelo-degelo; ensaios com sais descongelantes	Ensaio de expansão ARS; ensaio de expansão gelo-degelo; ensaios com sais descongelantes

1 - se a massa específica dos agregados saturados com superfície seca for superior a 2000 kg/m^3 , pode-se alterar a classe de resistência para C30/37

2 - conforme ENV 206

3 - reação álcalis-sílica

onal, conforme mostra a tabela 8.

Das normas discutidas neste trabalho, a recomendação RILEM é a que apresenta critérios menos restritivos para a utilização de agregados reciclados em concreto. O primeiro aspecto a ser observado está na possibilidade de aplicação de agregados de todas as categorias classificadas em sua seção 2, obedecendo seus requisitos e limitações específicas. Restringe-se, entretanto, a dimensão mínima do grão (4mm), uma vez que esta característica interfere significativamente em propriedades físicas e mecânicas do concreto. O item 5 da RILEM justifica esta restrição através de cinco razões mostradas a seguir:

- Materiais reciclados finos muitas vezes contém grande quantidade de contaminantes.
- O conhecimento sobre o impacto dos agregados reciclados finos na durabilidade

Tabela 8: Fatores para a adequação das propriedades mecânicas do concreto contendo agregado reciclado, RILEM (1994)

Valores para dimen- sionamento	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Resistência à tração (f_{ctm})	1	1	1
Módulo de elasticidade (E_{cm})	0,65	0,8	1
Coefficiente de fluência	1	1	1
Retração	2	1,5	1

e resistência dos concretos reciclados ainda é incipiente.

- Ainda não está disponível para utilização um método para ensaios de resistência para agregados reciclados finos
- Ainda não está disponível para utilização um método confiável para a determinação da reatividade álcali residual dos agregados reciclados finos.
- Tem sido relatado problemas na produção de concretos reciclados, relativos ao controle da água livre e consistência do material, com o uso de agregados finos.

A RILEM fundamenta seus modelos de comportamento mecânico na norma Eurocode 2. O aspecto diferencial, em relação às demais normas, está na atribuição de fatores de correção para as propriedades mecânicas dependendo do tipo de agregado reciclado utilizado.

Estas medidas permitem à recomendação RILEM adotar limites menos conservadores para as propriedades do concreto contendo agregado reciclado, a exemplo de uma resistência mecânica ilimitada, dependendo o tipo de agregado, o uso de resíduos de diversas origens e elevados teores de substituição.

De maneira geral, os modelos de comportamento sugeridos por normas são aproximações desenvolvidas a partir de teorias que descrevem as leis constitutivas que regem a mecânica dos materiais. Fundamentados nestas teorias, diversos códigos para dimensionamento de estruturas de concretos convencionais apresentam diagramas para a descrição do seu comportamento mecânico. Normas como a NBR 6118

(ABNT, 2007), ACI 318 (2001), CEB MC 90 (1993) e CEB 228 (1995) apresentam modelos largamente utilizados com parâmetros ajustados para o emprego em concretos convencionais e concretos de alto desempenho. São exemplos, os diagramas parábola-retângulo e blocos de tensão. As normas que regulamentam o uso de concretos reciclados, também sugerem a utilização destes modelos para descrição do seu comportamento, entretanto, medidas restritivas são adotadas para aproximar-los do comportamento dos concretos convencionais.

A seguir, a tabela 9 sintetiza as restrições de utilização do concreto contendo agregado reciclado para fins estruturais segundo algumas normas de dimensionamento de estruturas de concreto, conforme Gonçalves (2007).

Tabela 9: Restrições ao uso estrutural do concreto contendo agregado reciclado, segundo Gonçalves (2007)

Norma	Local	% max.	σ (MPa)	Comp. Ag.	D. min.
NBR 6118/04	Brasil	-	-	-	-
NBR 15116/04	Brasil	-	-	nota 1	-
DIN 4226-100	Alemanha	25	37	nota 2	32 mm
WBTC 12/02	Hong Kong	20 (nota 3)	35	nota 4	10 mm
BCSJ	Japão	100	18	nota 5	-
RILEM	França	100	nota 6	nota 6	4 mm
BS 8500-2/02	Reino Unido	20	50	nota 7	-
C.U.R	Holanda	100	sem informação	nota 8	sem rest.
E 471/06	Portugal	25	50	nota 9	-
PTV 406	Bélgica	-	37	nota 10	-
OT 70085	Suíça	100	37	nota 11	sem rest.
DCA/95	Dinamarca	100	40	nota 12	4 mm
JIS A 5021	Japão	-	nota 13	nota 13	-
Russa	Rússia	50	20	-	-
EHE 08	Espanha	20	40	nota 14	4 mm

1 - ARC: Fração graúda do agregado com fragmentos à base de cimento portland e rocha superior a 90% em massa.

ARM: Fração graúda do agregado com fragmentos à base de cimento portland e rocha inferior a 90% em massa.

2 - TIPO I: Resíduos majoritariamente constituído por concreto, com 90% ou mais de concreto e até 10% de clínquer, tijolos maciços e alvenaria de pedra.

3 - Uso de teor de substituição de 100% limitado a estruturas pouco exigentes tais como bancadas, canteiros ou concreto ciclópico.

4 - Apenas agregados de concreto e rocha.

5 - Não faz restrições quanto a composição do agregado, podendo ser composto por concreto e alvenaria. Limita massa específica e absorção de água permitida.

6 - TIPO I (C16/20): agregados predominantemente de detritos de alvenaria, TIPO II (C50/60): agregados predominantemente de detritos de concreto e TIPO III (sem limite): agregados com 80% de agregados naturais e, no máximo, 10% de agregados do tipo I.

7 - RCA: Agregados graúdos provenientes de concretos com baixo percentual de alvenaria.

8 - Resíduos de concreto, alvenaria britada, concreto leve e pedras naturais.

9 - ARB1 e ARB2, agregado constituído majoritariamente por concreto, percentuais maiores que 90% e 70%, respectivamente.

10 - Resíduos majoritariamente constituído por concreto, com 90% ou mais de concreto e até 10% de resíduos cerâmicos.

11 - Agregado graúdo composto totalmente por resíduos de concreto

12 - Agregados reciclados com massa específica superior a 2200 kg/m³, contendo mais de 95% de resíduos de concreto.

13 - Norma japonesa para utilização de agregado reciclado em concretos de alta resistência. Interpretando as informações apresentadas por Gonçalves (2007), a norma permite o uso apenas de agregados originados de resíduos de concreto uma vez que classifica materiais cerâmicos como contaminantes.

14 - Resíduos majoritariamente constituído por concreto.

3 Modelos constitutivos para o concreto

3.1 Aspectos gerais

O concreto, por se tratar de um material compósito, apresenta comportamento mecânico peculiar. Este comportamento é consequência da combinação das propriedades mecânicas individuais de cada uma de suas fases. Mier (1997) afirma que as propriedades dos materiais compósitos dependem tanto das propriedades dos seus elementos constituintes quanto das propriedades da interface entre estes. Dessa forma o autor considera o concreto um composto trifásico, separando-o em pasta de cimento, agregados e a interface pasta-agregado.

De acordo com Leite (2001), todos os materiais que compõem o concreto afetam diretamente a sua resistência e o seu desempenho final. Leite (2001) afirma ainda que a fase agregado é extremamente importante para uma análise criteriosa das propriedades do concreto, já que corresponde a até 80% de toda a mistura. Segundo Coutinho (1997) apud Leite (2001), quando a resistência do concreto tem valor próximo ao da resistência do agregado, existe uma influência significativa do agregado sobre o comportamento mecânico do concreto, devendo este efeito ser considerado na análise dos fatores que determinam a resistência final do composto.

Mier (1997) e Proença (1998), afirmam que, mesmo antes da solicitação por qualquer tipo de carregamento, o concreto apresenta imperfeições originais. Esta microfissuração inicial existente resulta do fenômeno da retração e liberação de calor, desenvolvidos no início da cura. A propagação dessas microfissuras, à medida que o concreto é submetido à carga, é responsável pela resposta não-linear do concreto em

baixos níveis de tensão. Além disso, segundo Proença (1998), alguns outros fatores como textura e tamanho dos agregados, índice de vazios, relação água-cimento, etc. influenciam no comportamento mecânico global do concreto.

A ciência já dispõe de vários modelos analíticos consistentes para a descrição do comportamento mecânico do concreto convencional. Modelos baseados na teoria da elasticidade, plasticidade, na mecânica da fratura e do dano, e em combinações destes, são capazes de descrever grande parte dos fenômenos relativos ao concreto sob carregamento. Modelos concebidos utilizando a teoria da elasticidade apresentam expressões analíticas mais simplificadas, com eficiência satisfatória, e portanto são largamente utilizados para o desenvolvimento de pesquisas atuais para o concreto.

Os trabalhos iniciais dedicados ao estudo do comportamento do concreto objetivavam a formulação, a partir de estudos empíricos, dos fenômenos relacionados aos carregamentos de compressão. Um dos modelos pioneiros, que fundamentou pesquisas em várias vertentes, foi o modelo proposto por Saenz em 1964. A equação proposta por Saenz foi formulada para a ajuste de curvas experimentais, sendo expressa pela Equação 3.1 conforme Saenz (1964) *apud* Bhikshma e Kishore (2010).

$$\sigma = \frac{A\varepsilon}{1 + B\varepsilon^2} \quad (3.1)$$

onde:

ε = deformação do concreto;

σ = tensão correspondente à deformação do concreto;

A e B = constantes para ajustes da curva tensão-deformação.

Nota-se que nesta relação, entre tensão e deformação, estão embutidas nas constantes A e B todo o sistema mecânico que relaciona causa e efeito, entretanto, apresentada de forma implícita.

Também em 1964, Desayi e Krishan propuseram uma equação para o comportamento uniaxial do concreto em compressão (Equação 3.2) semelhante à sugerida por Saenz, entretanto associando características do material (BABU *et al.*, 2005).

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \right)^2} \quad (3.2)$$

onde:

ε = deformação do concreto;

ε_{max} = deformação máxima do concreto;

σ = tensão correspondente à deformação do concreto;

E_0 = módulo de elasticidade inicial.

De acordo com Álvares (1993), em 1965, Saenz propôs uma expressão para o comportamento do concreto à compressão envolvendo parâmetros explícitos relativos ao material: resistência máxima à compressão; deformação correspondente a esta resistência; deformação última e módulo de elasticidade inicial. Dessa forma, os conceitos de elasticidade não-linear foram inseridos por Saenz no seus estudos, sugerindo a Equação 3.27 para o ramo ascendente da curva tensão-deformação, conforme Saenz (1965) *apud* Kheyroddin e Mortezaei (2008).

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{1 + \left(\frac{E_0}{E_{sc}} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \right) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \right)^2} \quad (3.3)$$

onde:

ε = deformação do concreto;

ε_{max} = deformação máxima do concreto;

σ = tensão correspondente à deformação do concreto;

E_0 = módulo de elasticidade inicial;

E_{sc} = módulo de elasticidade secante.

Um modelo importante com vistas à aplicação em elementos estruturais de concreto foi proposto em 1985 por Carreira e Chu. Foi proposta a Equação 3.4 para a descrição do comportamento do concreto reforçado à tração, contendo uma variável adicional β dependente da forma do diagrama tensão-deformação experimental (BABU *et al.*, 2005).

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_t^{max}} = \frac{\beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_t^{max}} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_t^{max}} \right)^\beta} \quad (3.4)$$

onde:

ε = deformação do concreto;

ε_t^{max} = deformação máxima do concreto;

σ = tensão correspondente à deformação do concreto;

σ_t^{max} = tensão correspondente à deformação máxima do concreto;

β = variável dependente da forma do diagrama tensão-deformação.

No dimensionamento de elementos estruturais lineares submetidos a esforços normais e momentos fletores, as normas permitem a adoção de uma distribuição de tensões, na seção do elemento de concreto, aproximada por diagramas parábola-retângulo ou retangular.

Partindo de um diagrama tensão-deformação experimental representativo para o material submetido à compressão, é possível simplificar a curva real, geralmente com forte não-linearidade física no trecho pós-pico, através de uma função parabólica representando o trecho ascendente até a deformação de pico, somada a uma função constante no intervalo entre a deformação de pico e a deformação última, conforme mostra a Figura 3.

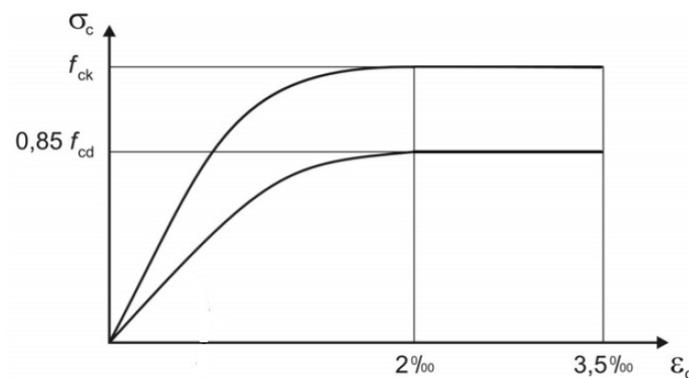


Figura 3: Diagrama tensão-deformação idealizado NBR 6118 (ABNT, 2007)

Para obtenção do diagrama parábola-retângulo, o *Comite Euro-International Du Beton* (CEB) sugere o modelo apresentado pela Equação 3.5.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_u} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (3.5)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_u}{0,002} \quad (3.6)$$

$$k = \frac{0,0022(1,1E)}{\sigma_u} \quad (3.7)$$

onde:

σ_c = resistência a compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico;

σ_u = tensão última;

E = módulo de elasticidade;

ε_u = deformação última com valor entre 0,003 e 0,0035;

A NBR 6118 descreve o trecho parabólico através de uma função quadrática, Equação 3.8, na qual o termo $0,85f_{cd}$ representa o fator de segurança incorporado à formulação para análises no estado limite último (ELU) do concreto à compressão.

$$\sigma_c = 0,85f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_C}{0,2\%} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

Na tração, a NBR 6118 (ABNT, 2007) indica o diagrama bilinear apresentado na Figura 4 para a simplificação do diagrama real, desde que o concreto encontre-se na fase de pré-fissuração.

A utilização de modelos simplificados fundamenta-se na possibilidade de representação do comportamento mecânico do material através de uma redistribuição de tensões na seção do elemento estrutural. Esta redistribuição segue critérios que simplificam e uniformizam a função que descreve a curva tensão-deformação do material, incorporam fatores a favor da segurança para as análises estruturais em ELU, preocupando-se em representar, com boa aproximação, a quantidade de energia ab-

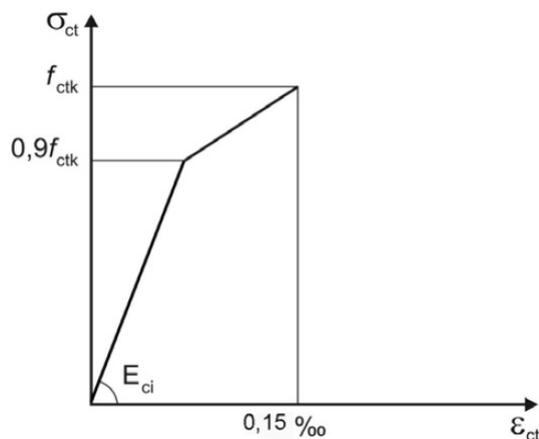


Figura 4: Diagrama tensão-deformação bilinear na tração NBR 6118 (ABNT, 2007)

sorvida durante o processo de fratura do material. Esta energia tem como parâmetro indicativo a área total sob a curva tensão-deformação abrangendo as fases pré-pico e pós-pico.

Shah, Swartz e Ouyang (1995) mostram que a evolução da degradação do concreto submetido a um carregamento de tração, pode ser modelada através de duas teorias complementares, a Mecânica do Dano Contínuo e a Mecânica da Fratura. Por serem correlacionadas, a adoção de aproximações e hipóteses adicionais pode permitir a utilização de apenas uma dessas para a descrição do comportamento mecânico do início do carregamento até a deformação última.

A teoria da mecânica do dano está sendo extensivamente utilizada na determinação de modelos constitutivos que descrevem o comportamento mecânico de concretos convencionais, sobretudo, no modelo de dano isotrópico de Mazars. As pesquisas desenvolvidas por Álvares (1993), Paula (2001) e Pituba e Proença (2005) são exemplos de trabalhos que utilizaram o modelo de dano isotrópico para representar o comportamento não-linear de elementos estruturais de concreto. A solidez teórica deste método, fundamentado na termodinâmica dos processos irreversíveis, assim como sua facilidade de implementação computacional e representação da mecânica estrutural do concreto, constituem vantagens significativas quando comparado a outras fundamentações (TAO E PHILLIPS, 2005).

3.2 Lei constitutiva baseada na Mecânica do Dano Contínuo

De acordo com Barasan (1998), o primeiro trabalho que introduziu o conceito de dano foi desenvolvido por Kachanov em 1958. Neste trabalho, Kachanov definiu a variável escalar ψ para a consideração do estado de integridade dos meios contínuos. Esta variável, denominada continuidade, tem valor unitário para meios contínuos não defeituosos e valor nulo para meios sem nenhuma capacidade de carga. De forma análoga, definiu-se a variável D para mensurar o estado de deterioração ou dano do meio, sendo $D = 1 - \psi$. Portanto, D tem significado contrário a ψ . Para um material livre de defeitos, tem-se $D = 0$ e $\psi = 1$ e para um material sem integridade estrutural, $D = 1$, o que corresponde a $\psi = 0$.

A partir dos estudos de Kachanov, outros trabalhos posteriores trataram a variável D de maneiras diferentes para descrever o dano. Lemaitre e Chaboche (1990) utilizaram uma metodologia fundamentada na termodinâmica dos processos irreversíveis para formalizar a chamada Mecânica do Dano em Meios Contínuos.

3.2.1 Modelo isotrópico de Mazars

Segundo Mazars (1980), a degradação de um material pode ser descrita através de combinações entre leis de evolução do dano e suas equações constitutivas, utilizando um método fenomenológico, baseado na termodinâmica dos processos irreversíveis.

Fazendo uso de uma formulação anisotrópica tridimensional de acoplamento entre dano e elasticidade, proposta por Benouniche (1979), e simplificando-a para o caso de solitação uniaxial de compressão, Mazars (1980) expressou a evolução de propriedades mecânicas em função do dano da seguinte forma:

$$E = E_0(1 - D_1)^2 \quad (3.9)$$

$$\nu = \nu_0 \frac{1 - D_1}{1 - D_2} \quad (3.10)$$

Onde E e ν são o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do material degradado respectivamente, E_0 é o módulo de elasticidade e ν_0 , o coeficiente de Poisson do material completamente íntegro ($D = 0$ e $\psi = 1$), D_1 é a variável dano na direção da carga aplicada e D_2 é a variável dano na direção perpendicular à direção da carga aplicada.

A validade deste conceito está relacionada a algumas considerações assumidas no seu desenvolvimento. Estas considerações foram apresentadas por Álvares (1993) com a denominação de hipóteses fundamentais do modelo de Mazars, quais sejam:

o concreto em processo de dano evolutivo apresenta comportamento elástico, sendo, portanto, desprezadas deformações permanente evidenciadas, experimentalmente, numa situação de descarregamento [...]

supõe-se que o dano seja causado somente pela existência de extensões (alongamentos) ao menos ao longo de uma das direções principais de deformação [...]. Isto significa supor que a ruptura local se desenvolve no modo I ou no modo misto I e II [...]

[...] considera-se que o dano seja isótropo, isto é, o estado de dano num ponto é representado por uma grandeza escalar [...]

o dano é representado localmente por uma variável escalar D ($0 \leq D \leq 1$), cuja evolução ocorre quando for superado um certo valor de referência para o alongamento equivalente.

Através da realização de ensaios com cargas cíclicas em corpos de prova cilíndricos, instrumentados para possibilitar a aquisição de dados com controle de deslocamentos, Mazars (1980) definiu a evolução das variáveis D_1 e D_2 por meio da obtenção dos valores experimentais das propriedades E e ν a cada ciclo de carga. De posse dessas informações, Mazars (1980) pôde concluir que:

1. Na fase elástica, quando $\varepsilon_2 \leq \varepsilon_{db}$

$$D_1 = D_2 = 0 \tag{3.11}$$

2. Na fase de dano isotrópico, quando $\varepsilon_{db} < \varepsilon_2 \leq \varepsilon_{d0}$

$$D_1 = D_2 = K_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_{db})^{K_1} \quad \therefore (K_1 = 0,42, K_1 = 0,40) \quad (3.12)$$

3. Na fase de dano anisotrópico, quando $\varepsilon_2 > \varepsilon_{d0}$

$$D_1 = K_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_{db})^{K_1} \quad (3.13)$$

$$D_2 = 1 - \frac{\nu_0(1 - D_1)^2}{\nu_0 + K_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_{d0})^{K_2}} \quad \therefore (D_2 > D_1, K_2 = 10^3, K_2 = 1,21) \quad (3.14)$$

onde,

ε_2 é deformação máxima transversal;

ε_{db} é a deformação no limite elástico;

ε_{d0} é a deformação de pico;

K_1, K_2 são constantes de ajuste.

Baseando-se nas evidências experimentais anteriormente apresentadas, Mazars (1984) propôs um modelo para a evolução do dano para o concreto submetido à tração uniaxial.

Para um comportamento puramente elástico, $\varepsilon \leq \varepsilon_{d0}$, a lei constitutiva do concreto obedece à lei de Hooke generalizada, fundamentada na Teoria da Elasticidade como mostra a equação 3.15 a seguir:

$$\sigma = \varepsilon E_0 \quad (3.15)$$

Para o trecho descendente da curva tensão-deformação, quando $\varepsilon \geq \varepsilon_{d0}$, admitido-se uma deformação pós-pico sem contribuição de deformações residuais provenientes da plastificação do material, a relação com o dano é estabelecida pelo conceito de tensão efetiva, de modo que:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} = \varepsilon \cdot E_0 \quad \therefore \sigma = \varepsilon \cdot E_0(1 - D) \quad (3.16)$$

onde, para as equações 3.15 e 3.16:

σ é a tensão uniaxial;

$\tilde{\sigma}$ é a tensão uniaxial efetiva;

ε é a deformação na direção de aplicação da carga;

E_0 é o módulo de elasticidade longitudinal inicial;

D é a variável dano.

Para atender a uma das hipóteses fundamentais do modelo, estendendo sua utilização às situações de carregamento à compressão, fez-se necessária a introdução do conceito de deformação equivalente para a variável ε .

A deformação equivalente, que se refere à parte positiva da deformação principal na direção i é então definida pela Equação 3.17 a seguir:

$$\varepsilon_{Eq} = \sqrt{(\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3)^2} \quad (3.17)$$

Assim, para o caso da tração (Equação 3.18) e compressão (Equação 3.19) tem-se:

$$\varepsilon_{Eq} = \varepsilon_i \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_{Eq} = \sqrt{(\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3)^2} = -\nu\varepsilon_i\sqrt{2} \quad (3.19)$$

Considerando ε_M a deformação máxima na tração, Mazars (1984) instituiu que a evolução do dano uniaxial pode ser escrita pela relação:

$$D = F(\varepsilon_M) \quad (3.20)$$

Dessa forma, após ajustes experimentais, foi proposta para a função F a descrição do comportamento mecânico para o caso unidimensional em duas fases:

1. Se, $\varepsilon_M \leq \varepsilon_{d0} \Rightarrow D = 0$

2. Se, $\varepsilon_M > \varepsilon_{d0}$

$$D = 1 - \frac{A}{e^{[B(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]}} - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A)}{\varepsilon_M} \quad (3.21)$$

onde,

ε_{d0} é a deformação no início da danificação;

ε_M é a deformação máxima;

A e B são parâmetros para ajustes da curva tensão-deformação que incorporam características dos materiais.

Generalizando a função de evolução do dano proposta para o comportamento diferenciado do concreto à tração e à compressão tem-se:

$$D_T = 1 - \frac{A_T}{e^{[B_T(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]}} - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_T)}{\varepsilon_M} \quad (3.22)$$

$$D_C = 1 - \frac{A_C}{e^{[B_C(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]}} - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - A_C)}{\varepsilon_M} \quad (3.23)$$

Os valores dos parâmetros A_T , B_T , A_C , B_C e ε_{d0} foram sugeridos por Mazars para o concreto convencional conforme intervalos expressos a seguir:

- $0,7 \leq A_T \leq 1$
- $1 \leq A_C \leq 1,5$
- $10^4 \leq B_T \leq 10^5$
- $10^3 \leq B_C \leq 2 \times 10^3$
- $10^{-5} \leq \varepsilon_{d0} \leq 10^{-4}$

3.2.2 Estudo da influência paramétrica do modelo de Mazars

Utilizando os intervalos de valores sugeridos pelo modelo de Mazars, Álvares (1993) estudou a influência dos parâmetros A_T , B_T , A_C , B_C e ε_{d0} para o caso de esforços uniaxiais de tração e compressão em corpos de prova de concreto.

Analisando o parâmetro ε_{d0} , Álvares (1993) observou que esta variável influencia o início e a inclinação inicial do trecho não-linear, bem como o valor assintótico de σ , como mostrado na figura 5.

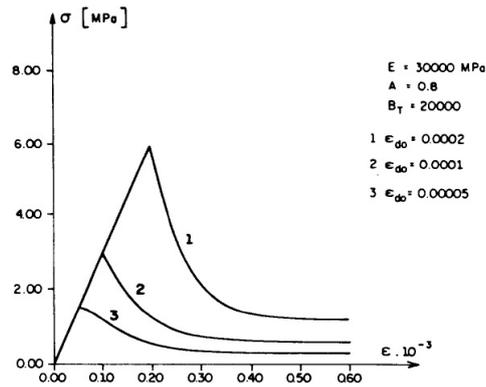


Figura 5: Influência do parâmetro ε_{d0} Álvares (1993)

A variação do parâmetro A_T permitiu observar sua influência na inclinação inicial do trecho não-linear e no valor da assíntota horizontal, de acordo com a figura 6.

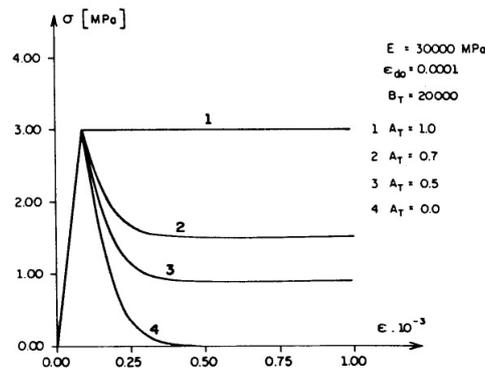


Figura 6: Influência do parâmetro A_T Álvares (1993)

Variando o parâmetro B_T , observa-se na, Figura 7, que ocorrem alterações tanto relativas ao sinal da inclinação inicial do trecho não-linear, quanto sobre o valor de pico do diagrama tensão-deformação.

Para os parâmetros de compressão, Álvares (1993) observou que existe influência análoga aos parâmetros de tração. As figuras 8 e 9 mostram, portanto, as influências dos parâmetros B_C e A_C .

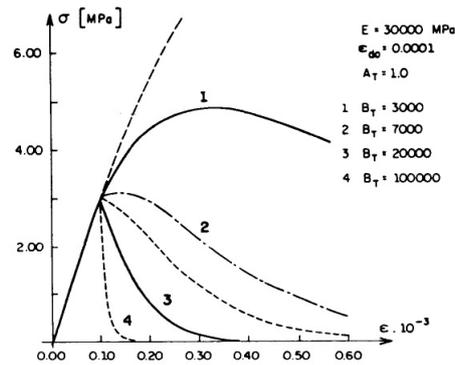


Figura 7: Influência do parâmetro B_T Álvares (1993)

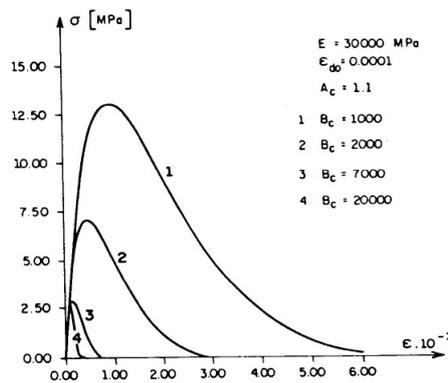


Figura 8: Influência do parâmetro B_C Álvares (1993)

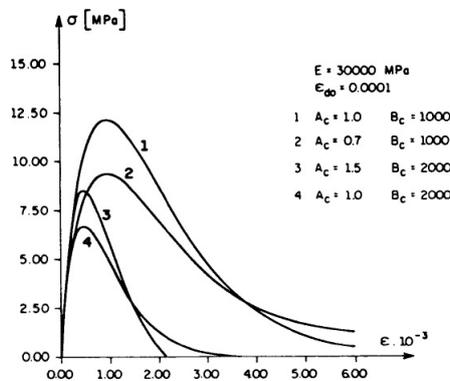


Figura 9: Influência dos parâmetros A_C e B_C Álvares (1993)

3.3 Modelos constitutivos adaptados para o concreto contendo agregado reciclado

Alguns trabalhos desenvolvidos na última década enfocam o conhecimento do comportamento estrutural do concreto contendo agregado reciclado por meio de estudos teóricos.

Xiao et al. (2005) investigaram, experimentalmente, as propriedades mecânicas

do concreto contendo agregado reciclado submetido a carregamento uniaxial objetivando a descrição analítica do seu comportamento. Através da expressão proposta por Guo e Zhang (1982) apud Xiao et al. (2005), para o concreto convencional, adotada pela norma chinesa GB50010, adaptaram suas variáveis obtendo boas aproximações para as curvas tensão-deformação experimentais do concreto contendo RCD. O comportamento mecânico é aproximado pela expressão normalizada representada pela Equação 3.24.

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} a\bar{\varepsilon} + (3 - 2a)\bar{\varepsilon}^2 + (a - 2)\bar{\varepsilon}^3, & \text{para } \bar{\varepsilon} < 1, \\ \frac{\bar{\varepsilon}}{b(\bar{\varepsilon}-1)^2 + \bar{\varepsilon}}, & \text{para } \bar{\varepsilon} > 1. \end{cases} \quad (3.24)$$

Na Equação 3.24, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_0$ e $\bar{\sigma} = \sigma/f_c$. Os parâmetros a e b são constantes a serem determinadas, representando, respectivamente, na curva tensão-deformação o módulo de elasticidade inicial e a influência na área sob a sua parte descendente.

Xiao et al. (2005) sugeriram as seguintes equações para os parâmetros a e b , função do parâmetro r (percentual de substituição de agregados).

$$a = 2.2(0.748r^2 - 1.231r + 0.975) \quad (3.25)$$

$$b = 0.8(7.6483r + 1.142) \quad (3.26)$$

A relação obtida entre as curvas analíticas e experimentais, normalizadas, indicam que a formulação pode ser utilizada para representar casos práticos de concreto contendo agregados reciclados.

Xiao et al. (2009) utilizaram a técnica *Lattice Model* em conjunto com Método dos Elementos Finitos para simular a danificação do concreto contendo agregado reciclado submetido a carregamento uniaxial de compressão. Neste trabalho, simulou-se a distribuição aleatória de agregados reciclados e naturais no concreto, para posterior combinação entre a técnica de modelagem discreta e o método numérico.

Bhikshma e Kishore (2010) aplicaram a expressão proposta em 1964 por Saenz, para a descrição do comportamento do concreto convencional, no estudo do concreto contendo agregado reciclado submetido à compressão, Equação 3.1.

A adaptação da Equação 3.1 foi desenvolvida a partir da consideração de uma razão entre deformações como variável independente e uma razão entre tensões como variável dependente, conforme mostra a Equação 3.27.

$$\frac{f}{f_u} = \frac{A' \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)}{1 + B' \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u} \right)^2} \quad (3.27)$$

onde:

$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_u}$ = razão entre deformações;

$\frac{f}{f_u}$ = razão entre tensões;

A' e B' = constantes para ajustes da curva tensão-deformação.

O modelo proposto foi utilizado para a avaliação da forma das curvas tensão-deformação teóricas e experimentais, uma vez que suas variáveis foram normalizadas. Os autores concluíram que o modelo descreveu satisfatoriamente as misturas de concreto previstas no programa experimental.

Du et al. (2010) também investigaram a performance mecânica do concreto contendo agregado reciclado sob carga de compressão axial. Além das evidências usualmente notadas no comportamento experimental do concreto contendo RCD, foi proposto um modelo constitutivo para sua descrição a partir de curvas experimentais típicas para diferentes teores de substituição de agregados. A descrição do ramo ascendente da curva tensão-deformação analítica foi baseada em um polinômio de terceiro grau proposto por Guo (1997). A Equação 3.28 descreve a parábola do trecho inicial da curva.

$$y = ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3 \quad (3.28)$$

onde:

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$, ($0 \leq x < 1$);

$x = \frac{\sigma}{\sigma_{max}}$.

Para o trecho descendente foi proposto um modelo exponencial função (Equação 3.29) de três parâmetros a serem ajustados (α , β_1 e β_2). Os autores obtiveram curvas

teóricas muito próximas às curvas das misturas do programa experimental.

$$y = \alpha e^{\frac{(x-1)^2}{2\beta_1^2}} + (1 - \alpha)e^{\frac{(x-1)^2}{2\beta_2^2}} \quad (3.29)$$

onde:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (1 \leq x < +\infty);$$

$$x = \frac{\sigma}{\sigma_{max}}.$$

González et al. (2011) determinaram uma expressão analítica para a curva tensão-deformação de concreto com agregados reciclados levando em conta os percentuais de substituição dos agregados. Neste trabalho os autores utilizaram a equação constitutiva proposta pelo Eurocode 2, adaptando seus parâmetros de forma a considerarem os efeitos do uso do agregado reciclado. A nova equação gerada descreveu satisfatoriamente as curvas experimentais tanto do concreto convencional quanto o concreto contendo agregado reciclado.

4 Modelo constitutivo para o concreto contendo agregado reciclado

Neste capítulo é proposta uma metodologia para utilização da teoria do dano contínuo na descrição do comportamento mecânico do concreto contendo agregado reciclado submetido à compressão axial. O modelo constitutivo apresentado baseia-se no estudo realizado por Mazars (1984) para o concreto convencional, adaptando-o para o concreto contendo RCD.

4.1 Considerações iniciais

Do ponto de vista matemático, o modelo de dano isotrópico proposto por Mazars (1984), chamado neste trabalho de modelo de Mazars, é uma função que combina de forma não-linear dois parâmetros, A e B. Conforme visto no capítulo anterior, estes parâmetros expressam, implicitamente, características inerentes ao material modelado. A contribuição de cada parâmetro para o comportamento mecânico do material pode ser obtida através de uma análise de influência paramétrica, conforme realizada por Álvares (1993).

Utilizando um método de regressão é possível ajustar o modelo de Mazars a curvas experimentais. A regressão, portanto, atribuirá aos parâmetros do modelo os valores que melhor ajustem a função não-linear aos dados fornecidos, a partir da evolução da variável independente, deformação (ε).

Um modelo, para ser representativo, deve atender a um conjunto significativo de dados experimentais. O modelo de Mazars descreve o concreto convencional, que atende às suas hipóteses básicas, com boa aproximação, desde que seus parâmetros

tenham valores próximos aos intervalos sugeridos pelo pesquisador, mostrado no capítulo 3. A aplicação deste modelo à descrição do comportamento do concreto contendo agregado reciclado não é trivial, pois significa torná-lo sensível às alterações observadas nas propriedades mecânicas deste material quando varia-se o percentual de substituição de agregados naturais por reciclados. Portanto, será desenvolvida no presente capítulo a metodologia necessária para inserir o teor de substituição de agregados no modelo de Mazars, relacionando-o explicitamente aos parâmetros A e B, adaptando este modelo ao concreto contendo agregado reciclado.

4.2 Adaptação dos parâmetros A e B ao concreto contendo agregado reciclado

Tornar os parâmetros de dano de Mazars (1984) capazes de representar as alterações que ocorrem nas propriedades mecânicas do concreto, resulta em um modelo constitutivo dinâmico e potencializa sua capacidade de predição. Como visto nos capítulos anteriores, modificações significativas ocorrem no comportamento do concreto contendo agregado reciclado com o aumento do teor de substituição de agregados, o que indica que esta variável tem grande importância na adaptação do modelo original.

Neste trabalho, o teor de substituição de agregados (TSA), foi adicionado ao modelo de Mazars como uma variável independente associada diretamente aos parâmetros A e B. O modelo adaptado, portanto, passa a ser função de duas variáveis independentes, TSA e ε , relacionadas, respectivamente, à mudança na composição do concreto e ao desenvolvimento do estado de carregamento.

A relação entre os parâmetros de dano (A e B) e o TSA foi feita a partir da observação de curvas experimentais σ x ε . A variável TSA foi avaliada no intervalo de 0 a 100% em três pontos do seu domínio, os limites extremos 0 e 100%, e o ponto central. A relação objetivada surge, portanto, da curva que melhor ajusta os pontos avaliados, podendo ser expressa por uma função polinomial. O procedimento a seguir mostra as etapas desta avaliação:

1. Obter curvas experimentais
2. Calcular valores das constantes experimentais E , ν e ε_0 ;
3. Proceder identificação paramétrica das curvas experimentais;
4. Selecionar resultados por critérios estatísticos;
5. Obter funções para as curvas A x TSA e B x TSA;
6. Substituir parâmetros do modelo original de Mazars por funções obtidas.

Para melhor visualização da metodologia do trabalho, a Figura 10 sintetiza etapas em diagrama de fluxo:

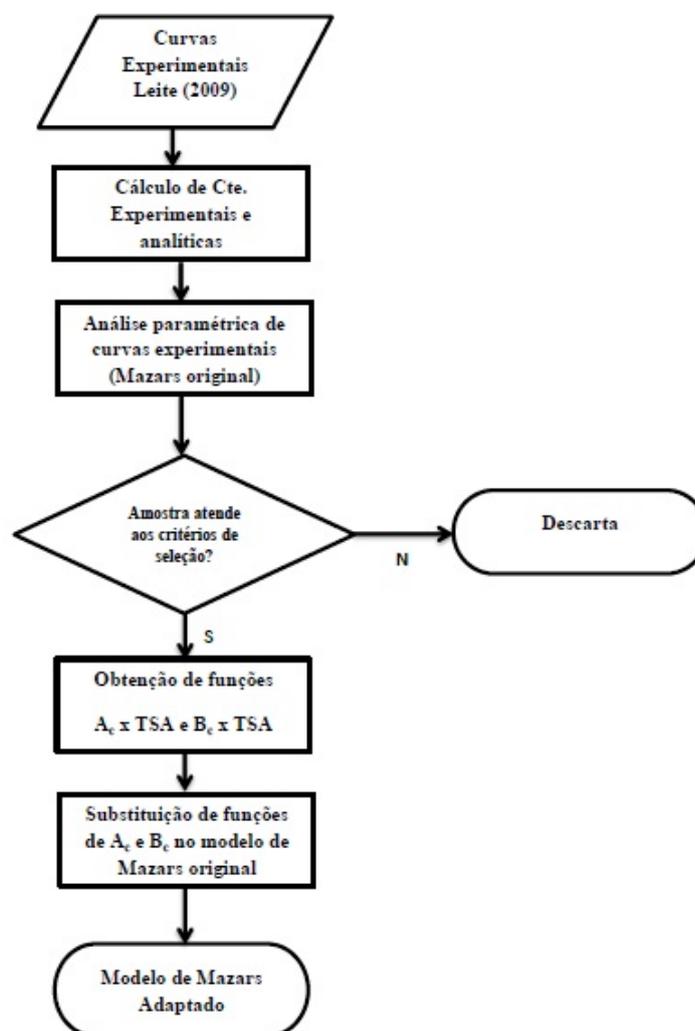


Figura 10: Síntese da metodologia do trabalho

4.2.1 Obtenção de curvas experimentais

A qualidade dos dados experimentais influencia a precisão do modelo. Para testes experimentais de compressão axial do concreto, a NBR 5739 (ABNT, 2007) recomenda o mínimo de dois corpos de prova, por exemplar, para avaliar estatisticamente o desempenho do ensaio. A avaliação da eficiência do ensaio é feita através do seu coeficiente de variação (CV_e), transcrita na Tabela 10.

Neste trabalho, os dados experimentais utilizados para a adaptação do modelo de Mazaris foram obtidos por Leite (2009). A autora fez o estudo do comportamento mecânico de concretos reciclados submetidos à compressão axial e tração direta,

Tabela 10: Avaliação do ensaio através do coeficiente de variação dentro do ensaio, NBR 5739 (ABNT,2007) alterada

Coeficiente de Variação (CV_e)				
(Excelente)	(Muito bom)	(Bom)	(Razoável)	(Deficiente)
$CV_e \leq 3,0$	$3,0 < CV_e \leq 4,0$	$4,0 < CV_e \leq 5,0$	$5,0 < CV_e \leq 6,0$	$CV_e > 6,0$

com vistas à aplicação em elementos de concreto pré-moldado. Os ensaios de Leite (2009) apresentaram coeficientes de variação no intervalo de 0,4 a 4,6 (excelente - bom) para resistências à compressão e entre 0,9 e 3,9 (excelente - muito bom) para módulos de elasticidade, considerados aptos a serem utilizados no presente estudo.

Os materiais utilizados por Leite (2009) para a produção dos concretos foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). A seguir, a Figura 11 mostra a composição gravimétrica do RCD utilizado.

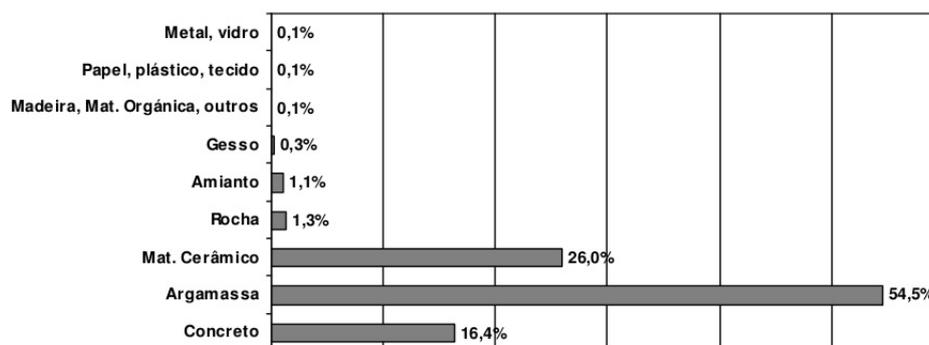


Figura 11: Composição gravimétrica do agregado reciclado utilizado, Leite (2009)

Leite (2009) avaliou seis misturas de concreto, moldou três corpos de prova por mistura, utilizando duas relações a/c, 0,45 e 0,80, e variando o teor de substituição de agregados naturais por reciclados, quais sejam:

- REF - referência
- 50%AMR - substituição de 50% do agregado miúdo natural por reciclado
- 100%AMR - substituição de 100% do agregado miúdo natural por reciclado

- 50%AGR - substituição de 50% do agregado graúdo natural por reciclado
- 100%AGR - substituição de 100% do agregado graúdo natural por reciclado
- 50%AMR-50%AGR - substituição de 50% do agregado miúdo e 50% do agregado graúdo natural por reciclado

As curvas experimentais foram geradas por meio de ensaios de resistência à compressão axial com controle de deslocamento, aos 28 dias de idade.

Utilizando as curvas médias tensão-deformação axial e lateral das misturas avaliadas, Leite (2009) observou que, de maneira geral, os concretos reciclados apresentaram menores tensões de ruptura e, comparando-se uma mesma tensão, maiores deformações que os concretos convencionais (referência). A Figura 12 apresenta graficamente o comportamento das misturas para a relação a/c de 0,45. As curvas para as misturas de concreto utilizadas no trabalho estão apresentadas no Apêndice A.

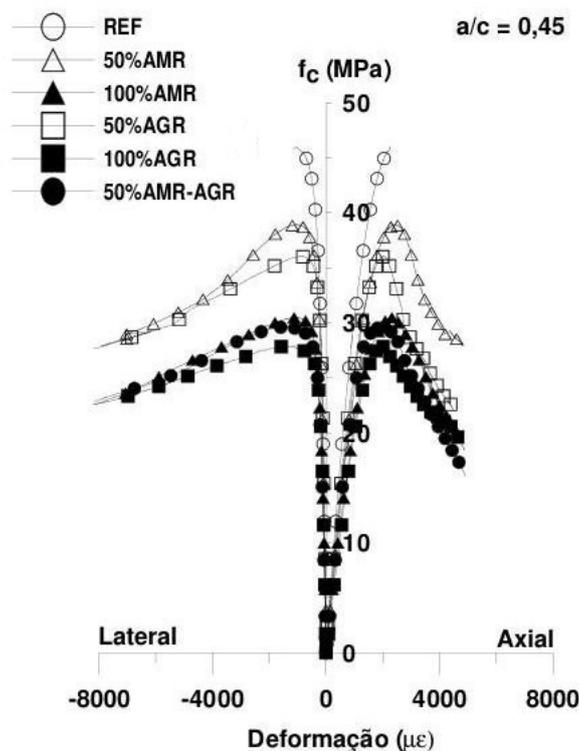


Figura 12: Curvas tensão-deformação para relação a/c de 0,45, Leite (2009)

4.2.2 Cálculo das constantes experimentais E , ν e ε_0

As curvas experimentais possibilitaram o cálculo das constantes necessárias para a utilização do modelo de Mazars, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e deformação de início de dano na compressão (ε_0) para cada corpo de prova de concreto. Seguindo a metodologia utilizada por Leite (2009), baseada nas prescrições da Norma ASTM C 469 (ASTM, 2007), o módulo de elasticidade foi calculado pela Equação 4.1.

$$E_c = \frac{(\sigma_{c2} - \sigma_{c1})}{(\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1})} \quad (4.1)$$

onde:

E_c é o módulo de elasticidade em GPa;

σ_{c2} é a tensão correspondente a 40% da carga de pico em MPa;

ε_{a1} é a deformação axial igual a 0,000050;

σ_{c1} é a tensão correspondente a deformação axial, ε_{a1} , em MPa;

ε_{a2} é a deformação axial produzida pela tensão σ_{c2} .

O coeficiente de Poisson foi calculado pela Equação 4.2.

$$\nu = \frac{(\varepsilon_{L2} - \varepsilon_{L1})}{(\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1})} \quad (4.2)$$

ν é o coeficiente de Poisson;

ε_{L2} é a deformação lateral a meia altura do corpo de prova produzida pela tensão σ_{c2} ;

ε_{L1} é a deformação lateral a meia altura do corpo de prova produzida pela tensão σ_{c1} .

O modelo de Mazars utiliza a deformação de pico (ε_{d0}) do concreto para estabelecer a superfície de início de dano na compressão (ε_0). De acordo com a teoria apresentada no capítulo 3, a evolução do dano no concreto sob compressão axial ocorre pelo desenvolvimento de fissuras por esforços de tração, estando o critério de início de dano do modelo, portanto, associado à deformação de pico do con-

creto submetido à tração axial. Esta consideração trata-se de uma das hipóteses fundamentais do modelo, apresentada por Álvares (1993):

supõe-se que o dano seja causado somente pela existência de extensões (alongamentos) ao menos ao longo de uma das direções principais de deformação [...]. Isto significa supor que a ruptura local se desenvolve no modo I ou no modo misto I e II [...]

Dessa forma, a superfície de início de dano na compressão (ε_0) é calculada pela Equação 4.3, conforme desenvolvimento apresentado no capítulo anterior.

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{d0}}{(-\nu\sqrt{2})} \quad (4.3)$$

4.2.3 Identificação paramétrica das curvas experimentais

O cálculo dos valores dos parâmetros do modelo de Mazars para cada curva experimental tensão-deformação foi realizado através de regressão por mínimos quadrados. A aplicação de um método de regressão assegura o melhor ajuste do modelo aos dados experimentais, bem como permite a avaliação da qualidade do ajuste através do parâmetro R^2 . Segundo Álvares (1993), a identificação paramétrica deve ser iniciada pela escolha da função erro, possibilitando a avaliação da resposta numérica em relação à experimental.

Utilizando a regressão por mínimos quadrados, estima-se o erro por meio do somatório dos quadrados das diferenças entre a função de pontos experimentais conhecidos e a função que descreve modelo a ser ajustado. O melhor ajuste, portanto, é definido como o menor erro total calculado de acordo com a Equação 4.4.

$$Err = \sum_{i=1}^n [y_i^e(x_i) - y_i^n(x_i, A, B)]^2 \quad (4.4)$$

Onde:

Err é o erro global;

y_i^e é a função de valores experimentais discretos x_i e y_i ;

y_i^n é a função a ser ajustada dependente de x_i e dos parâmetros do modelo, neste caso, A e B.

A minimização do modelo de Mazars em relação aos seus parâmetros A e B, afim de atender à condição estabelecida pela Equação 4.4, resultou em um sistema de equações acopladas e não-linear. A solução de sistemas desta natureza necessita de métodos iterativos. Neste trabalho, optou-se pelo método de Levenberg-Marquardt. Os valores iniciais dos parâmetros A e B necessários para a primeira iteração do método foram tomados dentro dos intervalos sugeridos por Mazars (1984) para aplicações do modelo em concreto convencional, conforme exposto no capítulo 3.

4.2.4 Seleção dos resultados por critérios estatísticos

Após a obtenção dos dados do ajuste individual das curvas experimentais, através do modelo de Mazars, foi preciso filtrá-los estatisticamente. Este processo assegura a seleção dos melhores resultados para serem utilizados na posterior adaptação do modelo. Foi assumido que os resultados das amostras de concreto apresentam distribuição normal, levando-se assim em consideração o desvio padrão (dp) como critério de seleção. Basicamente foram aplicados dois critérios sobre os resultados obtidos no item 4.2.3:

1. Serão excluídas as amostras nas quais o valor de qualquer parâmetro de dano (A_c ou B_c) esteja fora do intervalo média $\pm 2dp$;
2. Serão excluídas as amostras nas quais o valor da propriedade módulo de elasticidade na compressão (E_c) esteja fora do intervalo média $\pm 1dp$.

O primeiro critério tem como objetivo a seleção dos resultados por meio da consideração da curva tensão-deformação em sua extensão total. Como os parâmetros de dano tem influência sobre todo o domínio da curva, dessa forma, serão escolhidas as curvas mais próximas da curva média. A consideração do limite de $2dp$ assegura a representação de cerca de 95% dos resultados.

O segundo critério, mais rígido, tem como meta a seleção através da análise do trecho inicial (linear elástico) da curva tensão-deformação. Sendo o trecho com menor variabilidade entre as amostras, assegura, por meio do módulo de elasticidade, que as curvas escolhidas representam aproximadamente 68% dos resultados na distribuição normal.

As amostras remanescentes serão utilizadas, então, para obtenção das relações entre os parâmetros do modelo e o teor de substituição de agregados para cada tipo de agregado reciclado e fator água/cimento.

4.2.5 Obtenção das funções para as curvas A x TSA e B x TSA

O comportamento dos parâmetros do modelo analítico em relação à substituição de agregados é observado traçando curvas que ajustem os três pontos escolhidos anteriormente no seu domínio (0%, 50% e 100%). A escolha da função de ajuste obedece aos seguintes critérios:

1. A curva deve passar necessariamente pelos 3 pontos obtidos experimentalmente;
2. A curva, nos intervalos entre os pontos (0% - 50% e 50% - 100%), deve ter forma linear ou quadrática.

A Figura 13 mostra um exemplo genérico do procedimento para o ajuste da equação.

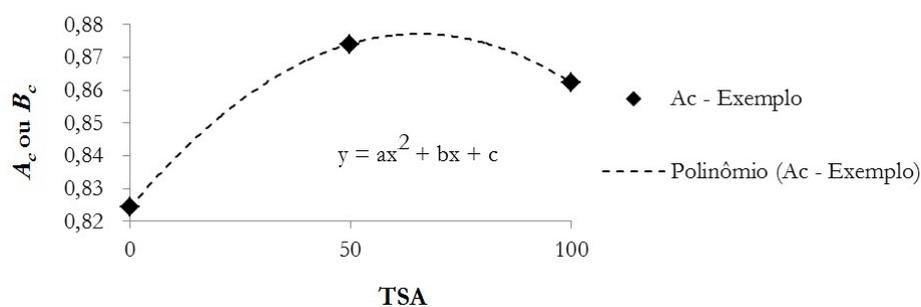


Figura 13: Obtenção das funções A_c x TSA e B_c x TSA

4.2.6 Substituição dos parâmetros do modelo original de mazars pelas funções obtidas

A forma quadrática assumida pelos parâmetros de dano no item 4.2.5, conforme Equações 4.6 e 4.7, deve ser inserida no modelo original de Mazars utilizando a equação constitutiva apresentada no Capítulo 3. Este procedimento estará atribuindo ao modelo uma nova variável independente, TSA, provendo a sua adaptação à descrição do comportamento dos concretos reciclados estudados para teores de substituição de agregados variando em um intervalo de 0 a 100%.

$$A_c = Mx^2 + Nx + O \quad (4.5)$$

$$B_c = Px^2 + Qx + R \quad (4.6)$$

onde:

M, N, O, P, Q e R = coeficientes da função quadrática;

x = teor de substituição de agregados (TSA).

Dessa forma, o modelo de Mazars adaptado à descrição do comportamento do concreto contendo agregado reciclado deverá ter a seguinte forma genérica:

$$D_{adp} = 1 - \frac{(Mx^2 + Nx + O)}{e^{[(Px^2 + Qx + R)(\varepsilon_M - \varepsilon_{d0})]}} - \frac{\varepsilon_{d0}(1 - (Mx^2 + Nx + O))}{\varepsilon_M} \quad (4.7)$$

onde,

D_{adp} = variável dano adaptada;

ε_{d0} é a deformação no início da danificação;

ε_M é a deformação máxima.

5 Apresentação e análise dos resultados

5.1 Identificação paramétrica e aplicação dos critérios de seleção de amostras

A execução do procedimento exposto no Capítulo 4 resultou em dados que auxiliaram tanto a validação da metodologia proposta quanto a avaliação da capacidade do modelo isotrópico de Mazars na descrição do comportamento mecânico do concreto contendo RCD.

Como etapa inicial, foi proposto o cálculo das constantes experimentais presentes no modelo constitutivo a ser adaptado. As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores experimentais encontrados por Leite (2009) para as seguintes propriedades: resistência à compressão axial (f_c); módulo de elasticidade na compressão (E_c); coeficiente de Poisson (ν); deformação de pico na tração (ε_{d0_t}) e o cálculo da deformação de início de fissuração na compressão (ε_0), conforme Mazars (1984).

Tabela 11: Resultados obtidos por Leite (2009) para f_c , E_c e ν

Mistura	f_c (MPa)	E_c (GPa)	ν
REF a/c 0,45	46,6 ± 1,7 (3,7)	34,6 ± 0,6 (1,6)	0,21 ± 0,01 (2,6)
50 % AMR a/c 0,45	39,2 ± 0,7 (1,8)	28,7 ± 0,7 (2,3)	0,20 ± 0,01 (2,6)
100 % AMR a/c 0,45	30,3 ± 0,8 (2,6)	23,8 ± 0,9 (3,9)	0,21 ± 0,02 (8,9)
50 % AGR a/c 0,45	36,0 ± 1,3 (3,6)	29,0 ± 0,4 (1,5)	0,20 ± 0,02 (7,5)
100 % AGR a/c 0,45	28,4 ± 0,1 (0,4)	24,8 ± 0,6 (2,6)	0,19 ± 0,01 (5,0)
50 % AMR-AGR a/c 0,45	30,8 ± 0,4 (1,3)	23,3 ± 0,8 (3,6)	0,21 ± 0,01 (5,0)
REF a/c 0,80	21,7 ± 0,9 (4,0)	25,7 ± 0,9 (3,7)	0,21 ± 0,05 (24,5)
50 % AMR a/c 0,80	23,1 ± 0,7 (2,8)	23,4 ± 0,5 (2,0)	0,17 ± 0,01 (4,4)
100 % AMR a/c 0,80	18,5 ± 0,8 (4,2)	18,9 ± 0,6 (3,1)	0,17 ± 0,01 (5,8)
50 % AGR a/c 0,80	18,3 ± 0,7 (3,7)	20,9 ± 0,2 (0,9)	0,17 ± 0,01 (3,1)
100 % AGR a/c 0,80	13,3 ± 0,3 (2,3)	16,2 ± 0,4 (2,5)	0,16 ± 0,01 (4,2)
50 % AMR-AGR a/c 0,80	16,4 ± 0,8 (4,6)	20,3 ± 0,6 (3,2)	0,19 ± 0,01 (4,5)

A Tabela 12 apresenta os valores de (ε_0) , calculados a partir dos valores médios de (ε_{d0_t}) .

Tabela 12: Resultados obtidos por Leite (2009) para ε_{d0_t} e cálculo de ε_0

Mistura	$\varepsilon_{d0_t} \cdot 10^{-6}$	$\varepsilon_0 \cdot 10^{-6}$
REF a/c 0,45	106,4 ± 9,7 (9,1)	-358,27
50 % AMR a/c 0,45	104,3 ± 4,0 (3,9)	-368,76
100 % AMR a/c 0,45	148,1 ± 6,6 (4,5)	-498,68
50 % AGR a/c 0,45	105,9 ± 5,6 (5,3)	-374,41
100 % AGR a/c 0,45	143,0 ± 15,8 (11,0)	-532,19
50 % AMR-AGR a/c 0,45	125,8 ± 13,2 (10,5)	-423,59
REF a/c 0,80	99,7 ± 6,9 (6,9)	-335,71
50 % AMR a/c 0,80	116,7 ± 13,4 (11,5)	-485,41
100 % AMR a/c 0,80	147,0 ± 11,0 (7,5)	-611,44
50 % AGR a/c 0,80	171,8 ± 27,2 (15,8)	-714,59
100 % AGR a/c 0,80	203,4 ± 6,7 (3,3)	-898,91
50 % AMR-AGR a/c 0,80	77,5 ± 4,3 (5,5)	-288,43

Utilizando as curvas experimentais obtidas através de ensaios de compressão axial e os valores médios apresentados nas Tabelas 11 e 12, foi possível descrever o comportamento mecânico de cada amostra de concreto por meio do modelo de dano isotrópico criado por Mazars (1984).

Este processo, nomeado análise paramétrica, definiu os valores dos parâmetros A_c e B_c , para o concreto contendo agregado reciclado estudado, utilizando um método de regressão por mínimos quadrados. Para cada mistura foram obtidos valores ajustados para o par de parâmetros, conforme apresentado nas Tabelas 13 e 14.

Adicionalmente aos valores dos parâmetros A_c e B_c , são apresentados nas Tabelas 13 e 14 os valores do coeficiente de determinação (R^2), módulo de elasticidade (E_c) e a variação (diferença entre experimental e analítica) da resistência à compressão ($\Delta\sigma$) de cada amostra. Como dito no capítulo anterior, o R^2 auxiliará a avaliação da qualidade do ajuste realizado.

Tabela 13: Identificação paramétrica para misturas com fator água/cimento de 0,45

Identificação	A_c	B_c	E_c	R^2	$\Delta\sigma$
REF 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,81	1.116,99	35.590,47	0,998	0,43
REF 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,81	1.063,88	36.701,77	0,997	0,68
REF 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,84	1.158,70	35.780,58	0,993	0,00
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,91	1.306,55	27.257,26	0,976	-1,05
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,85	1.045,60	29.173,56	0,995	0,54
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,90	1.471,89	29.928,10	0,959	-1,05
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,87	1.435,43	26.724,97	0,977	-0,91
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,87	1.523,85	24.968,64	0,965	-0,30
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,86	1.599,97	25.381,15	0,963	-0,60
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,79	1.473,41	29.983,00	0,988	-0,33
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,84	1.644,13	30.318,38	0,963	-1,11
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,86	1.917,65	30.292,45	0,910	-1,57
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,72	1.718,38	26.148,22	0,974	-0,71
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,74	1.809,93	25.130,22	0,958	-1,07
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	1,00	1.117,04	15.863,45	0,970	-0,36
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,64	2.261,52	35.317,02	0,969	-0,06
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,84	1.558,64	23.362,50	0,939	-0,06
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,82	1.689,58	24.492,29	0,931	-0,96

A Figura 14 expressa graficamente a qualidade do ajuste, obtido através da regressão por mínimos quadrados, para a mistura 50% AGR CP1. Nota-se que o valor do coeficiente de determinação encontrado, 0,988, atesta que o modelo de Mazars, mesmo tendo poucos parâmetros de ajuste, representa satisfatoriamente esta mistura de concreto contendo agregado reciclado. As demais representações gráficas da análise paramétrica das Tabelas 13 e 14 estão apresentadas no Apêndice A deste trabalho.

Observa-se nas Tabelas 13 e 14 que o menor coeficiente de determinação obtido tem valor 0,910, correspondente à mistura 50% AGR CP3, com fator a/c igual a 0,45. Os valores encontrados para o parâmetro A_c estão próximos ao limite inferior do intervalo sugerido por Mazars (1984) para este parâmetro, variam de 0,64 a 1,00. Em relação ao parâmetro B_c , seus valores encontram-se entre 1.045,60 e 2.251,62, coerentes com as expectativas do modelo analítico aplicado.

Para as misturas com fator água/cimento de 0,80, os valores do parâmetro A_c encontram-se entre 0,55 e 0,88 e do parâmetro B_c entre 1.185,50 e 2.057,15.

As Figuras 15 e 16 mostram a comparação entre os intervalos de valores para os

Tabela 14: Identificação paramétrica para misturas com fator água/cimento de 0,80

Identificação	A_c	B_c	E_c	R^2	$\Delta\sigma$
REF 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,64	1.409,06	25.916,74	0,964	0,91
REF 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,80	1.558,63	27.320,98	0,939	-0,33
REF 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,61	1.315,03	28.073,07	0,942	0,86
REF 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,58	1.415,78	27.449,04	0,939	0,47
REF 0,80 COMPRESSÃO CP5	0,56	1.185,49	26.287,27	0,901	0,95
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,68	1.289,42	24.523,87	0,986	0,21
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,65	1.293,74	23.977,20	0,974	0,18
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,66	1.281,19	25.030,89	0,965	0,23
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,66	1.321,94	25.360,48	0,974	0,22
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,55	1.213,63	20.375,38	0,960	0,18
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,64	1.277,64	19.593,23	0,988	0,11
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,60	1.273,67	18.724,57	0,984	0,13
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,62	1.203,07	19.116,92	0,983	0,11
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,59	1.509,98	26.804,22	0,998	0,02
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,62	1.409,49	25.285,33	0,990	0,03
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,64	1.338,93	23.497,23	0,991	0,03
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,55	1.377,21	21.972,77	0,946	0,45
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,81	1.405,11	19.441,10	0,993	0,00
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,82	1.434,82	20.803,95	0,993	0,00
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,85	1.515,78	20.647,52	0,999	0,00
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,80	2.057,15	17.009,44	0,999	0,00
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP5	0,78	1.868,70	16.901,54	0,998	0,00
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP6	0,76	1.607,14	16.832,56	0,984	0,03
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,88	1.312,32	18.204,44	0,994	0,01
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,85	1.506,40	21.774,15	0,999	0,00
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,85	1.506,32	21.999,24	0,992	0,01

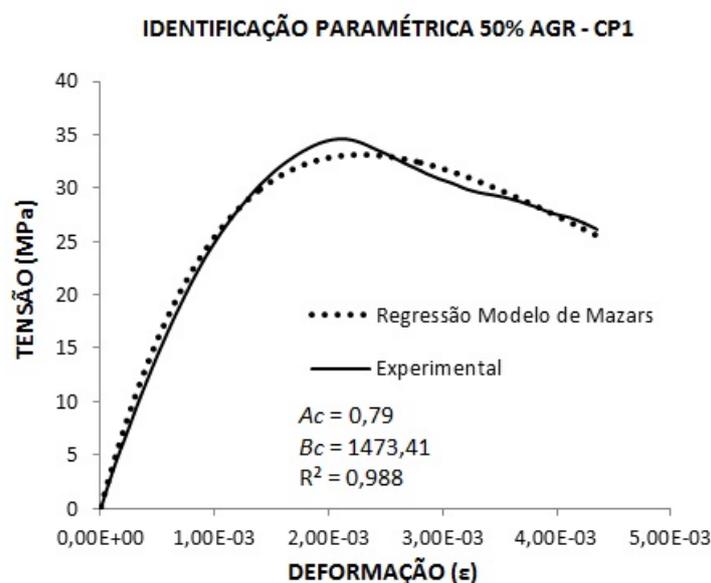


Figura 14: Ajuste do traço 50% AGR 0,45 CP1

parâmetros A_c e B_c , sugeridos por Mazars para concretos convencionais e intervalos de valores encontrados para as misturas de concretos reciclados investigadas neste trabalho.

De acordo com os conceitos de influência dos parâmetros do modelo de Mazars na curva tensão-deformação à compressão dos concretos, apresentados por Álvares (1993), e observação das Figuras 15 e 16, nota-se que:

- O parâmetro A_c apresenta, para os concretos reciclados: menores valores para os limites do intervalo (superior e inferior) em relação aos concretos convencionais, e menor tamanho do intervalo (diferença entre limite superior e limite inferior). Do ponto de vista da influência paramétrica no modelo constitutivo, este comportamento expressa que os concretos reciclados apresentam tendência à diminuição das tensões de pico e aumento das deformações últimas, afirmação coerente com resultados experimentais apresentados nos capítulos anteriores.
- O parâmetro B_c apresenta limites do intervalo de valores para o concreto contendo agregado reciclado próximos aos valores estabelecidos por Mazars (1984) para o concreto convencional. Como este parâmetro exerce influência sobre a inclinação inicial do trecho não linear da curva tensão-deformação, pode-se afirmar que esta característica não apresenta diferenças significativas com a inclusão de RCD no concreto

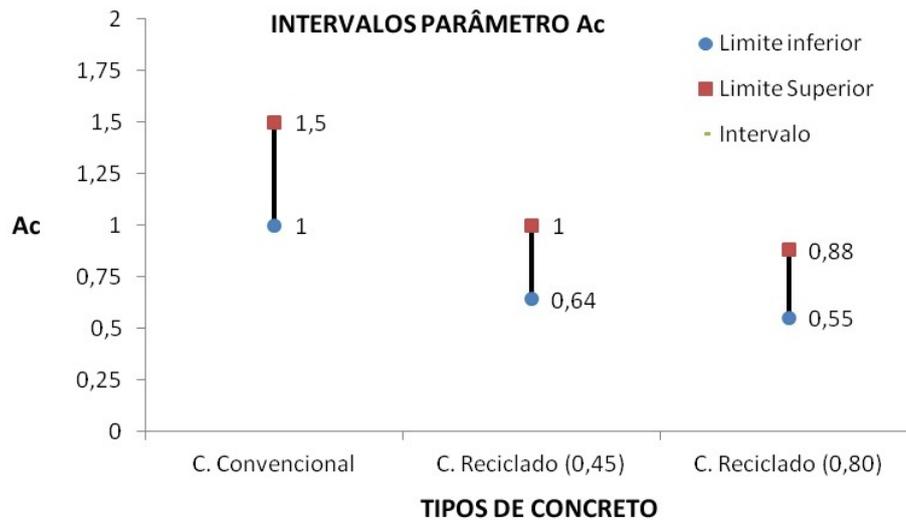


Figura 15: Comparação entre os intervalos de valores para o parâmetro A_c

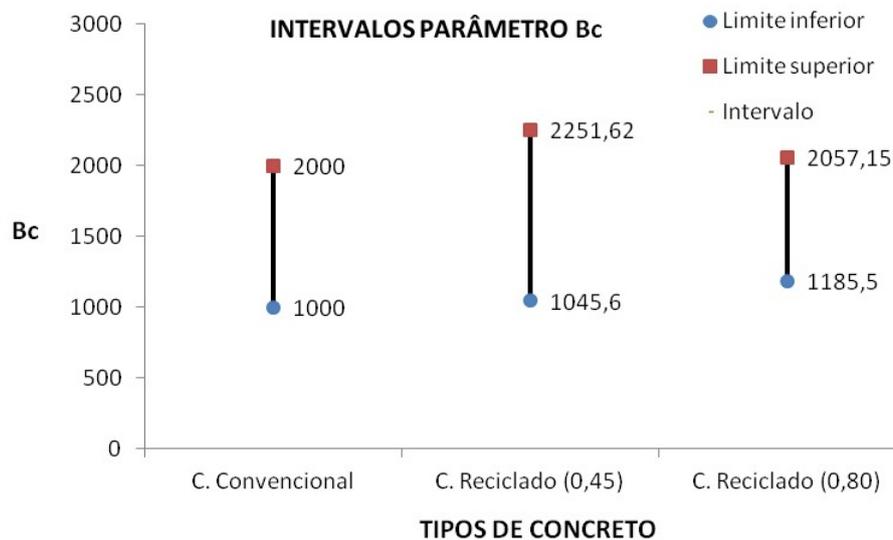


Figura 16: Comparação entre os intervalos de valores para o parâmetro B_c

A seleção dos dados para a adaptação do modelo tem critérios que analisam tanto os valores dos módulos de elasticidade de cada amostra quanto os valores dos parâmetros do modelo de Mazars, obtidos por meio da identificação paramétrica apresentada. Os parâmetros estatísticos, média e desvio padrão, foram calculados para cada mistura utilizando seu conjunto de amostras (corpos de prova) e podem ser visualizados na Tabela 15.

Após aplicação dos critérios, conforme apresentado no item 4.2.4, restaram as amostras apresentadas nas Tabelas 16 e 17.

Em relação ao critério 1, o qual elimina as amostras que apresentam valores para os parâmetros A_c e B_c fora do intervalo média $\pm 2dp$, os dados resultantes da identificação paramétrica foram todos selecionados. Este critério, apesar de ter menor rigidez, assegura qualidade mínima aos dados diante da variabilidade inerente ao concreto contendo agregado reciclado.

O critério 2 é mais rígido. Este critério seleciona dentro de cada mistura as amostras mais uniformes, do ponto de vista do comportamento mecânico, para serem utilizadas na adaptação do modelo. Aqui, assegura-se, de fato, a representatividade das características mecânicas do concreto contendo agregado reciclado estudado e a transferência destas para o modelo analítico.

Após o filtro dos melhores resultados, fez-se necessário o cálculo de novas médias para os valores restantes a fim de utilizá-las no próximo passo desta metodologia. O uso de valores médios para representar cada mistura/traço de concreto contendo agregado reciclado conduzirá o estudo às soluções generalizadas e, portanto, mais abrangentes. A Tabela 18 apresenta as novas médias para os parâmetros a partir das amostras selecionadas.

Tabela 15: Valores médios e respectivos desvios padrão para as misturas

Identificação	A_c	B_c	E_c
MÉDIA REF 0,45	0,82	1.113,19	36.024,27
DESVIO REF 0,45	0,02	47,52	594,38
MÉDIA 50% AMR 0,45	0,89	1.274,68	28.786,31
DESVIO 50% AMR 0,45	0,03	214,92	1.376,89
MÉDIA 100% AMR 0,45	0,86	1.519,75	25.691,59
DESVIO 100% AMR 0,45	0,01	82,35	918,40
MÉDIA 50% AGR 0,45	0,83	1.678,40	30.197,94
DESVIO 50% AGR 0,45	0,03	224,09	186,60
MÉDIA 100% AGR 0,45	0,82	1.548,45	22.380,63
DESVIO 100% AGR 0,45	0,16	376,41	5.666,95
MÉDIA 50%AMR-AGR 0,45	0,77	1.836,58	27.723,94
DESVIO 50%AMR-AGR 0,45	0,11	373,79	6.600,02
MÉDIA REF 0,80	0,64	1.376,80	27.009,42
DESVIO REF 0,80	0,10	137,87	885,60
MÉDIA 50% AMR 0,80	0,66	1.296,58	24.723,11
DESVIO 50% AMR 0,80	0,01	17,70	604,72
MÉDIA 100% AMR 0,80	0,60	1.242,01	19.452,53
DESVIO 100% AMR 0,80	0,04	39,13	710,40
MÉDIA 50% AGR 0,80	0,60	1.408,91	24.389,89
DESVIO 50% AGR 0,80	0,04	73,30	2.103,18
MÉDIA 100% AGR 0,80	0,80	1.648,12	18.606,02
DESVIO 100% AGR 0,80	0,03	260,65	1.912,88
MÉDIA 50%AMR-AGR 0,80	0,86	1.441,68	20.659,28
DESVIO 50%AMR-AGR 0,80	0,02	112,03	2.128,93

Tabela 16: Amostras selecionadas com fator água/cimento de 0,45

Identificação	A_c	B_c	E_c	R^2
REF 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,81	1.116,99	35.590,47	0,998
REF 0,45 COMPRESSÃO CP2	*	*	*	*
REF 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,84	1.158,70	35.780,58	0,993
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,85	1.045,60	29.173,56	0,995
50% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,90	1.471,89	29.928,10	0,959
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,87	1.523,85	24.968,64	0,965
100% AMR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,86	1.599,97	25.381,15	0,963
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,84	1.644,13	30.318,38	0,963
50% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,86	1.917,65	30.292,45	0,910
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	0,72	1.718,38	26.148,22	0,974
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,74	1.809,93	25.130,22	0,958
100% AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	*	*	*	*
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP2	0,84	1.558,64	23.362,50	0,939
50%AMR-AGR 0,45 COMPRESSÃO CP3	0,82	1.689,58	24.492,29	0,931

* Valores eliminados

5.2 Obtenção das funções para os parâmetros A_c e B_c

Partindo dos valores médios apresentados na Tabela 18 foi possível cumprir com umas das etapas mais importantes desta metodologia, a transformação do comportamento do concreto contendo agregado reciclado com a variação do seu teor de substituição em polinômio do segundo grau. Conforme exemplo mostrado no capítulo anterior, as funções para os parâmetros de dano são obtidas através da relação entre os valores dos parâmetros e o teor de substituição de agregados para cada mistura.

Como resultados, são apresentadas a seguir oito curvas (A_c x TSA e B_c x TSA) representativas do comportamento de cada parâmetro em relação aos agregados dos tipos AMR e AGR e aos fatores água/cimento de 0,45 e 0,80. As misturas compostas por substituição mútua de agregados miúdos e graúdos foram excluídas, a partir desta etapa, pois apresentaram grande variabilidade nos resultados das etapas anteriores. A Figura 17 apresenta as curvas geradas e suas respectivas funções

Tabela 17: Amostras selecionadas com fator água/cimento de 0,80

Identificação	A_c	B_c	E_c	R^2
REF 0,80 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
REF 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,80	1.558,63	27.320,98	0,939
REF 0,80 COMPRESSÃO CP3	*	*	*	*
REF 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,58	1.415,78	27.449,04	0,939
REF 0,80 COMPRESSÃO CP5	0,56	1.185,49	26.287,27	0,901
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,68	1.289,42	24.523,87	0,986
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP2	*	*	*	*
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,66	1.281,19	25.030,89	0,965
50% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP4	*	*	*	*
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,64	1.277,64	19.593,23	0,988
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP3	*	*	*	*
100% AMR 0,80 COMPRESSÃO CP4	0,62	1.203,07	19.116,92	0,983
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,62	1.409,49	25.285,33	0,990
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,64	1.338,93	23.497,23	0,991
50% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP4	*	*	*	*
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	0,81	1.405,11	19.441,10	0,993
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	*	*	*	*
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	*	*	*	*
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP4	*	*	*	*
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP5	0,78	1.868,70	16.901,54	0,998
100% AGR 0,80 COMPRESSÃO CP6	0,76	1.607,14	16.832,56	0,984
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP1	*	*	*	*
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP2	0,85	1.506,40	21.774,15	0,999
50%AMR-AGR 0,80 COMPRESSÃO CP3	0,85	1.506,32	21.999,24	0,992

* Valores eliminados

Tabela 18: Novos valores médios para as misturas de concreto contendo agregado reciclado

Identificação	A_c	B_c	E_c
MÉDIA REF 0,45	0,82	1.137,85	35.685,53
MÉDIA 50% AMR 0,45	0,87	1.258,75	29.550,83
MÉDIA 100% AMR 0,45	0,86	1.561,91	25.174,90
MÉDIA 50% AGR 0,45	0,85	1.780,89	30.305,42
MÉDIA 100% AGR 0,45	0,73	1.764,16	25.639,22
MÉDIA 50%AMR-AGR 0,45	0,83	1.624,11	23.927,40
MÉDIA REF 0,80	0,65	1.386,64	27.019,10
MÉDIA 50% AMR 0,80	0,67	1.285,31	24.777,38
MÉDIA 100% AMR 0,80	0,63	1.240,36	19.355,08
MÉDIA 50% AGR 0,80	0,63	1.374,21	24.391,28
MÉDIA 100% AGR 0,80	0,79	1.734,53	17.546,16
MÉDIA 50%AMR-AGR 0,80	0,85	1.506,37	21.886,70

polinomiais.

Nas curvas traçadas, os valores dos parâmetros nos pontos 0%, 50% e 100% de teor de substituição de agregados foram obtidos utilizando os critérios de seleção de dados estabelecidos no Capítulo 4 e portanto representam com precisão o comportamento das amostras de concreto contendo agregado reciclado utilizadas neste trabalho. A metodologia utilizada permite inferir o comportamento de concretos reciclados com teores de substituição intermediários, estimado através de uma função de interpolação quadrática que passa pelos três pontos referentes aos teores de substituição das misturas estudadas.

Dessa forma, o modelo de dano isotrópico proposto por Mazars (1984), apresentado no Capítulo 3, pode ser adaptado para a descrição do concreto contendo agregado reciclado substituindo seus parâmetros A_c e B_c (originalmente arbitrados) por funções polinomiais que expressam a degradação das propriedades mecânicas do concreto com a substituição de agregados naturais por reciclados. Assim, o concreto contendo agregado reciclado estudado neste trabalho pode ser descrito pelo modelo de Mazars utilizando as seguintes funções resultantes do comportamento expresso na Figura 17:

1. Misturas com fator água/cimento = 0,45 e substituição de AMR

$$A_c = \frac{-1.239}{100.000.000}x^2 + \frac{477}{294.056}x + \frac{18.913}{22.952} \quad (5.1)$$

$$B_c = \frac{5.555}{152.386}x^2 + \frac{20.549}{34.520}x + \frac{633.718}{557} \quad (5.2)$$

2. Misturas com fator água/cimento = 0,45 e substituição de AGR

$$A_c = \frac{-218}{7.657.183}x^2 + \frac{4.359}{2.255.359}x + \frac{18.913}{22.952} \quad (5.3)$$

$$B_c = \frac{-15.4085}{116.767}x^2 + \frac{171.839}{8.831}x + \frac{633.718}{557} \quad (5.4)$$

3. Misturas com fator água/cimento = 0,80 e substituição de AMR

$$A_c = \frac{-200}{17.809.439}x^2 + \frac{746}{796.549}x + \frac{31.697}{48.867} \quad (5.5)$$

$$B_c = \frac{3.182}{282.175}x^2 - \frac{26.798}{10.345}x + \frac{683.613}{493} \quad (5.6)$$

4. Misturas com fator água/cimento = 0,80 e substituição de AGR

$$A_c = \frac{367}{10.000.000}x^2 - \frac{9.055}{3.978.069}x + \frac{31.697}{48.867} \quad (5.7)$$

$$B_c = \frac{6.677}{89.565}x^2 - \frac{96.923}{24.377}x + \frac{683.613}{493} \quad (5.8)$$

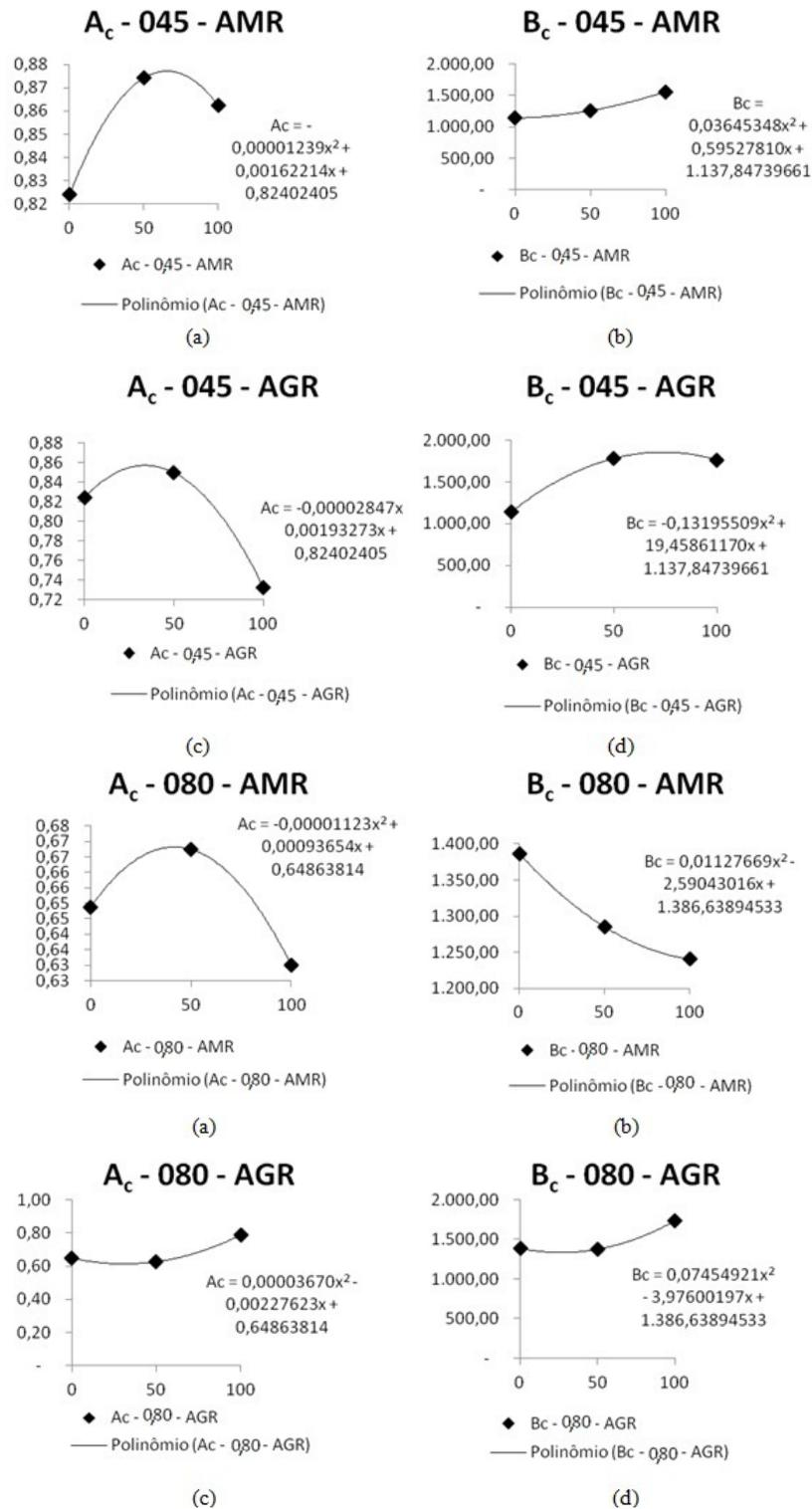


Figura 17: Comportamento dos parâmetros A_c e B_c para os fatores água/cimento de 0,45 e 0,80

5.3 Comparação entre o modelo de Mazars adaptado e curvas experimentais

A avaliação da eficácia do modelo adaptado para o concreto contendo agregado reciclado foi realizada através da descrição de curvas experimentais de compressão

axial. O modelo proposto foi implementado no software *MATLAB*[®]. A equação original de Mazars (1984) teve os parâmetros A_c e B_c substituídos pelas funções apresentadas no item 5.2 de acordo com as características das misturas do programa experimental. A seguir, as Figuras 18 a 22 apresentam graficamente comparações para algumas misturas.

Nesta validação, foram utilizadas as curvas experimentais correspondentes às amostras selecionadas para a adaptação do modelo (Tabelas 16 e 17) comparando-as às curvas geradas pelo modelo de Mazars adaptado.

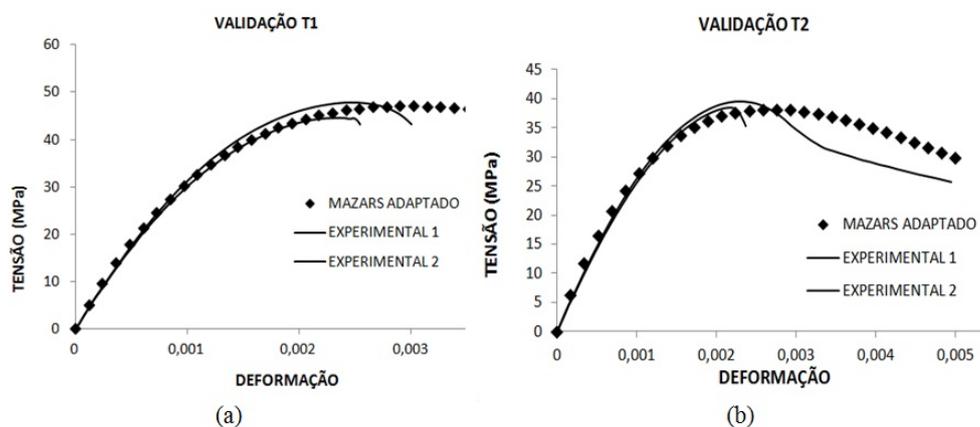


Figura 18: Validação do modelo para (a) 0% (referência) e (b) 50% AMR, ambos com fator água/cimento de 0,45

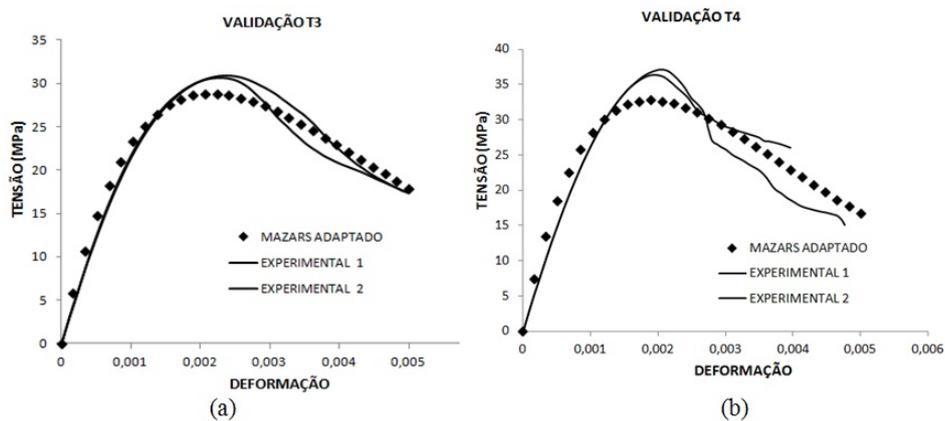


Figura 19: Validação do modelo para (a) 100% AMR e (b) 50% AGR, ambos com fator água/cimento de 0,45

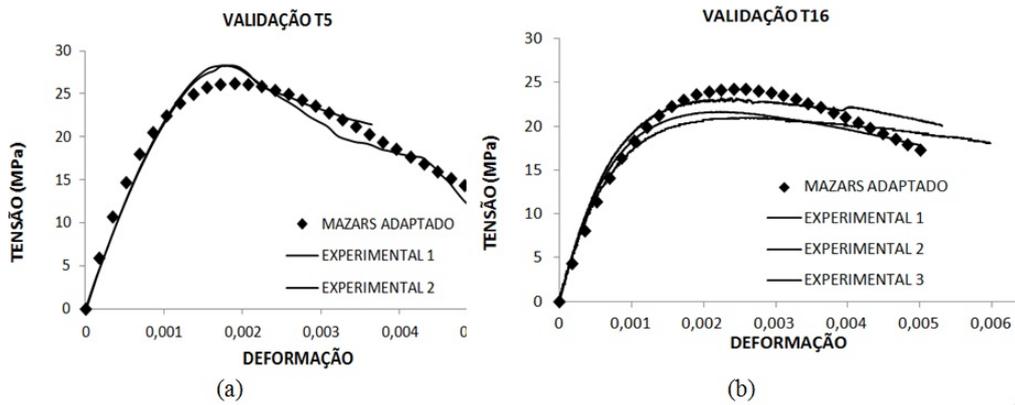


Figura 20: Validação do modelo para (a) 100% AGR 0,45 e (b) 0% (referência) fator água/cimento de 0,80

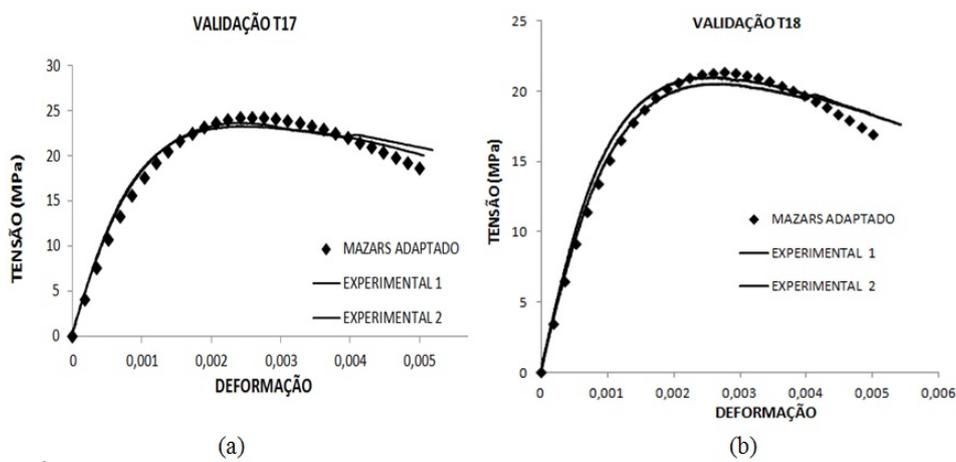


Figura 21: Validação do modelo para (a) 50% AMR e (b) 100% AMR, ambos com fator água/cimento de 0,80

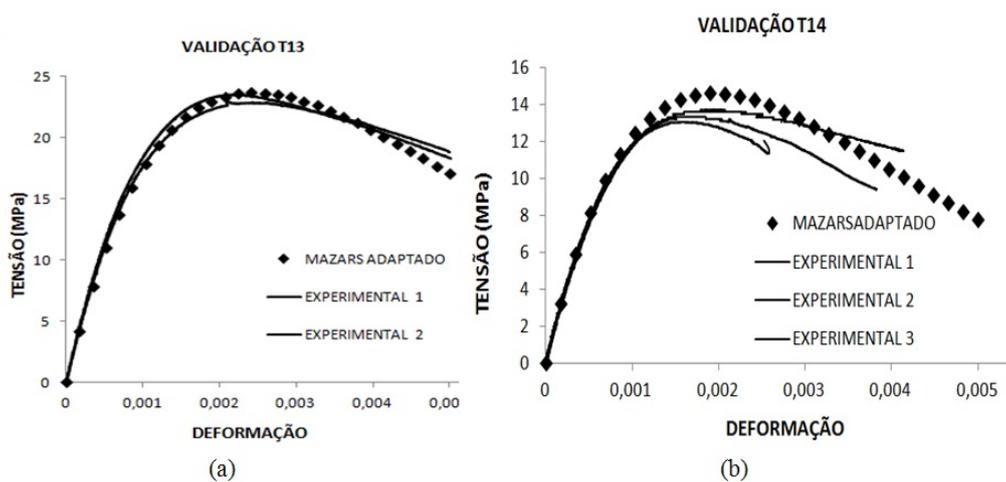


Figura 22: Validação do modelo para (a) 50% AGR e (b) 100% AGR, ambos com fator água/cimento de 0,80

É possível notar que o modelo proposto (Mazars Adaptado) não descreve com total exatidão nenhuma das curvas experimentais individualmente, tanto para as misturas com fator a/c de 0,45 quanto para o fator a/c de 0,80. Entretanto, as curvas permitem observar que o modelo de Mazars Adaptado é capaz de traçar o comportamento aproximado do concreto contendo agregado reciclado para diferentes teores de substituição, resultando em um modelo generalizado e com curvas analíticas muito próximas das curvas experimentais para todas as misturas.

A qualidade dos resultados obtidos neste trabalho pode ser avaliada pela observação de alguns pontos importantes do comportamento tensão-deformação mostrado nas Figuras 18 a 22.

1. Módulo de elasticidade

De maneira geral os resultados apresentaram bons ajustes em relação ao ramo ascendente da curva tensão-deformação, conseqüentemente em relação ao módulo de elasticidade também. Entretanto, os melhores ajustes foram conseguidos para as misturas de fator a/c igual a 0,80. Nota-se que é comum aos concretos de fator a/c igual a 0,45 a tendência do modelo em superestimar o valor desta propriedade, conforme mostrado nas Figuras 18, 19 e 20a.

2. Tensão e deformação de pico

Os resultados relativos a tensão de pico foram satisfatórios, sobretudo para os concretos de fator a/c de 0,80, os quais apresentaram menores tensões de pico. Nota-se que, para concretos com tensões de pico próximas ou acima de 30 MPa, o modelo adaptado subestima seu valor, como observado nas Figuras 18, 19 e 20a. As deformações de pico analíticas apresentam bons ajustes para todas as misturas. De acordo com a revisão de literatura apresentada, este parâmetro tem maiores valores para os concretos reciclados. O modelo consegue captar tais peculiaridades para fornecer o melhor ajuste.

5.4 Aplicação numérica do modelo de Mazars adaptado

5.4.1 Estudo de caso: Simulação do ensaio de resistência à tração na flexão segundo NBR 12142 (ABNT, 1994)

O modelo analítico validado no item anterior (Figuras 18-22) foi utilizado em simulações numéricas para representar o comportamento à compressão do concreto contendo agregado reciclado. Foram simulados, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), ensaios de resistência à tração na flexão utilizando as misturas definidas no item 4.2.1 do Capítulo 4 referentes aos fatores a/c de 0,45 e 0,80.

A escolha da simulação do ensaio de resistência à tração na flexão para a aplicação do modelo proposto deve-se aos seguintes fatores:

1. A natureza do esforço de flexão, uma combinação de esforços de compressão e tração, permite a observação do modelo adaptado sob perspectiva diferente em relação ao seu processo de validação (curvas experimentais de compressão axial);
2. Possibilita a criação de modelos numéricos de flexão de vigas para auxiliar trabalhos futuros.

O concreto contendo agregado reciclado utilizado nos resultados experimentais de flexão teve agregado reciclado com composição gravimétrica igual ao agregado mostrado na Figura 11.

As condições de geometria e carregamento para a construção do modelo seguiram as recomendações da NBR 12142 (ABNT, 1994). A figura 23 mostra esquematicamente a configuração do ensaio.

As considerações assumidas para a construção do modelo numérico utilizando o software *TNO – DIANA*[®] estão expressas na Tabela 19 a seguir. Um arquivo exemplo de entrada de dados utilizada no software está exposto no Apêndice B.

O modelo de Mazars Adaptado foi inserido na análise através de diagramas tensão-deformação de compressão (curva com 30 pontos) obtidos pela substituição

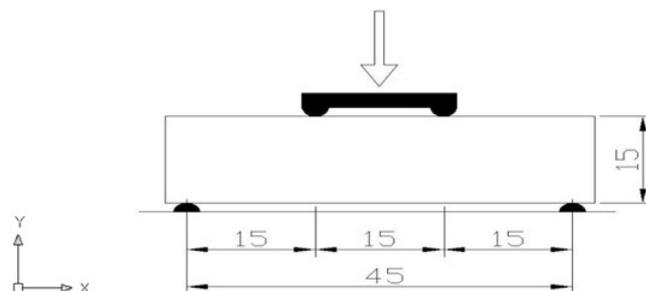


Figura 23: Geometria do ensaio de resistência à tração na flexão (dimensões em centímetros)

Tabela 19: Parâmetros utilizados no modelo numérico

PARÂMETRO	VALOR/DESCRIÇÃO
Elemento Finito	Q8MEM
Malha (altura x comprimento)	12 x 40 elementos (Tam. Elem. = 0,0125 m)
Carregamento	Y = - 0,001 m
Tipo de carregamento	Incremental
Modelo de fissuração	Distribuída/rotacional
Comportamento à compressão	Mazars Adaptado
Comportamento à tração	Com amolecimento
Largura da Banda de fissuração	h = 0,0176 m

das equações do item 5.2, escolhidas de acordo com o tipo de mistura, nas equações do Capítulo 3, modelo de Mazars original.

O comportamento à tração após a fissuração foi representado por um modelo de fissuração distribuída utilizando a função desenvolvida por Hordijk *et al.* (1986) *apud* DIANA (2005). A largura da banda de fissuração (h) foi calculada em função das dimensões do elemento finito segundo a Equação 5.9, sugerida pelo manual do software *TNO – DIANA*[®].

$$h = \sqrt{2A} \quad (5.9)$$

onde:

A = área do elemento finito.

As energias de fratura (G_f) consideradas, Tabela 20, foram calculadas para cada mistura a partir da Equação 5.10, apresentada por Huang (2005) e Peng *et al.* (2006) *apud* Xiao (2012).

$$G_f = b \frac{f_c}{E_c} \left(\frac{d}{d_{20}} \right)^{b_1} \left(\frac{t}{t_{30}} \right)^{b_2} \lambda \quad (5.10)$$

onde:

G_f = energia de fratura;

b = parâmetro com valor igual a 85,93;

b_1 = parâmetro com valor igual a 0,125;

b_2 = parâmetro com valor igual a 0,211;

d = diâmetro máximo do agregado;

d_{20} = parâmetro com valor igual a 20 mm;

t = tempo de cura em dias;

t_{30} = parâmetro com valor igual a 30 dias;

λ = parâmetro com valor igual a 1.

Tabela 20: Valores adotados para as energias de fratura (G_f)

MISTURA	G_f (N/m)
REF 0,45	103,92
50% RFA 0,45	105,39
100% RFA 0,45	98,24
50% RCA 0,45	104,46
100% RCA 0,45	96,36
REF 0,80	65,15
50% RFA 0,80	76,17
100% RFA 0,80	75,53
50% RCA 0,80	73,68
100% RCA 0,80	69,08

A Tabela 21 apresenta os resultados encontrados a partir do modelo numérico e a comparação destes com valores experimentais obtidos por Leite (2009). Este estudo de caso comparou a proximidade dos valores da tração na flexão numérica do ponto central da face inferior da viga aos valores da tração na flexão experimental, estimados a partir dos valores obtidos em ensaios de tração direta realizados por Leite (2009), utilizando a Equação 5.11, proposta pelo CEB-FIP MC 90.

$$f_t = f_{t,fl} \frac{1,5(h_b/h_0)^{0,7}}{1,0 + 1,5(h_b/h_0)^{0,7}} \quad (5.11)$$

onde:

f_t = resistência à tração direta;

$f_{t,fl}$ = resistência à tração na flexão;

h_b = altura da viga (mm);

$h_0 = 100$ mm.

Tabela 21: Resultados da modelagem numérica

MISTURA	f_t (MPa)(Exp.)	$f_{t,fl}$ (MPa) ¹	$f_{t,fl}$ (MPa) ²	Variação(%)
REF 0,45	2,50	3,75	3,58	-4,7
50% AMR 0,45	2,10	3,15	2,93	-7,1
100% AMR 0,45	1,80	2,70	2,55	-5,7
50% AGR 0,45	2,60	3,91	3,71	-5,0
100% AGR 0,45	2,30	3,45	3,33	-3,6
REF 0,80	2,10	3,15	2,96	-6,2
50% AMR 0,80	1,70	2,55	2,58	1,0
100% AMR 0,80	1,60	2,40	2,38	-1,0
50% AGR 0,80	1,80	2,70	2,67	-1,2
100% AGR 0,80	1,40	2,10	2,18	3,7

1. Resultados da equação do CEB-FIP MC 90.
2. Resultados numéricos encontrados.

A análise da quinta coluna na Tabela 21 permite observar que a maior variação percentual encontrada entre os resultados numéricos e experimentais foi igual a 7,1%. Este valor, em números absolutos, representa que o resultado numérico está 0,22 MPa menor (sinal negativo) que o resultado experimental. Tal variação máxima representa um resultado satisfatório diante das metas deste trabalho.

Nota-se também que os resultados numéricos, em sua maioria, apresentam valores de tração na flexão menores que os resultados experimentais. Este comportamento pode ser causado por dois fatores: os valores experimentais de tração na flexão obtidos pela equação do CEB-FIP MC 90 são estimados e permitem alguma variabilidade para maior ou menor, ou o modelo tende a subestimar os valores de tração na flexão. Outro comportamento que vai ao encontro dos resultados da validação do modelo é o melhor ajuste dos resultados referentes ao fator a/c igual a 0,80.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho, o comportamento mecânico à compressão do concreto contendo RCD foi estudado a partir da adaptação de um modelo de dano isotrópico. O objetivo almejado foi tornar o modelo de Mazars apto a descrever o comportamento dos concretos reciclados para diferentes percentuais de substituição de agregados, inserindo na sua formulação o teor de substituição de agregados (TSA) como variável independente adicional. Para tanto, foi considerado que os parâmetros do modelo, A e B , poderiam ser expressos como funções polinomiais de grau 2 a fim de representar as alterações mecânicas do concreto com a variação do TSA.

A metodologia aplicada para a adaptação do modelo analítico original possibilita a sua generalização, uma vez que as funções geradas para os parâmetros do modelo serão alteradas conforme as características físicas e mecânicas do concreto contendo agregado reciclado estudado. Esta dependência é criada a partir dos dados de entrada necessários para este procedimento. As curvas de ensaios de compressão axial do concreto para diversos percentuais de substituição de agregados fornecem tanto características mecânicas de cada amostra de concreto (módulo de elasticidade, tensão de pico, deformação de pico, etc.) assim como permitem a realização da análise paramétrica para obtenção dos valores dos parâmetros A e B e observação da qualidade do ajuste do modelo de Mazars às curvas experimentais.

Apesar da variabilidade inerente aos resultados experimentais obtidos com concretos reciclados contendo RCD, faz-se necessário garantir a baixa dispersão dos dados de entrada para, após aplicação dos critérios de seleção de amostras, assegurar dados suficientes para obtenção das curvas A x TSA e B x TSA. Neste trabalho,

garantiu-se a qualidade dos dados em dois momentos: na avaliação do coeficiente de variação dos ensaios de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007) e na eliminação das amostras que não atendiam aos critérios estatísticos estabelecidos.

Os resultados do ajuste do modelo de Mazars às curvas experimentais individuais do concreto (identificação paramétrica) atestam a escolha de um modelo analítico adequado para os objetivos deste trabalho. O ajuste através da regressão por mínimos quadrados apresentou menor coeficiente de determinação igual a 0,901. Por outro lado, foram obtidos valores para o R^2 muito próximos a 1, como pôde ser observado para as amostras 3 e 4 da mistura 100% AGR e fator a/c igual a 0,80, que obtiveram coeficientes iguais a 0,999. A análise paramétrica permitiu verificar também que, em relação ao parâmetro A_c , os concretos reciclados apresentam valores em intervalos inferiores ao concreto convencional, o que corrobora com a tendência de diminuição das tensões de pico com a substituição de agregado e aumento do fator a/c. Entretanto, o parâmetro B_c , que influencia a inclinação da curva no pós-pico, não sofreu alterações significativas em seu intervalo em relação ao intervalo sugerido por Mazars (1984).

As funções obtidas para os parâmetros do modelo foram baseadas em três pontos bem conhecidos, relativos aos TSA iguais a 0%, 50% e 100%, e na interpolação quadrática entre estes pontos. Esta suposição de comportamento entre os pontos permite inferir o comportamento de concretos reciclados de agregados com mesma composição, porém com teores de substituição diferentes.

A validação do modelo analítico adaptado, utilizando as curvas experimentais do concreto submetido à compressão axial, demonstrou que a metodologia proposta foi eficiente. As curvas analíticas representaram satisfatoriamente cada mistura de concreto contendo agregado reciclado, possibilitando o registro, por meio de funções polinomiais, do comportamento mecânico do concreto estudado para utilização em aplicações futuras. As discordâncias entre curvas analíticas e experimentais, evidenciadas no capítulo de discussão dos resultados, mostraram-se pouco relevantes.

Finalmente, o estudo de caso realizado mostrou que o modelo de Mazars adap-

tado, inserido em uma simulação numérica pelo MEF, atendeu à expectativa de aplicabilidade, funcionalidade e precisão. Foi possível simular, manipulando uma única variável, TSA, e propriedades mecânicas do concreto contendo agregado reciclado, 10 (dez) misturas diferentes de concreto, obtendo-se resultados numéricos muito próximos dos valores experimentais.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar dos bons resultados obtidos nesta pesquisa, o desenvolvimento do trabalho apresentou novos caminhos a serem investigados assim como algumas lacunas a serem preenchidas.

Foi observado que uma maior diversidade de misturas experimentais, em relação ao teor de substituição de agregados, fornecerá melhor precisão e confiabilidade ao modelo desenvolvido, à medida em que forem reduzidos os intervalos entre os percentuais de substituição de agregados.

Notou-se também, que a aplicação numérica desenvolvida, flexão de viga, permite outras análises utilizando o modelo adaptado, por exemplo, através da inclusão de reforço ao elemento de concreto contendo agregado reciclado, do estudo da aderência aço-concreto contendo agregado reciclado, da interação com modelos de fluência, etc.

O fator a/c é um parâmetro muito importante no estudo dos concretos reciclados. A alta absorção de água inerente ao agregado de RCD tem grande influência no comportamento mecânico destes concretos. Para o aprimoramento do modelo desenvolvido, sugere-se a implementação deste parâmetro como variável adicional a fim de torná-lo mais representativo.

O modelo de Mazars, conforme concebido originalmente, é capaz de descrever o comportamento do concreto convencional submetido à compressão, à tração e à combinações destes. Para fazer uso mais abrangente deste modelo, sugere-se a adaptação do mesmo à descrição do comportamento à tração do concreto contendo agregado reciclado, baseada na metodologia desenvolvida para o comportamento à compressão.

A seguir, estão sintetizados os próximos passos para a continuação da presente pesquisa:

1. Avaliação do modelo adaptado para concretos reciclados com teores de substituição intermediários em relação aos percentuais estudados neste trabalho;
2. Estender a aplicação do modelo a elementos de concreto reforçados;
3. Desenvolver modelo de fluência;
4. Acrescentar o fator a/c como variável;
5. Desenvolver modelo de Mazars adaptado para o comportamento de tração.

APÊNDICE A - *Curvas experimentais e Gráficos de ajustes por mínimos quadrados*

Este capítulo apresenta graficamente o ajuste do modelo isotrópico de Mazars às curvas experimentais de compressão axial para cada amostra de concreto. As curvas estão organizadas por fator água/cimento e subdivididas por mistura.

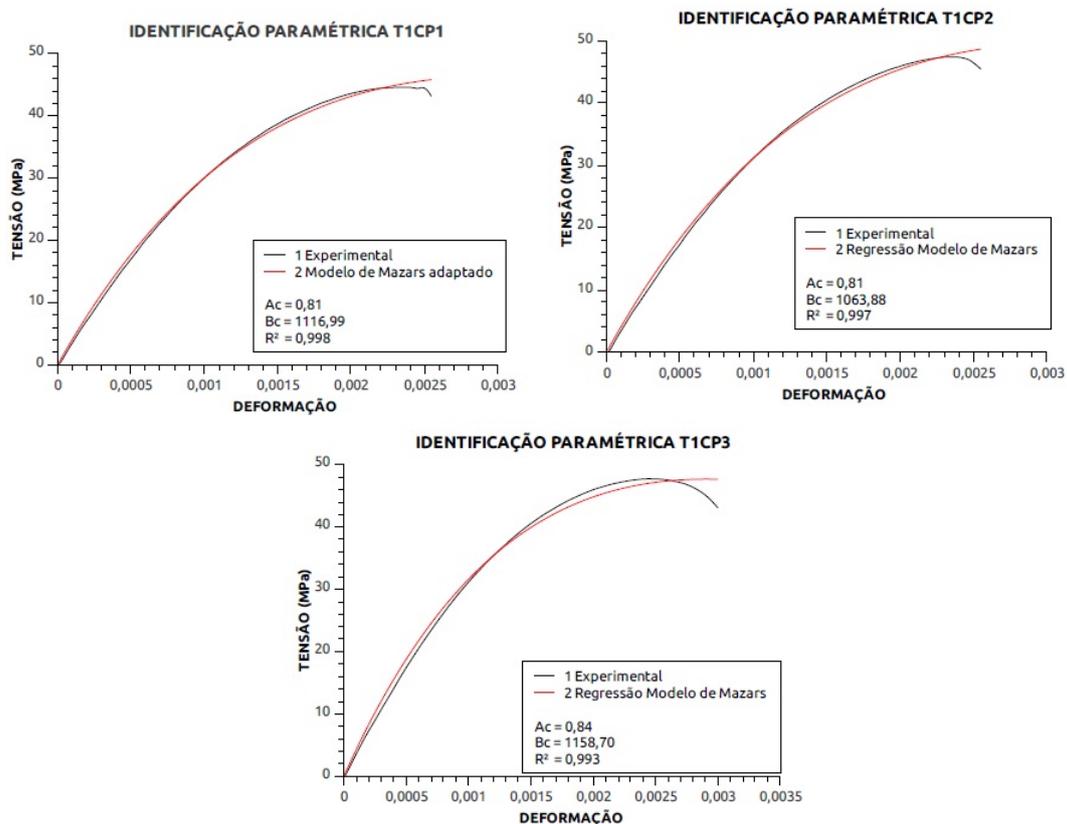


Figura 24: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 0% e fator a/c igual a 0,45

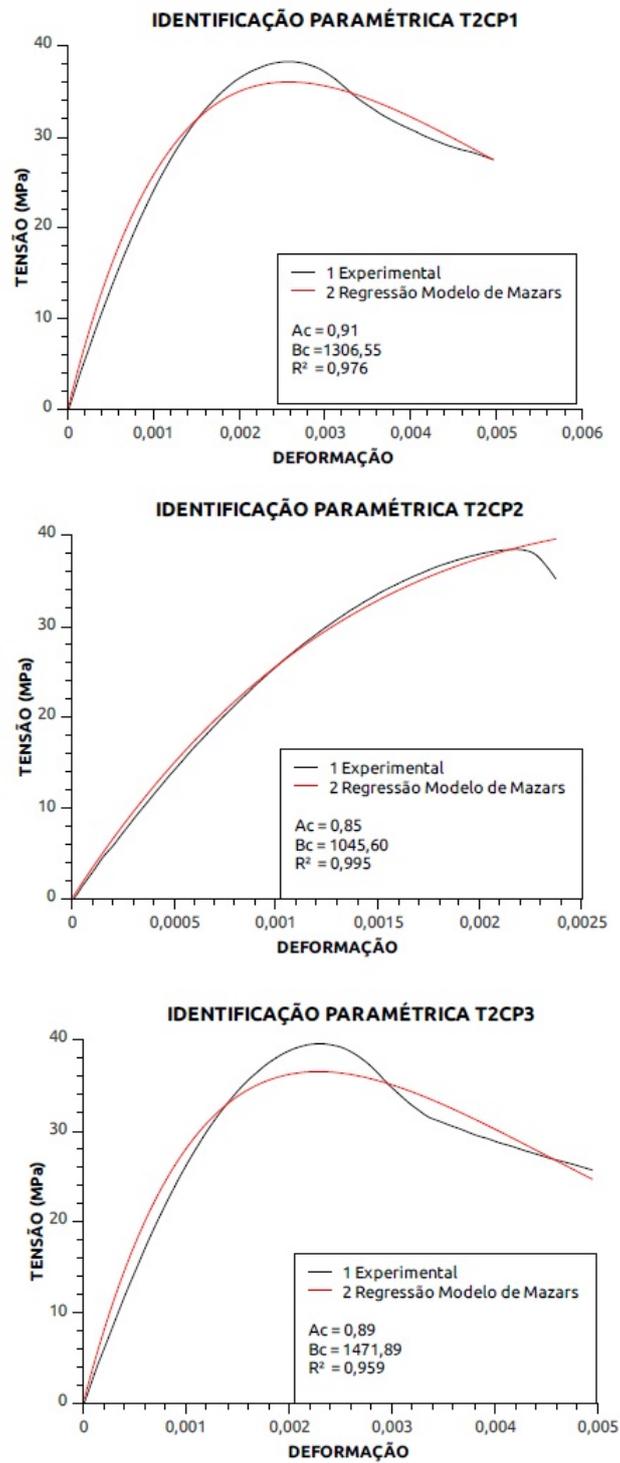


Figura 25: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e fator a/c igual a 0,45

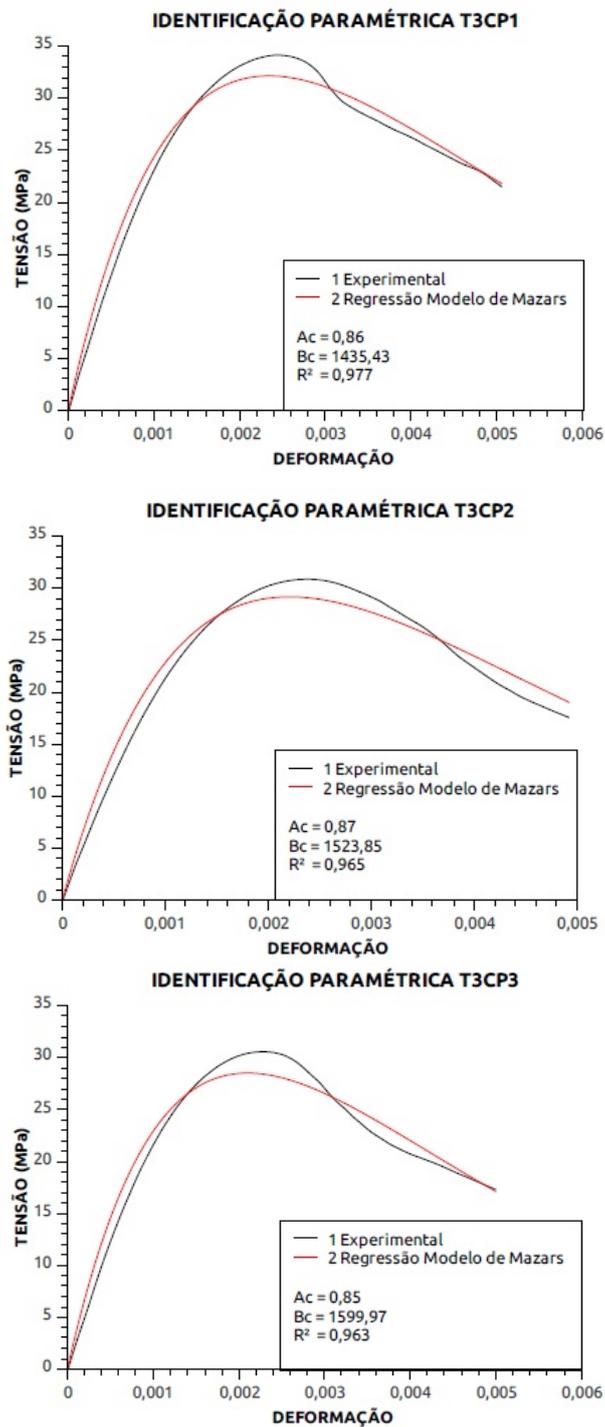


Figura 26: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AMR e fator a/c igual a 0,45

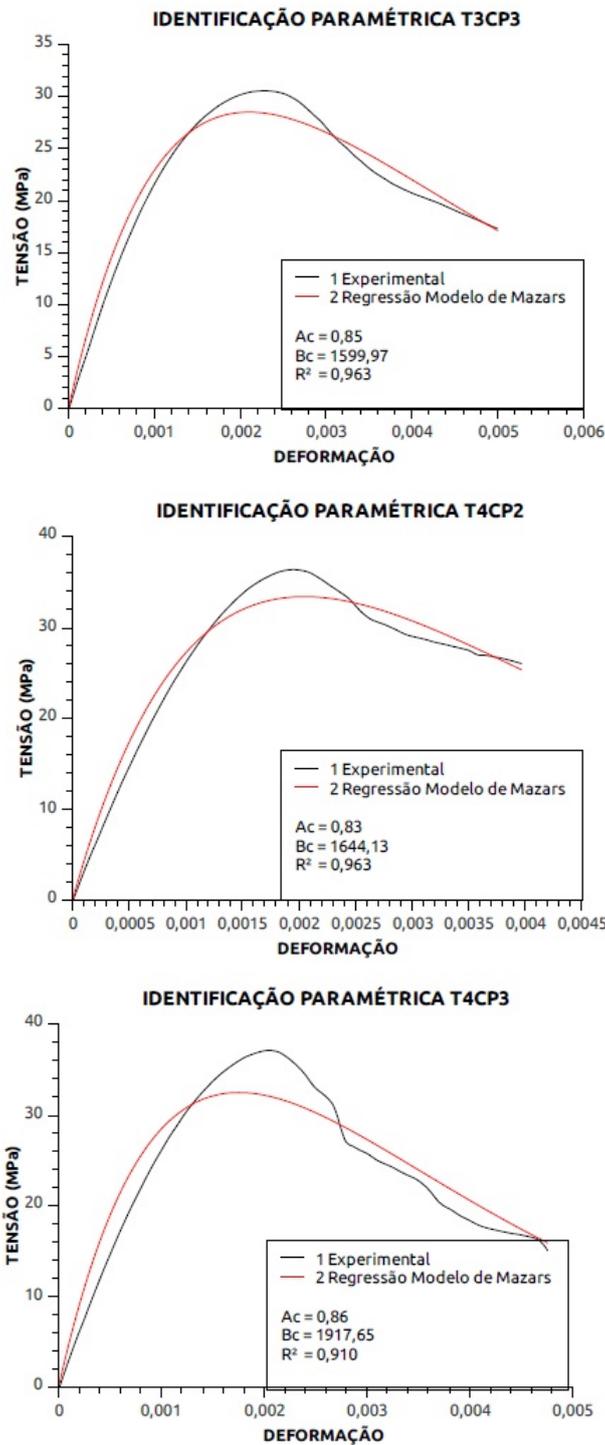


Figura 27: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AGR e fator a/c igual a 0,45

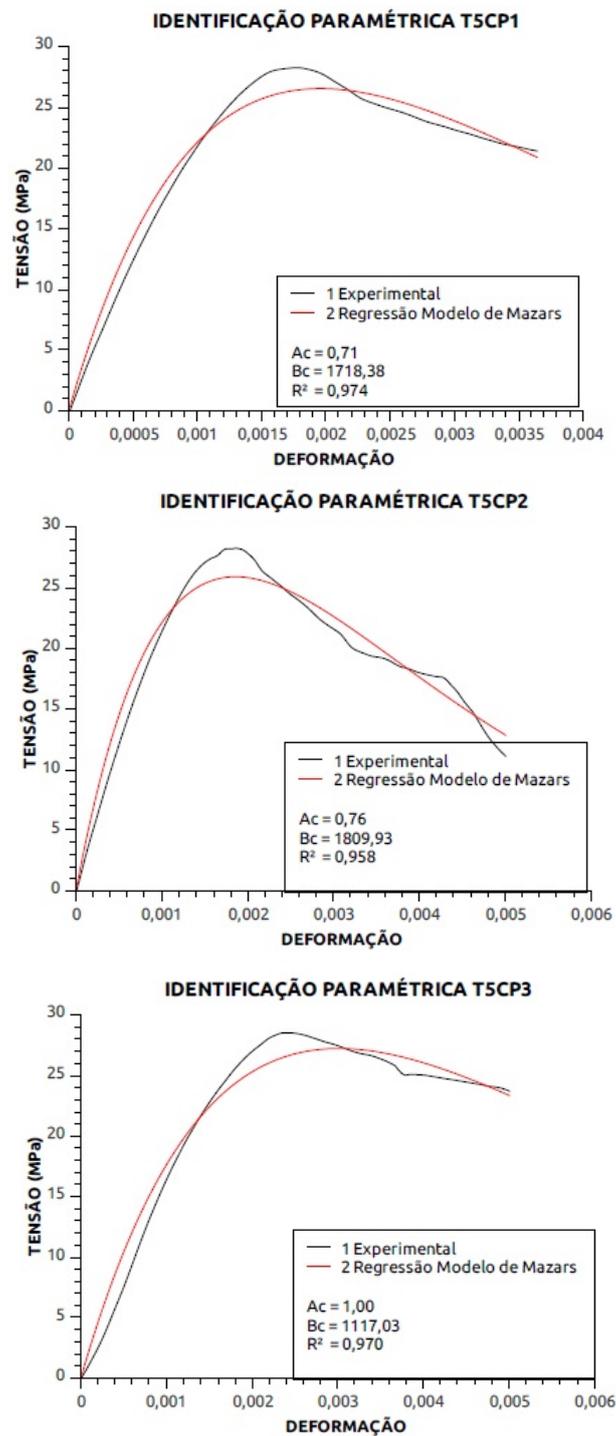


Figura 28: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AGR e fator a/c igual a 0,45

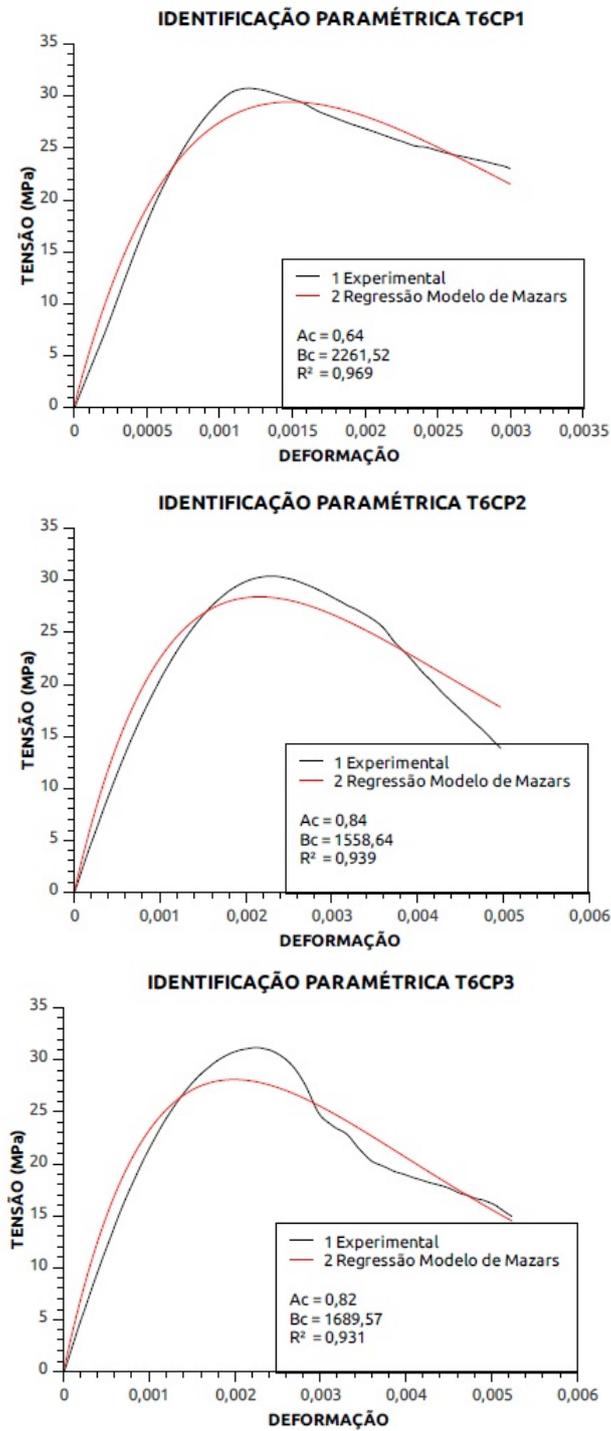


Figura 29: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e 50% AGR e fator a/c igual a 0,45

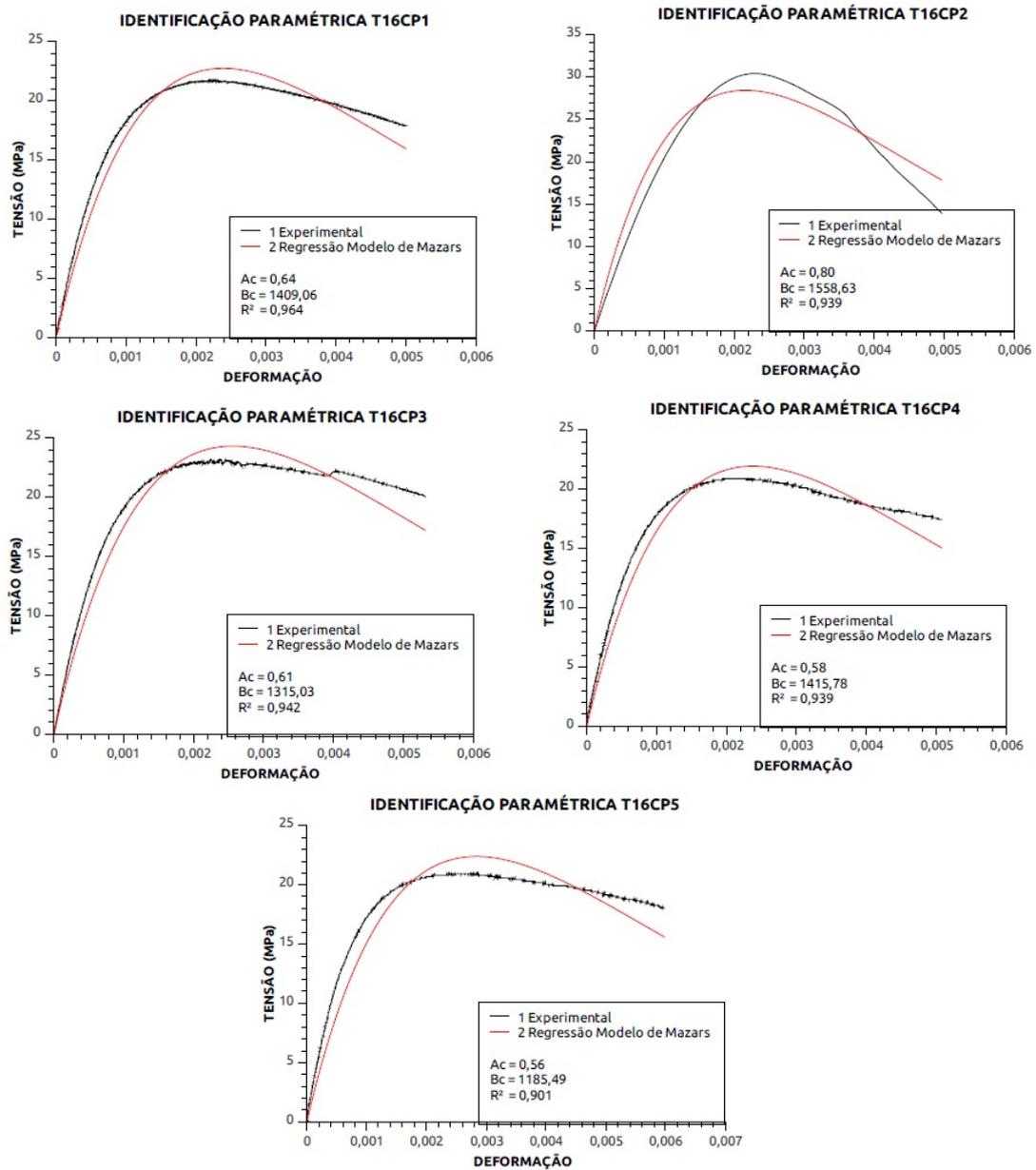


Figura 30: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 0% e fator a/c igual a 0,80

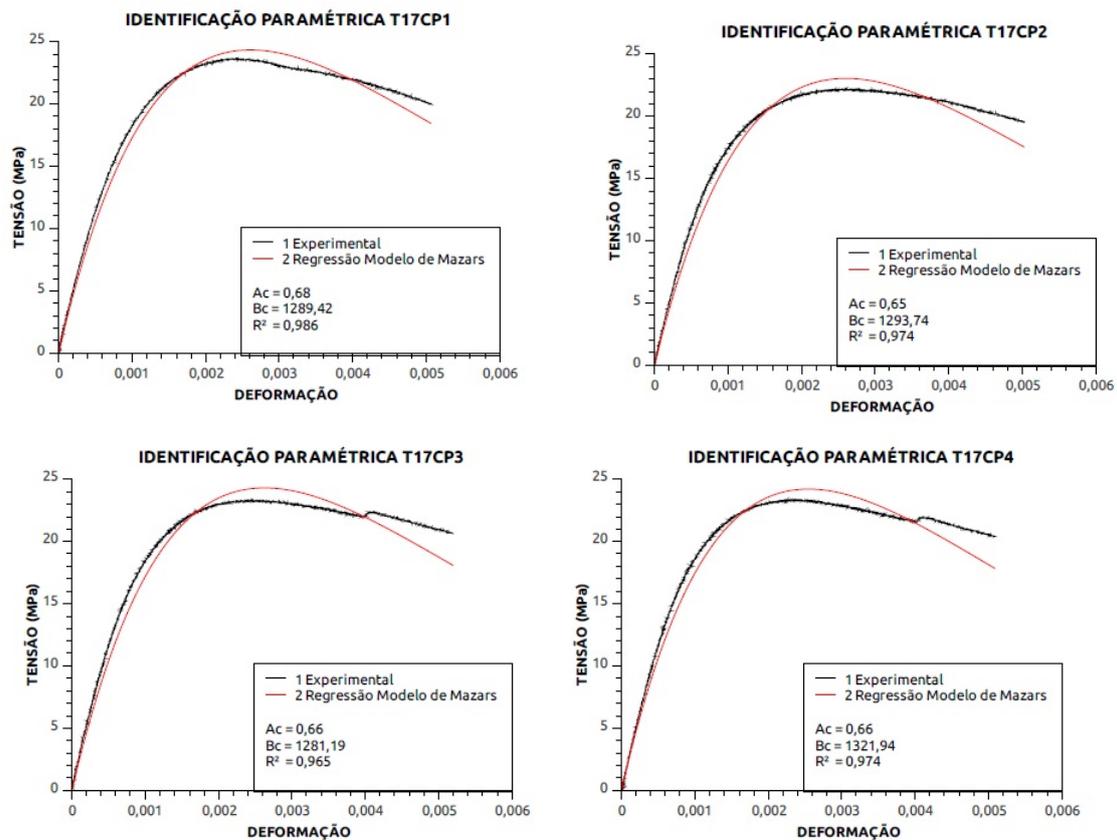


Figura 31: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e fator a/c igual a 0,80

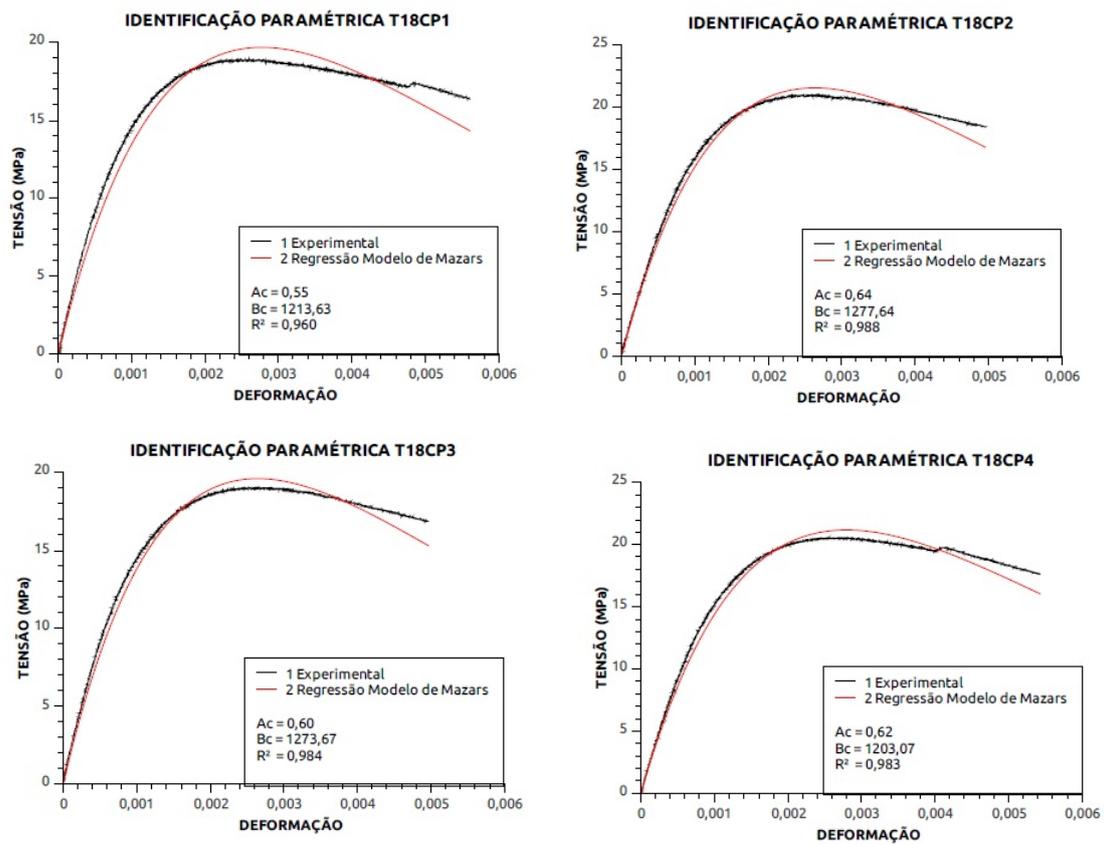


Figura 32: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AMR e fator a/c igual a 0,80

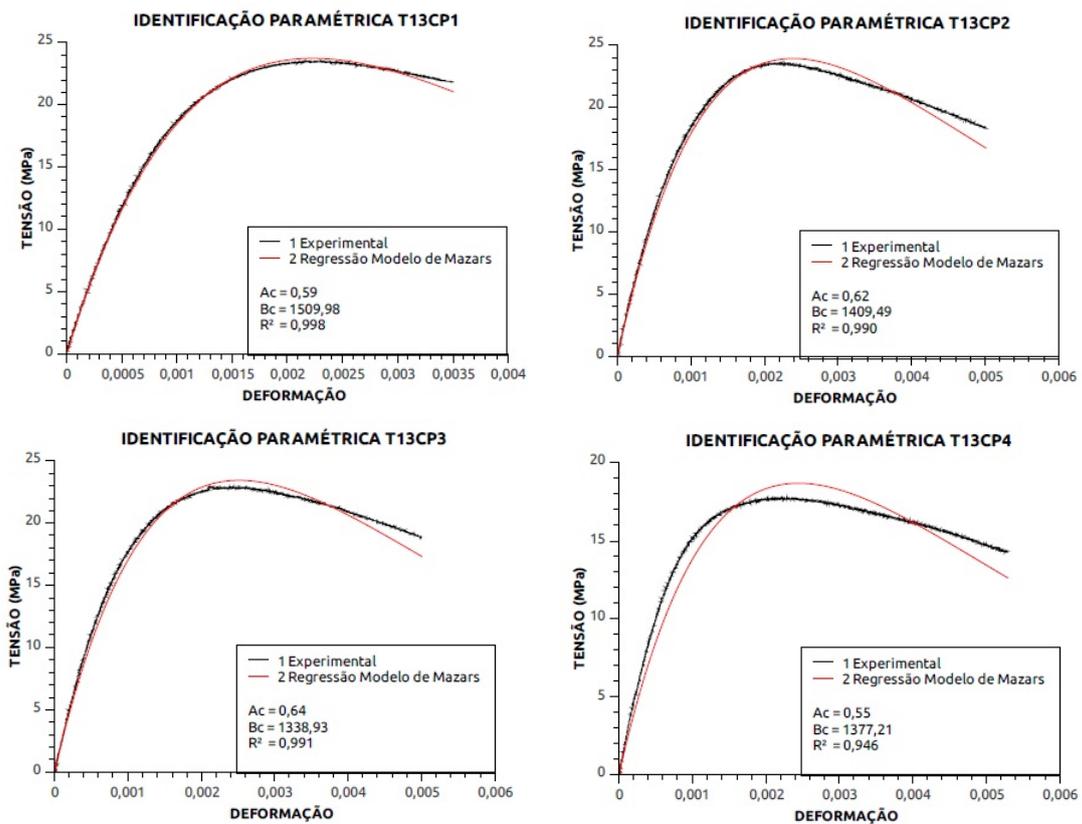


Figura 33: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AGR e fator a/c igual a 0,80

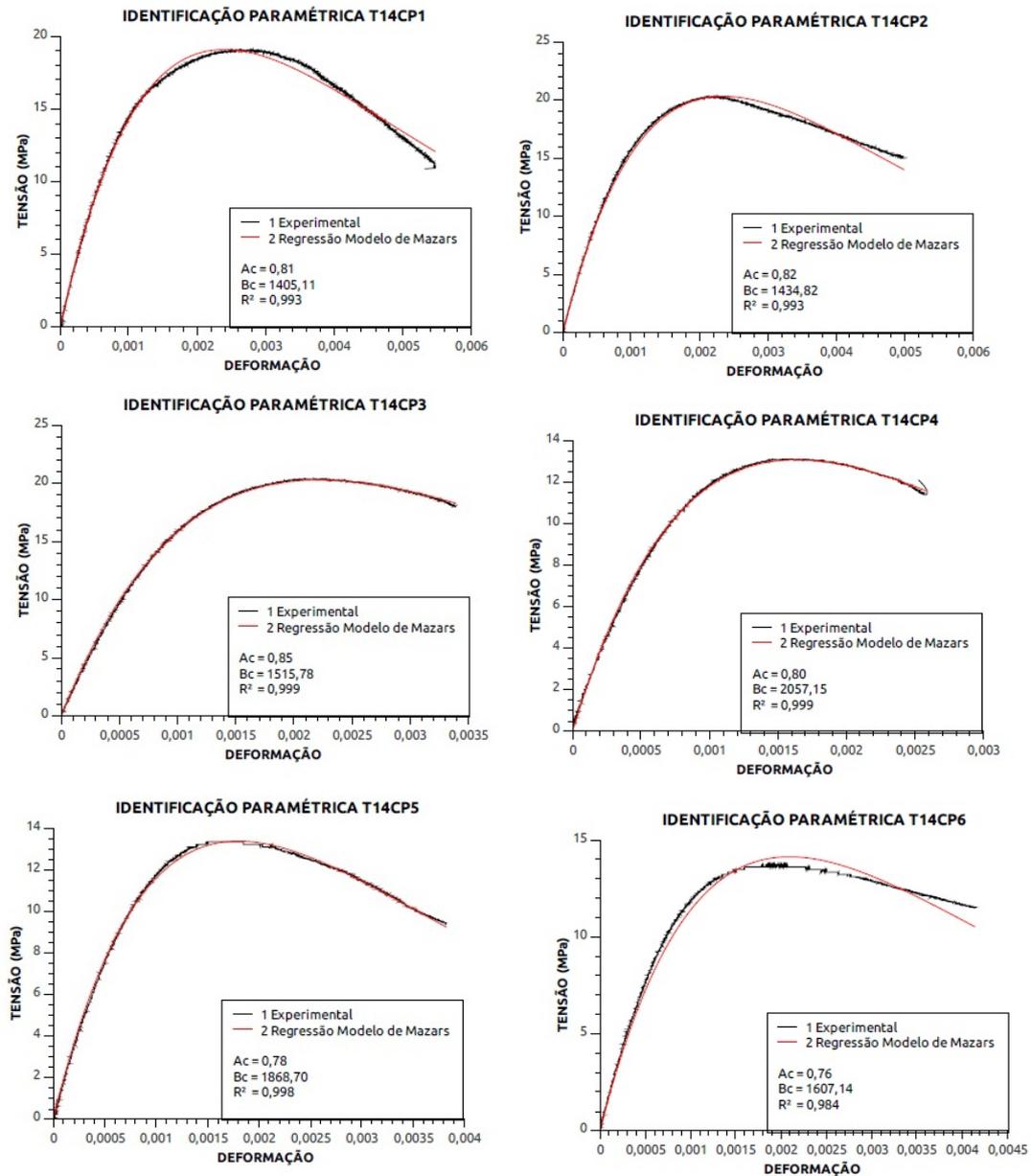


Figura 34: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 100% AGR e fator a/c igual a 0,80

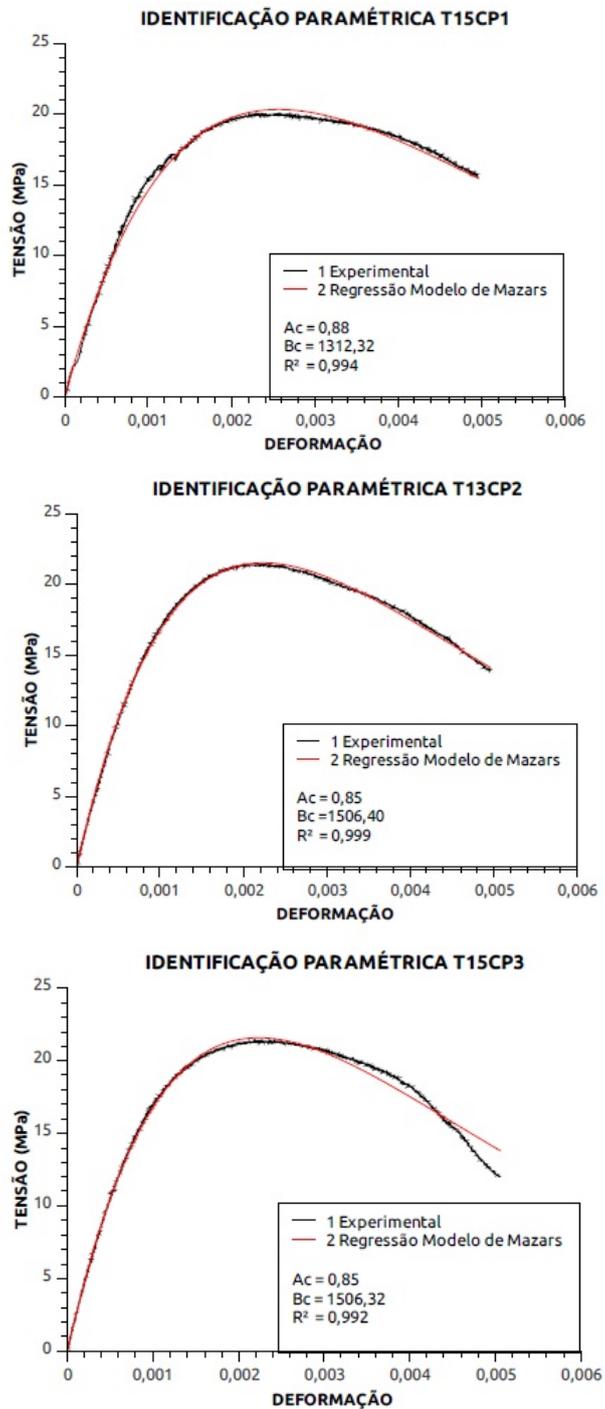


Figura 35: Ajuste por mínimos quadrados para teor de substituição de 50% AMR e 50% AGR e fator a/c igual a 0,80

APÊNDICE B - Entrada de dados para o software TNO-DIANA

B.1 Estudo de caso

FEMGEN MODEL : CASOCONCRECREF

ANALYSIS TYPE : Structural 2D

'UNITS'

LENGTH M

TIME SEC

TEMPER KELVIN

FORCE N

'COORDINATES' DI=2

1 0.000000E+00 0.000000E+00

2 0.000000E+00 1.250000E-02

3 0.000000E+00 2.500000E-02

4 0.000000E+00 3.750000E-02

.

. (*coment: nós 5 a 529 suprimidos deste arquivo*)

.

530 5.000000E-01 1.125000E-01

531 5.000000E-01 1.250000E-01

532 5.000000E-01 1.375000E-01

533 5.000000E-01 1.500000E-01

'ELEMENTS'

CONNECTIVITY

1 Q8MEM 1 2 15 14

2 Q8MEM 2 3 16 15

3 Q8MEM 3 4 17 16

4 Q8MEM 4 5 18 17

.

. (*coment: elementos 5 a 473 suprimidos deste arquivo*)

.

474 Q8MEM 513 514 527 526

475 Q8MEM 514 515 528 527

476 Q8MEM 515 516 529 528

477 Q8MEM 516 517 530 529

478 Q8MEM 517 518 531 530

479 Q8MEM 518 519 532 531

480 Q8MEM 519 520 533 532

MATERIALS

/ 1-480 / 1

GEOMETRY

/ 1-480 / 1

'MATERIALS'

1 YOUNG 2.570000E+10

POISON 2.100000E-01

TOTCRK ROTATE

TENCRV HORDYK

TENSTR 2.100000E+06

GF1 65.15000E+00

CRACKB 1.760000E-02

COMCRV MULTLN

COMPAR

(coment: 30 pontos do modelo de Mazars adaptado)

0 0

-4359200.603492 -0.0001724137931034

-8120844.705243 -0.0003448275862069

-11346367.0649 -0.0005172413793103

-14091588.13768 -0.0006896551724138

-16407195.07879 -0.0008620689655172

-18339183.18619 -0.001034482758621

-19929260.94539 -0.001206896551724

-21215221.59171 -0.001379310344828

-22231283.87719 -0.001551724137931

-23008404.51795 -0.001724137931034

-23574564.60327 -0.001896551724138

-23955032.06786 -0.002068965517241

-24172602.16321 -0.002241379310345

-24247817.71079 -0.002413793103448

-24199170.77892 -0.002586206896552

-24043287.29519 -0.002758620689655

-23795095.98601 -0.002931034482759

-23467982.92464 -0.003103448275862

-23073932.86679 -0.003275862068966

-22623658.45884 -0.003448275862069

-22126718.31731 -0.003620689655172

-21591624.89798 -0.003793103448276

-21025942.99967 -0.003965517241379

-20436379.67971 -0.004137931034483

-19828866.2956 -0.004310344827586

-19208633.32995 -0.00448275862069

-18580278.6023 -0.004655172413793

-17947829.42318 -0.004827586206897

-17314799.19999 -0.005

'GEOMETRY'

1 THICK 1.500000E-01

'SUPPORTS'

/ 27 / TR 1

/ 27 195 351 495 / TR 2

'LOADS'

CASE 1

DEFORM

195 TR 2 -0.100000E-02

351 TR 2 -0.100000E-02

'DIRECTIONS'

1 1.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00

2 0.000000E+00 1.000000E+00 0.000000E+00

3 0.000000E+00 0.000000E+00 1.000000E+00

'END'

Referências

ALVARES, M. S. **Estudo de um modelo de dano para o concreto: formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos**. São Carlos (SP); 1993. [Dissertação de mestrado em Engenharia Estrutural - Universidade de São Paulo (USP)].

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary. Detroit, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142**: concreto - determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655**: concreto - preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15115**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C469/C469M**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Philadelphia, 2007.

BABU, R; BENIPAL, G; SINGH,A. Constitutive modelling of concrete: an overview. **Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)**, India, v. 6, n. 4, p. 211-246, 2005.

BARASAN, C; YAN, C. A Thermodynamic Framework for Damage Mechanics of Solder Joints. **Journal of Electronic Packaging**, USA, v. 120, p. 379-384, 1998.

BENOUNICHE, S. **Modélisation de l'endommagement du béton hydraulique par microfissuration en compression**. Thèse de 3^a cycle, Paris, 1979.

BHIKSHMA, V; KISHORE, R. Development of stress-strain curves for recycled aggregate concrete. **Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)**, India, v. 11, n. 2, p. 253-261, 2010.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Política nacional de resíduos sólidos. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>>. Acesso em 20 Fev. 2012.

BRECCOLOTTI, M; MATERAZZI, A. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete. **Engineering Structures**, v. 32, p. 3704-3712, 2010.

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. São Carlos, 2007. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 254p. 2007.

CEB.Comité Euro-International du Béton. **Model Code For Concrete Structures, 1990**. Thomas Telford Ltd., London, 1993.

CEB. Comité Euro-International du Béton. **High Performance Concrete**. Bulletin d Information No. 228, Lausanne, Switzerland, 1995.

CIDADES E ARENAS: SALVADOR. **Portal da copa**, Brasília, Jan. 2012. Disponível em: <<http://www.copa2014.gov.br/pt-br/arena/salvador>>. Acesso em 20 Fev. 2012.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 307 de Julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimento para a gestão dos resíduos da construção. Diário Oficial da República Federativa Brasil. Brasília, 17 de Jul. de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em 20 Fev. 2012.

DIANA. **User's Manual - Release 9**. Last modified Fri Apr 29 13:34:17 CEST 2005.

DU, T; WANG, W; LIU, Z; LIN, H; GUO, T. The Complete Stress-strain Curve of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Compression Loading. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, v. 25, (2010) 862-865.

Instrucción de hormigón estructural (EHE), Ministerio de Fomento, Spain, 2001.

ETXEBERRIA, M; VÁSQUEZ, E; MARÍ, A; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production processon properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**. V.37 (2007) 735-742.

- GONÇALVES, P. C. M. **Betão com agregados reciclados: Análise comentada da legislação existente**. Lisboa - Portugal; 2007.[Dissertação de Mestrado - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa].
- GONZÁLEZ, B; MARTÍNEZ, F; CARRO, D; SEARA, S. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate.**Construction and Building Materials**. V.25 (2011) 2335-2342.
- GONZÁLEZ, B; MARTÍNEZ, F; HERRADOR, M; SEARA, S. Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate.**Construction and Building Materials**. V.28 (2012) 111-116.
- GRÜBL, P.; RÜHL, M. German committee for reinforced concrete (DafStb) code: concrete with recycled aggregate. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Eds.). **Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate**. London: Thomas Telford Pub., (1998) 409-418.
- GUO, Z. **The Strength and Deformation of Concrete (Experimental Basis and Constitutive Relationship)**[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Resultados do censo demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultadosdocenso2010.php>>. Brasília. 2010. Acesso em 20 Fev. 2012.
- JOHN, Vanderley. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: PROJETO ENTULHO BOM. Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção. A. P. Carneiro, I. A. S. Brum, J; C. S. Cassa (Eds). Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2000. p.26-43.
- KHEYRODDIN, A; MORTAZAEI, A. The effect of element size and plastic hinge characteristics on nonlinear analysis of RC frames.**Iranian Journal of Science and Technology**. v.32, n. B5 (2008) 451-470.
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. 270 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LEITE, M. B. **Avaliação do comportamento tensão-deformação de concretos reciclados submetidos à compressão axial e tração direta**. Trabalho monográfico de progressão de carreira de Professor Adjunto para Professor Titular. Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santa, Brasil, 2009.
- LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of Solid Materials**, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- LI, X. Recycling and reuse of waste concrete in china. Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. **Resources, Conservation and Recycling**, v.53 (2009) 107-112.

- LNEC E 471. **Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2006.
- MARUYAMA, I; SOGO, M; SOGABE, T; SATO, R; KAWAI, K. Flexural properties of reinforced concrete beams. **International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures**, Barcelona, 2004.
- MIER, J. G. M. V. **Fracture Processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models**. New York, CRC Press Inc., 1997.
- MAZARS, J. Evolution de la microfissuration dans les béton: formation de fissures. **Journéé d'étude ITBTP - AFREM - AFB**. Paris - 1980.
- MAZARS, J. **Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non lineaire et à la rupture du béton de structure**. Thèse de Doctorat d'État, Université Paris 6, 1984.
- PAULA, C. F. **Contribuição ao estudo das respostas numéricas não-lineares estática e dinâmica de estruturas reticuladas planas**. São Carlos (SP); 2001. [Tese de doutorado em Engenharia Estrutural - Universidade de São Paulo (USP)].
- PEDROSO, F. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e construções**. IBRACON. n. 53 (2009) 14-19.
- PITUBA, J. J. C.; PROENÇA, S. P. B. Estudo e aplicação de modelos constitutivos para o concreto fundamentados na mecânica do dano contínuo. **cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 7, n. 23 (2005) 33-60.
- POON, C. S., KOU, S. C., LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, (2002) 281-289.
- POON C. S., CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. **Construction and Building Materials**, v. 20, (2006) 569-577.
- PROENÇA, S. P. B. **Sobre modelos matemáticos do comportamento não-linear do concreto: análise crítica e contribuições**. São Carlos (SP); 1988. [Tese de doutorado em Engenharia Estrutural - Universidade de São Paulo (USP)].
- RAO, M. C; BHATTACHARYYA, S. K; BARAI, S. V. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. **Construction and Building Materials**. v. 25 (2011) 69-80.
- RILEM TC 121-DRG Specifications for concrete with recycled aggregates, in **Materials and Structures**. Paris, v. 27, (1994) 557-559.
- SHAH, S. P; SWARTZ, S. E; OUYANG, C. **Fracture Mechanics of Concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials**. John Wiley and Sons, 1995.

- SOUTSOS, M. N; TANG, K; MILLARD, S. G. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, 2011.
- TAO, X; PHILLIPS, D. V. A simplified isotropic damage model for concrete under bi-axial stress states. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, (2005) 716-726.
- VEGAS, I; IBÁÑEZ, J. A; SAN JOSÉ, J. T; URZELAI, A. Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. **Waste Management**, v. 28 (2008)565-574.
- XIAO, J; LI, J; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 35 (2005) 1187-1194.
- XIAO, J. Z; WU, Y. C; ZHANG, S. D. Fracture Analysis for a 2D Prototype of Recycled Aggregate Concrete Using Discrete Cracking Model. **Key Engineering Materials**.(2009) 681-684.
- XIAO J; LI, W; POON, C. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China: A review. **Science china Technological Sciences**. V.15 (2012).