

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

Marcela Gimenes

Estudo do comportamento mecânico do concreto com
agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo
MEF

Bauru (SP)

2020

Marcela Gimenes

**Estudo do comportamento mecânico do concreto com
agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo
MEF**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Luís Manzoli

Coorientador: Dr. Eduardo Alexandre Rodrigues

Bauru (SP)

2020

Gimenes, Marcela.

Estudo do comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo MEF/ Marcela Gimenes, 2020 103 f. : il.

Orientador: Osvaldo Luís Manzoli

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020
1. Modelagem multiescala. 2. Concreto com Agregado Reciclado. 3. Método dos Elementos Finitos. 4. Elemento Finito de Interface. 5. Modelo de dano. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MARCELA GIMENES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 27 dias do mês de abril do ano de 2020, às 09:00 horas, no(a) Via sistema de videoconferência e outras ferramentas de comunicação a distância, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. OSVALDO LUIS MANZOLI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Professor Associado ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO do(a) Departamento de Engenharia Civil / ESCOLA POLITÉCNICA DA USP, Prof. Dr. GUILLERMO ETSE do(a) Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologia / Universidad Nacional de Tucuman, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MARCELA GIMENES, intitulada **Estudo do comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado mediante modelagem multiescala pelo MEF**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. OSVALDO LUIS MANZOLI

P/ Professor Associado ANTONIO DOMINGUES DE FIGUEIREDO

P/ Prof. Dr. GUILLERMO ETSE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	5
1.2	OBJETIVO	6
2	CONCRETO RECICLADO	7
2.1	DIFERENÇAS ENTRE OS RESÍDUOS DE CONCRETO	7
2.2	GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS	8
2.3	PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO	12
2.4	RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	15
3	METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONCRETO RECICLADO	19
3.1	GERAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO	19
3.2	TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA COM ELEMENTOS FINITOS SÓLIDOS DE INTERFACE	27
3.2.1	Elemento finito sólido de interface	27
3.2.2	Cinemática de descontinuidades fortes	29
3.2.3	Zona de transição interfacial (ZTI)	31
3.3	MODELAGEM MULTIESCALA	34
3.4	MODELO DE DANO CONTÍNUO	38
3.4.1	Conceitos básicos	39
3.4.2	Critério de degradação	41
3.4.3	Lei de evolução da variável de dano	42
3.4.4	Condições de carga e descarga	44
3.4.5	Modelo constitutivo de dano isotrópico	44
3.4.6	Algoritmo de integração implícito-explicito (IMPL-EX)	45
3.5	PARÂMETROS	47
4	RESULTADOS	50
4.1	GERAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	50
4.2	FRAGMENTAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	51
4.3	TESTES BÁSICOS DO MODELO DE DANO E DA MODELAGEM CONCORRENTE ...	53
4.4	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	57
4.5	VIGAS ENTALHADAS COM DIFERENTES TRAÇOS DE CONCRETO	64

4.6	FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM DIFERENTES TEORES DE AGREGADO RECICLADO.....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1	CONCLUSÕES.....	81
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	82
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA CENTRAL DE RECICLAGEM DE RCD (ADAPTADO DE EGUCHI ET AL., 2007).....	10
FIGURA 2.2 SEPARADOR ADR (ADAPTADO DE LOTFI ET AL., 2015).....	11
FIGURA 2.3 DESENHO ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO “SINK AND FLOAT” (ÂNGULO, 2005).....	12
FIGURA 3.1 REPRESENTAÇÃO DE CONCRETO CONVENCIONAL COM AGREGADO ELÍPTICO (A) SEM POROS; (B) COM POROS CIRCULARES E (C) COM POROS ELÍPTICOS WANG ET AL. (2015).....	20
FIGURA 3.2 ILUSTRAÇÃO DO ALGORITMO <i>TAKE-AND-PLACE</i> PARA AGREGADOS NATURAIS (ADAPTADO DE WRIGGERS ET AL., 2006)	23
FIGURA 3.3 DIFERENTES TAMANHOS DE AGREGADOS RECICLADOS GRAÚDOS. LIU ET AL. (2011) 23	23
FIGURA 3.4 GEOMETRIAS CIRCULARES E POLIGONAIS CONVEXAS ADOTADAS POR PENG ET AL. (2016) NA REPRESENTAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	24
FIGURA 3.5 SEÇÃO TRANSVERSAL DO CONCRETO RECICLADO MODELADO E REPRESENTAÇÃO VIA MEF REALIZADA POR XIAO ET AL. (2013).....	24
FIGURA 3.6 GERAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS. ADAPTADO DE RODRIGUES ET AL. (2020) ...	25
FIGURA 3.7 REPRESENTAÇÕES PRÉ-DEFINIDAS DE AGREGADOS RECICLADOS	26
FIGURA 3.8 VIGA ENTALHADA COM REGIÃO CENTRAL EM MESOESCALA E AGREGADOS RECICLADOS OCTOGONAIS	26
FIGURA 3.9 ESQUEMA DE FRAGMENTAÇÃO DA MALHA: MALHA ORIGINAL, DUPLICAÇÃO DOS NÓS E REDUÇÃO DOS ELEMENTOS, INTRODUÇÃO DOS ELEMENTOS DE INTERFACES E MALHA FRAGMENTADA (ADAPTADA DE MANZOLI ET AL., 2016).	27
FIGURA 3.10 ELEMENTO FINITO TRIANGULAR COM ALTA RAZÃO DE ASPECTO (MANZOLI ET AL., 2016)	27
FIGURA 3.11 (A) CINEMÁTICA DE DESCONTINUIDADE FRACA; (B) CINEMÁTICA DE DESCONTINUIDADE FORTE (OLIVER ET AL., 1999)	30
FIGURA 3.12 REPRESENTAÇÃO BIDIMENSIONAL DO COMPOSTO NO ESQUEMA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA (RODRIGUES, 2015).....	32
FIGURA 3.13 ILUSTRAÇÃO DO AR EM MESOESCALA, COM DESTAQUE AOS ELEMENTOS DAS ZTIS.	33
FIGURA 3.14 PROPAGAÇÃO DA FRATURA EM (A) UMA SEÇÃO MICROTOMOGRÁFICA DE UM CONCRETO CONVENCIONAL CARREGADO EM COMPRESSÃO POR LANDIS ET AL. (2009); (B) CONCRETO DE AGREGADO RECICLADO MODELADO POR XIAO ET AL. (2013).....	33
FIGURA 3.15 VIGA EM MULTIESCALA COM ELEMENTOS FINITOS DE ACOPLAMENTO (EM VERMELHO) COMPATIBILIZANDO DUAS MALHAS NÃO CONFORMES	34
FIGURA 3.16 ESQUEMA DE ACOPLAMENTOS DE MALHAS NÃO CONFORMES.	35
FIGURA 3.17 ELEMENTO DE COMPATIBILIZAÇÃO CONSTRUÍDO A PARTIR DE ELEMENTO CONVENCIONAL COM UM NÓ ADICIONAL (BITENCOURT ET AL., 2015).....	35
FIGURA 3.18 REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO (ADAPTADA DE LEMAITRE,1978)	39
FIGURA 3.19 LEI DE EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL INTERNA (A) COM DANO PERFEITO (B) ENDURECIMENTO LINEAR (C) ABRANDAMENTO LINEAR (D) ENDURECIMENTO EXPONENCIAL (E) ABRANDAMENTO EXPONENCIAL.....	42
FIGURA 3.20 DIAGRAMA DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO AXIAL (MAEDO, 2015).	44
FIGURA 4.1 GERAÇÃO DE AGREGADOS NO ESPÉCIMEN DOG-BONE PARA OS TEORES DE AR DE (A) 0%; (B) 25%; (C) 50%; (D) 75%; (E)100%	50
FIGURA 4.2 GERAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS SEGUNDO DIFERENTES CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	50
FIGURA 4.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO ALEATÓRIA	51

FIGURA 4.4 FRAGMENTAÇÃO DE MALHA DE CONCRETO COM ELEMENTO DE INTERFACE DO AGREGADO (EM AZUL), ELEMENTO DE INTERFACE DA MATRIZ (AMARELO) E ELEMENTO DA ZTI (ROSA).	52
FIGURA 4.5 FRAGMENTAÇÃO DE MALHA DO CAR	52
FIGURA 4.6 CURVAS DE CARGA POR DESLOCAMENTO PARA TRAÇÃO E COMPRESSÃO UNIAXIAL	54
FIGURA 4.7 CONFIGURAÇÕES DEFORMADAS DA AMOSTRA: A) EM TENSÃO E B) EM COMPRESSÃO.	54
FIGURA 4.8 GEOMETRIA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E MALHAS NÃO-CONFORMES PARA OS TESTES BÁSICOS SIMULTÂNEOS EM MÚLTIPLAS ESCALAS 2D.	55
FIGURA 4.9 RESULTADOS DOS CAMPOS DE DESLOCAMENTO PARA O TESTE DE TENSÃO: (A) DESLOCAMENTO HORIZONTAL E (B) DESLOCAMENTO VERTICAL (EFEITO DE POISSON) EM MALHAS DEFORMADAS (FATOR DE ESCALA DE 300).	56
FIGURA 4.10 REPRESENTAÇÃO DAS VIGAS ENTALHADAS ENSAIADAS	57
FIGURA 4.11 CURVAS GRANULOMÉTRICAS A,B E C	58
FIGURA 4.12 MODELO NUMÉRICO PARA ANÁLISE EM MULTIESCALA DAS VIGAS ENTALHADAS.	59
FIGURA 4.13 REPRESENTAÇÃO EM MESOESCALA DAS DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS A, B E C, RESPECTIVAMENTE.	60
FIGURA 4.14 CURVAS DE CARGA-DEFLEXÃO DO MIX 1: (A) RESPOSTAS NUMÉRICAS; (B) RESULTADOS EXPERIMENTAIS.	61
FIGURA 4.15 CURVAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA DO MIX 1: (A) RESPOSTAS NUMÉRICAS; (B) RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
FIGURA 4.16 PROCESSO DE FRATURA NAS AMOSTRAS A1, B1 E C1, RESPECTIVAMENTE.	62
FIGURA 4.17 TRAJETÓRIA DA FRATURA (SIREGAR ET AL., 2017).....	62
FIGURA 4.18 CURVAS DE CARGA-DEFLEXÃO DO MIX 2: (A) RESPOSTAS NUMÉRICAS; (B) RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	63
FIGURA 4.19 CURVAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA DO MIX 2: (A) RESPOSTAS NUMÉRICAS; (B) RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
FIGURA 4.20 PROCESSO DE FRATURA NAS AMOSTRAS A2, B2 E C2, RESPECTIVAMENTE.....	64
FIGURA 4.21 CONFIGURAÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS POR CASUCCIO ET AL. (2008).....	65
FIGURA 4.22 CURVAS NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 18 MPa	68
FIGURA 4.23 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 18 MPa	69
FIGURA 4.24 REPRESENTAÇÃO DO FRATURAMENTO NAS VIGAS (A) A18; (B) B18; (C) G18;	69
FIGURA 4.25 CURVAS NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 37 MPa	70
FIGURA 4.26 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 37 MPa	70
FIGURA 4.27 REPRESENTAÇÃO DO FRATURAMENTO NAS VIGAS (A) A37; (B) B37; (C) G37;	70
FIGURA 4.28 CURVAS NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 48 MPa	71
FIGURA 4.29 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 48 MPa	71
FIGURA 4.30 REPRESENTAÇÃO DO FRATURAMENTO NAS VIGAS (A) A48; (B) B48; (C) G48;	72
FIGURA 4.31 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA AS VIGAS COM F_{CK} DE 37 MPa E AGREGADO TIPO A.....	73
FIGURA 4.32 DIMENSÕES DO ESPÉCIMEN (JAPAN CONCRETE INSTITUTE, 2003).....	74
FIGURA 4.33 CURVAS DE CARGA X ABERTURA DE FISSURA PARA O CONCRETO DE AGREGADOS NATURAIS	75
FIGURA 4.34 CURVAS EXPERIMENTAIS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE CONCRETO DE AGREGADO RECICLADO (RIAZ ET AL., 2015).....	76

FIGURA 4.35 CURVAS NUMÉRICAS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA DIFERENTES COMPOSIÇÕES DE CONCRETO DE AGREGADO RECICLADO	77
FIGURA 4.36 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA O CAR-25	77
FIGURA 4.37 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA O CAR-50	78
FIGURA 4.38 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA O CAR-75	78
FIGURA 4.39 CURVAS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS DE FORÇA POR ABERTURA DE FISSURA PARA O CAR-100	78
FIGURA 4.40. MALHAS DEFORMADAS COM DIFERENTES TEORES DE AGREGADOS RECICLADOS ..	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1. COMPARATIVO DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO CAR	14
TABELA 2-2 REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO AO PREPARO DE CONCRETO SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL	16
TABELA 2-3 REQUISITOS PARA AGREGADO RECICLADO DESTINADO AO PREPARO DE CONCRETO ESTRUTURAL.....	17
TABELA 2-4 VISÃO GERAL DOS CAMPOS DE APLICAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS NO CONCRETO	18
TABELA 3-1. ETAPAS DA MODELAGEM DO CONCRETO RECICLADO	19
TABELA 3-2. ETAPAS DE GERAÇÃO DO ALGORITMO <i>TAKE-AND-PLACE</i>	21
TABELA 3-3. ETAPAS DE COLOCAÇÃO DO ALGORITMO <i>TAKE-AND-PLACE</i>	22
TABELA 3-4. DESIGNAÇÃO ZTIS DO CAR.....	33
TABELA 3-5. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO ALGORITMO DE INTEGRAÇÃO IMPL-EX	46
TABELA 3-6. VALORES DE Gf_0 PARA CADA DIÂMETRO MÁXIMO	47
TABELA 4-1 PARÂMETROS DE MATERIAL PARA TESTES BÁSICOS SIMULTÂNEOS EM MÚLTIPLAS ESCALAS 2D.....	55
TABELA 4-2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ENERGIA DE FRATURA DE CADA TIPO DE CONCRETO USADO PARA O TESTE EXPERIMENTAL.....	58
TABELA 4-3. PROPRIEDADES DE FRATURA DOS ELEMENTOS DE INTERFACE	59
TABELA 4-4. PARÂMETROS EXPERIMENTAIS OBTIDOS POR CASUCCIO ET AL. (2008)	65
TABELA 4-5. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO A18.....	66
TABELA 4-6. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO B18.....	66
TABELA 4-7. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO G18.....	66
TABELA 4-8. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO A37.....	66
TABELA 4-9. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO B37.....	67
TABELA 4-10. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO G37.....	67
TABELA 4-11. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO A48.....	67
TABELA 4-12. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO B48.....	67
TABELA 4-13. PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DO CONCRETO G48.....	68
TABELA 4-14 - COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS DE CONCRETO (RIAZ, ET AL.,2015).....	74
TABELA 4-15 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS COMPOSIÇÕES DE CONCRETO	75
TABELA 4-16 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO DAS VIGAS ENSAIADAS POR RIAZ ET AL. (2015).....	76

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
AN	Agregado natural
AR	Agregado reciclado
ARC	Agregado de resíduo de concreto
ARM	Agregado de resíduo misto
BSCJ	Building Contractors Society of Japan
CAR	Concreto com agregado reciclado
CONAMA	Conselho Nacional do Meio ambiente
RC	Resíduos de concreto
RCD	Resíduos de construção e demolição
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
SINDUSCON	Sindicato da Indústria da Construção Civil
TFM	Técnica de Fragmentação de Malhas
ZTI	Zona de transição interfacial

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família por terem me dado todo o apoio e tranquilidade necessários para prosseguir com meus estudos. Marisa, Caio, Igor e Tony, dedico essa conquista a vocês. Ao meu marido Luiz Felipe, por cuidar de mim e ser tão compreensivo principalmente nas datas críticas desta pesquisa.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Osvaldo Luís Manzoli, que ainda na graduação me deu a oportunidade de ser sua orientada de iniciação científica e desde então tem me acompanhado e proporcionado oportunidades de crescimento, abrindo meus horizontes na vida acadêmica com sua vasta experiência e avanço na sua área de pesquisa.

Em especial, agradeço ao meu coorientador Dr. Eduardo Alexandre Rodrigues, que foi meu principal colaborador na realização deste trabalho, estando sempre acessível para colocarmos em prática todas as ideias que surgiram ao longo desses dois anos. Esse trabalho não teria sido possível sem o seu auxílio.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, em especial aos professores Dr. Caio Gorla Nogueira e Dr. Carlos Eduardo Javaroni, com quem sempre pude contar para buscar conhecimento e direção na vida acadêmica.

Ao Dr. Michael Andrade Maedo e Prof. Dr. Luis A. G. Bitencourt, cujos trabalhos serviram como base para essa pesquisa, agradeço pela dedicação despendida na revisão da dissertação.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa Heber Agnelo Fabbri, Pedro Rogério Cleto, Murilo Camargo, Higor Biondo de Assis e José Henrique Ambiel, agradeço pela convivência diária, tenho muita admiração por todos e espero poder retribuir toda a ajuda.

Também não poderia deixar de agradecer pelo privilégio de desenvolver essa pesquisa nas instalações da Unesp, instituição responsável por toda minha formação desde o ensino médio no Colégio Técnico “Professor Isaac Portal Roldán” seguida pela graduação e pós-graduação na Faculdade de Engenharia de Bauru. Sendo assim, agradeço aos docentes e servidores, em especial da pós-graduação pelo suporte prestado.

Finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa nos primeiros meses e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2018/05784-3, pela bolsa de estudos e demais recursos destinados à essa pesquisa e à minha obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de análise numérica do concreto com agregados reciclados (CAR). A ferramenta desenvolvida facilita a avaliação do comportamento mecânico do material, verificando a viabilidade de sua utilização para fins estruturais. Considerando que no Brasil o emprego atual do material ainda é bastante limitado em comparação com outros países, o CAR pode vir a ser utilizado mais ampla e adequadamente, trazendo vantagens de caráter estrutural, econômico, e principalmente ambiental. Em termos de modelagem do CAR, a ocorrência de particularidades em nível mesoscópico exige um modelo em escala mais refinada para representar as propriedades alteradas do agregado reciclado (AR), de modo que foi desenvolvido um gerador de agregados reciclados para representar sua composição variada. Os mecanismos de falha que ocorrem nas interfaces características do agregado reciclado e da matriz de concreto introduzem não linearidade ao problema mecânico. Para que haja a representação dessa não linearidade, a estratégia de modelagem proposta recorre ao emprego da técnica de fragmentação de malha de elementos finitos juntamente com um modelo constitutivo de dano. Essa técnica de fragmentação baseia-se no emprego de elementos finitos com alta razão de aspecto, os quais poderão ser utilizados para representar as fases adicionais desse material compósito, correspondentes às diferentes zonas de transição interfaciais (ZTIs) intrínsecas do CAR em mesoescala, e consequentemente, caminhos potenciais para a propagação de fraturas. Um modelo constitutivo baseado na mecânica do dano contínuo é empregado para representar o comportamento não linear dessas diferentes fases do CAR, o qual, juntamente com a técnica de fragmentação citada, compõe ferramentas valiosas para o estudo da influência do AR no comportamento mecânico do CAR. A validação da metodologia se deu através de testes preliminares para calibração de parâmetros, e posteriormente por meio de simulações de casos mais avançados realizados em experimentos, nos quais os resultados numéricos qualitativos e quantitativos obtidos são comparados com os respectivos resultados experimentais colhidos da literatura. Na maioria dos casos simulados foi obtida grande correspondência entre os resultados, indicando que o modelo concebido é capaz de representar o CAR na distribuição 2D de agregados, na simulação de ZTIs e na propagação de fissuras devido ao dano por tração. A influência do AR foi maior em concretos com resistência mais elevada e além disso, uma substituição parcial de até 25% de agregado natural (AN) por AR não produziu grande perda na capacidade resistente.

Palavras-chave: Modelagem multiescala; Concreto com Agregado Reciclado; Método dos Elementos Finitos; Elemento Finito de Interface; Modelo de dano.

ABSTRACT

This research presents a numerical analysis proposal for recycled aggregate concrete (RAC), whose recycled aggregates are obtained from the crushing of concrete waste. The developed tool facilitates the mechanical behavior evaluation of the RAC, verifying the feasibility of its use for structural purposes. Considering that in Brazil the current use of the material is still quite limited in comparison with other countries, the RAC could be used more widely and properly, bringing structural, economic and mainly environmental advantages. Due to the occurrence of mesoscopic specificities, the RAC modeling requires a more refined scale model to represent the altered properties of recycled aggregate, so that a recycled aggregate generator was developed to represent its variable composition. The failure mechanisms that occur at the several interfaces of the recycled aggregate (RA) and concrete matrix introduce nonlinearity to the mechanical problem. In order to represent this nonlinearity, the proposed modeling strategy uses the finite element mesh fragmentation technique together with robust and stable damage constitutive model. This fragmentation technique is based on the use of finite elements with high aspect ratio, which can be used to represent the additional phases of this composite material, corresponding to the different mesoscale RAC intrinsic interfacial transition zones (ITZs), as well as potential pathways for the propagation of fractures. A constitutive model based on the Continuum damage mechanics is used to represent the non-linear behavior of these different RAC phases, which together with the cited fragmentation technique are valuable tools for the study of the influence of recycled aggregate on the mechanical behavior of concrete. The validation of the methodology occurred through preliminary tests for calibration of parameters and later through simulations of more advanced cases carried out in experiments in which the qualitative and quantitative numerical results obtained are compared with the respective experimental results from the literature. A great correspondence between the results was obtained in most of the simulated cases, indicating that the model is capable of representing the RAC in the 2D distribution of aggregates, simulation of ITZs and in the propagation of cracks due to tension damage. The influence of RA was greater in concretes with higher matrix strength and, in addition, a partial substitution of up to 25% of natural aggregate (NA) by RA did not produce a great loss in resistant capacity.

Keywords: Multiscale approach; Finite Element Method; Interface finite element; Damage model; Recycled Aggregate Concrete.

1 INTRODUÇÃO

Por ser um material de ampla utilização, o concreto figura entre os principais resíduos sólidos provenientes da construção civil e demolições, sendo um dos mais críticos no tocante ao volume gerado (ÂNGULO, 2000; TAM, 2006; AREZOUMANDI, 2015). Uma das medidas comumente empregadas para sua reutilização é a britagem. Após o processo, o material descartado pode ser empregado novamente na construção civil, servindo de base para adequação de cotas, pavimentação de vias, material para confecção de blocos de vedação, ou ainda, como agregado graúdo para concreto, substituindo as britas convencionalmente utilizadas para esse fim.

No contexto da análise experimental, o estudo do comportamento mecânico do concreto de agregado reciclado (CAR) se baseia em sua comparação com o comportamento do concreto convencional (CC). Nos ensaios de vigas submetidas à flexão, os principais aspectos de interesse são a morfologia e progressão das fissuras, deflexão e resistência à flexão do material. Em sua generalidade, os resultados publicados apontam para um comportamento muito similar em diversos dos itens mencionados, inclusive nas respostas obtidas em análises de confiabilidade (MALESEV et al., 2010; AREZOUMANDI et al., 2015).

Algumas normas e recomendações internacionais (BCSJ, 1977; RILEM RECOMMENDATION, 1994; WBTC Nº 12, 2002) já preveem o uso de concreto estrutural com adição integral ou percentual de agregado reciclado na construção civil. Isso ocorre uma vez que a escassez de agregados finos e graúdos é uma realidade preocupante em alguns destes países, acarretando em elevados custos para importação de matérias-primas. Por reconhecer a alta variabilidade na composição dos resíduos, as normas mais conservadoras (BSCJ, 1977) restringem sua aplicação a concretos com f_{ck} até 18 MPa no caso de substituição integral apenas do agregado graúdo. Por outro lado, existem normas mais atuais (RILEM RECOMMENDATION, 1944; WBTC Nº 12, 2002) que regulamentam a adição do AR em concretos com f_{ck} de ordem 50 MPa para fins estruturais.

No contexto nacional, a resolução 307 do CONAMA contém uma classificação detalhada dos tipos de resíduos sólidos e quais as práticas adequadas de gerenciamento dos mesmos. De acordo com a resolução, o concreto de demolição enquadra-se como resíduo tipo I, classe A, sendo passível de reutilização como agregado. Suas diretrizes contemplam desde as etapas de caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação, de forma que o AR tende a se tornar cada vez mais padronizado e, portanto, adequado para compor o CAR.

No contexto da análise numérica, de acordo com WITTMAN (1983) o concreto pode ser estudado segundo o (a) nível micro, que diz respeito à microestrutura da pasta de cimento

endurecida; (b) nível meso, que trata de poros, inclusões e fissuras; (c) nível macro, que está relacionado ao elemento estrutural, de modo que o concreto pode ser considerado homogêneo nesse nível.

Embora o concreto seja um material heterogêneo e repleto de microfissuras antes mesmo do carregamento externo, modelos macroscópicos têm se mostrado adequados para prever seu comportamento (SIMO et al., 1987; CERVERA et al., 1996; MANZOLI et al., 2012; BITENCOURT JR et al., 2015). No entanto, a fim de avaliar mais a fundo os fatores influenciadores das propriedades mecânicas do concreto, é crescente o número de estudos voltados às características microscópicas e mesoscópicas do material como por exemplo suas zonas de transição interfacial e ocorrência de micro vazios (DIAMOND, 2001; TAM et al., 2005; ZHENG et al., 2005; LANDIS et al., 2009). Desta forma, diante da heterogeneidade do material, uma análise numérica mesoscópica é uma abordagem capaz de representar com maior precisão os aspectos do seu comportamento mecânico abrangendo parcialmente os fenômenos que ocorrem n (HUANG et al., 2015; WANG et al., 2015; RODRIGUES et al., 2016).

Evidentemente, no caso do concreto reciclado, a ocorrência de particularidades no agregado é um fator que demanda um modelo em escala mais refinada para representar suas propriedades alteradas, de modo que sua análise mesoscópica se torna altamente indicada. Contudo, ainda é reduzido o número de trabalhos dedicados à simulação numérica desse material (vide, por exemplo, os trabalhos de PENG et al., 2016; LI et al., 2017; PAUL et al., 2018).

PENG et al. (2016) analisaram a resistência à compressão uniaxial, o efeito do tamanho do espécimen na resistência e os processos de dano do CAR usando o Método do Elemento de Força de Base em mesoescala representando o AR com um modelo de agregado convexo aleatório. Os parâmetros de entrada tais como módulo de elasticidade e resistência à tração de cada fase foram atribuídos com base em valores da literatura. Analisando as respostas com variados teores de argamassa aderida ao agregado e variadas resistências das ZTIs foi simulada a relação entre a mesoestrutura e as propriedades mecânicas do CAR.

LI et al. (2017) conduziram um estudo numérico sobre concreto reciclado modelado para investigar os danos plásticos e a propagação de fissuras sob carga uniaxial. No modelo numérico, as propriedades mecânicas em nanoescala e a espessura das ZTIs foram obtidas com base em nanoindentação avançada. Os resultados mostraram que as microfissuras aparecem primeiro em torno das ZTIs novas e antigas e depois se propagam para as argamassas de cimento novas e antigas.

PAUL et al. (2018) realizaram estudos experimentais e numéricos para revelar a provável relação entre parâmetros como porcentagem de substituição de AR, relação água/cimento, relação

agregado/ cimento, porcentagem de ar no concreto com a resistência mecânica do CAR. A pesquisa aplicou rede neural automatizada para prever a resistência mecânica do CAR, observando que a relação proposta prediz a resistência à compressão e tração do CAR, que se aproxima muito dos resultados experimentais. O emprego de técnicas similares, como redes neurais artificiais, regressão linear múltipla e sistema de inferência neuro-difusa também pode ser encontrado nos trabalhos recentes de outros autores (DUAN et al., 2013a; DUAN et al., 2013b; KHADEMI et al., 2016).

Na simulação numérica do concreto convencional (com agregados naturais) grande parte dos estudos se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF), um dos métodos computacionais mais empregados atualmente na solução de problemas mecânicos e representação do comportamento de materiais em geral. Porém sua simples aplicação pode ser limitada quanto à representação da descontinuidade em materiais quase-frágeis, de modo que técnicas adicionais vêm sendo desenvolvidas para atender essa necessidade. Os modelos consolidados são classificados como modelos de fissuração distribuídos ou discretos. Na aproximação de fissuras distribuídas (“*Smearred crack approach*”) (RASHID, 1968) o processo de deterioração é descrito por meio de uma relação constitutiva, distribuindo assim fissuras sobre o meio contínuo onde há concentração de deformações. O modelo discreto de fissuração (NGO et al., 1967) visa simular o início e propagação de fissuras dominantes como descontinuidades de deslocamento entre os elementos, de modo que as fissuras são forçadas a se propagarem nas bordas dos elementos. Com a intenção de contornar os inconvenientes dos modelos anteriores no que se refere à sensibilidade de malha, foram desenvolvidas técnicas que combinam os pontos favoráveis dos dois modelos, como o modelo de fissuras coesivas discretas, meio contínuo enriquecido, elementos com descontinuidades incorporadas (“*Elements with embedded discontinuities*”) e etc. (BORST et al., 2004; OLIVER et al., 2006; RADULOVIC et al., 2011).

Como destaca RODRIGUES (2015), o modelo numérico reticulado (“*Lattice Model*”) também rendeu contribuições muito relevantes no estudo numérico do processo de fissuração do concreto em nível mesoscópico. Neste modelo, discretiza-se o contínuo com elementos unidimensionais (i.e., mola, barra, viga) dispostas de forma reticulada (VAN MIER, 1997; LANDIS et al., 2009). As propriedades de cada elemento são atribuídas de acordo com sua posição projetada no domínio, podendo se diferenciar entre elemento de agregado, matriz e ZTI. A fissuração é representada pelo rompimento dos elementos de barra, que têm suas tensões calculadas geralmente pelo MEF.

No presente trabalho, para que haja a simulação mesoscópica do CAR e de sua não linearidade no comportamento mecânico, a estratégia de modelagem recorre ao emprego de uma técnica recente de fragmentação de malha (SÁNCHEZ et al., 2014; MAEDO, 2015; MANZOLI et al., 2016), na qual elementos finitos sólidos de interface com alta razão de aspecto são inseridos entre os elementos finitos regulares de malha convencional. Assim, esses elementos poderão ser

empregados estrategicamente nas zonas de transição entre a nova matriz e o AR, assim como entre a matriz e a brita do próprio AR, buscando representar os efeitos dessas interfaces no comportamento mecânico global de um membro estrutural. Uma estratégia similar já foi utilizada para modelar o concreto convencional em mesoescala, em uma abordagem bidimensional (RODRIGUES et al., 2015, 2016 e 2018). Constatando se tratar de uma técnica bastante precisa, entende-se que com as adaptações adequadas, pode ser utilizada de forma eficiente para representar as diferentes fases do CAR, adotando essa mesma escala de observação.

Desta forma, este estudo propõe uma abordagem bidimensional simultânea em duas escalas (macro e mesoescala) para o concreto reciclado. Na macroescala utiliza-se um modelo elástico linear com propriedades elásticas homogeneizadas. Já no nível mesoscópico ocorre a geração aleatória de agregados reciclados graúdos segundo uma curva granulométrica e são assumidos modelos de comportamento não linear baseados num modelo de dano à tração para o material com as seguintes fases: agregado graúdo, matriz de argamassa nova, matriz de argamassa antiga e respectivas ZTIs. Uma vez que duas escalas distintas podem ser empregadas na simulação de um mesmo espécimen de concreto reciclado, recorre-se também à técnica de acoplamento de malhas para garantir a continuidade no campo de deslocamentos dos nós comuns a essas malhas com diferentes níveis de refinamento.

Deste modo, este estudo visa desenvolver um modelo capaz de prever o comportamento mecânico do CAR via Método do Elementos Finitos, reproduzindo uma ferramenta para avaliar as possibilidades mais amplas de utilização do material na construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância do desenvolvimento de um modelo computacional representativo do concreto reciclado está no fornecimento de uma ferramenta adicional de teste desse material para fins construtivos. Busca-se definir os principais fatores determinantes do comportamento mecânico do material para que, desta forma, haja maior embasamento nos critérios de seleção dos agregados reciclados.

Por se tratar de um material reciclado, sua difusão está associada a um melhor aproveitamento dos resíduos da construção e demolição. Ou seja, o material estudado representa uma alternativa a favor da conservação do meio ambiente, pois traz grande utilidade a um material que provavelmente seria descartado, se tornando um inconveniente para a sociedade.

Além de proporcionar um melhor destino aos resíduos de concreto, essa alternativa também favorece a redução do consumo de matérias-primas e está associada ao fator econômico, que pode ser decisivo em regiões com escassez de tais recursos.

É importante ressaltar que em termos de normas e recomendações técnicas, o Brasil ainda se encontra desprovido de diretrizes claras quanto ao emprego seguro do CAR para fins estruturais. Dessa forma, maior conhecimento acerca desse material contribui para sua consolidação na indústria da construção e em normas técnicas menos restritivas quanto à sua utilização.

Finalmente, no campo da análise numérica, o estudo colabora com o desenvolvimento de mais uma aplicação prática da Técnica de Fragmentação de Malhas de elementos finitos (TFM) casos relacionados à engenharia estrutural, aos custos e ao gerenciamento de resíduos da construção.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do estudo é contribuir para o desenvolvimento de uma estratégia de modelagem capaz de considerar os fenômenos envolvidos na utilização de agregados reciclados no concreto a partir do trabalho desenvolvido por RODRIGUES (2016) para representação do concreto convencional em multiescala. Desta forma, pretendeu-se simular com mais precisão o comportamento mecânico do material compósito com matéria-prima oriunda de reciclagem. Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um gerador de agregado reciclado a partir de uma curva granulométrica fornecida;
- Adaptar o programa de fragmentação de malha para que este possa fragmentar também o agregado reciclado, representando as diferentes fases do material;
- Aplicar os modelos constitutivos implementados no software *in house* de elementos finitos na representação do comportamento mecânico do concreto reciclado.

2 CONCRETO RECICLADO

A reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) é uma prática que teve seu início séculos atrás, havendo indícios de que escombros eram utilizados pelos povos romanos para construir pontes de acesso durante invasões de guerra, estradas para expansão do território e para reerguer cidades destruídas (HENDRIKS, 2000).

Mais recentemente, com o fim da segunda guerra mundial e a necessidade de restaurar os locais afetados, os engenheiros alemães empregaram a reciclagem de RCD para obter agregados e material de nivelamento de terrenos, prática que rapidamente difundiu-se pelos demais países da Europa e se tornou o marco inicial da utilização do RCD na produção de concreto reciclado. Desde então, há um crescente investimento em tecnologias e políticas que propiciem avanços nessa esfera.

Este capítulo traz algumas informações gerais sobre o concreto reciclado no contexto nacional e internacional, desde a geração de resíduos até o seu processamento, propriedades mecânicas e requisitos de utilização. Embora algumas das informações apresentadas não tenham sido diretamente utilizadas na análise numérica, elas colaboram para situar a pesquisa desenvolvida.

2.1 DIFERENÇAS ENTRE OS RESÍDUOS DE CONCRETO

Os resíduos da construção e demolição podem ser provenientes de diversas fontes e, portanto, possuir características bastante variadas, o que culmina na alta heterogeneidade do material. Por esse motivo, a classificação do material de acordo com as fontes geradoras colabora para um refinamento no controle das propriedades do mesmo.

Recebe a denominação de RCD o tipo mais geral de resíduo da construção. Segundo ÂNGULO (2005), essa categoria inclui todos os resíduos das atividades de construção, tais como novas construções, reformas, demolições e limpeza de terrenos com a presença de solo e vegetação. Apesar de conter considerável quantia de concreto em sua composição, esse tipo de resíduo também é composto de argamassa, tijolos, cerâmicos, vidro, gesso e solo. A consequência direta dessa composição variada é um material com propriedades físicas e químicas heterogêneas, o que dificulta sua utilização como agregado no concreto reciclado.

Por outro lado, a classificação RC (resíduo de concreto) implica em um resíduo cuja composição preponderante é o concreto. De acordo com BUTTLER (2007), esse material é obtido dos rejeitos da demolição de estruturas de concreto, resíduos de usinas de concreto pré-misturado, fábricas de elementos pré-moldados e pavimentos de concreto. Esse tipo de resíduo caracteriza-se por uma homogeneidade notadamente maior, uma vez que deriva exclusivamente de resíduos de concreto. Além disso, trata-se de um material com propriedades já conhecidas devido ao controle exercido

no processo de geração, como é o caso das usinas de concreto pré-misturado, por exemplo. Esse maior conhecimento acerca de sua qualidade faz do RC um material mais indicado e confiável para a produção de concreto reciclado.

Existe ainda a possibilidade de processar os rejeitos do tipo RCD por meio de uma separação dos materiais a fim de selecionar aqueles que possuem mais concreto, eliminando os materiais indesejados, porém trata-se de um trabalho oneroso que envolve triagem manual, retiradas de contaminantes metálico-ferrosos, britagem, peneiração e outros processos que demandam bastante recursos e mão de obra.

Desta forma, fica claro que o agregado reciclado proveniente do RC é o mais indicado para obter um concreto reciclado com melhor desempenho, principalmente no que diz respeito ao comportamento mecânico desse concreto para fins estruturais. Sendo assim, o modelo numérico desenvolvido para CAR prevê o uso de um AR com alta homogeneidade, o qual pode ser facilmente obtido pelos processos citados.

2.2 GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS

De acordo com ÂNGULO et al. (2001), a cadeia da construção civil é o setor que mais consome material em todas as sociedades. Estima-se que 50% da matéria prima bruta no Japão é consumida pelo setor, enquanto nos EUA a construção civil é responsável pelo consumo de 75% do consumo total de materiais (MATOS et al., 1999 apud ÂNGULO et al., 2001). Como o concreto é o material mais tipicamente empregado na construção civil, a maioria dos recursos extraídos se destinam à sua extensa cadeia de produção.

Segundo MEHTA et al. (2008), o concreto só é mundialmente menos consumido do que a água e além disso, o consumo de cimento ultrapassa até o consumo de alimentos no planeta. Estima-se ainda, que a demanda global por agregados utilizados na construção civil cresça 4,7% ao ano, havendo atingido 26,8 bilhões de toneladas métricas no ano de 2011, com um custo de US \$ 201 bilhões (DE BRITO et al., 2013). Estes custos são relacionados aos processos de extração dos agregados finos e grãos por mineração terrestre ou aquática, transporte, limpeza e separação granulométrica.

Além de ser o setor que mais consome recursos, a construção civil também é aquela que gera maior volume de resíduos. Recentemente, foi relatado que cerca de 850 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição foram gerados na UE por ano, representando 31% da geração total de resíduos (FISHER et al., 2009). Apesar de se tratar de um volume expressivo de resíduos, nos

países mais desenvolvidos, a taxa de reciclagem também é elevada, de modo que quase a totalidade dos resíduos é reutilizada para pavimentação ou produção de concreto.

A comissão europeia estipulou uma meta de reciclagem de 70% para os resíduos de construção e demolição (RCD) até o ano de 2020 (VAZQUEZ, 2013; ULUBEYLI et al., 2017). Alguns países como Alemanha, Holanda, Irlanda, Estônia e Dinamarca já ultrapassaram esse número e têm a pavimentação, drenagem, aterros e estruturas de concreto pouco solicitadas como as principais aplicações do AR. Já nos EUA, estima-se que a taxa de reciclagem para o RCD misturado é de 35% (ULUBEYLI et al., 2017). A reciclagem de concreto para aplicações de pavimentação está agora implementada em pelo menos 41 dos estados americanos (CACKLER, 2018). Porém ainda há países considerados desenvolvidos, como Itália e Espanha, que estão distantes da meta fixada pela comissão europeia, apresentando taxa de reciclagem que não excede 20% (VAZQUEZ, 2013).

Já no Brasil, JOHN et al. (2013) estimaram que em cidades de médio e grande porte a massa de RCD gerada varia de 41% a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos. Essa elevada taxa de geração pode ser atribuída ao baixo desenvolvimento tecnológico da indústria da construção civil nacional (BUTLER, 2007). Um aspecto preocupante é que grande parte desse resíduo é descartada em pontos clandestinos, que superam os aterros sanitários legalizados em quantidade, uma vez que vários dos locais oficiais de deposição encontram-se com capacidade esgotada ou próxima do esgotamento. Estima-se que no Brasil a reciclagem processa apenas 10% do total de RCD gerado (BUTLER, 2007).

Desta forma, é evidente que a substituição, ainda que parcial, dos recursos naturais por reciclados nesse setor teria um grande impacto positivo em termos ambientais e econômicos. Seu efeito seria visível na preservação dos escassos recursos naturais e das áreas que seriam utilizadas para o descarte, constituindo uma alternativa de emprego de um resíduo cuja disposição ainda é um desafio, minimizando a poluição, gerando empregos e economia no processo construtivo.

Atualmente, existem instalações para reciclagem de RCD e políticas específicas para esse tipo de resíduo em praticamente todos os países da Europa, assim como na maioria dos países desenvolvidos (ÂNGULO, 2000). Por outro lado, a reciclagem de RCD no Brasil ainda é modesta, normalmente operada pelas prefeituras municipais, produzindo agregados que são utilizados apenas para a pavimentação (JOHN et al., 2013).

Independentemente do porte da central de reciclagem, o beneficiamento tradicional do RCD visando a reciclagem contempla as etapas de classificação dos resíduos, separação das fases indesejáveis; britagem por equipamento de martelo e, geralmente, peneiramento (JOHN et al.,

2013; DE BRITO, et al., 2013). A Figura 2.1 apresenta um diagrama esquemático de uma típica central de reciclagem de RCD.

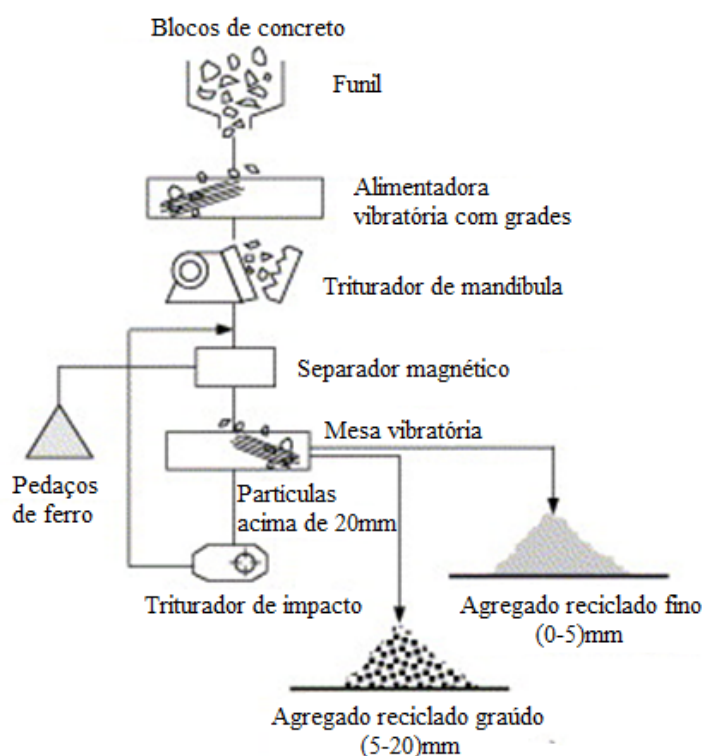


Figura 2.1 Diagrama esquemático de uma central de reciclagem de RCD (adaptado de EGUCHI et al., 2007)

Outro método mais recente de separação é o chamado ADR ou “Advanced Dry Recovery”. Ele é aplicado para remover os finos e contaminantes leves com um ponto de corte ajustável entre 1 e 4 mm para partículas minerais. Usa energia cinética para quebrar as ligações que são formadas pela umidade e partículas finas e pode classificar os materiais quase que independentemente de seu teor de umidade (LOTFI, et al., 2015). Depois de quebrar o material em um jato, as partículas finas são separadas das partículas grossas, como ilustra a Figura 2.2. A separação ADR tem como resultado concentrado um produto agregado graúdo e uma fração fina que inclui a pasta de cimento e contaminantes.

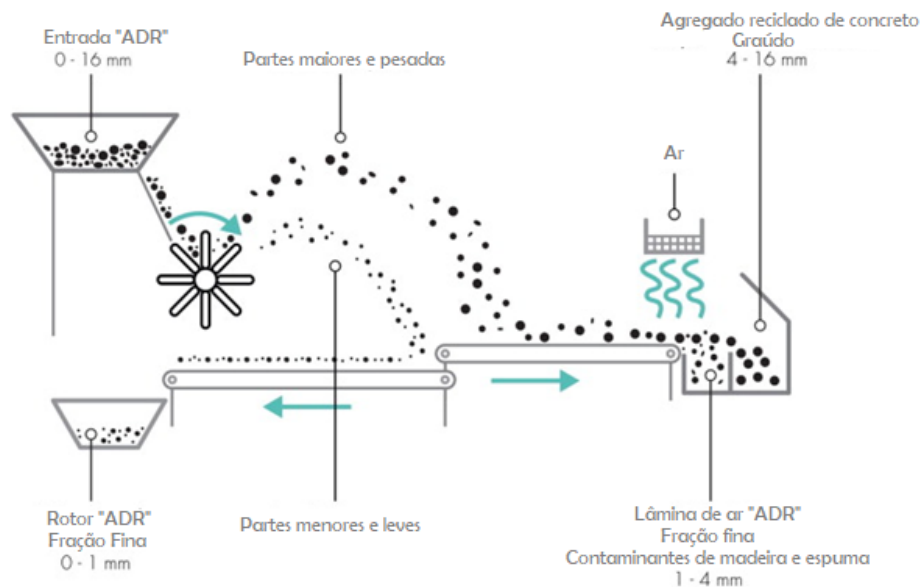


Figura 2.2 Separador ADR (adaptado de LOTFI et al., 2015)

As tecnologias de separação manual e magnética são as mais usuais no Brasil, porém existem alternativas que conferem maior precisão na seleção dos agregados, como a classificação que se baseia na diferença de densidade das diferentes fases. A Figura 2.3 ilustra o funcionamento do “Sink and Float”, onde uma suspensão aquosa com densidade alta e controlada promove o “corte” de densidade que separa os agregados. Uma vantagem desse tipo de separação é a possibilidade de separação dos agregados cerâmicos das frações de concreto e rocha das frações porosas (ÂNGULO, 2005; JOHN et al., 2013).

Além disso, JOHN et al. (2001) sugerem que uma forma de diminuir a variabilidade natural do produto é a criação de pilhas homogeneização dos agregados ao longo do processo, o que valoriza o material e permite sua aplicação não apenas nos serviços de pavimentação, porém essa etapa ainda não é observada com frequência nas centrais brasileiras.

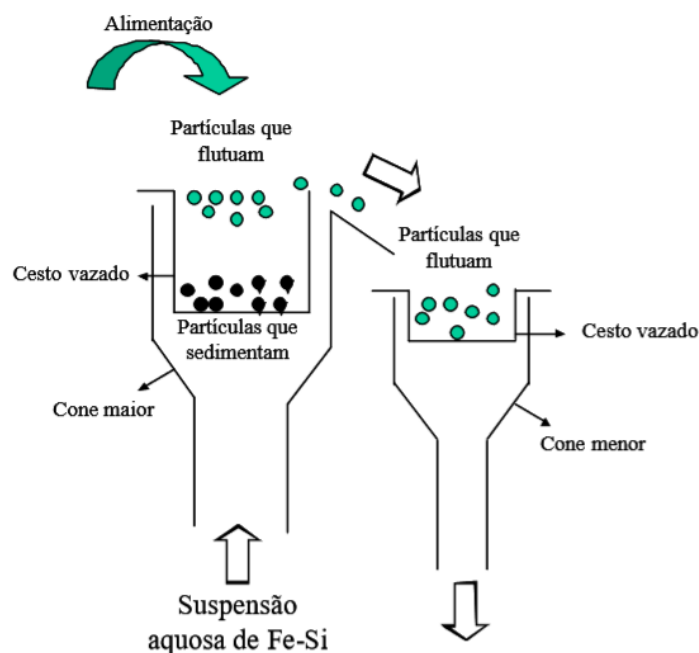


Figura 2.3 Desenho esquemático do funcionamento do equipamento “Sink and Float” (ÂNGULO, 2005)

2.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO RECICLADO

Os agregados normalmente representam de 60% a 75% do volume de concreto. Portanto, eles desempenham um papel substancial nas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade.

O estudo comparativo de MALESEV et al. (2010) sugere que em relação ao AN, o AR apresenta maior absorção de água, menor resistência ao desgaste por abrasão, mais “britabilidade”, mais partículas de pó e impurezas orgânicas e menor densidade aparente e específica. Desta forma, a tecnologia de produção do CAR é diferente do procedimento de produção de concreto com agregados naturais. Devido à argamassa ligada, o agregado reciclado tem maior porosidade e consequentemente, maior absorção de água do que o agregado natural. Portanto, para obter a trabalhabilidade desejada do CAR, é necessário adicionar certa quantidade de água para saturar o agregado reciclado antes ou durante a mistura. Essa quantidade adicional de água é calculada com base na absorção de água do agregado reciclado no tempo prescrito.

Segundo ÂNGULO (2005), a propriedade que exerce maior influência no comportamento mecânico dos concretos é a massa específica aparente (d) e em uma separação por densidade dos agregados reciclados, aqueles que apresentarem $d > 2,2 \text{ g/cm}^3$ podem ser utilizados em concretos de estruturas convencionais, já que apresentam comportamento mecânico e absorção de água similares aos agregados naturais.

DE BRITO et al. (2013) afirmam que o AR apresenta menor valor de abrasão Los Angeles e dureza do que o agregado natural, devido à presença de argamassa aderida. No entanto, este valor para a maioria dos agregados de RC informados na literatura atende aos vários requisitos para construções de concreto e estradas.

De maneira geral, a substituição de agregado no concreto diminui a resistência à compressão, mas produz uma resistência à tração comparável; produz módulo de ruptura na flexão ligeiramente menor do que o concreto convencional, provavelmente devido ao enfraquecimento da zona de transição da argamassa residual; e, apresenta módulo de elasticidade também menor. No que diz respeito ao desempenho estrutural, elementos de CAR experimentam maiores deflexões sob uma carga de serviço e menores momentos de fissuração. Já o momento final costuma ser moderadamente afetado pelo conteúdo de AR (BUTTLER, 2007; MALESEV et al., 2010; MCNEIL et al., 2013).

No entanto, em geral, em grande parte das pesquisas publicadas concluiu-se que a substituição parcial de até 30% do AN por AR não traz perdas significativas às características de resistência do concreto endurecido (HANSEN, 1992; GOMEZ-SOBERON, 2002; BUTTLER, 2007; LI et al., 2009; MALESEV et al., 2010; RAO et al., 2011; YANG et al., 2011; DE BRITO et al., 2013).

Além disso, por se tratar de um material compósito, as propriedades do CAR são influenciadas não apenas pela qualidade do AR, como também pela relação de água/cimento, por exemplo. HANSEN (1992) produziu CAR com uma relação água-cimento de 0,40 tendo cerca de 34 MPa resistência à compressão após 14 dias de cura padrão, usando agregado reciclado de um concreto original com uma relação água-cimento de 1,20, que apresentava resistência à compressão de aproximadamente 14 MPa. Isto confirmou resultados anteriores que mostraram que é possível fazer concretos com agregados reciclados mais resistentes do que os concretos originais dos quais os agregados reciclados são derivados.

Além disso, ANDREU et al. (2013) analisaram as propriedades mecânicas de CAR cujos agregados vieram de concretos de alto desempenho, observando que devido à alta qualidade da argamassa ligada a esse agregado, o CAR resultante apresentou desempenho igual ou superior ao concreto convencional. No caso específico de concretos de alto desempenho, a análise microscópica da zona de transição interfacial (ZTI) revelou que ela é comparativamente mais densa que a do concreto convencional (POON et al., 2004), o que justifica as propriedades mecânicas melhoradas e o fato de a resposta mecânica não apresentar sensibilidade à porcentagem de substituição dos AN por AR.

A Tabela 2-1 traz algumas breves considerações sobre as mais importantes propriedades físicas e mecânicas do CAR nos estados fresco e endurecido em comparação ao concreto convencional.

Tabela 2-1. Comparativo das principais propriedades do CAR

Propriedade	Comparativo
Trabalhabilidade	A trabalhabilidade é afetada pela maior absorção de água. Geralmente o concreto fresco apresenta <i>Slump</i> menor que o concreto convencional. A textura da superfície e a angularidade do AR também têm uma influência na trabalhabilidade do concreto. Existem diversos trabalhos propondo metodologias para melhorar essa propriedade (EVANGELISTA et al., 2007; PADMINI et al., 2009; GONZALEZ-FONTEBOA et al., 2011).
Densidade	A densidade do concreto reciclado fresco é levemente menor que a da mistura que contém agregado natural, uma vez que a densidade do AR é menor que a do agregado natural devido à presença de partículas de argamassa de cimento residual de menor densidade ligadas ao agregado.
Teor de Ar	Existem poucos estudos comparativos acerca desse parâmetro. Sabe-se que a presença de até 3% de ar pode ser benéfica para a mistura, diminuindo a demanda por água. LOPEZ-GAYARRE et al. (2009) constataram que ARs provenientes de concretos com melhor desempenho resultam em CAR com menor teor de ar.
Resistência à compressão (RC)	Normalmente, a resistência à compressão do concreto diminui com a adição de AR, essa redução pode chegar a 40% na substituição total (CHEN et al., 2003). Para uma substituição parcial de até 30% alguns autores relataram que a redução é negligenciável (GOMEZ-SORBERON, 2002; LI et al., 2009), enquanto outros relataram que esta atinge ao mínimo 12% (ETXEBERRIA et al., 2007).
Resistência à tração por compressão diametral (RT)	A RT também tende a diminuir no CAR, no entanto DE BRITO et al. (2010) afirmam que o efeito do AR é menor na RT que na RC.
Resistência flexural (RF)	A adição de AR no concreto diminui a resistência à flexão. No entanto, em vários estudos, é relatado que essa adição não reduz tão substancialmente quanto a resistência à compressão (LIMBACHIYA et al., 2004; CASUCCIO et al., 2008). Essa variação entre concreto convencional e o CAR foi insignificante em alguns estudos e foi inferior a 30% em outros, dependendo das variações de fatores diferentes, como quantidade de reposição, origem e qualidade do AR, razão a/c e etc.
Módulo de elasticidade (E)	As causas para a redução do E do concreto devido à incorporação do AR indicado em referências são: (1) a perda de rigidez do concreto, que depende de propriedades como rigidez da argamassa, porosidade do concreto e aderência de pasta de cimento ao agregado; (2) o menor E do AR em relação ao AN, uma vez que o E do concreto é principalmente dependente do E do agregado. A redução no E do concreto devido à incorporação do agregado de RCD é geralmente maior que a redução de RC correspondente, podendo atingir até 50%. (DE BRITO et al., 2011)
Resistência ao cisalhamento (RS)	GONZALEZ-FONTEBOA et al. (2007) observaram que enquanto as deflexões e as cargas finais foram pouco afetadas, nas vigas de concreto reciclado, a fissuração foi prematura. FATHIFAZL et al. (2015) mostram que o desempenho ao cisalhamento de vigas de CAR armado é comparável, ou até superior, ao de vigas feitas inteiramente com agregados naturais, resultado atribuído ao método específico de dosagem adotado.

2.4 RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Haja vista as diferentes propriedades entre os agregados naturais e reciclados, seu emprego como material de construção requer normas específicas para garantir desempenho adequado. Este item traz as mais relevantes normas nacionais e internacionais para o CAR, constatando que as recomendações são mais detalhadas e abrangentes de acordo com o nível de consolidação da prática de reciclagem no respectivo país.

No Brasil, a norma ABNT NBR 15116 "Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil" (2004) permite o uso de AR somente em concreto não estrutural, e frações graúdas e finas são permitidas na produção de concreto. Atendendo à resolução CONAMA nº 307, a norma classifica os RCD em quatro classes (A, B, C e D) e, destes, o resíduo da Classe A pode ser considerado agregado para uso em concreto. Os tipos de resíduos que pertencem à Classe A são os seguintes:

- Resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- Resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa e concreto;
- Resíduos de processo de preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.

Ainda de acordo com a norma brasileira, os resíduos classificados como classe A devem ser subdivididos nas seguintes classificações:

- **Agregado de resíduo de concreto (ARC):** É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.
- **Agregado de resíduo misto (ARM):** É o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas.

A Tabela 2-2 contém os requisitos para o agregado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural, assim como as normas de ensaios que devem ser utilizados para a determinação das propriedades.

Tabela 2-2 Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural

Propriedades	Agregado reciclado classe A				Normas de Ensaios	
	ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤7	≤12	≤12	≤17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos		1		ABNT NBR 9917	
	Sulfatos		1		ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais		2		Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila		2		ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes		3		-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)	≤10	≤15	≤10	≤20	ABNT NBR NM 46	

(Fonte: NBR 15116, 2004)

DE BRITO et al. (2013) destacam que ao contrário da maioria das recomendações internacionais, as quais impõem uma densidade mínima ao agregado, a recomendação nacional não observa esse aspecto, porém ele é de certa forma contemplado, uma vez que está relacionado à capacidade de absorção de água do material.

A recomendação RILEM TC 121-DRG (1994) trata dos agregados graúdos com diâmetro superior a 4mm, no documento não são discutidas as propriedades dos agregados finos, devido à sua discrepância com a areia natural. Nesta recomendação, as designações ARM e ARC são análogas aos tipos I e II, havendo ainda o tipo III, que consiste em uma mistura de AR (até 10% do tipo I) e AN (ao menos 80%).

Em comparação às disposições da instrução normativa nacional, os requisitos da RILEM consideram uma maior gama de fatores influenciadores e fundamentam-se na densidade dos materiais, além de abrangerem a combinação de AN e AR, como mostra a Tabela 2-3.

Tabela 2-3 Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto estrutural

Propriedades	Tipo I (ARM)	Tipo II (ARC)	Tipo III (ARC + NA)
Densidade na condição de superfície saturada seca (SSD) (kg / m ³)	≥1,500	≥2,000	≥2,400
Absorção de água (%)	≤20	≤10	≤3
Quantidade de material com densidade SSD <2.200 kg/m ³ (%)	–	≤10	≤10
Quantidade de material com densidade SSD <1.800 kg/m ³ (%)	≤10	≤1	≤1
Quantidade de material com densidade SSD < 1.000 kg/m ³ (%)	≤1	≤0.5	≤0.5
Contaminantes (betume, vidro, metais) (%)	≤5	≤1	≤1
Metais (%)	≤1	≤1	≤1
Materiais orgânicos (%)	≤1	≤0.5	≤0.5
Filler, <63 µm (%)	≤3	≤2	≤2
Areia (%)	≤5	≤5	≤5
Sulfito solúvel em água (%)	≤1	≤1	≤1
Agregados naturais (%)	–	–	≥80
Agregado de tipo I (%)	–	–	≤10

(Fonte: Adaptada de RILEM TC 121-DRG, 1994)

Uma vez discutidos os critérios de classificação e requisitos de utilização segundo as normas brasileira e a recomendação RILEM, a Tabela 2-4 compilada por DE BRITO et al. (2013) sumariza os campos de aplicação para os concretos confeccionados com os agregados reciclados segundo as principais normas internacionais.

Os aspectos mais importantes observados pelos dados da Tabela 2-4 são o fato de que diversas recomendações normativas permitem a substituição total de agregados graúdos naturais por reciclados, inclusive para a aplicação em concretos estruturais. E ainda, que a substituição parcial, geralmente de até 30% de AR, é amplamente incentivada na maioria das normas. Quanto às classes de resistência, nota-se uma ampla variação, desde 15 MPa até 50/60 MPa, valor característico dos concretos de alto desempenho. Toda essa variedade nas especificações se deve à existência de diversos fatores que influenciam no uso do CAR, como já comentado neste capítulo.

Tabela 2-4 Visão geral dos campos de aplicação de agregados reciclados no concreto

Especificação	Classificação	Máxima substituição de material natural por agregados reciclados		Condições de Uso	Máxima classe de resistência
		Graúdo	Fino		
Brasil	ARC ARM	100%	100%	Concreto não estrutural	15 MPa
RILEM	ARC + AN			Ambiente seco e molhado; sem agressividade no solo e/ou água	sem limite
	ARC	100%	Somente se os requisitos dos agregados naturais forem atendidos		C50/60
	ARM			Ambiente seco e molhado; sem agressividade no solo e/ou água; não sujeito a congelamento	C16/20
Espanha	ARC	20%	0%	Não permitido em concreto protendido	40 MPa
Holanda	ARC	100%	Somente se aplicado com agregado natural graúdo	Ambientes sem agressividade	C40/50
	ARM				C20/25
Japão BCSJ	ARM	100%	até 100%, dependendo da aplicação	Fundações e soluções com exigências mais brandas	18 MPa
Japão JIS 5021	ARM	n.i.	n.i.	Sem limitações	45 MPa
Japão JIS 5022	ARM	n.i.	n.i.	Elementos não sujeitos a congelamento e descongelamento	n.i.
Suíça	ARC	100%	100%	Concreto Reforçado; concreto protendido somente com testes adicionais	C30/C37
Alemanha	ARC	20–35 %	0%	Carbonatação; Ataques químicos; Não permitido para concreto protendido	C30/37 (20 % AR); C25/30 (35 % AR)

(Fonte: adaptado de DE BRITO et al., 2013)

3 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONCRETO RECICLADO

Este capítulo descreve os conceitos, técnicas e modelos que fundamentam cada etapa da metodologia empregada na análise numérica do concreto reciclado. A Tabela 3.1 contém uma síntese de cada uma das etapas, descrevendo sua ordem de sucessão e quais os parâmetros de entrada necessários para sua realização. Uma parte significativa dos processos envolvidos é resultado da contribuição de trabalhos anteriores, enquanto outros processos são exclusivos da análise em mesoescala do CAR proposta neste trabalho.

Tabela 3-1. Etapas da modelagem do concreto reciclado

Fase	Etapa	Entrada
Pré-processamento	Geração aleatória de agregados reciclados no MATLAB®	Geometria do espécimen, curva granulométrica, teor de agregados reciclados
	Geração da malha de elementos finitos com o software GiD®	Distribuição espacial dos agregados, materiais constituintes das fases, condições de carga e vinculação
	Fragmentação de malha com o software <i>in house</i> (MAEDO, 2015)	Arquivo de dados do GiD® contendo a conectividade e coordenadas dos nós
	Acoplamento de malhas não conformes	Arquivo de dados com inserção dos elementos de interface
Processamento	Análise numérica com o programa de elementos finitos <i>in house</i>	Arquivo de dados fragmentado, acoplado e com todos os parâmetros necessários para o modelo constitutivo
Pós-processamento	Exportação da configuração deformada para o GiD®	Arquivo de saída do programa de elementos finitos

3.1 GERAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO

Como a análise do concreto em mesoescala consiste na representação das distintas fases do material, a primeira etapa da construção do modelo é a geração dos agregados na matriz de concreto. Atualmente, existem dois principais recursos capazes de gerar um modelo mesoscópico para o concreto: a aquisição de dados via processamento de imagem ou a geração via algoritmos numéricos (WANG et al., 2015). As tecnologias de imagem envolvem câmeras, microscópios ou técnicas mais avançadas como ressonância magnética, Raio-X ou tomografia computadorizada usadas para registrar seções transversais ou toda a distribuição de agregados em 3D. Os dados

obtidos na forma de imagens podem ser importados para um software adequado de processamento que gera uma distribuição de agregados bastante fiel à realidade. Trata-se de um procedimento com alta qualidade e representação direta das diferentes fases, porém requer equipamentos de elevado custo e pode ser bastante trabalhoso em estudos nos quais se deseja analisar um grande número de amostras. Por outro lado, a geração parametrizada de agregados requer a curva de distribuição granulométrica do agregado reciclado como parâmetro de entrada. No caso de uma curva desconhecida, pode-se empregar o modelo de Fuller (WRIGGERS et al., 2006), cuja curva característica (Equação 3.1) é aquela que confere uma melhor compactação do agregado.

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{max}} \right)^n \quad (3.1)$$

sendo $P(d)$ a porcentagem passante acumulada em uma peneira com abertura d ; d_{max} é o tamanho máximo do agregado e n é uma constante ($n= 0,45$ a $0,70$).

Além disso, deve-se definir qual a forma geométrica do agregado (circular, elíptica, poligonal e etc.), qual a porcentagem do volume de concreto é composta pelos agregados graúdos, e parâmetros particulares de cada modelo, como por exemplo a distância mínima entre os agregados ou ainda a porosidade do concreto, no caso de modelos que representam inclusive os poros (WANG et al, 2015).

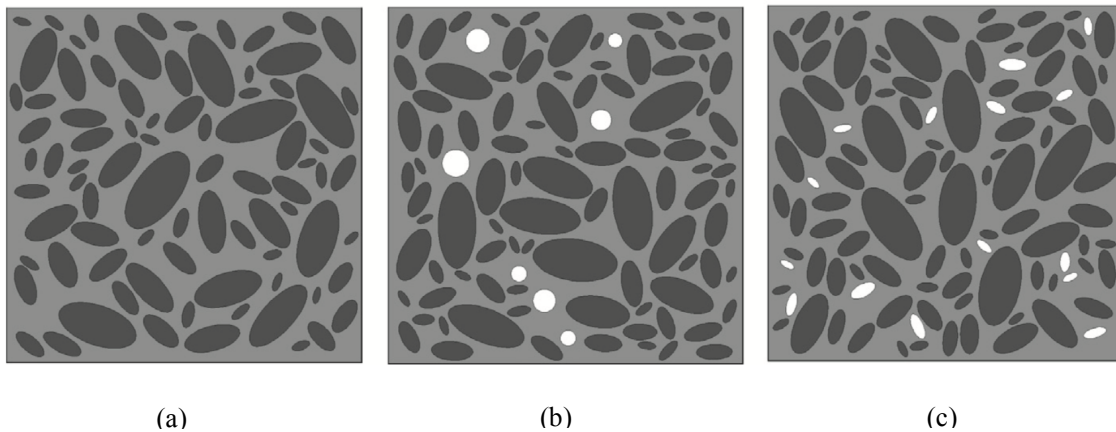


Figura 3.1 Representação de concreto convencional com agregado elíptico (a) sem poros; (b) com poros circulares e (c) com poros elípticos WANG et al. (2015)

No método empregado para modelagem na tese de RODRIGUES (2015) para simulação do concreto convencional em mesoescala, representa-se o agregado natural por formas octogonais geradas a partir do método *Take-and-Place* proposto por WRIGGERS et al. (2006). Esses agregados são distribuídos de forma aleatória na matriz, respeitando uma curva de classificação pré-definida e sem que haja interseção entre eles. No geral, a maioria dos modelos de geração aleatória de agregados tem etapas bastante similares, sendo que a maior diferença entre os modelos

existentes é o critério de espaçamento e de descarte das partículas. As etapas definidas para o algoritmo *Take-and-Place* (WRIGGERS et al., 2006) se dividem na geração (*taking*) e na colocação (*placing*) dentro do volume de concreto, conforme mostram as Tabelas 3-2 e 3-3.

Tabela 3-2. Etapas de geração do algoritmo *Take-and-Place*.

Calcular o volume de agregado a ser gerado no segmento de classificação conforme a Equação 3.2.
$V_p[d_s, d_{s+1}] = \frac{P(d_s) - P(d_{s+1})}{P(d_{max}) - P(d_{min})} \times \vartheta_p \times V \quad (3.2)$
sendo $V_p[d_s, d_{s+1}]$ o volume de agregados pertencentes ao segmento $[d_s, d_{s+1}]$; ϑ_p a fração volumétrica de agregados e V o volume total do espécimen.
1. Gerar um número aleatório que define o diâmetro de uma partícula. Supondo que o tamanho d tenha uma distribuição uniforme entre d_s e d_{s+1} , ele pode ser calculado usando a Equação 3.3.
$d = d_{s+1} + \eta(d_s - d_{s+1}) \quad (3.3)$
onde η é um numero uniformemente distribuído entre 0 e 1;
3. Calcular o volume do agregado gerado e subtrai-lo do volume de agregado dentro do segmento de gradação.
4. Repetir as etapas 2 e 3 até que o volume de agregado a ser gerado não seja o suficiente para gerar outra partícula. O volume restante de agregado a ser gerado é então transferido para o próximo segmento de classificação.
5. Repetir todas as etapas acima para o próximo segmento de gradação de tamanho menor e, em seguida, novamente para o segmento de gradação de tamanho sucessivamente menor, até que a última partícula do menor tamanho tenha sido gerada.
(Adaptada de WRIGGERS et al., 2006)

Uma vez gerado o agregado de acordo com a curva granulométrica, seu processo de inserção dentro do domínio deve atender as seguintes condições:

1. A partícula inteira deve estar completamente dentro do limite do volume de concreto;
2. Não deve haver qualquer sobreposição com partículas colocadas anteriormente;
3. Existe uma distância mínima entre a borda de uma partícula e o limite da amostra de concreto e uma largura mínima entre duas partículas adjacentes.

O critério de verificação da terceira condição recorre aos resultados das inspeções visuais realizadas em seções transversais de concreto endurecido por WANG et al. (1999), as quais revelaram que a espessura do filme de argamassa é proporcional ao tamanho da partícula. Assim, WRIGGERS et al. (2006) propuseram que a espessura mínima da película de argamassa entre uma partícula de tamanho d e o limite do concreto seja tomada como $\lambda \times d$, bem como a espessura

mínima da película de argamassa entre duas partículas, onde λ é um fator de distribuição cujo valor é dependente da fração de volume agregado. Quanto maior a porcentagem de agregados, menor deverá ser λ para garantir que todos os agregados sejam acomodados no domínio, desta forma, o parâmetro apresenta grande amplitude. WRIGGERS et al. (2006) utilizaram o intervalo $0,46 \geq \lambda \geq 0,02$ para reproduzir frações de 20% a 50% com variadas granulometrias.

Este fator de distribuição desempenha um papel significativo na configuração espacial das partículas agregadas. Quando um valor maior de λ é usado, uma distribuição espacial mais uniforme das partículas será obtida, mas também pode levar a dificuldades em encontrar espaço suficiente para colocar as partículas. Por outro lado, quando um valor menor de λ é usado, um empacotamento mais fácil das partículas no concreto pode ser obtido, mas a configuração gerada seria macroscopicamente menos homogênea. No início do processo de colocação, um valor inicial de λ é escolhido dependendo da fração de volume do agregado. Sempre que houver dificuldades na colocação das partículas, o valor de λ é reduzido e todo o processo de colocação é repetido, até que todas as partículas possam ser colocadas no concreto. A Figura 3.2 ilustra o critério de posicionamento das partículas segundo o método adotado para geração aleatória de agregados.

Tabela 3-3. Etapas de colocação do algoritmo *Take-and-Place*.

1. Geração de coordenadas aleatórias X que definem o centro do agregado
2. Verificar se as 3 condições são completamente atendidas
3. Se a verificação dessas condições revelar que alguma delas é violada, a partícula não é colocada no concreto. Caso a violação seja devida à primeira condição, então outro conjunto de números aleatórios é gerado para X e uma tentativa de colocar a partícula em um novo local é feita, enquanto no outro caso, em que a segunda condição não é satisfeita, o algoritmo de translação-rotação é seguido.
4. Se a partícula traduzida não pode satisfazer as condições de colocação após um número prescrito de tentativas, novos números aleatórios são gerados para X para fazer outra tentativa de colocar a partícula.
5. Se a partícula não puder ser colocada no concreto após um número apropriado de tentativas para X , todo o processo de colocação é interrompido e todas as partículas previamente colocadas no concreto são eliminadas. O valor de λ é então reduzido e todo o processo de colocação é reiniciado.
6. Os passos descritos acima são repetidos até que todas as partículas sejam colocadas com sucesso na amostra de concreto.

(Adaptada de WRIGGERS et al., 2006)

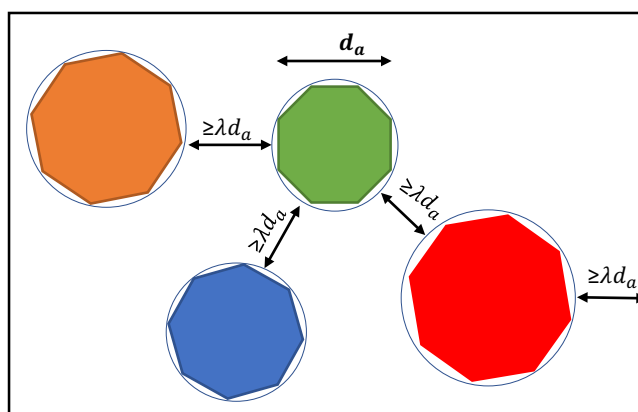


Figura 3.2 Ilustração do algoritmo *Take-and-Place* para agregados naturais (Adaptado de WRIGGERS et al., 2006)

Partindo da distribuição de agregados naturais para a distribuição de agregados reciclados, sabe-se que sua composição varia por conter duas fases, como evidencia a Figura 3.3. E também como já comentado, a simulação numérica do CAR é um tema ainda pouco desenvolvido nos trabalhos científicos, de modo que ainda não há uma técnica amplamente aceita para gerar agregados reciclados num volume de concreto para simulação numérica. Desta forma, são apresentadas a seguir algumas das técnicas atuais que norteiam a escolha do modelo adequado para este trabalho.

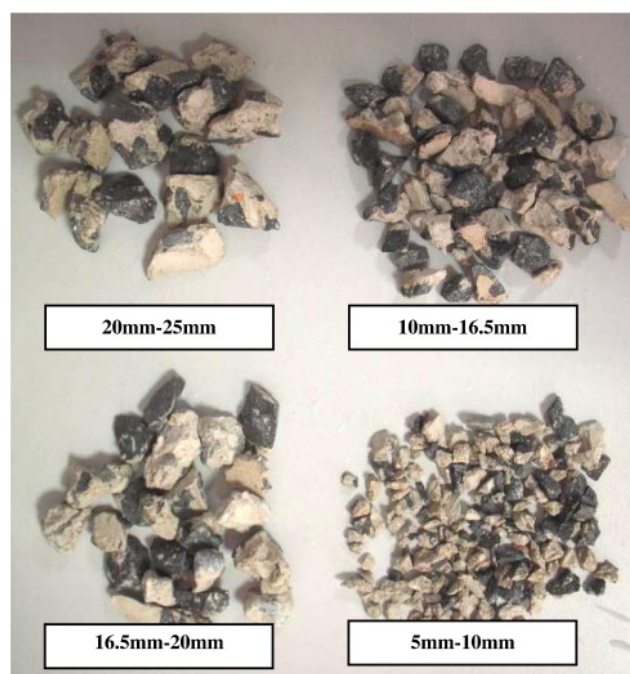


Figura 3.3 Diferentes tamanhos de agregados reciclados graúdos. LIU et al. (2011)

PENG et al. (2016) propuseram a modelagem a partir de geometrias convexas cujos agregados naturais são totalmente envolvidos pela matriz do concreto antigo dando origem aos agregados reciclados, que por sua vez, são distribuídos na nova matriz. Ao comparar a geometria convexa à circular, observou-se que a geometria convexa reflete melhor as características do CAR nos testes de compressão uniaxial e no processo de formação de microfissuras, que tem início nas regiões da zona de transição interfacial (ZTI) do agregado.

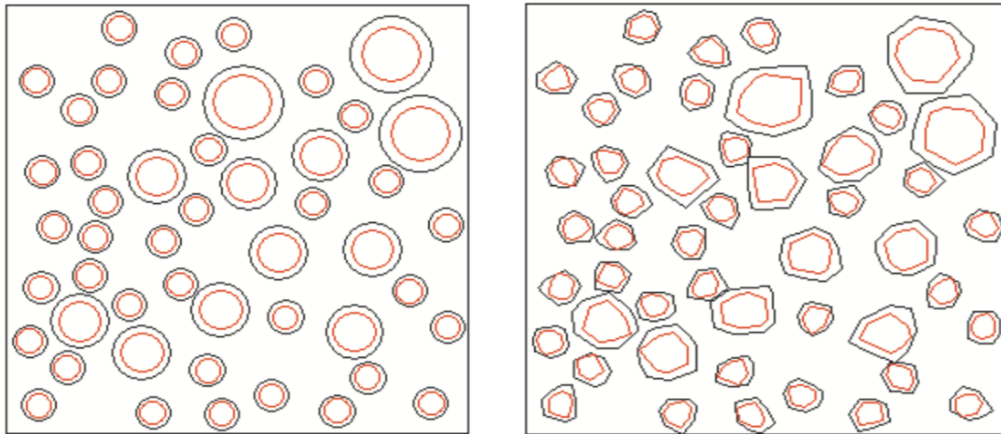


Figura 3.4 Geometrias circulares e poligonais convexas adotadas por PENG et al. (2016) na representação do agregado reciclado de concreto

Uma representação semelhante foi proposta por XIAO et al. (2013b) e LI et al. (2017), que desenvolveram um modelo de dano para o concreto reciclado comparado experimentalmente com um concreto reciclado moldado em laboratório com a exata configuração, como mostra a Figura 3.5. Por se tratar de CAR modelado, esta representação simplificada é de fato a distribuição dos agregados no espécimen.

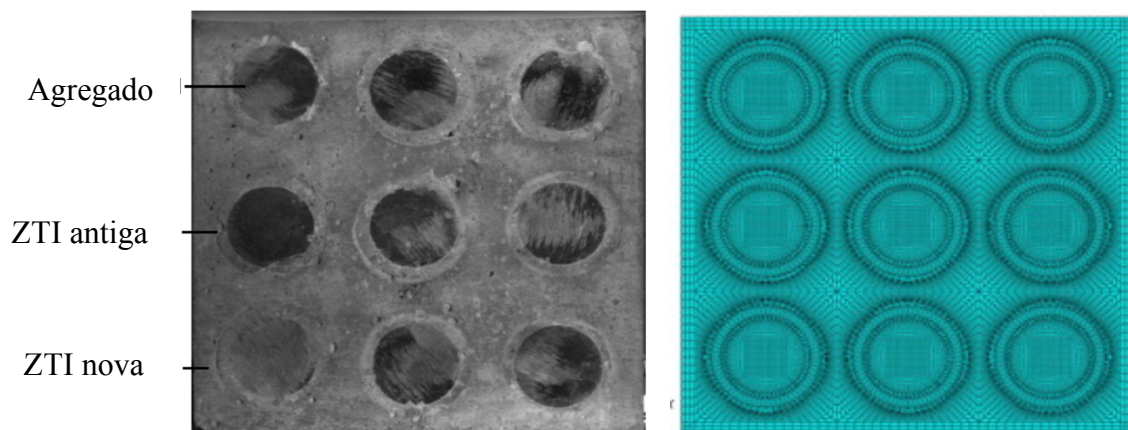


Figura 3.5 Seção transversal do concreto reciclado modelado e representação via MEF realizada por XIAO et al. (2013)

Uma possibilidade estudada por RODRIGUES et al. (2019) também a partir do método *Take-and-Place* é a geração de agregados naturais no volume de concreto e posterior sobreposição da distribuição definitiva a partir de uma segunda geração aleatória, que abrangeria parte do agregado natural e parte da matriz antiga para compor o novo agregado. O método proposto encontra-se ilustrado na Figura 3.6 e apesar de ser bastante representativo, requer um pré-processamento altamente minucioso do espécimen, o que pode acarretar em uma análise mais custosa.

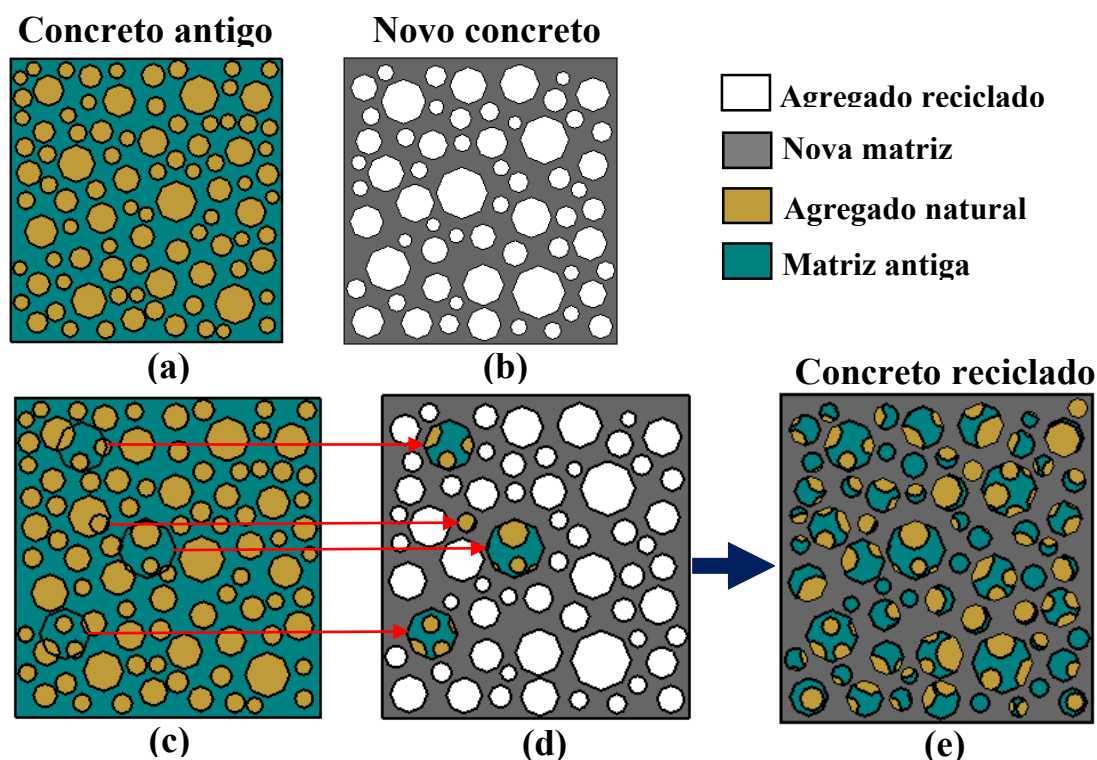


Figura 3.6 Geração de agregados reciclados. Adaptado de RODRIGUES et al. (2020)

Desta forma, baseando-se nos modelos apresentados pelos demais autores e buscando conciliar suas vantagens nesta proposta, são definidas possíveis configurações que o agregado reciclado pode assumir e de forma aleatória essas geometrias são inseridas para preencher os volumes de agregados dentro de cada faixa de diâmetro seguindo as mesmas etapas do método *Take-and-Place*. Ou seja, incluindo um passo preliminar no método proposto por WRIGGERS et al. (2006), é possível adaptar o modelo para o desenvolvimento do gerador de agregados reciclados implementado no software MATLAB.

A Figura 3.7 ilustra as geometrias selecionadas para representar as diferentes composições do AR, adotou-se a geometria octogonal com base nos resultados de PENG et al. (2017), que indicam que geometrias convexas são mais capazes de refletir o comportamento do CAR. Em cada passo do

processo de geração a rotação do agregado é aleatória, para que, deste modo, as respectivas ZTIs tenham orientações distintas, evitando que haja interferência no processo de fratura. Desta forma, obtém-se uma distribuição cuja complexidade assemelha-se a de RODRIGUES et al. (2019), porém a um custo computacional mais baixo como o de PENG et al. (2017). A princípio a probabilidade de distribuição de cada tipo de geometria é uniforme, porém o gerador de AR desenvolvido pode atribuir diferentes probabilidades a fim de equiparar-se às condições observadas experimentalmente. Além disso, a alternativa de considerar um agregado reciclado homogêneo com propriedades enfraquecidas em relação a um agregado natural foi descartada uma vez que a maior vulnerabilidade do AR está nos mecanismos de fratura que passam por suas interfaces (XIAO et al., 2013a; LI et al., 2017).

A Figura 3.8 ilustra uma viga entalhada em multiescala, onde a região mais crítica próxima ao entalhe recebe uma escala mesoscópica com a geração de AR proposta ao passo que a região mais periférica é considerada homogênea em macroescala.

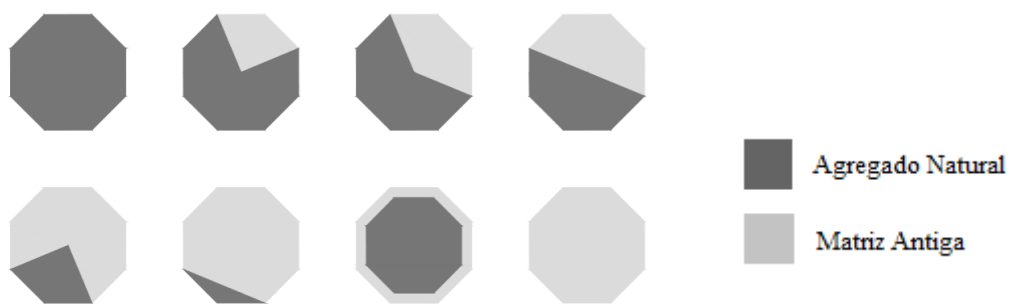


Figura 3.7 Representações pré-definidas de agregados reciclados

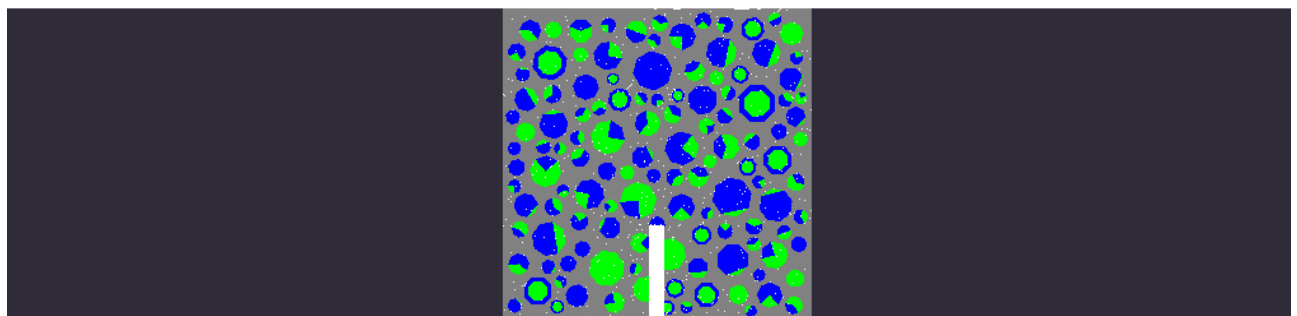


Figura 3.8 Viga entalhada com região central em mesoescala e agregados reciclados octogonais

3.2 TÉCNICA DE FRAGMENTAÇÃO DE MALHA COM ELEMENTOS FINITOS SÓLIDOS DE INTERFACE

A técnica de fragmentação de malha proposta por SÁNCHEZ et al. (2014), consiste no emprego de elementos finitos com elevada razão de aspecto (elementos de interface) entre os elementos regulares de uma malha de elementos finitos convencional. Considerando uma malha composta por elementos triangulares de três nós (2D), um par de elementos triangulares de interface é inserido entre os elementos vizinhos (Figura 3.9). A vantagem de simular interfaces com elementos extremamente delgados é que não há necessidade de técnicas especiais de integração ou uso de um valor de rigidez extremamente elevado como no caso do elemento de espessura nula (“*zero thickness*”).

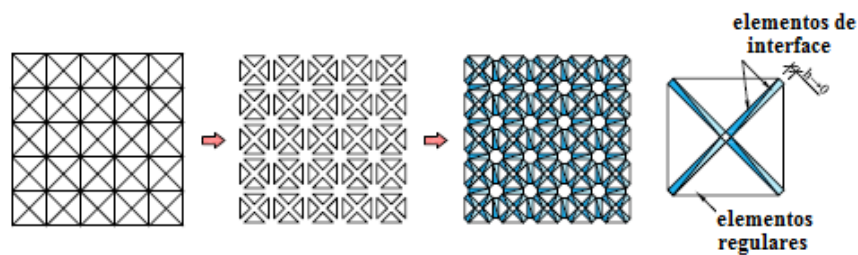


Figura 3.9 Esquema de fragmentação da malha: malha original, duplicação dos nós e redução dos elementos, introdução dos elementos de interfaces e malha fragmentada (adaptada de MANZOLI et al., 2016).

3.2.1 Elemento finito sólido de interface

A seguir são descritas as principais propriedades da formulação proposta por MANZOLI et al. (2012) considerando um elemento de interface triangular de 3 nós, conforme a Figura 3.10. O elemento encontra-se descrito no sistema cartesiano (n, s) e possui base b e altura h que corresponde à distância entre o nó 1 e a sua projeção na base (normal ao vetor $\mathbf{n}$).

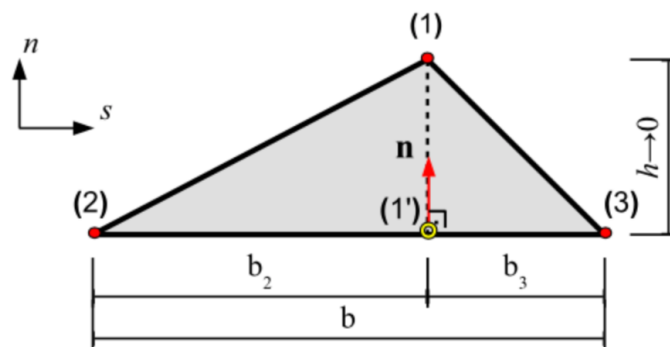


Figura 3.10 Elemento finito triangular com alta razão de aspecto (MANZOLI et al., 2016)

Inicialmente, partindo da aproximação para o campo de deformações segundo o MEF (Equação 3.4), pode-se decompor o tensor de deformações em duas partes, sendo que uma contém os termos que dependem de b e a outra os termos que dependem de h , conforme a Equação 3.5.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{d} \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} + \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (3.5)$$

Sendo $\boldsymbol{\varepsilon}$ o tensor de deformações, $\mathbf{B}$ a matriz das derivadas das funções de forma, $\mathbf{d}$ o tensor de deslocamentos nodais, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ o tensor associado à base e $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ o tensor associado à altura.

As componentes desses tensores encontram-se descritas nas Equações 3.6 e 3.7.

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{b} \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & 0 \\ \frac{1}{2}(u_n^{(3)} - u_n^{(2)}) & (u_s^{(3)} - u_s^{(2)}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} \llbracket u \rrbracket_n & \frac{1}{2} \llbracket u \rrbracket_s & 0 \\ \frac{1}{2} \llbracket u \rrbracket_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Onde $u_n^{(i)}$ e $u_s^{(i)}$ são componentes de deslocamento do nó i nas direções n e s , respectivamente. $\llbracket u \rrbracket_n$ e $\llbracket u \rrbracket_s$ são as componentes do deslocamento relativo $\llbracket \mathbf{u} \rrbracket$ entre o nó 1 e sua projeção na base.

Os deslocamentos relativos foram obtidos reescrevendo o deslocamento da projeção 1' como uma interpolação dos deslocamentos dos nós 2 e 3, conforme as Equações 3.8 e 3.9.

$$u_n^{(1)} - \left[\left(\frac{b_3}{b} \right) u_n^{(2)} + \left(\frac{b_2}{b} \right) u_n^{(3)} \right] = u_n^{(1)} - u_n^{(1')} = \llbracket u \rrbracket_n \quad (3.8)$$

$$u_s^{(1)} - \left[\left(\frac{b_3}{b} \right) u_s^{(2)} + \left(\frac{b_2}{b} \right) u_s^{(3)} \right] = u_s^{(1)} - u_s^{(1')} = \llbracket u \rrbracket_s \quad (3.9)$$

Considerando um sistema de coordenadas mais geral é possível reescrever $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ conforme a Equação 3.10.

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{h} (\mathbf{n} \otimes \llbracket \mathbf{u} \rrbracket)^s \quad (3.10)$$

Sendo $(\bullet)^s$ a parte simétrica de $(\bullet)$, $\mathbf{n}$ o vetor unitário normal à base do elemento e $\otimes$ o produto diádico. Deste modo, substituindo essa parcela na Equação 3.5, o tensor de deformações totais passa a ser escrito como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{1}{h} (\mathbf{n} \otimes \llbracket \mathbf{u} \rrbracket)^s \quad (3.11)$$

Averiguando o comportamento do tensor de deformações descrito segundo a Equação 3.11, nota-se que quando h tende a zero, a componente de deformação $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}$ permanece limitada, porém a componente $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ passa a ser ilimitada, de modo que o tensor de deformações $\boldsymbol{\varepsilon}$ se torna altamente dependente do deslocamento relativo entre o nó 1 e sua projeção na base. Como na situação limite o nó 1 e sua projeção são o mesmo ponto, $\llbracket \mathbf{u} \rrbracket$ se torna uma medida de descontinuidade de deslocamento.

3.2.2 Cinemática de descontinuidades fortes

Descontinuidades fortes são descritas por OLIVER et al. (1999) como soluções do problema mecânico quase-estático que exhibe saltos no deslocamento em uma linha material (em problemas 2D) denominada linha de descontinuidade. As deformações nesta linha são ilimitadas e no restante do sólido são limitadas, de modo que na cinemática da descontinuidade forte ocorre a separação do campo de deslocamento em uma parte regular e uma descontínua, enquanto a formação de descontinuidades fracas é caracterizada por deslocamentos contínuos, mas deformações descontínuas que se concentram em uma faixa de largura finita.

A Figura 3.11 ilustra os casos de descontinuidade forte e fraca em um sólido com linha de descontinuidade S dividindo o domínio Ω em Ω^+ e Ω^- . O eixo coordenado local η é normal a S de tal modo que S corresponde a reta $\eta = 0$ e h corresponde a espessura da banda de localização de deformação.

Desta forma, o campo de deslocamentos total ($\mathbf{u}$) para o caso de descontinuidade forte pode ser decomposto como a soma dos deslocamentos contínuos ($\tilde{\mathbf{u}}$) e descontínuos ($\llbracket \mathbf{u} \rrbracket$), conforme a Equação 3.12.

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + H_s \llbracket \mathbf{u} \rrbracket \quad (3.12)$$

Sendo que H_s é a função de *Heaviside* localizada na superfície de descontinuidade.

$$\begin{cases} H_s = 0 \quad \forall X \in \Omega^+ \\ H_s = 1 \quad \forall X \in \Omega^- \end{cases} \quad (3.13)$$

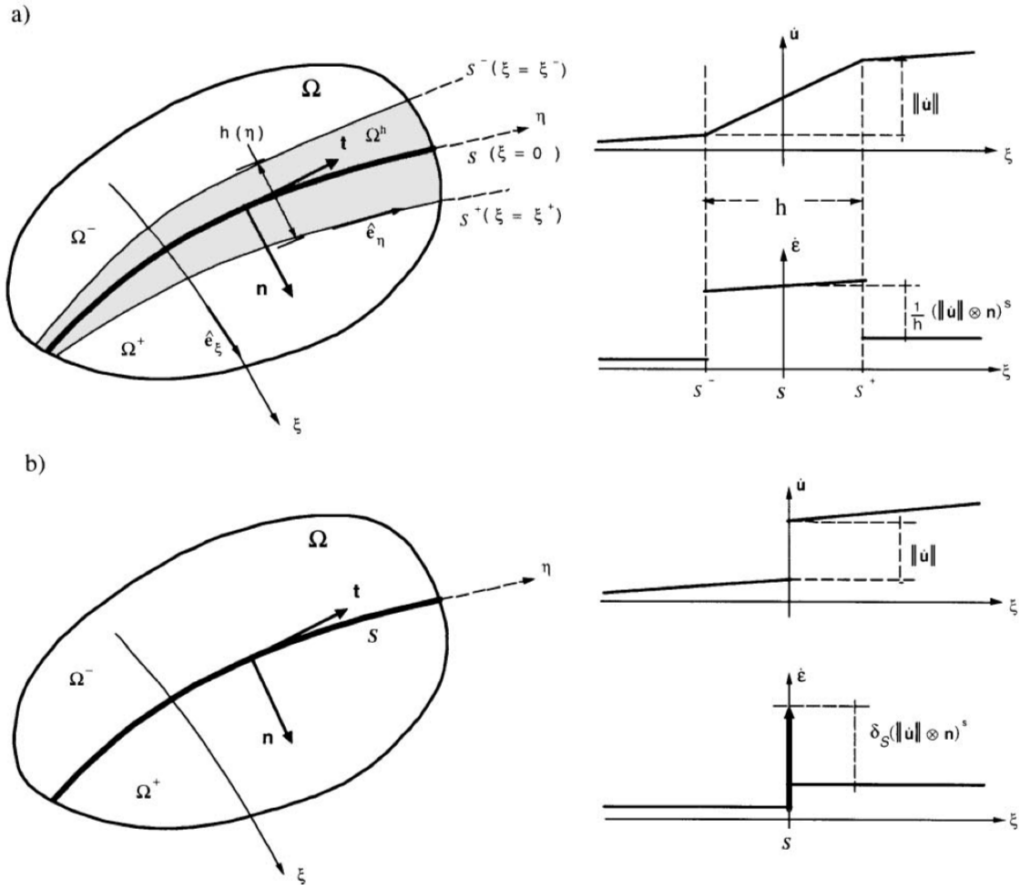


Figura 3-11 (a) Cinemática de descontinuidade fraca; (b) cinemática de descontinuidade forte (OLIVER et al., 1999)

Na situação em que a h tende a zero e a banda Ω_h passa a ser a própria linha S , tem-se a aproximação da descontinuidade forte como a situação limite do regime de descontinuidade fraca, descrito como:

$$\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + Z_s[\![\mathbf{u}]\!] \quad (3.14)$$

sendo $Z_s(\eta)$ uma função rampa definida segundo a Equação 3.15.

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_s = 0 \text{ se } \eta < -\frac{h}{2} \\ Z_s = 1 \text{ se } \eta > \frac{h}{2} \\ Z_s = \frac{\eta}{h} + \frac{1}{2} \text{ se } -\frac{h}{2} < \eta < \frac{h}{2} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Finalmente, diante dos conceitos apresentados, o campo de deformações total pode ser descrito como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \nabla^s \mathbf{u} = \nabla^s \tilde{\mathbf{u}} + Z_s \nabla^s \llbracket \mathbf{u} \rrbracket + \frac{\mu_s(\eta)}{h} (\llbracket \mathbf{u} \rrbracket \otimes \mathbf{n})^s \quad (3.16)$$

Sendo $\mu_s(\eta)$ denominada função de colocação na banda de deformação, tal que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_s(\eta) = 0 \text{ se } \eta < -\frac{h}{2} \text{ ou } \eta > \frac{h}{2} \\ \mu_s(\eta) = 1 \text{ se } -\frac{h}{2} < \eta < \frac{h}{2} \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Desta forma, obtém-se a forma final do campo de deslocamentos segundo a Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF) dada pela Equação 3.18.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{\mu_s(\eta)}{h} (\llbracket \mathbf{u} \rrbracket \otimes \mathbf{n})^s \quad (3.18)$$

Comparando as Equações 3.11 e 3.18, observa-se que a cinemática das deformações atuantes no elemento finito triangular é semelhante àquela do regime de descontinuidade forte no interior da banda de localização. Ou seja, no estado limite, quando h tende a zero e a relação de aspecto tende a infinito, a cinemática destes elementos é a mesma da ACDF, indicando se tratar de elementos adequados para representar a formação de descontinuidades associadas a fissuras.

Considerando que os elementos de interface empregados na técnica de fragmentação de malha podem ser munidos de relações constitutivas do contínuo baseadas nas teorias da plasticidade ou do dano, este tópico do trabalho descreve o desenvolvimento do modelo de dano à tração que governa esses elementos no caso da simulação numérica do CAR.

3.2.3 Zona de transição interfacial (ZTI)

Sabe-se que a microestrutura da pasta de cimento na vizinhança de um agregado no concreto difere não apenas daquela que é mais distante do agregado, mas também da pasta de cimento que não envolve agregados (DIAMOND, 2001; LANDIS et al., 2009). Esta microestrutura distinta é denominada zona de transição interfacial (ZTI). No concreto normal, a ZTI tem uma porosidade

consideravelmente mais alta do que a pasta de cimento mais distante e constitui o elo mais fraco da matriz de concreto normal (STROEVEN, 1999).

Diversos estudos de caracterização vêm sendo realizados nos últimos anos com auxílio de recursos de processamento de imagem que determinaram que a espessura da ZTI está em uma faixa de 20 a 56 μm para o concreto normal e que a densidade do volume do cimento varia dentro da ZTI (ZHENG, 2005).

A microestrutura da ZTI no CAR é um fator importante no controle do desenvolvimento de resistência do concreto agregado reciclado. Por esse motivo, a simulação numérica do concreto reciclado em mesoescala deve ser capaz de representar a particularidade da região compreendida como ZTI, lançando mão do emprego de elementos de interface.

Após distribuídos os agregados, realiza-se o procedimento de “fragmentação de malha”, criando uma fase adicional na ZTI entre agregado e matriz e também caminhos potenciais para a formação e propagação de fraturas na matriz. A estratégia em mesoescala do concreto desenvolvida por RODRIGUES (2015) considera o comportamento do agregado natural como elástico-linear, dispensando assim a necessidade de fragmentar sua malha de elementos finitos, como ilustrado na Figura 3.12. Isso ocorre pois no caso do concreto convencional, o agregado costuma ser a fase mais resistente do material compósito e, portanto, a propagação da fratura dificilmente ocorrerá através do mesmo. Desta forma, é possível realizar a simulação da resposta mecânica sem a introdução de elementos de interface entre elementos de agregado (MANZOLI, 2014; RODRIGUES, 2015; RODRIGUES et al., 2016).

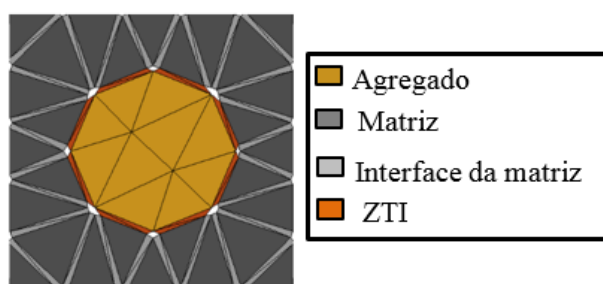


Figura 3.12 Representação bidimensional do composto no esquema de fragmentação de malha (RODRIGUES, 2015)

No caso do AR, por se tratar de um material composto por diferentes fases, faz-se necessário realizar a sua fragmentação, buscando representar o comportamento mecânico não-linear característico de sua natureza. A Figura 3.13 ilustra a forma geométrica pretendida na representação do concreto com esse tipo de agregado em mesoescala. O material será representado pelas seguintes fases: nova matriz de concreto; fração de agregado natural presente no agregado reciclado; fração da matriz antiga presente no agregado reciclado.

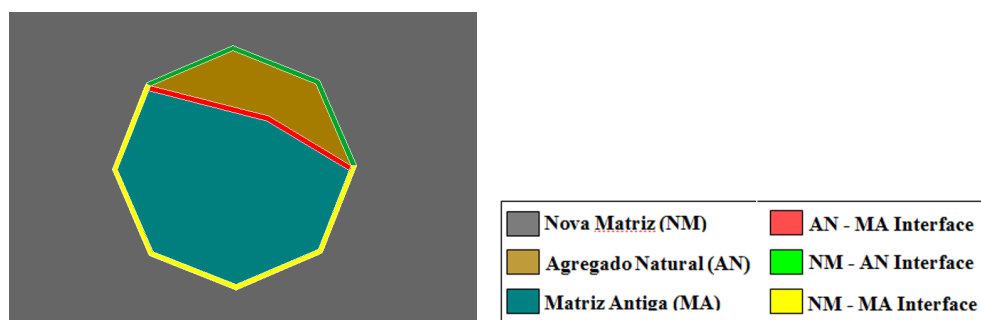


Figura 3.13 Ilustração do AR em mesoescala, com destaque aos elementos das ZTIs.

Desta forma, além dos elementos de interface na matriz de concreto associados à técnica de fragmentação, serão introduzidos elementos de interface entre as diferentes fases do material, como ilustra a Figura 3.13, proporcionando uma modelagem explícita das distintas ZTIs entre esses constituintes. Destaca-se que a inclusão destes novos elementos será fundamental na representação do comportamento não-linear do CAR em mesoescala. A Tabela 3.4 indica a nomenclatura adotada para se referir às distintas ZTIs do CAR.

Tabela 3-4. Designação ZTIs do CAR

Nome	Região
ZTI ₁	Agregado natural com nova matriz
ZTI ₂	Agregado natural com matriz antiga
ZTI ₃	Nova matriz com matriz antiga

Na Figura 3.14-a a propagação de fratura no concreto convencional visivelmente contorna os agregados, enquanto no CAR modelado da Figura 3.14-b observa-se que há propagação de fissuras tanto na ZTI₂ como na ZTI₃. Esse padrão de fissuração é também condicionado pela distribuição regular dos agregados, porém ilustra a recomendação da aplicação da técnica de fragmentação ao agregado reciclado.

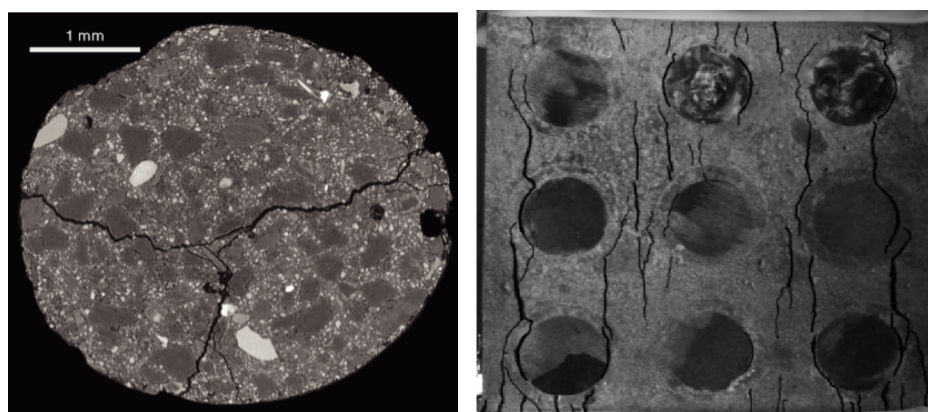


Figura 3.14 Propagação da fratura em (a) uma seção microtomográfica de um concreto convencional carregado em compressão por LANDIS et al. (2009); (b) concreto de agregado reciclado modelado por XIAO et al. (2013)

3.3 MODELAGEM MULTIESCALA

A análise numérica de elementos estruturais de concreto em uma escala mais refinada pode ser proibitiva em termos de custo computacional. Para contornar esse problema, tem-se empregado uma estratégia de modelagem denominada multiescala concorrente, na qual apenas regiões específicas desse elemento estrutural são representadas adotando um nível maior de refinamento, mantendo o restante em uma escala mais grosseira (LLOBERAS-VALS et al., 2012; RODRIGUES et al., 2016). Malhas não conformes como a da Figura 3.15 podem ser adotadas, desde que uma técnica de acoplamento seja empregada.

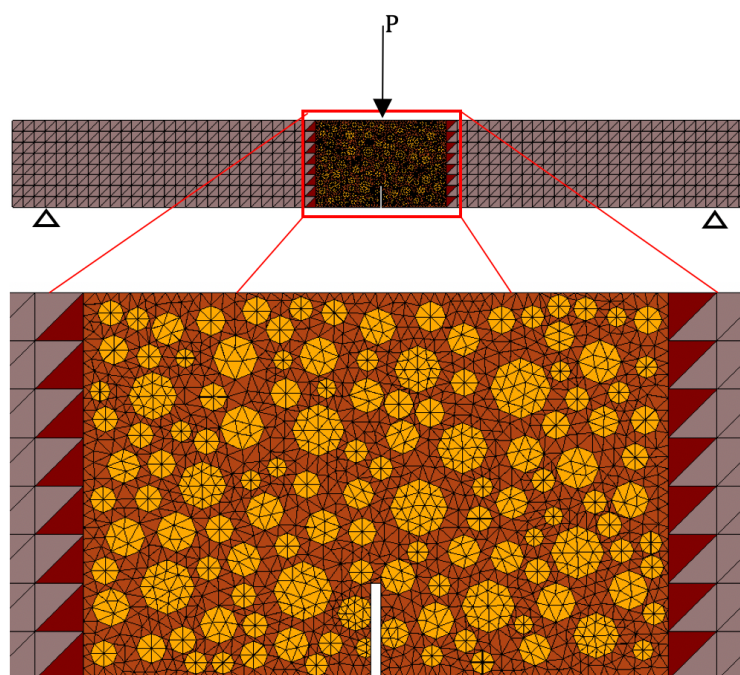


Figura 3.15 Viga em multiescala com elementos finitos de acoplamento (em vermelho) compatibilizando duas malhas não conformes

A ocorrência de malhas não conformes decorrentes da análise em multiescala requer a compatibilização dos campos de deslocamento entre dois domínios independentes e com nível de refinamento de malha de elementos finitos completamente diferentes, como ilustra a Figura 3.16. Com essa finalidade, BITENCOURT et al. (2015) desenvolveu uma técnica baseada na definição de elementos finitos de acoplamento (EFAs) a partir dos elementos convencionais, porém com um nó adicional (nó acoplado) como mostra a Figura 3.17. Essa técnica tem a característica de não aumentar o número de graus de liberdade do problema, uma vez que o elemento de acoplamento é definido a partir de nós já existentes, sendo capaz de garantir continuidade de deslocamento e do campo de tensões entre os diferentes subdomínios.

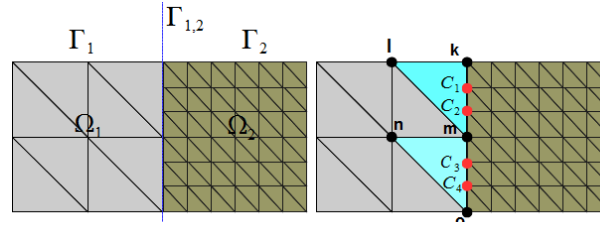


Figura 3.16 Esquema de acoplamentos de malhas não conformes.

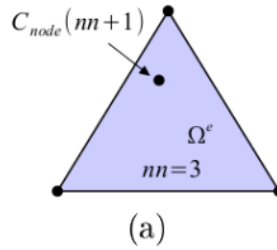


Figura 3.17 Elemento de compatibilização construído a partir de elemento convencional com um nó adicional (BITENCOURT et al., 2015)

A formulação dos EFA se inicia considerando um domínio Ω dividido em 2 subdomínios Ω_1 e Ω_2 que possuem discretizações distintas e compartilham a face comum $\Gamma_{1,2}$ representada na Figura 3.16.

O processo de acoplamento de malhas se divide em 3 etapas: identificação do contorno comum aos dois subdomínios e dos nós que precisam ser acoplados (C_1 , C_2 , C_3 e C_4 da Figura 3.16); identificação dos elementos bases para a geração dos EFAs com os nós correspondentes acrescidos dos nós dependentes; definição da lei que irá descrever a interação entre as malhas não conformes. Uma vez executado esse procedimento, o vetor de forças internas $\mathbf{F}^{int}$ e a matriz de rigidez global $\mathbf{K}$ podem ser descritos conforme as Equações 3.19 e 3.20, respectivamente.

$$\mathbf{F}^{int} = A_{e=1}^{nel\Omega_1} (\mathbf{F}_e^{int})_{\Omega_1} + A_{e=1}^{nel\Omega_2} (\mathbf{F}_e^{int})_{\Omega_2} + A_{e=1}^{nelc} (\mathbf{F}_e^{int})_c \quad (3.19)$$

$$\mathbf{K} = A_{e=1}^{nel\Omega_1} (\mathbf{K}_e)_{\Omega_1} + A_{e=1}^{nel\Omega_2} (\mathbf{K}_e)_{\Omega_2} + A_{e=1}^{nelc} (\mathbf{K}_e)_c \quad (3.20)$$

Sendo A o operador de montagem do elemento finito, o primeiro termo se refere ao domínio Ω_1 , o segundo termo ao domínio Ω_2 e o último termo à introdução dos EFAs.

Um elemento finito isoparamétrico com domínio Ω_e composto por nn nós e com funções de forma $\bar{N}_i(\mathbf{X})$ definidas para qualquer ponto material $\mathbf{X} \in \Omega_e$ permite que o deslocamento $\bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X})$ seja

calculado interpolando os deslocamentos nodais $\mathbf{D}_i$, conforme:

$$\bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}_C) = \sum_{i=1}^{nn} \bar{\mathbf{N}}_i(\mathbf{X}) \mathbf{D}_i \quad (3.21)$$

Desta forma, o deslocamento relativo entre o nó C_{nn+1} e o ponto material $\mathbf{X}_C$ situado sobre o elemento de base pode ser calculado segundo a Equação 3.22.

$$[\mathbf{U}] = D_{nn+1} - \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}_C) = \mathbf{B}_e \mathbf{D}_e \quad (3.22)$$

Sendo $\mathbf{B}_e$ a matriz descrita por:

$$\mathbf{B}_e = [-\bar{\mathbf{N}}_1(\mathbf{X}_C) \quad -\bar{\mathbf{N}}_2(\mathbf{X}_C) \quad \dots \quad -\bar{\mathbf{N}}_{nn}(\mathbf{X}_C) \quad \mathbf{I}] \quad (3.23)$$

Onde $\bar{\mathbf{N}}_i = \bar{\mathbf{N}}_i \mathbf{I}$, sendo $\mathbf{I}$ a matriz identidade.

Sendo assim, o vetor $\mathbf{D}_e$ contém as componentes de deslocamento nodal do EFA e apresenta uma componente a mais do que os elementos convencionais, conforme:

$$\mathbf{D}_e = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_{nn+1} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Pelo trabalho virtual das forças internas do elemento de acoplamento obtém-se o vetor de forças internas e consequentemente a matriz de forças internas do elemento.

$$\mathbf{F}_e^{int} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{F}([\mathbf{U}]) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{K}_e = \frac{\partial \mathbf{F}_e^{int}}{\partial \mathbf{D}_e} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C}_{tg} \mathbf{B}_e \quad (3.26)$$

Onde $\mathbf{C}_{tg}$ é o operador tangente da relação constitutiva entre a força de reação ao deslocamento relativo.

Utilizando um modelo elástico linear para descrever a relação entre a força de reação e o deslocamento relativo, tem-se:

$$\mathbf{F}_e^{int} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C} \mathbf{B}_e \mathbf{D}_e \quad (3.27)$$

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C} \mathbf{B}_e \quad (3.28)$$

Onde $\mathbf{C}$ é a matriz de constantes elásticas.

Substituindo as equações do EFA na Equações 3.19 e 3.20, que representam o problema no domínio completo Ω , tem-se o problema devidamente acoplado. Para o caso de acoplamento rígido entre as malhas, basta assumir valores suficientemente elevados para compor a matriz de constantes elásticas, conforme mostrado nos capítulos futuros.

3.4 MODELO DE DANO CONTÍNUO

Os materiais aplicados na engenharia estão sujeitos a condições mecânicas e ambientais desfavoráveis, as quais provocam um acúmulo de alterações microestruturais que caracterizam sua deterioração (KACHANOV, 1986). De acordo com SOUZA NETO et al. (2011), o dano interno pode ser definido como a presença e evolução de fissuras e vazios em nível microscópico capazes de reduzir significativamente a capacidade resistente de uma estrutura. Isso ocorre porque a existência de vazios e fissuras afeta a integridade do material diminuindo a área efetiva resistente e consequentemente alterando suas propriedades elásticas como a rigidez.

Existem diversas formas pelas quais um material pode sofrer degradação. A natureza do material, tipo de carregamento e temperatura são os fatores que determinam no tipo de manifestação do dano (SOUZA NETO et al., 2011). Dentre as manifestações mais frequentes elencadas por LEMAITRE et al. (1996) tem-se o dano frágil, que é quando uma fissura é iniciada na mesoescala sem uma grande quantidade de tensão plástica. Por outro lado, o dano é chamado de dúctil quando ocorre simultaneamente com deformações plásticas maiores que um determinado limite. Já o dano por fluência ocorre quando um metal é carregado a temperatura elevada e ocorre deformação plástica viscosa, deformando o material sob tensão constante. No caso de carregamento cíclico, tem-se o dano por fadiga, que é resultado do acúmulo de micro e macro fissuras que gradualmente deterioram o material. O dano no concreto manifesta-se por sua condição de material heterogêneo, que possui zonas cuja resistência é enfraquecida e são passíveis de fissuração quando submetidas a carregamentos (SIH et al., 1984).

LEMAITRE et al. (1996) ainda ressalta que o dano interno é a deterioração que ocorre nos materiais antes da falha, o qual pode não ser visível antes de atingir certo nível. Desta forma, durante séculos a fratura foi estudada como um processo "sim ou não" relacionado a um valor crítico de carga, tensão e tempo ou número de ciclos de carga. Apenas a partir dos estudos de KACHANOV (1958) surgiu o conceito de mecânica do dano contínuo, quando o autor publicou a respeito de uma variável de campo que mede a “continuidade” de um material, cuja complementar viria a se tornar a variável de dano unidimensional. Sua formulação resultou num simples modelo de dano material que subsequentemente poderia ser estendido a materiais elásticos, plásticos ou viscosos frágeis sob todas as condições de cargas uniaxiais ou multiaxiais, simples ou cíclicas.

Desta forma, este capítulo aborda conceitos básicos da teoria da mecânica do dano contínuo aplicada na descrição do comportamento do material no regime inelástico. Além disso, é discutido o modelo de dano à tração unidimensional e bidimensional, bem como o esquema implícito-

explícito (IMPL-EX) usado para integração dos modelos constitutivos. No caso da simulação do concreto reciclado, material quase-frágil sob influência de carregamento quase-estático, os efeitos de fluência e fadiga não são levados em conta.

3.4.1 Conceitos básicos

Considerando um sólido sob ação de carregamento externo e sujeito ao processo de degradação, define-se a variável de dano (d) associada a uma seção transversal normal ao vetor $\mathbf{n}$, segundo a relação:

$$d = \frac{A_D}{A} = \frac{A - \bar{A}}{A} \quad (3.29)$$

Onde A representa a área intacta; A_D representa a área degradada, ou seja, a soma de todos os vazios e fissuras causados pelo carregamento, e, ainda $\bar{A}$ representa a área efetiva, isto é, a área que efetivamente resiste aos esforços, como mostra a Figura 3.18.

De acordo com a definição da variável, nota-se que a mesma está contida no intervalo $0 < d < 1$, onde $d = 0$ significa que a área degradada é nula, ou seja, a seção está intacta. Por outro lado, $d = 1$ significa que a seção está totalmente degradada. Definiu-se d como uma variável escalar adimensional, uma vez que foi considerado dano isotrópico, ou seja, a degradação ocorre igualmente em todas as direções.

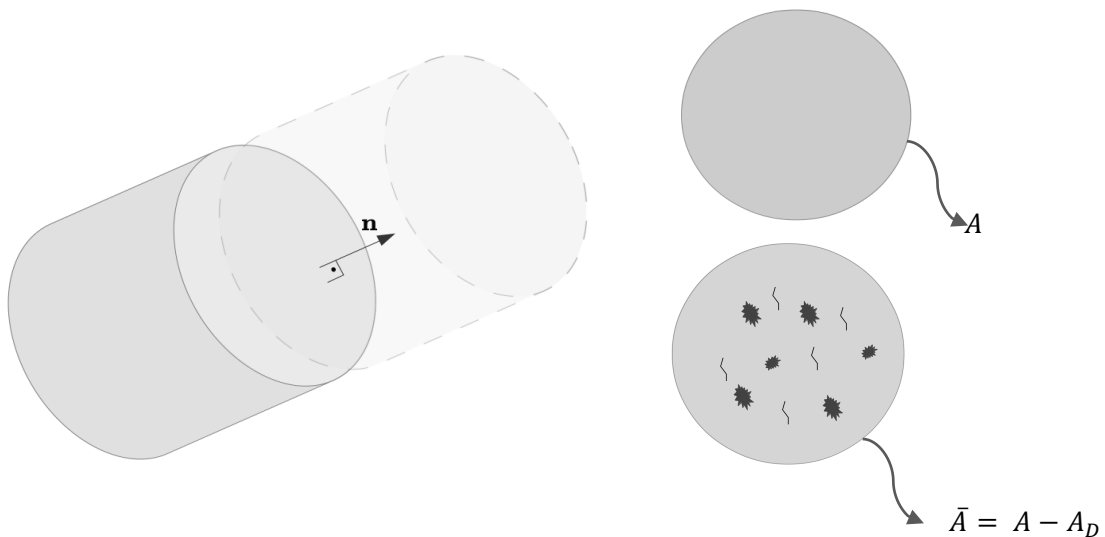


Figura 3.18 Representação do processo de degradação (adaptada de LEMAITRE,1978)

Além disso, é evidente que uma vez que o material foi acometido por um certo nível de dano, ele não retorna a sua condição intacta, ou seja, a área degradada ao longo do tempo ocorre conforme $\dot{A}_D \geq 0$. Assim, a taxa de variação da variável de dano ($\dot{d}$) é sempre positiva, de modo que:

$$\dot{d} = \frac{\dot{A}_D}{A} \geq 0 \quad (3.30)$$

Adicionalmente, a distinção entre a área intacta (A) e a área efetiva ($\bar{A}$) resulta na consideração de duas tensões distintas que podem ocorrer na superfície do material quando submetido a uma força axial F , as quais são designadas como tensão aparente (σ) e tensão efetiva ($\bar{\sigma}$). Tais tensões são descritas conforme as equações a seguir.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.31)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{\bar{A}} \quad (3.32)$$

Trabalhando as Equações 3.29 a 3.32, é possível relacionar as tensões aparente e efetiva em termos da variável de dano, conforme a Equação 3.33.

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} \quad (3.33)$$

A expressão da Equação 3.33 revela que na condição intacta ($d = 0$), a tensão aparente atuante no material é a mesma que a tensão efetiva ($\sigma = \bar{\sigma}$). Já no caso do material completamente degradado ($d = 1$), observa-se que a tensão efetiva tende ao infinito ($\bar{\sigma} \rightarrow \infty$).

Aliado ao conceito de tensão equivalente, o princípio de equivalência de deformações proposto por Lemaitre (1971) afirma a equação constitutiva de deformação para um material danificado pode ser derivada da mesma maneira que para um material íntegro, exceto que a tensão aparente é substituída pela tensão efetiva.

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{E}_D} \quad (3.35)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{E}_D} \quad (3.36)$$

Onde ε_1 é a deformação no material intacto; ε_2 é a deformação no material degradado; E é o módulo de elasticidade íntegro e E_D é o módulo degradado.

Substituindo a igualdade da Equação 3.36 pela Equação 3.33 é possível estabelecer a relação entre módulo de elasticidade íntegro e degradado em termos da variável de dano conforme:

$$E_D = (1 - d)E \quad (3.37)$$

Dessa forma, substituindo a Equação 3.37 nas Equações 3.34 e 3.35, a relação constitutiva total pode ser escrita segundo as Equações 3.38 e 3.39.

$$\sigma = E_D \varepsilon \quad (3.38)$$

$$\bar{\sigma} = E \varepsilon \quad (3.39)$$

Os conceitos já expostos nesse capítulo servem como base para a elaboração acerca do critério de degradação, lei de evolução da variável de dano e finalmente do modelo constitutivo de dano empregado nas análises.

3.4.2 Critério de degradação

O domínio elástico, ou seja, o conjunto dos valores de tensão para os quais o material apresenta comportamento elástico pode ser representado por uma função $\varphi(\sigma)$. Desta forma, admite-se que o domínio elástico se encontra na região $\varphi(\sigma) \leq 0$ e possui superfície de dano delimitadora $\varphi(\sigma) = 0$. Escreve-se a função que determina o domínio elástico conforme a Equação 3.40.

$$\varphi(\sigma) = \tau(\sigma) - q \leq 0 \quad (3.40)$$

Onde $\tau(\sigma)$ é a tensão equivalente e q é a variável interna, as quais definem a forma e o tamanho do domínio elástico, respectivamente.

Essa função também pode ser descrita no espaço das tensões efetivas, conforme:

$$\varphi(\bar{\sigma}) = \tau(\bar{\sigma}) - r \leq 0 \quad (3.41)$$

$$r = \frac{q}{1-d} \quad (3.42)$$

Onde r é a variável interna no espaço de tensões efetivas.

Além disso, como discutido anteriormente, $\dot{d} \geq 0$, de modo que $\dot{r} \geq 0$, ou seja, a variável interna tem comportamento crescente.

Reescrevendo a Equação 3.42 para obter a variável de dano em termos das variáveis internas, tem-se:

$$d(r) = 1 - \frac{q(r)}{r} \quad (3.43)$$

3.4.3 Lei de evolução da variável de dano

Materiais com naturezas diferentes podem apresentar comportamentos diferentes quando ultrapassado o limite de elasticidade, ou seja, conforme ocorre a evolução do dano. A Figura 3.19 contém as curvas com as possíveis evoluções da variável interna $q(r)$, de onde são obtidas as leis de endurecimento/abrandamento do material.

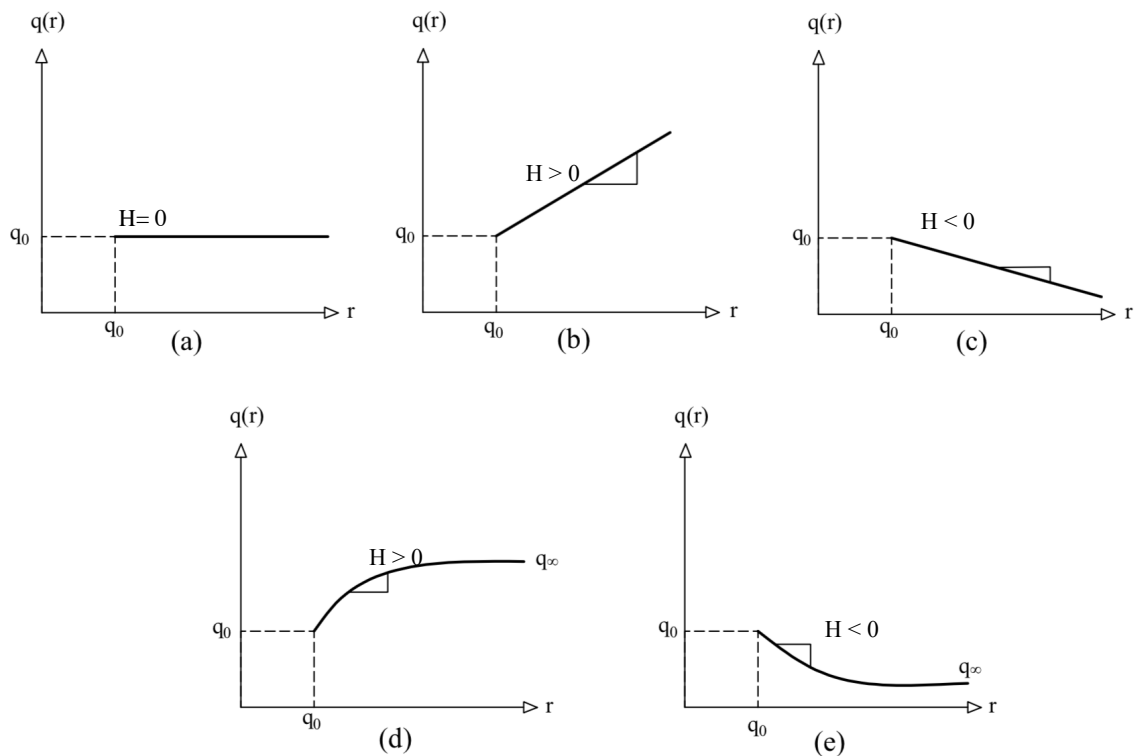


Figura 3.19 Lei de evolução da variável interna (a) com dano perfeito (b) endurecimento linear (c) abrandamento linear (d) endurecimento exponencial (e) abrandamento exponencial

Observa-se pela Figura 3.19 que a inclinação da curva da lei de evolução da variável interna material relaciona-se diretamente com o parâmetro H , denominado módulo de endurecimento/abrandamento. Esse parâmetro governa o comportamento do material após atingido o limite elástico. Para $H = 0$, tem-se dano perfeito, isto é, q permanece constante. Quando $H > 0$, a variável interna cresce e ocorre o processo de endurecimento, ou seja, aumento da tensão resistente com o aumento das deformações. Quando $H < 0$, a variável interna decresce configurando o abrandamento. Pode-se definir H conforme a seguinte equação:

$$H = \frac{\partial q(r)}{\partial(r)} = \dot{q}(r) \quad (3.44)$$

Como ilustrado na Figura 3.19, a lei de abrandamento/endurecimento pode ser linear ou ainda exponencial. Para o primeiro caso, tem-se

$$q(r) = q_o + H (r - q_o) \quad (3.45)$$

$$\dot{q}(r) = H \dot{r} \quad (3.46)$$

Já para a condição exponencial, descreve-se $q(r)$ da seguinte forma:

$$q(r) = q_\infty - (q_\infty - q_o) e^{A(\frac{1-r}{q_o})} \quad (3.47)$$

Onde $A > 0$ é um parâmetro relacionado à concavidade da lei exponencial e quando $q_\infty = 0$ tem sentido físico associado à energia de fratura do material, isto é, a energia necessária para abrir uma unidade de área em uma superfície de fratura. Partindo da igualdade entre a potência externa e potência tensional que atuam num sólido com largura h , a energia de fratura pode ser descrita da seguinte forma:

$$G_f = h \frac{q_o^2}{AE} \quad (3.48)$$

Evidentemente, no caso da lei exponencial H não é um valor constante, porém sua determinação é possível pela definição da Equação 3.46, ou seja, $H = \dot{q}(r)$. Dessa derivação obtém-se:

$$\dot{q}(r) = A \frac{(q_\infty - q_o)}{q_o} e^{A(1-\frac{r}{q_o})} = H \quad (3.49)$$

A consideração de uma lei exponencial de abrandamento é adequada para descrever o comportamento do concreto no modelo de dano à tração. A partir da hipótese de degradação completa do material, tomando $q_\infty = 0$, a expressão de H simplificada passa a ser:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.53)$$

Onde $\bar{\sigma}$ e $\boldsymbol{\varepsilon}$ passam a ser os tensores de tensões efetivas e de deformações, respectivamente. $\mathbf{C}$ é o tensor elástico de quarta ordem, calculado conforme a expressão $\mathbf{C} = 2G\mathbf{I} + \left(K - \frac{2}{3}G\right)\mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$. Onde $\mathbf{I}$ é o tensor unitário de quarta ordem, $\mathbf{1}$ é o tensor unitário simétrico de segunda ordem, G é o módulo de elasticidade transversal e K é o modulo de compressibilidade

Na extensão para a abordagem tridimensional, o tensor de tensões efetivas também se relaciona com o tensor de tensões aparente conforme a Equação 3.54.

$$\bar{\sigma} = (1 - d)\sigma \quad (3.54)$$

Estabelecida a relação constitutiva, resta definir o critério utilizado para aplicação da variável de dano. Evidentemente existem diversos critérios de dano, os quais são selecionados de acordo com a natureza do material. No estudo de materiais quase-frágeis como é o caso do concreto, o modelo proposto emprega o critério de dano baseado na tensão equivalente normal à base do elemento (σ_{nn}). Além disso, por se tratar de um modelo de dano à tração, o critério só é aplicado caso a tensão σ_{nn} seja de tração, de modo que na compressão admite-se comportamento linear.

Na técnica de fragmentação de malha, calcula-se essa componente normal de tensão (σ_{nn}) nos elementos de interface, cujo salto no campo de deslocamentos representa a fissuração do material, como descrito no item 3.2.

Sendo assim, para este critério as expressões da tensão equivalente e função delimitadora são:

$$\tau(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}_{nn} \quad (3.55)$$

$$\varphi(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma}_{nn} - r \leq 0 \quad (3.56)$$

Quanto às leis que regem as variáveis d , q e r apresentadas anteriormente para o caso unidimensional, estas também podem ser estendidas para análises 2D e 3D, completando o modelo de dano contínuo isotrópico.

3.4.6 Algoritmo de integração implícito-explicito (IMPL-EX)

Desenvolvido por OLIVER et al. (2008), o algoritmo IMPL-EX consiste num método que combina as vantagens dos métodos implícito e explícito no mesmo passo de integração. Por exemplo, o tensor constitutivo tangente sempre será simétrico e semi-positivo, gerando maior robustez. A

Tabela 3.5 descreve as etapas do algoritmo segundo os conceitos de mecânica do dano apresentados, onde o índice n refere-se ao passo de iteração.

Tabela 3-5. Descrição das etapas do algoritmo de integração IMPL-EX

Entrada: $\boldsymbol{\varepsilon}_{(n+1)}, r_{(n-1)}, r_n, \mathbf{C}, A, H$	
1. Cálculo das tensões efetivas	$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{(n+1)}$
2. Cálculo da tensão equivalente	$\tau_{(n+1)} = \bar{\sigma}_{nn(n+1)} = \mathbf{n}^T \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)} \cdot \mathbf{n}$
3. Cálculo implícito da variável interna	se $\begin{cases} \varphi(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)}) = \tau_{(n+1)} - r_n \leq 0 \rightarrow r_{(n+1)} = r_n \\ \varphi(\bar{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)}) = \tau_{(n+1)} - r_n > 0 \rightarrow r_{(n+1)} = \tau_{(n+1)} \end{cases}$
4. Extrapolação da variável interna	$\begin{cases} \Delta r_n = r_n - r_{(n-1)} \\ \tilde{r}_{(n+1)} = r_n + \frac{\Delta r_n}{\Delta t_n} \Delta t_{(n+1)} \end{cases}$
5. Atualizar variável de dano segundo lei exponencial	$\tilde{q}_{(n+1)} = q_{(n)} e^{A(1 - \frac{\tilde{r}_{(n+1)}}{q_{(n)}})}$ $\tilde{d}_{(n+1)} = 1 - \frac{\tilde{q}_{(n+1)}}{\tilde{r}_{(n+1)}}$
6. Cálculo do tensor de tensões atual	$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)} = (1 - \tilde{d}_{(n+1)}) \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$
7. Cálculo do tensor constitutivo tangente	$\tilde{\mathbf{C}}_{(n+1)}^{tang} = \frac{\partial \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}} = (1 - \tilde{d}) \mathbf{C}$
Saída: $r_{(n+1)}, \tilde{\boldsymbol{\sigma}}_{(n+1)}, \tilde{\mathbf{C}}_{(n+1)}^{tang}$	

3.5 PARÂMETROS

Os dados tipicamente obtidos em um ensaio experimental de espécimes de concreto são o módulo de elasticidade (E), a resistência à compressão (f_{cm}), resistência à tração (f_t) e a energia de fratura (G_f) no modo I de falha, a qual pode ser obtida por ensaios de tração uniaxial ou ensaios de flexão em vigas onde o modo I seja predominante (vigas entalhadas, por exemplo) . Desta forma, a reprodução dos resultados via simulação numérica necessita que ao menos tais parâmetros sejam conhecidos, para então se obter os demais parâmetros indiretamente.

Por recorrer a um modelo de dano à tração, a resistência à tração é um parâmetro de interesse na simulação, eventualmente seu valor pode ser determinado experimentalmente, porém nos casos em que ele não é determinado experimentalmente é possível estimá-lo por meio da correlação prevista na NBR 6118/2014.

$$f_t = 0,3 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (3.57)$$

Segundo o CEB/90(10), na ausência de dados experimentais, a energia de fratura G_f no modo I pode ser estimada como:

$$G_f = G_{f0} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,7} \quad (3.58)$$

Onde f_{cm} é a resistência média à compressão e G_{f0} é uma constante que depende do diâmetro máximo (d_{max}) dos agregados conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3-6. Valores de G_{f0} para cada diâmetro máximo

d_{max}	G_{f0}
8	0,025
16	0,03
32	0,058

Uma vez conhecidos os parâmetros do concreto homogêneo, deve-se transformá-los em parâmetros particulares a cada uma das fases. Para essa conversão, recorre-se ao auxílio de correlações e considerações acerca dos materiais constituintes e suas interações obtidos na literatura. Partindo do módulo de elasticidade homogêneo (E_{hom}) e conhecendo o módulo de elasticidade (E_{agg}) e volume do agregado (V_{agg}), é possível estimar o módulo de elasticidade da matriz (E_{mat}) conforme a Equação 3.59 desenvolvida por COUNTO (1964).

$$\frac{1}{E_{hom}} = \frac{1 - \sqrt{V_{agg}}}{E_{mat}} + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{V_{agg}}}{\sqrt{V_{agg}}}\right) E_{mat} + E_{agg}} \quad (3.59)$$

O parâmetro E_{agg} pode ser estimado de acordo com as informações conhecidas sobre o tipo de agregado, como por exemplo qual rocha originou sua composição. Diversos estudos (YANG et al., 1995; BAYAKASOGLU et al., 2008; PERRAS et al., 2014; YOU et al., 2015) apresentam esses valores compilados para diversas rochas, de modo que o valor deve ser adotado conforme as circunstâncias de cada ensaio. De forma semelhante, a resistência à tração do agregado natural (f_{tagg}) também pode ser estimada com base nos valores da literatura. Caso não se tenha nenhuma informação acerca da origem do agregado, as simulações executadas neste trabalho adotam $E_{agg} = 50$ MPa, $f_{tagg} = 5$ MPa e $G_f = 0,1$ N/mm, por se tratar de valores intermediários. As propriedades elásticas das fases do agregado reciclado também são obtidas a partir da Equação 3.59, considerando o mesmo como um volume representativo do concreto parental (ou de origem). Embora a distribuição das propriedades mecânicas do concreto em nível microscópico não seja muito clara, sabe-se que a ZTI é sua ligação mais fraca e desta forma, cria um caminho preferencial para a propagação de fraturas. Admite-se que seu módulo de elasticidade será o mesmo que o do material menos resistente que a compõe sua interface.

Quanto aos parâmetros necessários para a análise não-linear, partindo da análise em mesoescala do concreto convencional, RODRIGUES (2015) considerou a resistência à tração do concreto (f_t) como a média das resistências de suas duas fases fragmentadas, ou seja:

$$f_t = \frac{f_{mat} + f_{zti}}{2} \quad (3.60)$$

$$f_{zti} = \alpha \times f_{mat} \quad (\alpha = 0,5) \quad (3.61)$$

onde f_{mat} é a resistência à tração entre elementos de matriz, f_{zti} é a resistência à tração da ZTI e α é um parâmetro que quantifica a resistência da ZTI em relação à matriz de concreto, seu valor também varia de acordo com o tipo de concreto estudado, sendo maior em concretos de resistência elevada (POON et al., 2004; GAO et al., 2014; XIE et al., 2015).

A alteração proposta para a análise do CAR é que o agregado também passa a ser fragmentado, de modo que sua resistência também compõe o valor médio homogêneo f_t . Sendo assim, assumindo o parâmetro de resistência da rocha natural (f_{nat}) considera-se a seguinte expressão para o cálculo:

$$f_t = \frac{f_{itz} + f_{mat} + f_{nat}}{3} \quad (3.62)$$

As relações das Eq. 3.61 e 3.62 são aplicadas entre a matriz e a ZTI no concreto novo e no concreto que originou o AR, resultando na determinação dos parâmetros f_{mat}^{nova} , f_{mat}^{antiga} , f_{ZTI1} , f_{ZTI2} .

Quanto à ZTI₃, a qual é definida como a região entre a matriz nova e matriz antiga, sabe-se ser a região com maior ocorrência de microvazios, e, portanto, apresenta menor resistência (POON et al., 2004; XIAO et al., 2012). Uma forma simplificada de determinar seus parâmetros é a partir da adoção de um parâmetro de “redução” $0 < \beta < 1$ em relação à ZTI₁. Deste modo,

$$f_{ZTI3} \cong \beta \times f_{ZTI1} \quad (3.63)$$

No trabalho de XIAO et al. (2013b) propõe-se o estudo experimental e numérico de um parâmetro com significado semelhante variando de 0,5 a 1,0. Já nos trabalhos de PENG et al. (2017) e de XIAO et al. (2012) esse valor é de aproximadamente 0,7, norteando assim a escolha do parâmetro na simulação do CAR.

De maneira análoga, todas as relações adotadas para a resistência à tração também são utilizadas para calcular a energia de fratura, obtendo assim os 2 parâmetros necessários para a análise numérica com emprego do modelo de dano à tração.

4 RESULTADOS

4.1 GERAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

A fim de validar o gerador de agregados reciclados, foi introduzida a geometria de um espécimen dog-bone ensaiado por VAN MIER (1967). O espécimen possui dimensões 2400mm de altura e 1600mm de largura e para a granulometria foi adotada a curva de Fuller (WRIGGERS et al., 2006) com diâmetro variando entre 4mm e 8mm para um volume de agregado de 35%. Foram gerados então uma distribuição com 100% de agregados naturais e em seguida aumentou-se 25% do teor de AR até obter-se uma distribuição com 100% de AR, como mostra a Figura 4.1.

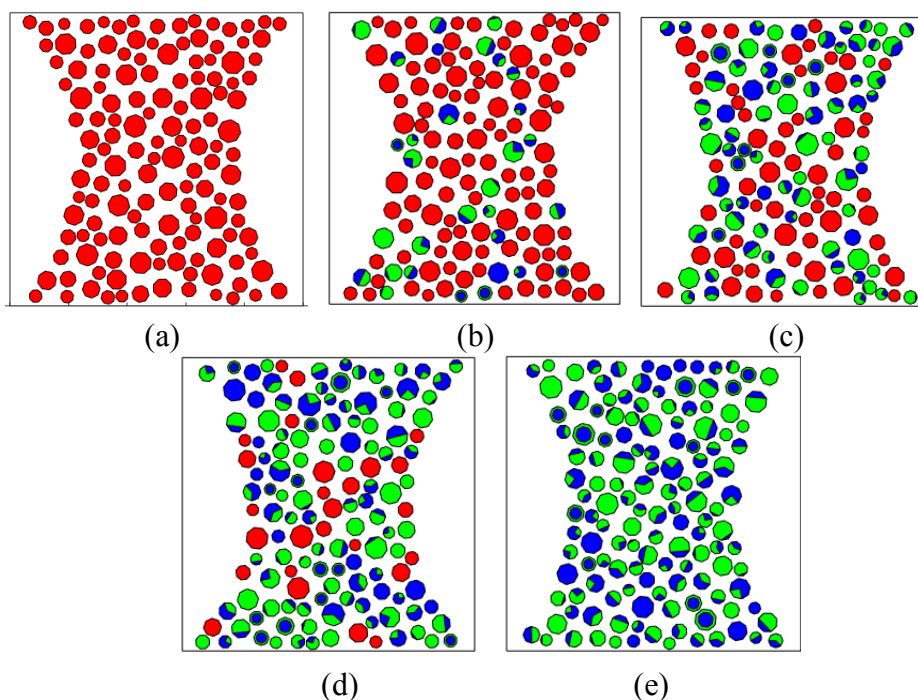


Figura 4.1 Geração de agregados no espécimen dog-bone para os teores de AR de (a) 0%; (b) 25%; (c) 50%; (d) 75%; (e)100%

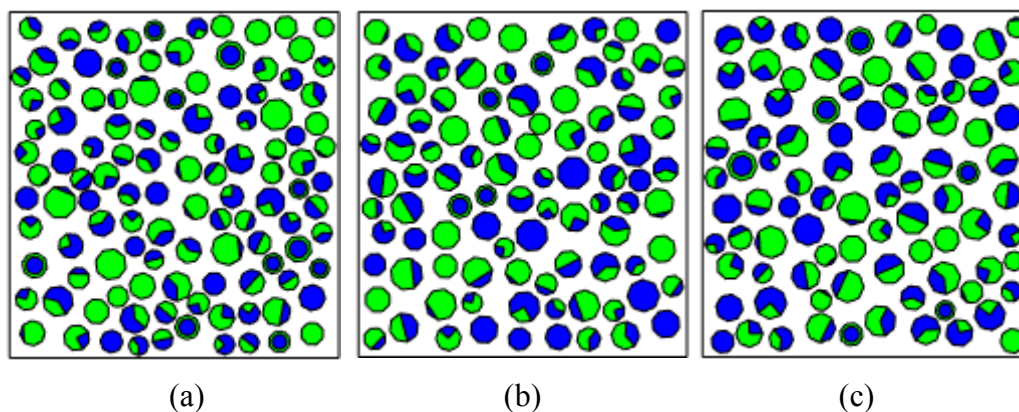


Figura 4.2 Geração de agregados reciclados segundo diferentes curvas granulométricas.

Além disso, utilizaram-se as diferentes curvas granulométricas hipotéticas da Figura 4.3 para a geração num volume de concreto de 150mmx150mm. Todas as curvas apresentam diâmetro mínimo de 6 mm e diâmetro máximo de 14 mm e foram divididos em 4 intervalos para a geração segundo o método “*Take and place*”, visivelmente o diâmetro médio dos agregados na Figura 4.2 (a) é menor e o diâmetro médio dos agregados na Figura 4.2 (c) é o maior.

Desta forma, o gerador de AR foi capaz de adaptar-se à geometria imposta posicionando os agregados em pontos aleatórios sem ocorrer sobreposição de partículas e que os AR foram gerados dentro de várias faixas de diâmetro e com diversas orientações de ZTI, de modo que a ferramenta pode atender os requisitos necessários para compor a análise numérica do CAR.

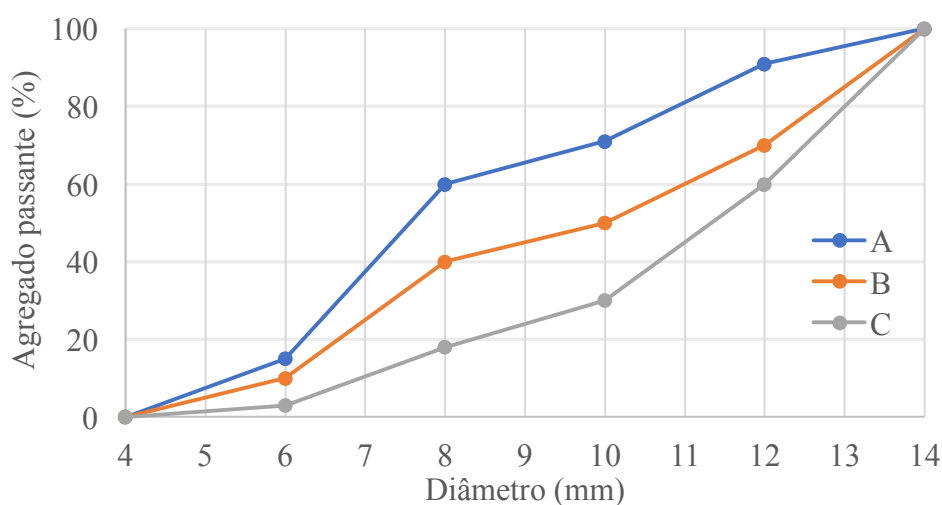


Figura 4.3 Curvas granulométricas utilizadas para a geração aleatória

4.2 FRAGMENTAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

Uma vez que a técnica de fragmentação ainda não havia sido empregada para posicionar elementos de interface entre os elementos regulares de agregado, o programa de fragmentação foi adaptado para realizar esse processo e distinguir cada uma das possíveis ZTI. A Figura 4.4 ilustra uma malha de elementos finitos para o concreto convencional em mesoescala, sendo que nesse caso foi necessária a inserção de 3 tipos diferentes de elementos de interface.

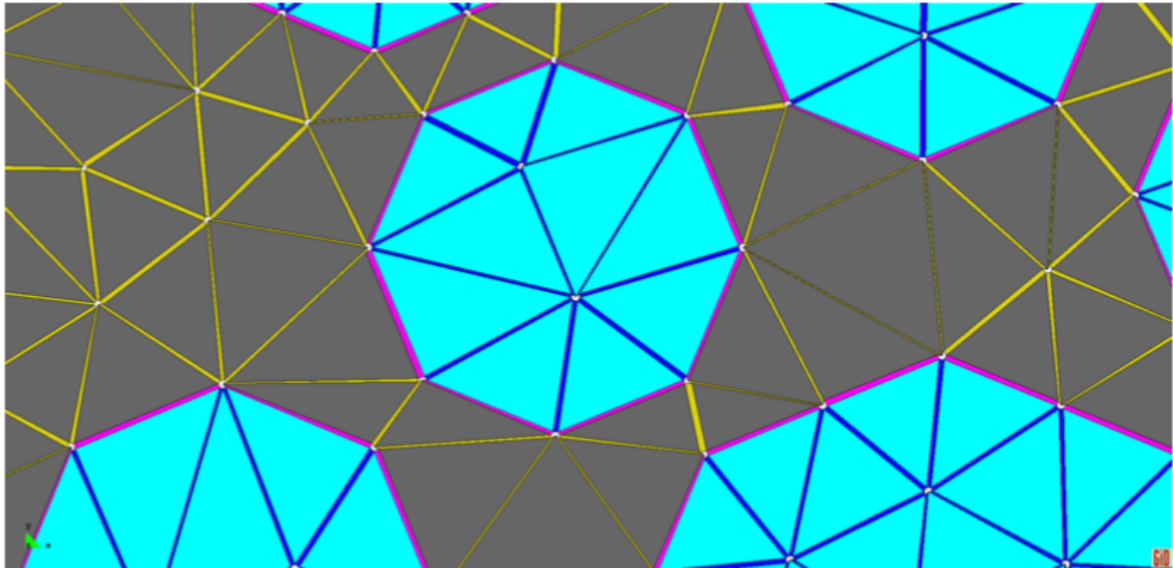


Figura 4.4 Fragmentação de malha de concreto com elemento de interface do agregado (em azul), elemento de interface da matriz (amarelo) e elemento da ZTI (rosa).

A Figura 4.5 ilustra uma malha de elementos finitos para o CAR em mesoescala, sendo que nesse caso foram inseridos 6 tipos diferentes de elementos de interface, tanto entre elementos de um mesmo material, como entre elementos de diferentes materiais, constituindo assim as ZTIs do CAR.

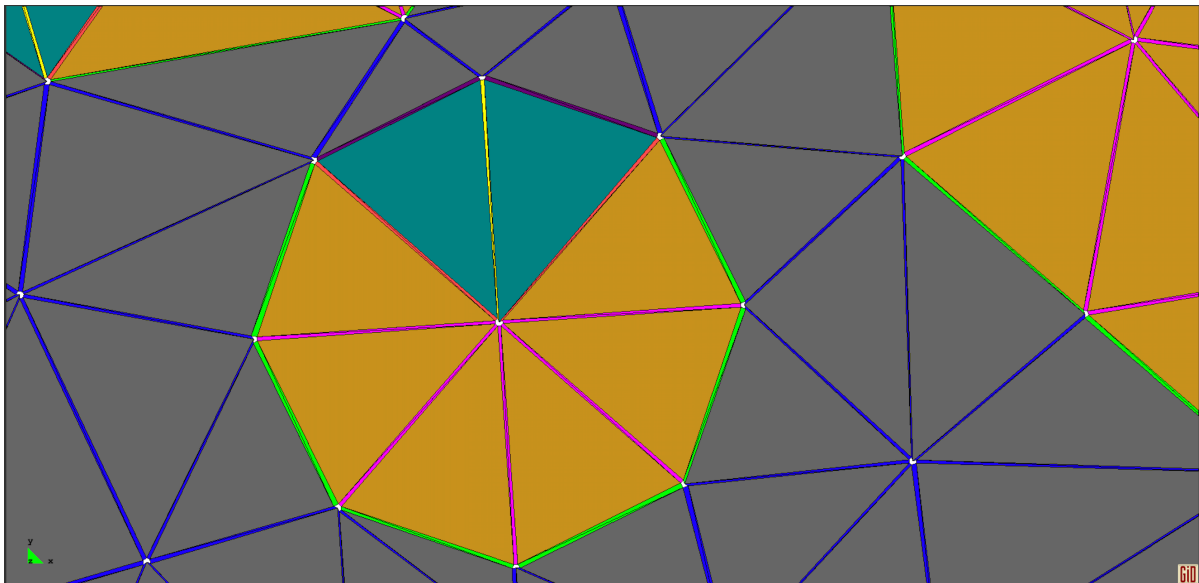


Figura 4.5 Fragmentação de malha do CAR

4.3 TESTES BÁSICOS DO MODELO DE DANO E DA MODELAGEM CONCORRENTE

Foram realizados testes de tração e compressão uniaxiais para um bloco (amostra 2D de concreto fictício com seção transversal de $200 \times 100 \text{ mm}^2$) para ilustrar o comportamento do modelo de dano descrito. O bloco é definido por elementos finitos triangulares regulares e um par de EIs é inserido na parte central do bloco para representar o caminho potencial de fratura. As análises são realizadas na condição de tensão plana, com 100 mm fora do plano. Os seguintes parâmetros elásticos são atribuídos: $E_c = 30 \text{ GPa}$ e $\nu_c = 0,2$ para elementos regulares e $E_i = 30 \text{ GPa}$ e $\nu_i = 0$ para elementos de interface. Resistência à tração e a energia de fratura assumida para os EIs são: $f_t = 3,0 \text{ MPa}$ e $G_f = 0,1 \text{ N/mm}$.

A Figura 4.6 mostra as curvas de deslocamento relativo às cargas de tração e compressão uniaxial. A curva representada pela linha sólida representa o comportamento estrutural típico do modelo de dano à tração usado. Além disso, a curva representada pela linha tracejada ilustra o comportamento rígido dos danos dos EIs. Observa-se que, no regime elástico, os componentes da descontinuidade de deslocamento são impedidos pela penalização de $1/h$ na Equação 3.11, ou seja, a descontinuidade do deslocamento tende a zero.

As malhas deformadas para o bloco sujeito a carga de tração e compressão no final da análise são mostradas na Figura 4.7. Com este modelo, os EIs podem representar a propagação de fissuras no modo I (Figura 4.7- a) ou transferir tensões de compressão sem sobreposição (Figura 4.7-b). A linha tracejada na Figura 4.7 representa o domínio do bloco no estado não deformado.

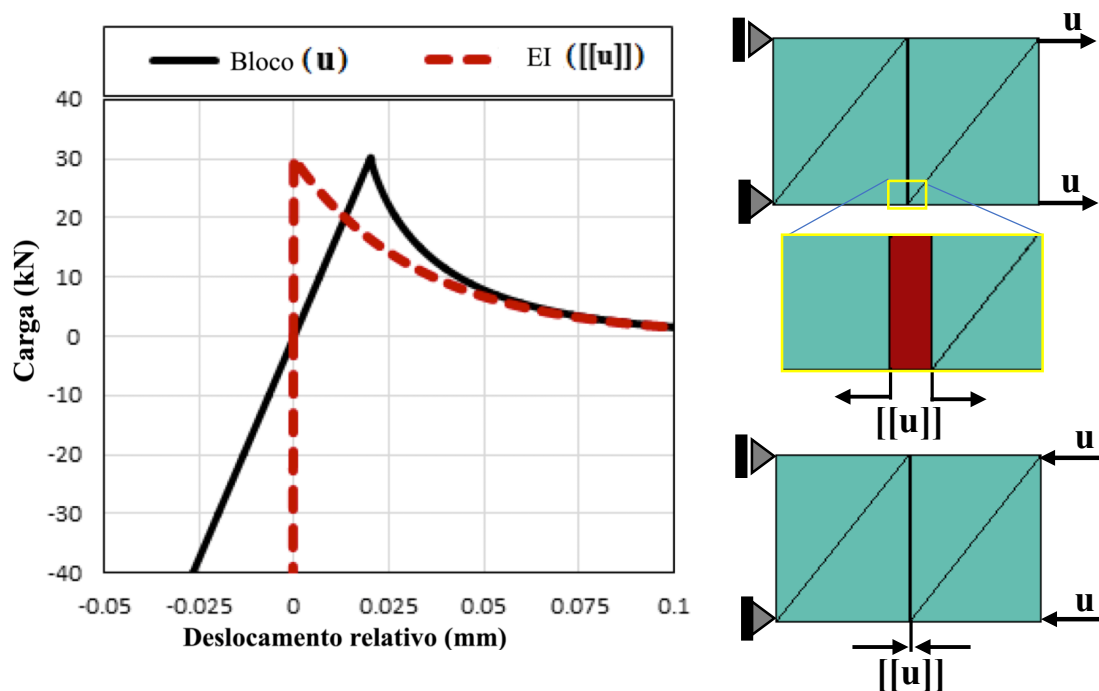


Figura 4.6 Curvas de carga por deslocamento para tração e compressão uniaxial

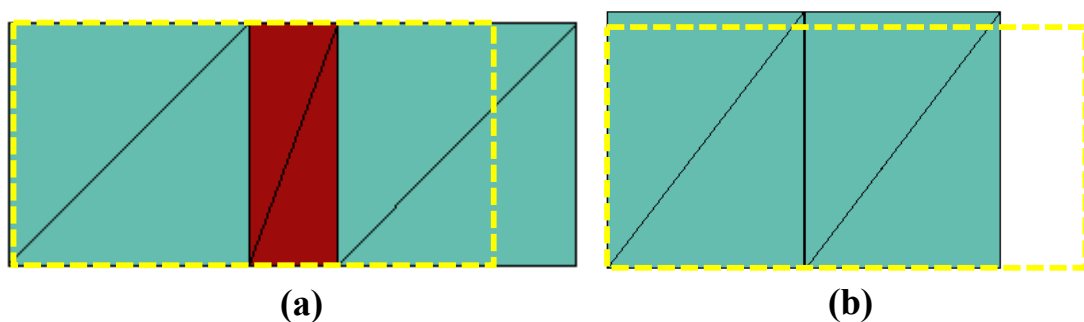


Figura 4.7 Configurações deformadas da amostra: a) em tensão e b) em compressão.

Um teste de tração uniaxial para um bloco com seção transversal de $200 \times 100 \text{ mm}^2$, dividido em duas partes e discretizado independentemente em macro e mesoescala, é realizado para exibir a eficácia da técnica de acoplamento aplicada para a simulação simultânea em múltiplas escalas de CAR, na qual os EFCs são usados para acoplar essas malhas não correspondentes, conforme mostrado na Figura 4.8. Essa figura também mostra as condições de contorno adotadas. As análises são realizadas na condição de tensão plana com dimensão fora do plano de 100 mm, e os parâmetros elásticos adotados são mostrados na Tabela 4.1. Cada parâmetro elástico do CAR na mesoescala é assumido e os parâmetros elásticos homogeneizados para o CAR na macroescala são calculados, usando o modelo baseado na teoria da mistura proposta por COUNTO (1964). O

elevado valor elástico de $\tilde{C} = 10^9$ N/mm é assumido para a matriz de constantes elásticas (por exemplo, $C = \tilde{C}I$).

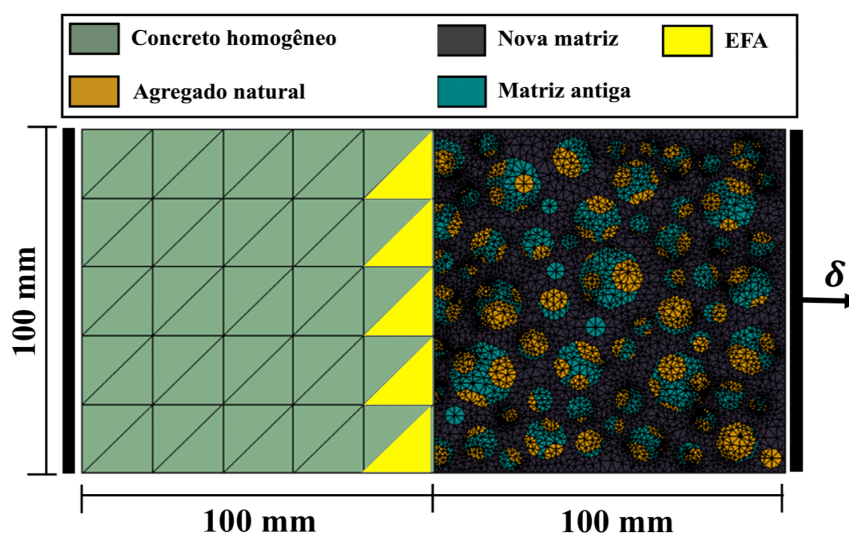


Figura 4.8 Geometria, condições de contorno e malhas não-conformes para os testes básicos simultâneos em múltiplas escalas 2D.

Tabela 4-1 Parâmetros de material para testes básicos simultâneos em múltiplas escalas 2D

Material	Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poison
Propriedades homogêneas do concreto	31,21	0,2
Agregado Natural	50,00	0,2
Nova matriz	30,00	0,2
Matriz antiga	25,00	0,2

A Figura 4.9 ilustra o campo de deslocamento nas direções horizontal (a) e vertical (b). Para mostrar a configuração deformada do bloco, é usado um fator de escala de 300 vezes a configuração original (domínio limitado pela linha tracejada). Observa-se que a técnica de acoplamento pode garantir adequadamente a continuidade do deslocamento nos subdomínios da macro e mesoescala.

Ressalta-se que dentro da região mesoscópica ocorrem leves perturbações no campo de deslocamento provocadas pelos diferentes módulos de elasticidade, as quais poderiam ser melhor visualizadas adotando-se uma escala de cores mais refinada.

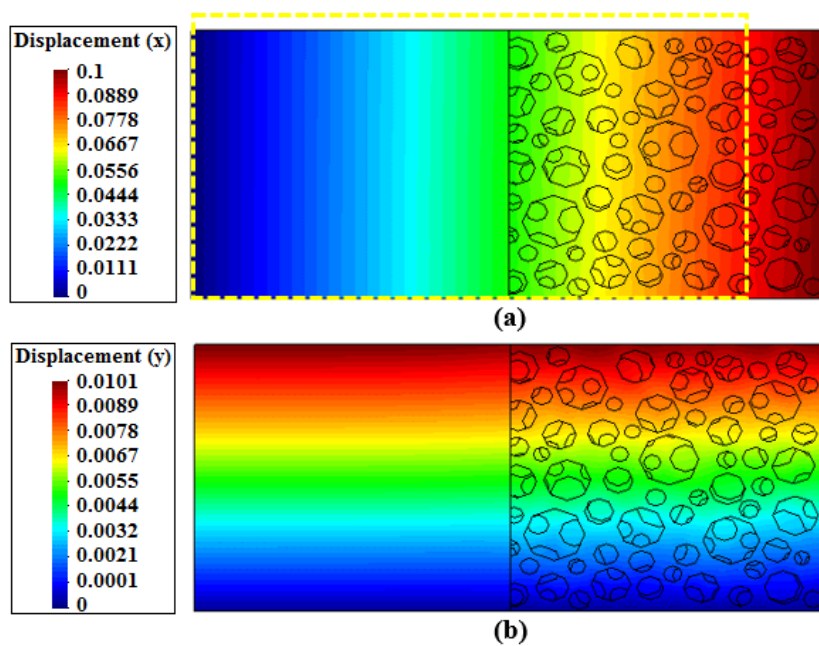


Figura 4.9 Resultados dos campos de deslocamento para o teste de tensão: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical (efeito de Poisson) em malhas deformadas (fator de escala de 300).

4.4 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Uma vez constatada a viabilidade de fragmentar a malha do agregado, uma aplicação mais imediata em termos de parâmetros ocorre no concreto de alto desempenho (CAD), onde mesmo não havendo a presença de AR, a matriz recebe aditivos que modificam suas propriedades de resistência, de modo que o agregado pode vir a ser a fase menos resistente do compósito e consequentemente, sofrer fraturamento. Além disso, existem casos onde o AR provém de um concreto de alto desempenho (CASUCCIO et al., 2008), de modo que estabelecer as relações que envolvem os parâmetros necessários para a modelagem do CAD contribui para a modelagem do CAR.

Neste exemplo, as vigas de CAD testadas experimentalmente por SIREGAR et al. (2017) são simuladas numericamente, empregando o modelo multiescala concorrente proposto. A avaliação experimental da influência da granulometria do agregado no CAD foi realizada em vigas com 850mm de comprimento, 800mm de vão, 100x100mm de área de seção transversal e 3mm de entalhe, como mostrado na Figura 4.10. O deslocamento e a deflexão da abertura da fissura das vigas foram medidos pelos autores.

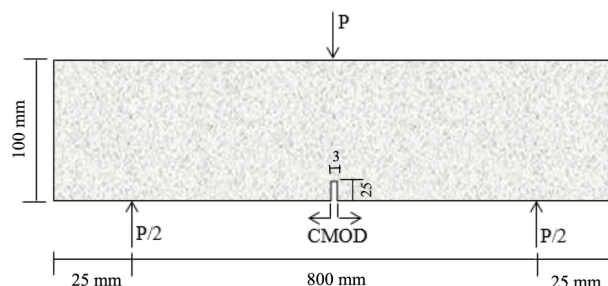


Figura 4.10 Representação das vigas entalhadas ensaiadas

Três diferentes granulometrias para o agregado gráudo e duas relações água/cimento foram utilizados na produção de concreto. Todo o agregado usado estava dentro da faixa de 5 mm a 16 mm. A classificação A tem o diâmetro médio (A_D) mínimo, enquanto a classificação B tem A_D máximo, como pode ser observado na Figura 4.11.

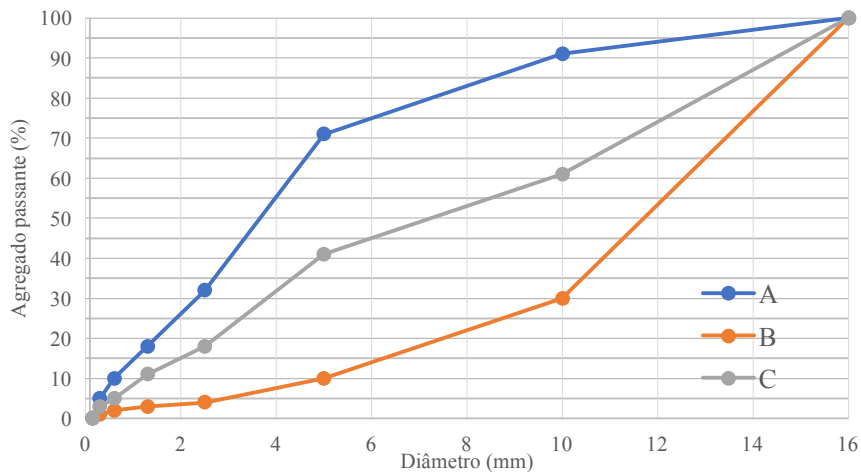


Figura 4.11 Curvas granulométricas A,B e C

As duas relações água/cimento diferentes são referidas como Mix 1 e 2. A primeira relação a/c é de 0,2 e a segunda é 0,3. Portanto, ambas as misturas resultam em concretos de alta resistência, mas o Mix 1 tem uma resistência à compressão maior do que o Mix 2. A Tabela 4-2 exibe as propriedades do concreto endurecido para todas as granulometrias testadas.

Tabela 4-2. Resistência à compressão e energia de fratura de cada tipo de concreto usado para o teste experimental.

Mix	f_{cm} (MPa)	G_f (N/mm)
A1	85.2	0.0938
B1	97.6	0.1499
C1	94.8	0.1267
A2	68.2	0.0851
B2	66.0	0.1465
C2	68.4	0.1343

A Figura 4.12 ilustra a representação multiescala da viga, na qual apenas uma região próxima do entalhe é representada em mesoescala e está acoplada ao restante da viga que é considerado homogêneo.

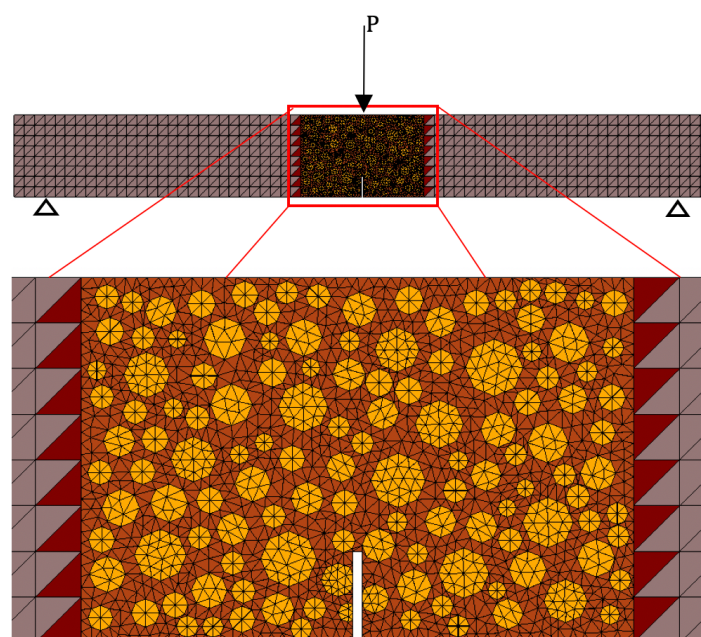


Figura 4.12 Modelo numérico para análise em multiescala das vigas entalhadas

Para verificar a capacidade do modelo de capturar o efeito de usar curvas granulométricas diferentes, os parâmetros definidos para o agregado, matriz e ZTI foram os mesmos para amostras feitas da mesma mistura (relação a/c). Apesar de cada espécimen apresentar sua própria resistência à compressão e energia de fratura (conforme mostrado na Tabela 4-2), os valores médios para cada mistura foram calculados. Isso significa que os espécimes A1, B1 e C1 receberam os mesmos parâmetros, de modo que a única diferença seria a distribuição do agregado dentro da amostra. O mesmo ocorreu com os exemplares A2, B2 e C2.

Como mencionado anteriormente, o modelo de dano constitutivo é baseado na resistência à tração do material, portanto, utilizando a correlação fornecida pela Norma Brasileira ABNT / NBR 6118 (2014), foi calculada a média das misturas 1 e 2. Os valores particulares para cada material interfacial foram calculados utilizando as Equações 3.57 a 3.62, como mostrado na Tabela 4-3.

Tabela 4-3. Propriedades de fratura dos elementos de interface

Mix 1		
Fase	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Agregado - Agregado	4.0	0.100
Matriz - Matriz	5.9	0.158
ZTI	4.2	0.111
Mix 2		
Agregado - Agregado	4.0	0.100
Matriz - Matriz	4.7	0.140
ZTI	3.3	0.100

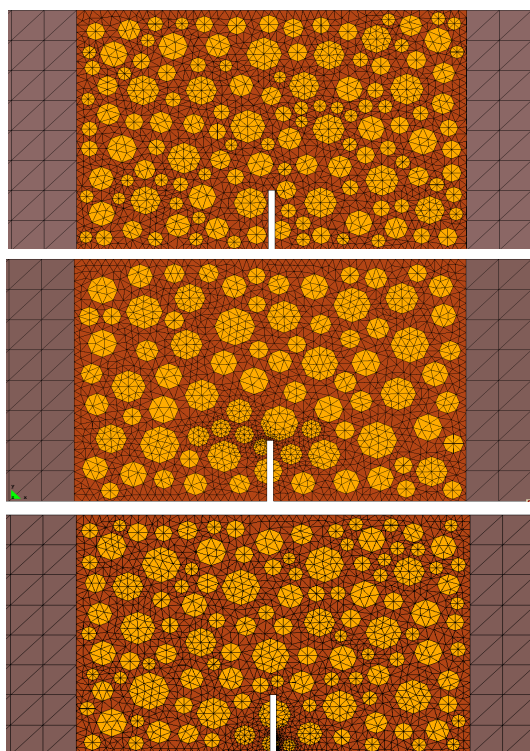
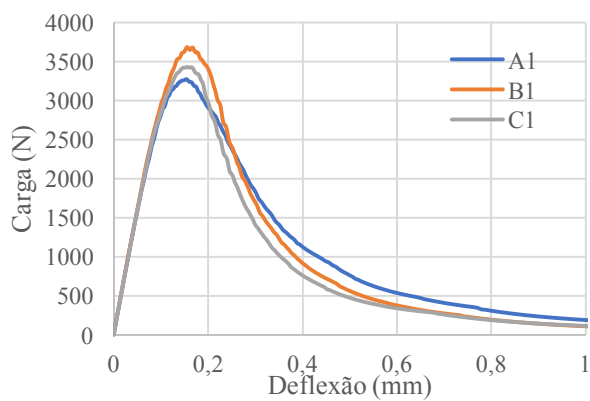


Figura 4.13 Representação em mesoescala das distribuições granulométricas A, B e C, respectivamente.

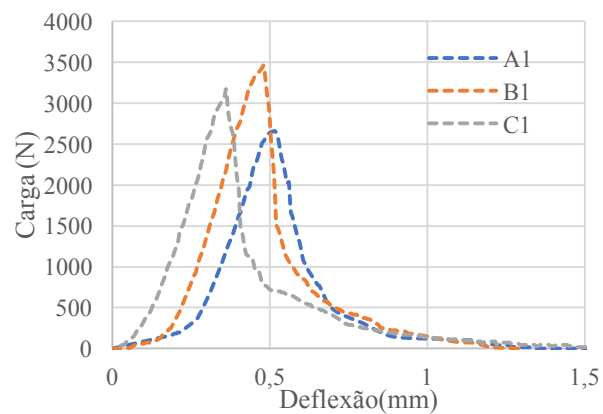
Uma vez que os parâmetros foram definidos, a análise prosseguiu para a geração do modelo de mesoescala ilustrada na Figura 4.13, onde há uma diferença visível na classificação. Como uma abordagem 2D é adotada, 3 realizações diferentes foram geradas para cada graduação, a fim de minimizar a influência da distribuição. As curvas apresentadas nas próximas figuras são as respostas médias obtidas.

A simulação do Mix 1 demonstrou que, de fato, a granulometria tem impacto no comportamento mecânico do CAD. Os resultados nas Figuras 4.14 a 4.15 sugerem que o maior pico de carga foi obtido pela granulometria B, que possui o máximo diâmetro médio (A_D) de partícula. Os resultados experimentais para deflexão também apresentam a distribuição B como a melhor resposta, seguida pela classificação C e A. O pico máximo de carga para a análise numérica e experimental é muito próximo, mas o teste experimental apresenta maior diferença entre as diferentes classificações.

As curvas da resposta medem a abertura de fissura, também denominada “Crack Mouth Opening Displacement” (CMOD). As curvas numéricas e experimentais ilustradas na Figuras 4.16 também estão de acordo, pois a classificação C tem uma carga de pico maior que a classificação A em ambos os casos. Estes resultados sugerem que concretos de alta resistência com maiores diâmetros médios são capazes de dissipar mais energia do que o CAD com menor diâmetro médio.

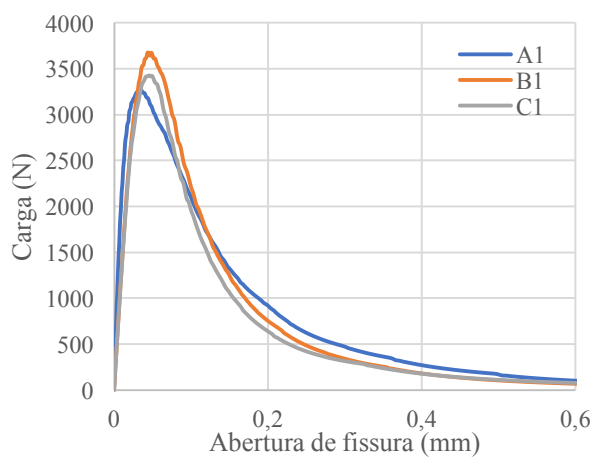


(a)

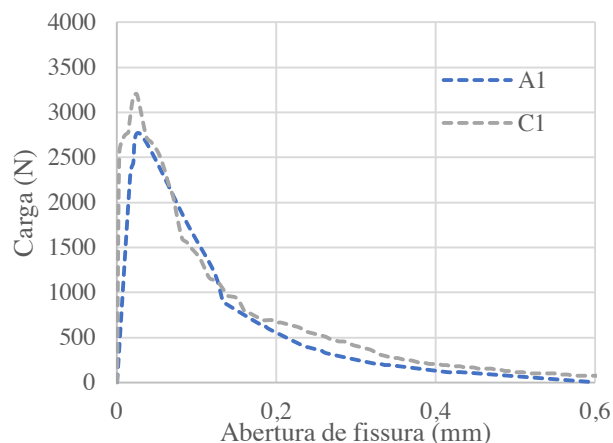


(b)

Figura 4.14 Curvas de carga-deflexão do Mix 1: (a) respostas numéricas; (b) resultados experimentais



(a)



(b)

Figura 4.15 Curvas de carga x abertura de fissura do Mix 1: (a) respostas numéricas; (b) resultados experimentais

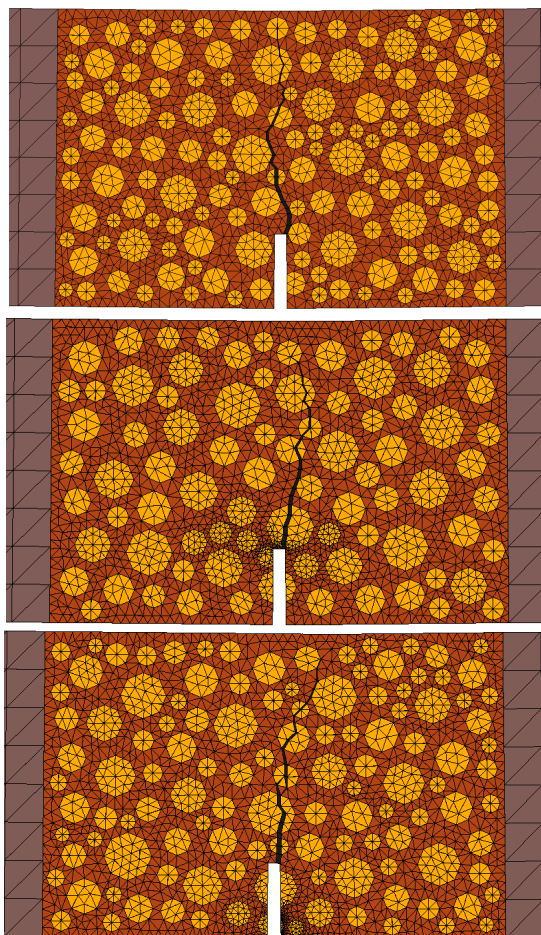


Figura 4.16 Processo de fratura nas amostras A1, B1 e C1, respectivamente.

A partir dos resultados pós-processo da Figura 4.16, é possível perceber que em todos os casos as fraturas se propagaram através do agregado, o que também foi relatado na análise experimental. A formação de rachaduras exibiu um caminho muito inclinado, como observado no espécime atual por SIREGAR et al. (2017), que é retratado na Figura 4.17. O modelo numérico foi capaz de representá-lo atribuindo ao agregado e à ZTI menor resistência à tração e energia de fratura.

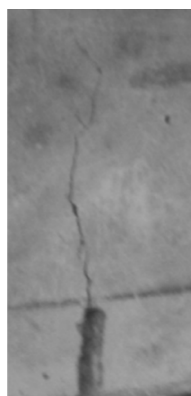


Figura 4.17 Trajetória da fratura (SIREGAR et al., 2017)

A simulação do Mix 2 (Figuras 4.18 a 4.20) resultou em uma resposta semelhante ao Mix 1, onde a curva B apresentou um pico de carga ligeiramente maior e a força residual foi próxima para todas as granulometrias. Uma possível razão pela qual a classificação com maior diâmetro médio agregado apresentou um pico de carga maior em ambos os casos é devido ao maior espaço entre agregados (a fase mais fraca), resultando em uma trajetória de fratura com maior comprimento. Além da distribuição do agregado, notou-se que a mudança na relação a/c também afetou a resposta numérica, uma vez que para o Mix 2 (Figura 4.18-a), a granulometria A apresentou melhor resposta que a C, ao contrário do que foi observado na Mix 1 (Figura 4.15-a). A sensibilidade da relação a/c também foi observada por SIREGAR et al. (2017) sugerindo que uma redução no tamanho do agregado gráudo na mistura está associada a uma menor energia de fratura.

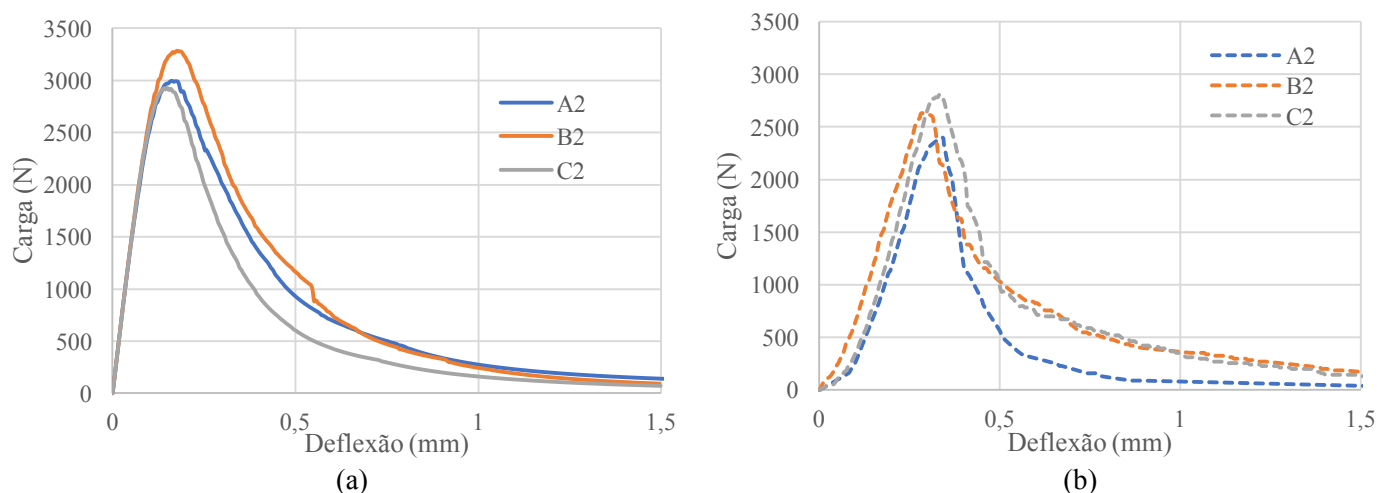


Figura 4.18 Curvas de carga-deflexão do Mix 2: (a) respostas numéricas; (b) resultados experimentais

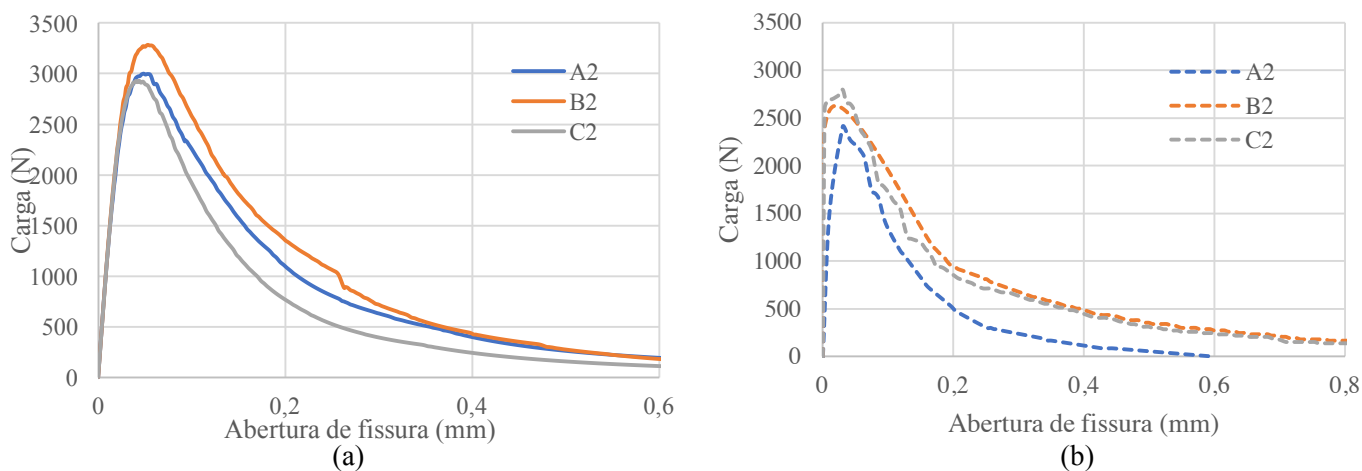


Figura 4.19 Curvas de carga x abertura de fissura do Mix 2: (a) respostas numéricas; (b) resultados experimentais

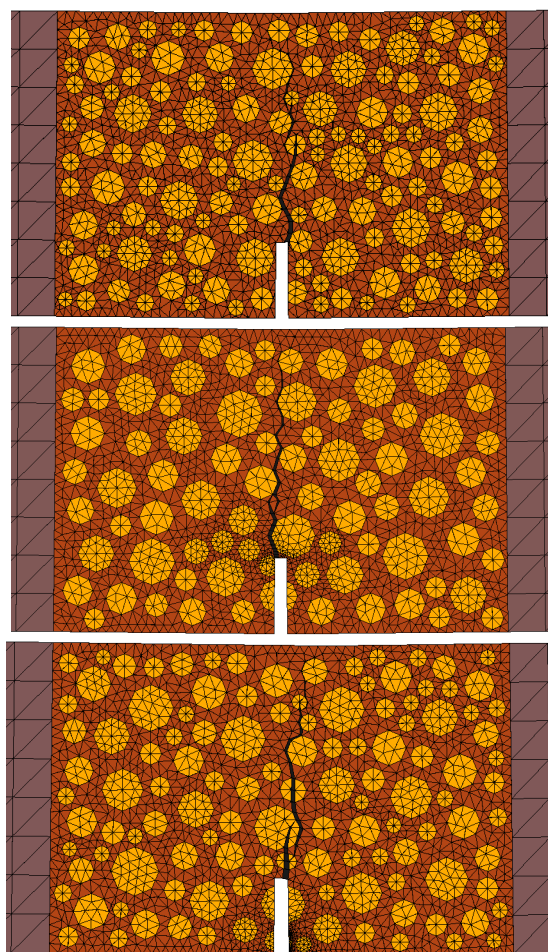


Figura 4.20 Processo de fratura nas amostras A2, B2 e C2, respectivamente.

No entanto, comparada com a análise anterior, a inclinação da fratura (Figura 4.20) foi muito menor, o que pode ser explicado pelo fato de que a relação a/c no Mix 2 é maior, e, portanto, agregado e matriz têm resistências mais próximas, como mostrado na Tabela 4-3.

4.5 VIGAS ENTALHADAS COM DIFERENTES TRAÇOS DE CONCRETO

Este exemplo se baseia no estudo realizado por CASUCCIO et al. (2008) em vigas entalhadas de concreto com 3 tipos diferentes de agregado: agregado natural de granito (tipo G); agregado reciclado proveniente de CAD com f_{ck} de 55 ± 5 MPa (tipo A) e agregado reciclado proveniente de concreto convencional com f_{ck} de 30 ± 5 MPa (tipo B). A granulometria utilizada foi uma mistura de 15% no intervalo de 6 a 12 mm, 70% de 6 a 20 mm e 15% de 10 a 30 mm. Além dos diferentes tipos de agregado, foram variadas as relações a/c, resultando em concretos com diferentes resistências: 18 MPa, 37 MPa e 48 MPa. Deste modo, o espécimen A18 possui agregado

do tipo A e dosagem para o f_{ck} de 18 MPa e assim por diante.

Testes de flexão de três pontos foram realizados em amostras entalhadas para estudar o comportamento à tração usando vigas de 105 mm de altura e 75 mm de largura, como ilustra a Figura 4.21. O entalhe foi cortado a uma profundidade igual a metade da altura da viga usando uma serra de diamante. As vigas foram carregadas ao longo de um vão de 400 mm a uma taxa de 0,02 mm/min para desta forma, medir a abertura de fissura no meio do vão.

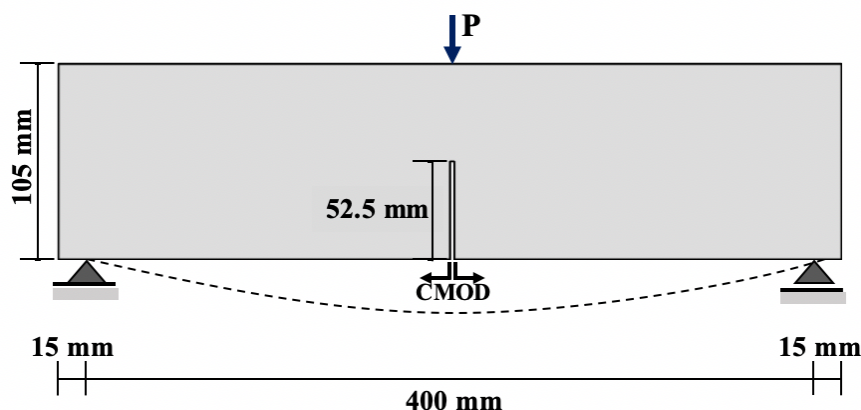


Figura 4.21 Configuração das vigas ensaiadas por CASUCCIO et al. (2008)

A Tabelas 4-4 contém os dados do ensaio experimental, enquanto as Tabelas 4-5 a 4-16 contém todos os parâmetros que foram inseridos no programa de elementos finitos. O parâmetro α é escolhido de acordo com a resistência à compressão experimental do concreto, ou seja: $\alpha=0,5$ para o $f_c \sim 18$ MPa, $\alpha= 0,75$ para o $f_c \sim 37$ MPa e $\alpha= 0,85$ para o $f_c \sim 48$ MPa. A principal explicação para a escolha desses valores α está no fato de que a resistência da ZTI é ampliada à medida que a resistência do concreto aumenta (POON et al.,2004; GAO et al., 2014; XIE et al., 2015). A mesma estratégia foi aplicada para os parâmetros de energia de fratura empregados. Considerou-se, ainda, o valor de $\beta=0,7$ para o parâmetro de redução da ZTI₃.

Tabela 4-4. Parâmetros experimentais obtidos por CASUCCIO et al. (2008)

Concreto	E (GPa)	ν	f_{ck} (MPa)	G_f (N/mm)
G18	27,1	0,186	18,1	0,143
A18	23,4	0,186	18,0	0,090
B18	22,6	0,185	15,4	0,099
G37	33,1	0,164	37,5	0,147
A37	28,8	0,168	36,4	0,107
B37	28,3	0,166	35,7	0,081
G48	39,9	-	48,4	0,155
A48	34,2	-	44,4	0,113
B48	32,7	-	43,8	0,106

Tabela 4-5. Parâmetros utilizados na análise do concreto A18

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	26,4	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	18,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	23,4	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	26,4	0,2	4,00	0,120
M. nova- M. nova	Interface	18,0	0	2,79	0,186
ZTI ₁	Interface	18,0	0	1,39	0,093
ZTI ₂	Interface	26,4	0	3,00	0,090
ZTI ₃	Interface	18,0	0	0,98	0,065

Tabela 4-6. Parâmetros utilizados na análise do concreto B18

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	22,9	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	18,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	22,6	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	22,0	0,2	2,67	0,119
M. nova- M. nova	Interface	18,0	0	2,79	0,186
ZTI ₁	Interface	18,0	0	1,39	0,093
ZTI ₂	Interface	22,9	0	1,33	0,060
ZTI ₃	Interface	18,0	0	0,98	0,065

Tabela 4-7. Parâmetros utilizados na análise do concreto G18

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	18,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	27,1	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. nova- M. nova	Interface	18,0	0	2,79	0,186
ZTI ₁	Interface	18,0	0	1,39	0,093

Tabela 4-8. Parâmetros utilizados na análise do concreto A37

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	26,4	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	25,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	28,8	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	26,4	0,2	4,00	0,120
M. nova- M. nova	Interface	25,0	0	3,47	0,166
ZTI ₁	Interface	25,0	0	2,60	0,125
ZTI ₂	Interface	26,4	0	3,00	0,090
ZTI ₃	Interface	18,0	0	1,82	0,087

Tabela 4-9. Parâmetros utilizados na análise do concreto B37

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	22,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	25,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	28,3	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	22,0	0,2	2,67	0,119
M. nova- M. nova	Interface	25,0	0	3,47	0,166
ZTI ₁	Interface	25,0	0	2,60	0,125
ZTI ₂	Interface	22,9	0	1,33	0,060
ZTI ₃	Interface	22,0	0	1,82	0,087

Tabela 4-10. Parâmetros utilizados na análise do concreto G37

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	25,0	0,2	-	-
Concreto	Regular	33,1	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. nova- M. nova	Interface	25,0	0	3,47	0,166
ZTI ₁	Interface	25,0	0	2,60	0,125

Tabela 4-11. Parâmetros utilizados na análise do concreto A48

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	36,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	33,4	0,2	-	-
Concreto	Regular	34,2	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	36,0	0,2	4,00	0,120
M. nova- M. nova	Interface	33,4	0	5,03	0,170
ZTI ₁	Interface	33,4	0	4,27	0,145
ZTI ₂	Interface	26,4	0	3,00	0,090
ZTI ₃	Interface	33,4	0	2,12	0,083

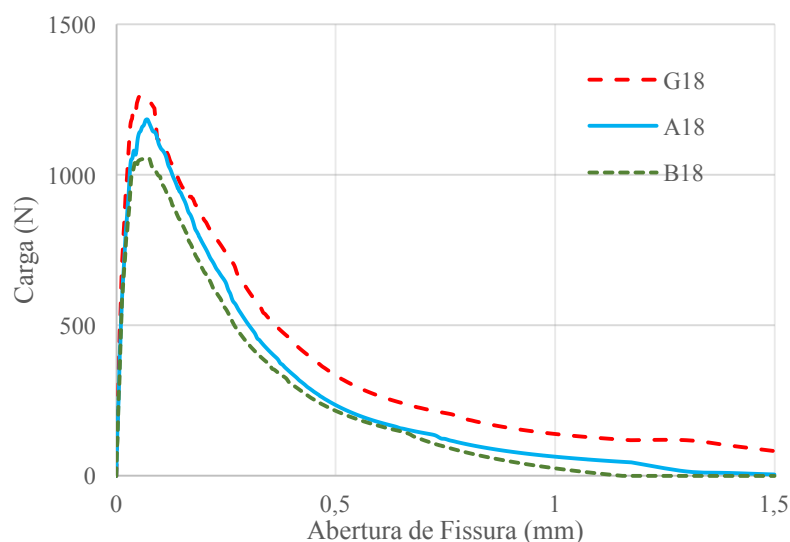
Tabela 4-12. Parâmetros utilizados na análise do concreto B48

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	22,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	33,4	0,2	-	-
Concreto	Regular	32,7	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. Antiga-M. Antiga	Interface	22,0	0,2	2,67	0,119
M. nova- M. nova	Interface	22,9	0	5,03	0,170
ZTI ₁	Interface	33,4	0	4,27	0,145
ZTI ₂	Interface	22,0	0	1,33	0,060
ZTI ₃	Interface	22,0	0	2,12	0,083

Tabela 4-13. Parâmetros utilizados na análise do concreto G48

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	f_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha do AR	Regular	50,0	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	33,4	0,2	-	-
Concreto	Regular	39,9	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	50,0	0,2	5,00	0,150
M. nova- M. nova	Interface	33,4	0	5,03	0,170
ZTI _I	Interface	33,4	0	4,27	0,145

A seguir são apresentadas as curvas para comparação das respostas experimentais e numéricas do problema estudado, bem como as configurações deformadas dos espécimes. Conforme ilustrado nas Figuras 4.22 e 4.23, o concreto de f_{ck} de 18 MPa com agregados naturais (G18) apresentou a melhor resposta, seguido pelo concreto com agregado proveniente do CAD (A18) e finalmente pelo concreto com AR proveniente de concreto convencional (B18). Os picos das respostas numéricas e experimentais foram satisfatoriamente próximos, havendo uma pequena diferença na energia dissipada. A Figura 4.24 ilustra a propagação de fraturas nas vigas usando um fator de ampliação de 2,5. É possível notar que a orientação da fissura principal foi semelhante nos 3 casos estudados, porém a viga B18 apresentou uma fratura mais sinuosa, uma vez que apresenta ZTI mais enfraquecida em comparação às outras. Em nenhuma das realizações houve faturamento de agregados, isso ocorre por se tratar de um concreto de baixa resistência.

Figura 4.22 Curvas numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 18 MPa

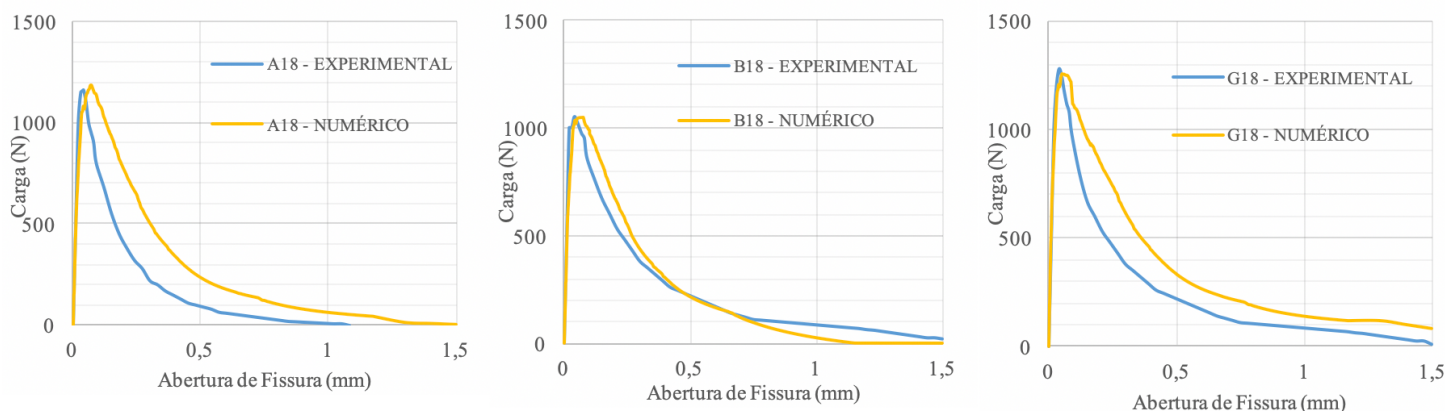


Figura 4.23 Curvas experimentais e numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 18 MPa

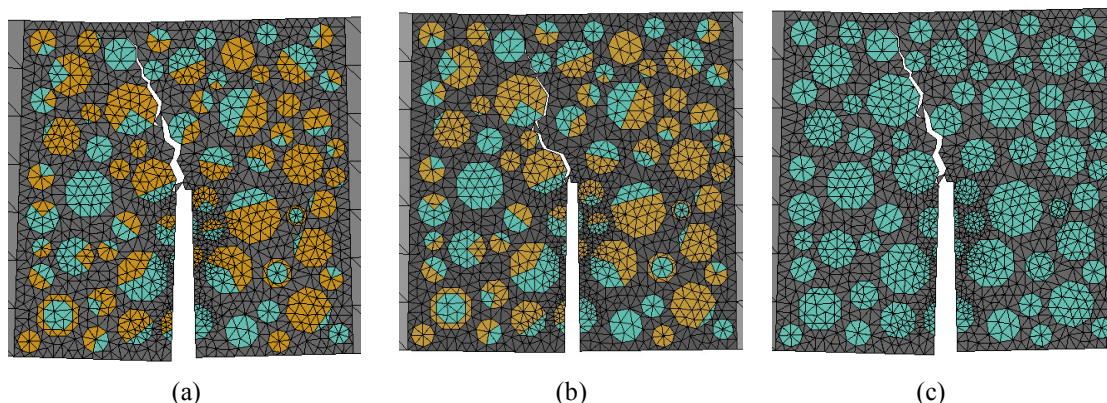


Figura 4.24 Representação do fraturamento nas vigas (a) A18; (b) B18; (c) G18;

Para o concreto de f_{ck} 37 MPa a mesma classificação das curvas ocorreu, sendo que nesse caso, como o concreto apresenta uma resistência mais elevada, a utilização do AR ocasionou uma queda de 17% na carga de pico, como mostra a Figura 4.25. A comparação de curvas da Figura 4.26 mostra que as respostas obtidas foram próximas do que se observou experimentalmente e pela Figura 4.27 nota-se que o padrão das fissuras foi mais alterado nesse caso do que nas vigas com resistência inferior.

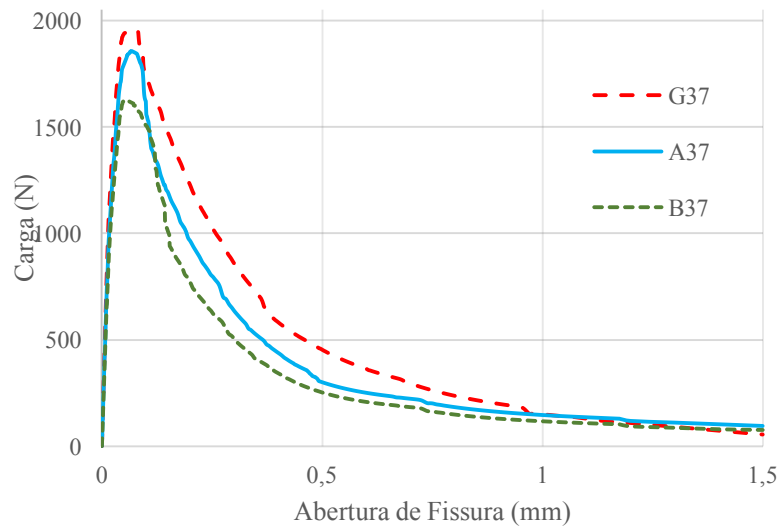


Figura 4.25 Curvas numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 37 MPa

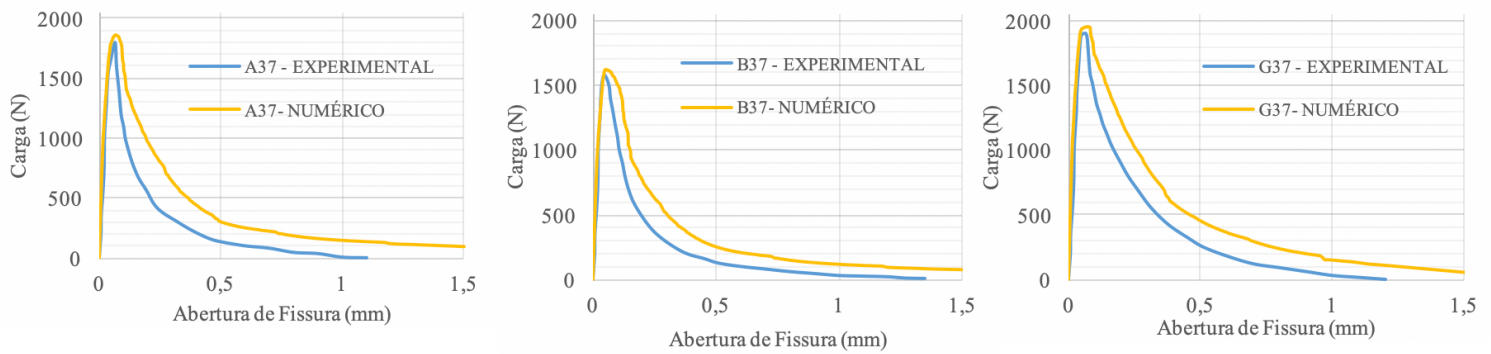


Figura 4.26 Curvas experimentais e numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 37 MPa

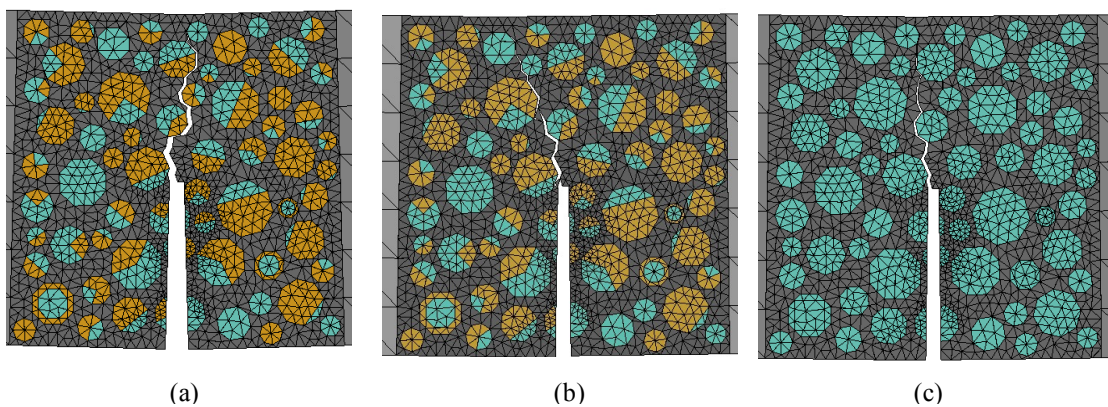


Figura 4.27 Representação do fraturamento nas vigas (a) A37; (b) B37; (c) G37;

A análise das vigas produzidas com concreto de $f_{ck} \sim 48$ MPa indica que a discrepância entre as curvas com diferentes agregados também foi significativa, isso ocorre devido à matriz ser

relativamente mais resistente, o que intensifica a influência do tipo de agregado no compósito. Em média, observou-se uma redução de 8% quando há o emprego de AR proveniente do CAD e uma redução de 14% quando o AR provém de concreto com resistência normal, como mostra a Figura 4.28. Houve correspondência entre as curvas numéricas e experimentais, como ilustra a Figura 4.30, porém neste caso assim como nos demais observou-se uma tendência em superestimar a energia pós-pico, o que aparenta ser uma característica do modelo proposto.

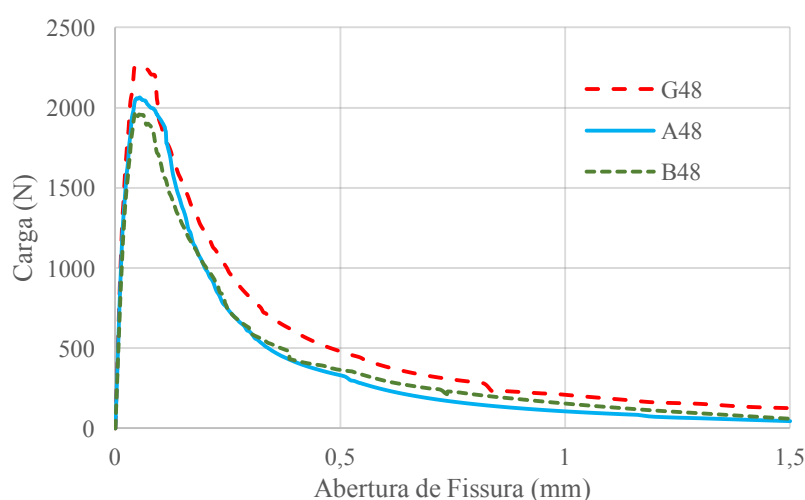


Figura 4.28 Curvas numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 48 MPa

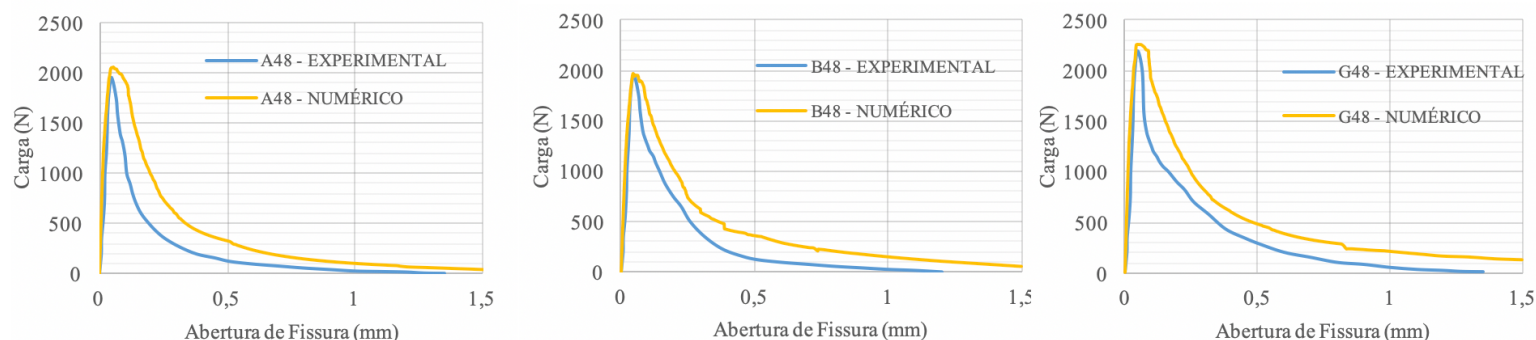


Figura 4.29 Curvas experimentais e numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 48 MPa

A Figura 4.30 compara as configurações deformadas dos espécimes, observou-se que todas as fraturas apresentam comportamento mais sinuoso nesse caso, isso ocorre, pois, a matriz é mais resistente, de modo que a energia é mais facilmente dissipada nas ZTIs, resultando em uma fratura menos direta. Além disso, no caso B48, houve ruptura de agregados, sendo o agregado do tipo “B” a representação mais generalizada da produção de concreto reciclado, onde muitas vezes não há um controle tão rigoroso da origem do concreto parental. Nos casos em que a matriz era

relativamente mais fraca, desenvolveu-se uma fratura mais inclinada principalmente composta por elementos da ZTI. Conforme a resistência da matriz foi aumentada, a fratura tornou-se mais concentrada na região central e também percorreu seções de agregado.

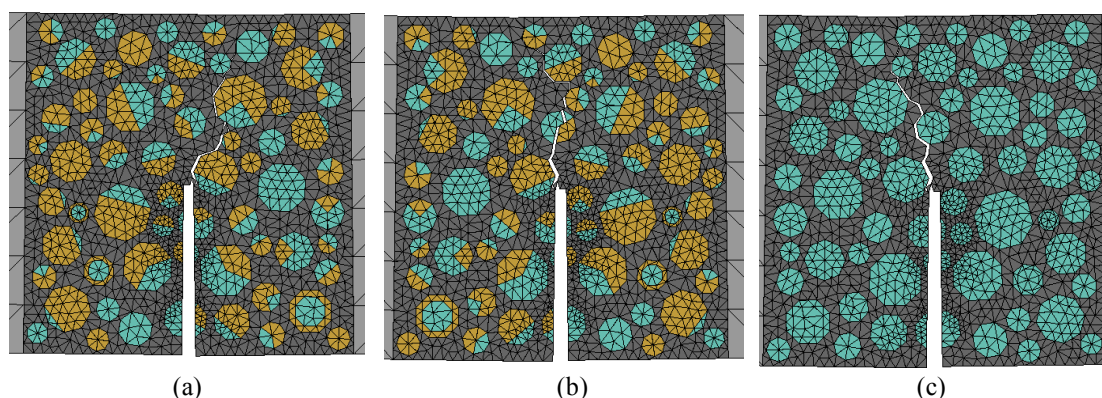


Figura 4.30. Representação do fraturamento nas vigas (a) A48; (b) B48; (c) G48;

Adicionalmente, foi realizada uma análise considerando o agregado reciclado uma única fase com parâmetros de resistência homogêneos iguais aos do concreto de origem. As curvas foram produzidas para a viga A37, a qual apresenta valor intermediário de resistência a compressão. Como é possível constatar, a consideração de um AR homogêneo com propriedades íntegras resultou em uma resposta bastante superior à experimental. Uma explicação para esse comportamento é o fato de que ao representar o AR com apenas uma fase, não ocorre mais distinção entre as ZTIs (eliminam-se as interfaces agregado/matriz antiga e matriz nova/matriz antiga).

Uma alternativa para tornar a resposta mais coerente foi adotar um parâmetro $0 < \phi < 1$, que representa a integridade do agregado em relação ao concreto parental devido ao processo de britagem, de forma que para $\phi=1$ não houve degradação e para $\phi=0$ houve degradação total dos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade, resistência à tração e energia de fratura. Como mostra a Figura 4.31, no caso do concreto A37 seria necessário “degradar” o agregado em 40% para obter uma resposta semelhante ao experimento numérico, porém com alguns ajustes ainda necessários quanto à resistência residual. Certamente o valor $\beta=0,6$ não se trata de uma relação fixa e deve sofrer variação de acordo com a resistência da matriz nova e do concreto parental, sendo que neste trabalho foi feita uma simples análise usando esta representação, uma vez que o intuito da modelagem é representar o AR em suas diferentes fases.

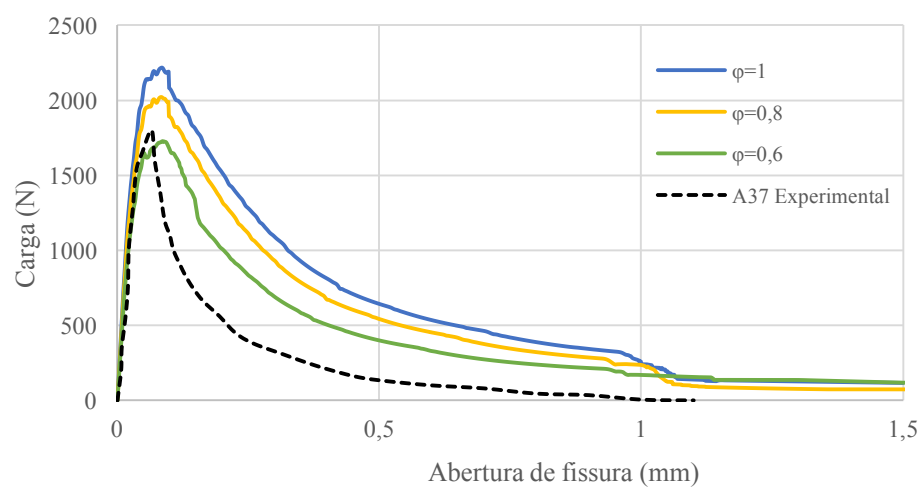


Figura 4.31 Curvas experimentais e numéricas de carga x abertura de fissura para as vigas com f_{ck} de 37 MPa e agregado tipo A

4.6 FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM DIFERENTES TEORES DE AGREGADO RECICLADO

RIAZ et al. (2015) ensaiaram experimentalmente espécimes feitos de concreto reciclado a partir de diferentes misturas de concreto para avaliar o impacto de diferentes porcentagens de AR na mistura. A primeira mistura continha apenas agregados naturais e nas demais ocorreu a substituição parcial dos AN por AR em 25%, 50%, 75%, 100% do volume, como mostra a Tabela 4-14.

Tabela 4-14 - Composição das misturas de concreto (RIAZ, et al.,2015)

Designação	Agregado natural (%)	Agregado reciclado (%)
CC-0	100	0
CAR-25	75	25
CAR-50	50	50
CAR-75	25	75
CAR-100	0	100

As vigas em escala reduzida foram ensaiadas segundo a norma japonesa JCI-S-001-2003 (JAPAN CONCRETE INSTITUTE, 2003), a qual descreve método para testar a energia de fratura do concreto com uso de vigas entalhadas. Conforme mostra a Figura 4.32, as dimensões são determinadas de acordo com o maior diâmetro do agregado (d_a). Os autores informam que o tamanho do agregado natural e reciclado utilizado variou de 4mm a 13mm, desta forma foi considerado $D=100\text{mm}$, $a_0=30\text{mm}$, $n_0=5\text{mm}$ $L=500\text{mm}$, vão efetivo $S=300\text{mm}$ e 100mm de largura da seção transversal.

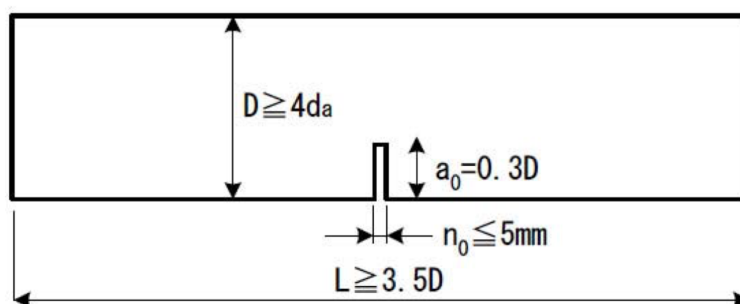


Figura 4.32. Dimensões do espécimen (JAPAN CONCRETE INSTITUTE, 2003)

Foram avaliadas as propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade, energia de fratura, como mostra a Tabela 4-15. Os dados de resistência à tração não foram fornecidos pelo autor, desta forma foram obtidos indiretamente utilizando a expressão recomendada pela

NBR6118 (ABNT, 2014). A partir dos dados gerais, foram obtidos os parâmetros particulares de cada fase utilizando as correlações propostas neste trabalho.

Tabela 4-15 - Propriedades mecânicas das composições de concreto

Composição	E (GPa)	G_{fc} (N/mm ²)	G_{ft} (N/mm ²)	f_{ctm} (MPa)	f_t (MPa)
CC-0	25,3	70	0,103	23,5	2,46
CAR-25	24	52	0,103	23	2,43
CAR-50	24	50	0,092	21	2,28
CAR-75	23	48	0,079	19	2,14
CAR-100	21	39	0,064	18,5	2,10

Fonte: Adaptado de RIAZ, et al. (2015)

O concreto que originou o agregado reciclado apresentava 35 MPa de resistência. Ambos os agregados (AN e AR) apresentavam diâmetro compreendido entre 4 mm e 13 mm. Utilizando os dados experimentais publicados pelo autor, as respectivas vigas foram simuladas numericamente. Inicialmente, foi simulada a viga de concreto convencional (CC-0) produzido a partir de agregados naturais utilizando os parâmetros fornecidos pelo autor, a curva numérica obtida foi confrontada com a curva experimental. Considerando que as respostas não foram suficientemente próximas, os parâmetros de resistência a tração e energia de fratura foram calibrados com base no ensaio da viga CC-0 e posteriormente mantidos nas análises para concreto reciclado. A Figura 4.33 ilustra as referidas curvas.

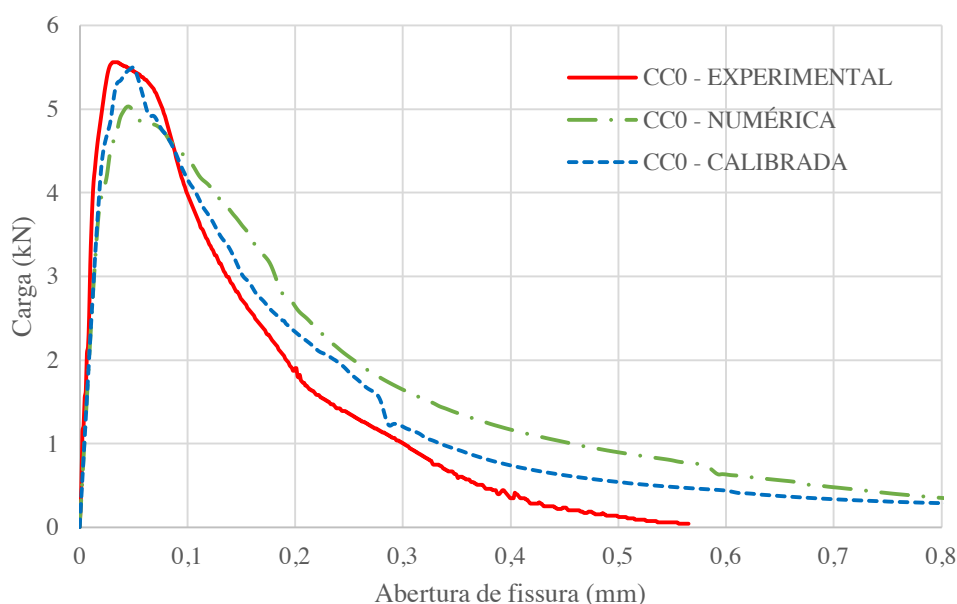


Figura 4.33 Curvas de carga x abertura de fissura para o concreto de agregados naturais

Da mesma forma que nos casos anteriores, foram calculados os parâmetros das fases conforme ilustra a Tabela 4-16. Foi adotado parâmetro $\alpha=0,5$ por se tratar de um concreto de 23 MPa. Cada uma das malhas foi composta por aproximadamente 512 elementos triangulares de tamanho 12,5

mm na região macroscópica e 4190 elementos triangulares medindo 3 mm na região mais refinada. Após o processo de fragmentação foram inseridos 13383 elementos de alta razão de aspecto ($h=0,01\text{mm}$) e 85 elementos de acoplamento.

Tabela 4-16 - Parâmetros utilizados na simulação das vigas ensaiadas por RIAZ et al. (2015)

Elemento	Tipo	E (GPa)	ν	F_t (MPa)	G_f (N/mm)
Rocha	Regular	5,0	0,2	-	-
Matriz antiga	Regular	2,50	0,2	-	-
Matriz nova	Regular	1,62	0,2	-	-
Concreto	Regular	2,10	0,2	-	-
Rocha-Rocha	Interface	5,0	0	5,0	0,100
M.Antiga – M. Antiga	Interface	2,50	0	4,27	0,130
M. Nova – M. Nova	Interface	1,62	0	4,0	0,106
ZTI ₁	Interface	1,62	0	2,0	0,052
ZTI ₂	Interface	2,50	0	2,14	0,065
ZTI ₃	Interface	1,62	0	1,40	0,037

Na Figura 4.34 estão contidas as curvas experimentais para os concretos com diferentes teores, os autores observaram pequena variação entre as respostas do concreto de agregados naturais e com até 50% de substituição. A diminuição na resistência de pico foi de 6% em relação ao CAR-25 e de 9% em relação ao CAR-50. Entretanto, no caso de uma substituição de 100% a redução na resistência de pico foi de 28,5% e a energia de fratura também sofreu grande diminuição.

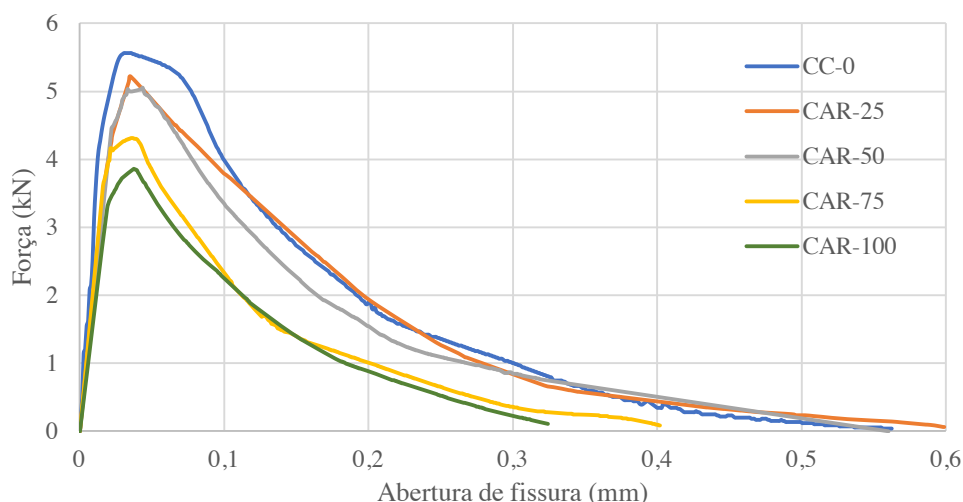


Figura 4.34 Curvas experimentais de força por abertura de fissura para diferentes composições de concreto de agregado reciclado (RIAZ et al., 2015)

A Figura 4.35 contém as curvas obtidas via simulação numérica, a curva do concreto convencional CC-0 teve seus parâmetros calibrados conforme detalhado anteriormente, enquanto as demais

curvas foram simuladas utilizando os mesmos parâmetros. Nesse caso, a queda na resistência de pico foi de 9,2% para o CAR-25, 17,2% para o CAR-50, 18% para o CAR-75 e 21% para o CAR-100. Sendo assim, conforme o aumento no teor menor a sensibilidade na resposta, de modo que as respostas para 50, 75 e 100% de substituição ficaram bastante próximas, havendo apenas diferença na resposta residual.

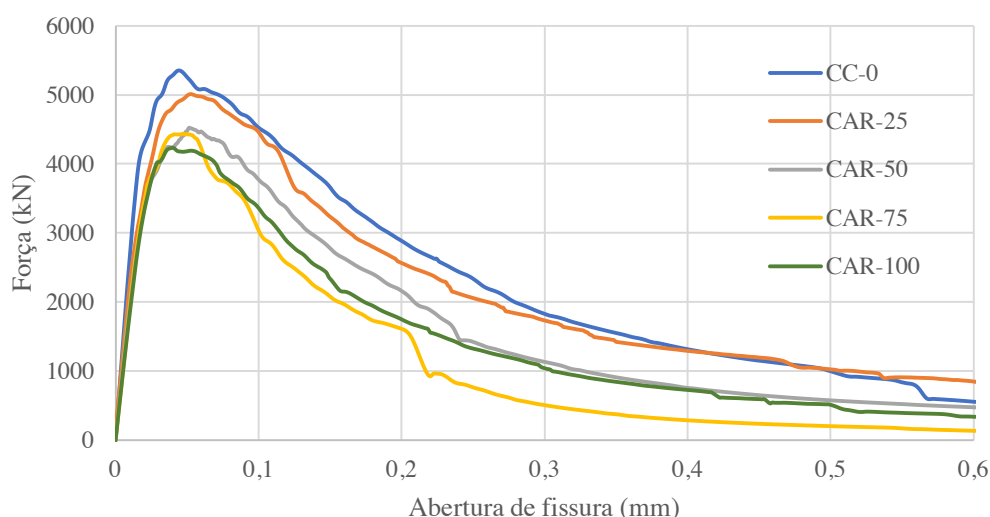


Figura 4.35 Curvas numéricas de força por abertura de fissura para diferentes composições de concreto de agregado reciclado

As figuras 4.36 a 4.39 contêm as curvas para cada porcentagem de AR. Comparando as respostas experimentais e numéricas obtidas, observa-se grande correspondência no trecho elástico, porém há variação na carga de pico e energia de fratura, a qual apresenta-se superestimada pelo modelo.

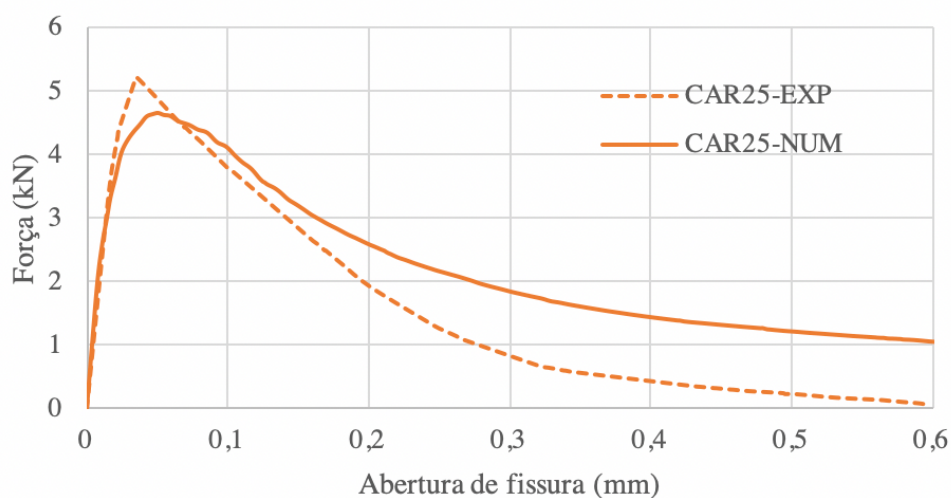


Figura 4.36 Curvas experimentais e numéricas de força por abertura de fissura para o CAR-25

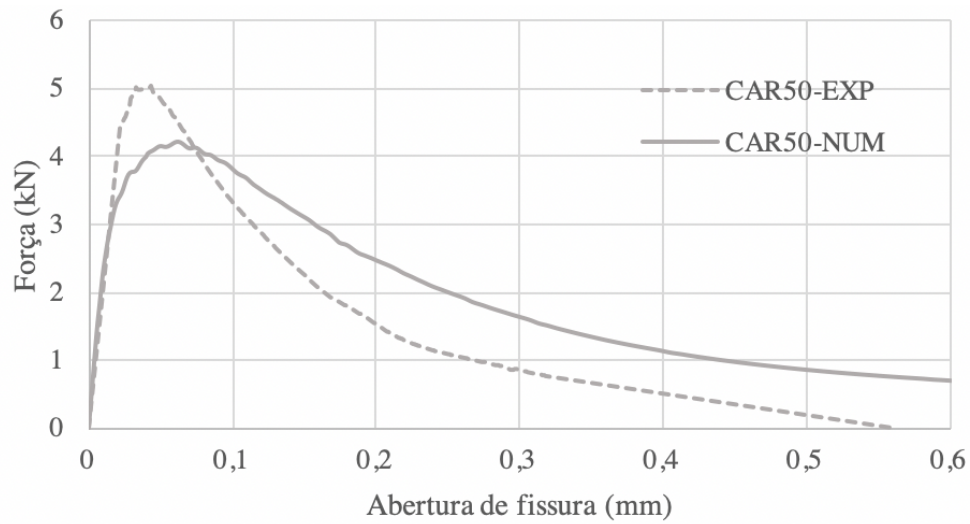


Figura 4.37 Curvas experimentais e numéricas de força por abertura de fissura para o CAR-50

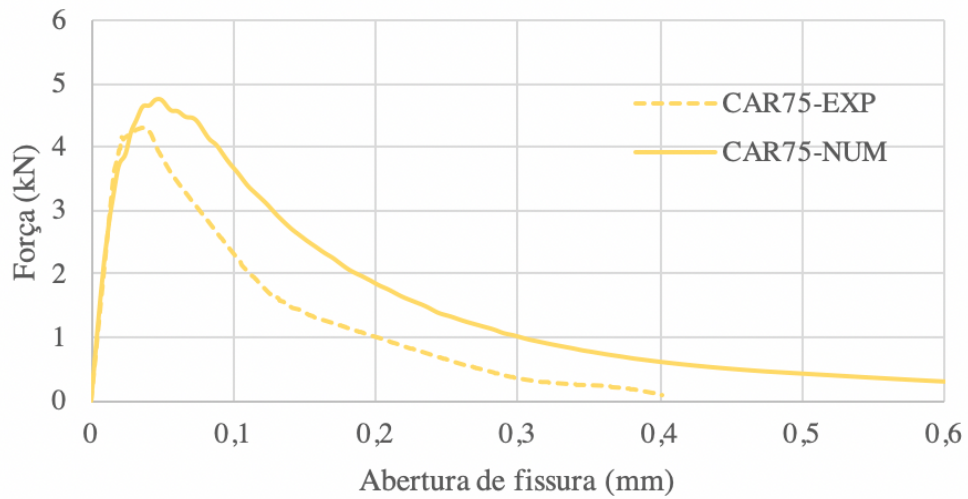


Figura 4.38 Curvas experimentais e numéricas de força por abertura de fissura para o CAR-75

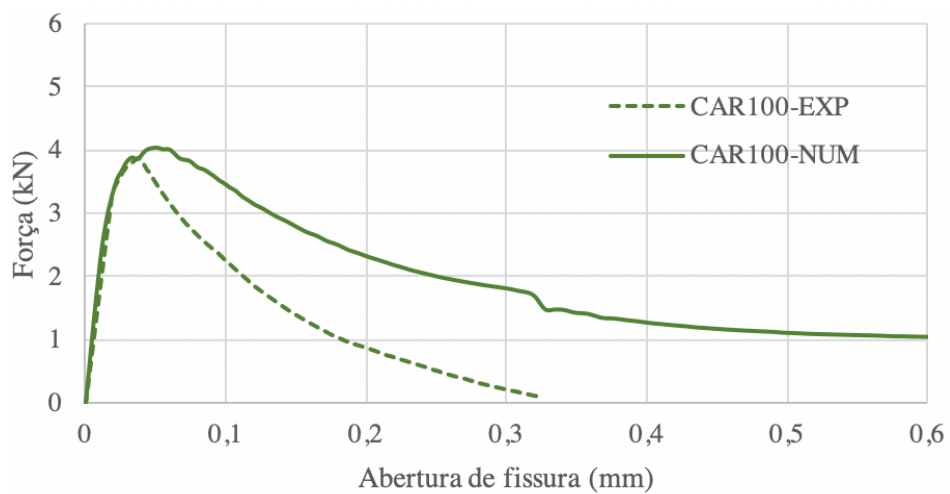


Figura 4.39 Curvas experimentais e numéricas de força por abertura de fissura para o CAR-100

Além disso, no caso de substituição de 50% representado pela Figura 4.37, a carga de pico experimental foi muito maior do que a numérica, porém a previsão numérica é mais coerente, uma vez que as curvas experimentais para 25% e 50% estavam praticamente sobrepostas, indicando que quase não houve mudança na resposta mesmo dobrando a fração de agregado reciclado.

Mesmo sem capturar a curva experimental com precisão, o modelo se mostrou capaz de reproduzir os efeitos do aumento da porcentagem de agregados reciclados principalmente em relação à resistência de pico do concreto. Em ambas as respostas é possível atestar a teoria de que uma substituição de 25% teria um efeito pequeno no comportamento mecânico. Porém a energia de fratura no caso numérico foi pouco afetada nas diversas composições, ao contrário do que ocorreu experimentalmente. Isso pode ser justificado pela hipótese inicial de que o agregado de concreto reciclado esteja intacto, ou seja, considerou-se que de fato ele apresentava 35 MPa de resistência à compressão, resistência à tração e energia de fratura intactos do concreto que o originou. Porém é possível que devido aos processos de beneficiamento aos quais o concreto foi submetido (Capítulo 2), haja uma certa degradação em suas características mecânicas provocada pelas microfissuras que surgem principalmente nas etapas de trituração.

Além disso, por se tratar de um modelo 2D, as simulações demonstraram que a análise é bastante sensível à distribuição dos agregados, já que em uma representação em mesoescala a dimensão do agregado é concorrente com a dimensão do espécimen. Nesta análise, por exemplo o diâmetro máximo do agregado foi de 13 mm enquanto o vão efetivo media 300 mm, exemplificando a condição de dimensões concorrentes. Desta forma, visando minimizar esse efeito, para cada composição foram simuladas 3 realizações. Isso ocorre pois para cada diferente teor de agregado, realiza-se uma distribuição de agregados totalmente nova, o que pode interferir na resposta, principalmente na condição na condição entalhada, onde o plano de propagação da fratura concentra-se em uma região central.

A Figura 4.40 mostra as respostas das vigas, usando um fator de ampliação de 2,5. Observou-se que mesmo se tratando de um concreto de resistência normal, houve faturamento através do agregado reciclado, porém pode ser observado que o faturamento é influenciado de acordo com a disposição dos agregados.

Desta forma, os resultados obtidos para o estudo dos diferentes teores são representativos, porém apresentam limitações quanto à precisão, sugerindo a necessidade de realizar uma análise 3D da estrutura, onde possivelmente os efeitos da distribuição dos agregados e de sua posição em relação ao entalhe seriam reduzidos e a resposta seria mais precisa.

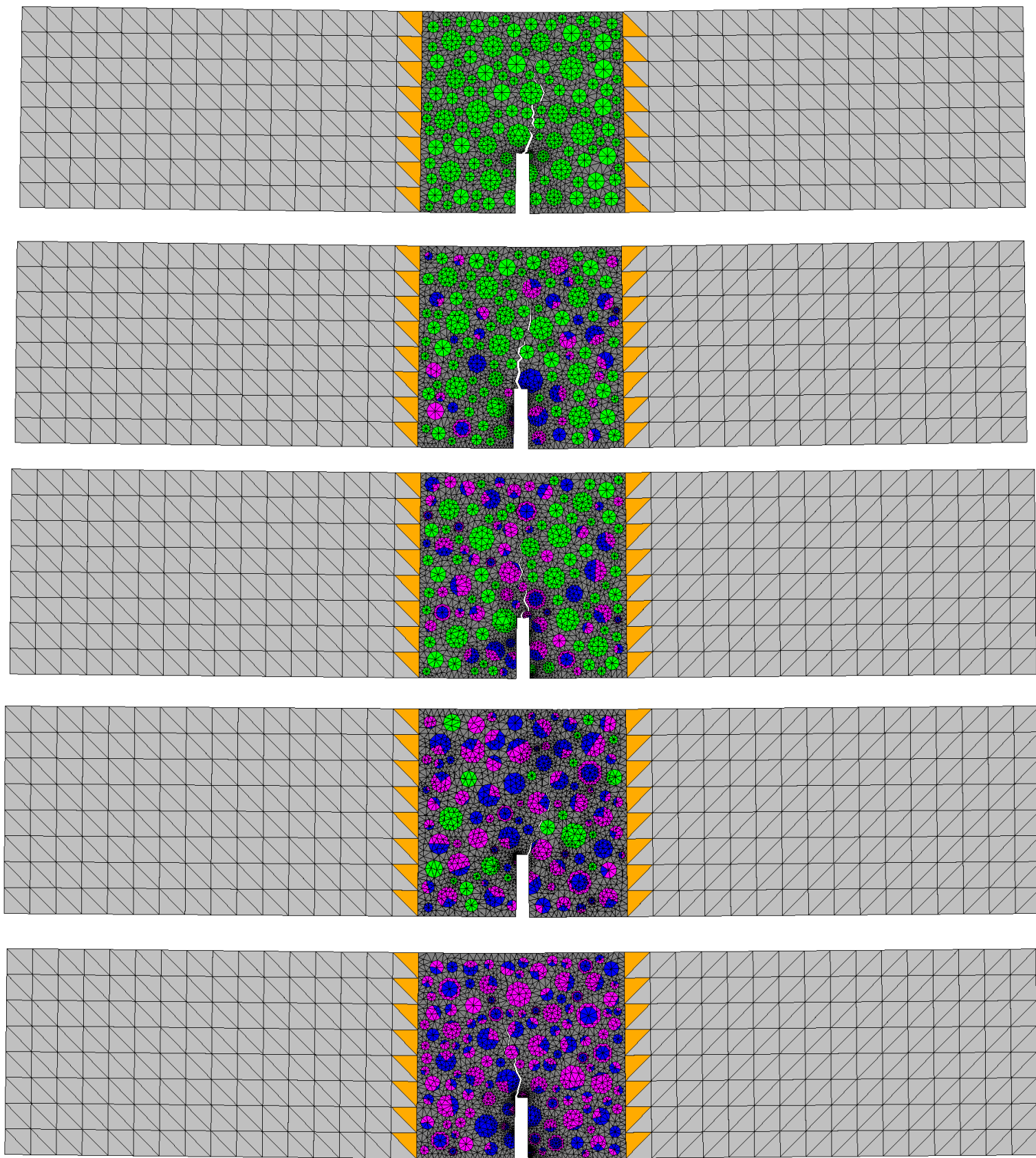


Figura 4.40. Malhas deformadas com diferentes teores de agregados reciclados

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma proposta de análise numérica do concreto com agregados reciclados (CAR) empregando as técnicas de: representação aleatória da mesoestrutura do material; fragmentação de malhas para predição das interfaces de fratura e, acoplamento de malhas não conformes para análise em multiescala.

Os resultados obtidos indicam que o desenvolvimento do gerador de agregado reciclado foi bem-sucedido, sendo capaz de fornecer uma distribuição de AR de forma aleatória, automatizada e sem grande esforço computacional, segundo uma curva granulométrica fornecida ou segundo a curva de melhor compactação. O gerador foi capaz de representar a inclusão de diversos teores para a substituição parcial de AN por AR, assim como ocorre na aplicação prática desse material.

Além disso, mesmo em análises mesoscópicas, a técnica de fragmentação de malha ainda não havia sido aplicada aos agregados, uma vez que no concreto convencional não há propagação de fratura através deles, como ocorre no concreto de alto desempenho e no concreto reciclado. Desta forma, ensaios preliminares com concreto de alto desempenho demonstram a viabilidade de aplicar a técnica de fragmentação de malha também ao agregado, servindo de precursor para o estudo da influência dos parâmetros de resistência do agregado e da ZTI no comportamento mecânico do concreto. O estudo mostrou como a resposta mecânica pode ser sensível à granulometria do agregado, uma vez que ele é a fase mais fraca do compósito, assim como pode ocorrer com o AR. O estudo realizado nas vigas entalhadas com diferentes traços de concreto e com agregados de origens diferentes também apresentou resultados extremamente satisfatórios e semelhantes aos obtidos experimentalmente, demonstrando a capacidade do modelo de capturar a influência do agregado na composição do AR.

Observou-se que o comportamento mecânico do CAR sofre influência da combinação do tipo agregado e de sua interação com a nova matriz. De modo que a substituição de agregados naturais por reciclados produz efeitos diferentes em concretos com diferentes classes de resistência.

Tais singularidades não poderiam ter sido modeladas considerando o material homogêneo, como ocorre em grande parte dos modelos numéricos.

No estudo das respostas para concretos com diferentes teores de AR, observou-se que uma substituição de até 25% produziu uma resposta ligeiramente inferior àquela do concreto com agregados naturais, como já foi indicado por diversos autores na literatura, sugerindo que esse teor poderia ser o ponto de partida para o estudo da produção de concreto estrutural no Brasil. Além disso, na técnica de modelagem empregada não houve grande distinção na resposta para elevados

teores de substituição (75% e 100%) de AN por AR para o caso estudado, sugerindo a possível necessidade de um estudo 3D do problema para minimizar a influência da distribuição de agregados na resposta.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho contribuiu com uma proposta de modelagem multiescala que considera principalmente os efeitos da tração no comportamento mecânico do CAR e colabora com a previsibilidade do seu comportamento no nível de material. Com algumas complementações seria possível aplicar a ferramenta em estudos mais amplos de CAR para a previsão do seu desempenho em termos estruturais. Dessa forma, pode-se sugerir como trabalhos futuros:

- Estudo do CAR produzido com diferentes tipos de AR (concreto, borracha, cerâmica e etc.);
- Complementação da ferramenta com um modelo de dano à compressão aplicado na abordagem multiescala;
- Estudo do comportamento de outras propriedades importantes do CAR tais como permeabilidade e condutividade térmica;
- Estudo do comportamento estrutural com inclusão de reforços na forma de barras ou ainda fibras de aço;
- Simulações em 3D para contornar limitações impostas pelo modelo 2D.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados.** *Dissertação (Mestrado)*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos.** *Tese de Doutorado*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** *IV Seminário Desenvolvimento sustentável a reciclagem na construção*. São Paulo, 2001.
- ANDREU, G.; MIREN, E. **Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials*. Dez. 2013.
- AREZOUMANDI, M.; SMITH, A.; VOLZ, J. S.; KHAYAT, K. H. **An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate.** *Engineering Structures*. Fev. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - classificação.** Rio de Janeiro, 1987
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – procedimento.** Rio de Janeiro, 2014
- BAYKASOGLU, A.; GULLU, H.; ÇANAKÇI, H.; ÖZBAKIR, L. **Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming.** *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, pp. 111-123, 2008.
- BITENCOURT JR. L.A.G.; MANZOLI O.L.; PRAZERES, P.G.C.; RODRIGUES, E.A.; BITTENCOURT, T.N. **A coupling technique for non-matching finite element meshes.** *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, v. 290, p. 19–44, 2015.
- BCSJ. **Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete.** *Committee on Disposal and Reuse of Construction Waste, Building Contractors Society of Japan*. 1977.
- BORST, R.; REMMERS, J.J.C.; NEEDLEMAN, A.; ABELLAN, M. **Discrete vs smeared crack models for concrete fracture:bridging the gap.** *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech* Vol. 28, pp.583–607.2004
- BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural.** *Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos*, 2007.
- CACKLER, T. **Recycled Concrete Aggregate Usage in the US (report).** National Concrete Pavement Technology Center. *Iowa State University*, 2018.

- CASUCCIO, M.; TORRIJOS, M.C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. **Failure mechanism of recycled aggregate concrete.** *Construction and Building Materials* Vol.22, 1500–1506. 2008.
- CHEN H-J, YEN T, CHEN K-H. **Use of building rubbles as recycled aggregates.** *Cement & Concrete Res* 33(1):125–132. 2003.
- COUNTO, U. J. **The effect of the elastic modulus of the aggregate on elastic modulus, creep and creep recovery of concrete.** *Magazine of Concrete Research*, 16(48), 129- 138, 1964.
- DE BRITO, J.; SAIKIA, N. **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste.** Springer Publishing. 233 Spring Street, New York, USA. 2013
- DE NARDIN, S.; ALMEIDA FILHO, F.M.; OLIVEIRA FILHO, J.; HAACH, V.G.; EL DEBS, A.L.H.C. **Non-linear analisys of the bond strength behavior on the steel-concrete interface by numerical models and pull-out tests.** Structures Congress, New York, 2005.
- DIAMOND, S. **Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in concrete.** *Cement & Concrete Composites*, v. 23, p. 171-178, 2001.
- DUAN, Z.H.; KOU, S.C.; POON, C.S. **Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks.** *Construction and Building materials*, Vol. 40, pp. 1200-1206. 2013a.
- DUAN, Z.H.; KOU, S.C.; POON, C.S. **Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete.** *Construction and Building materials*, Vol. 44, pp 524-532. 2013b.
- EGUCHI, K.; TERANISHI, K.; NAKAGOME, A.; KISHIMOTO, H.; SHINOZAKI, K.; NARIKAWA, M. **Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction.** *Construction and Building Materials* 21(7):1542–1551. 2007.
- FATHIFAZL, G.; RAZAQPURT, A.G.; FOURNIER, B. **Shear strength of reinforced recycled concrete beams with stirrups.** *Magazine of Concrete Research*, Vol. 62, pp. 685-699. 2015.
- FISHER, C.; WERGE, M. **EU as a recycling society.** *ETC/SCP* 2/2009, p 25. 2009.
- GAO, Y.; SCHUTTER, G.; YE, G. **The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: Effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content.** *Composites Part B: Engineering* Volume 60, p. 1-13,2014.
- GOMEZ-SOBERON, J.M.V. **Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study.** *Cement Concrete Research* 32(8):1301–1311. 2002.
- GONZALEZ-FONTEBOA, B.; MARTINEZ-ABELLA, F.; EIRAS-LOPEZ, J.; SEARA-PAZ, S. **Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete.** *Mater Struct* 44(10):1759–1770. 2011.
- HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry – RILEM Report N. 6.** Spon Press. London, 1992.

- HENDRIKS, CH. F. **The building cycle**. *The Netherlands: Aeneas Technical Publishers*, 2000.
- HUANG, Y.; YANG, Z.; REN, W.; LIU, G.; ZHANG, C. **3D meso-scale fracture modelling and validation of concrete based on in-situ X-ray Computed Tomography images using damage plasticity model**. *International Journal of Solids and Structures*, Vol 67-68, pp.340-352. 2015.
- JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. *Seminário de reciclagem resíduos sólidos domiciliares – Secretaria de Estado do Meio Ambiente*. São Paulo, 2013.
- JAPAN CONCRETE INSTITUTE. **Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam JCI-S-001-2003**, 2003.
- KACHANOV, L.M. **Introduction to Continuum Mechanics**. *Kluwer Academic Publishers*, 1986.
- KHADEMI, F.; JAMAL, S.M.; DESHPANDE, N. LONDHE, S. **Predicting strength of recycled aggregate concrete using Artificial Neural Network, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Multiple Linear Regression**. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol.5, pp. 355-369. 2016.
- LANDIS, E. J.; BOLANDER, J. E. **Explicit representation of physical processes in concrete fracture**. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009.
- LEMAITRE, J.; LIPPMANN, H. **A course on damage mechanics**. *Springer Berlin*, 1996.
- LI, W.; LUO, Z.; SUN, Z.; HU, Y.; DUAN, W.H. **Numerical modelling of plastic–damage response and crack propagation in RAC under uniaxial loading**. *Magazine of Concrete Research Vol. 70*, pp. 459-472. 2017.
- LI, J.; XIAO, H.; ZHOU, Y. **Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete**. *Construction Building Materials* 23(3):1287–1291. 2009.
- LIU, Q.; XIAO, J.; SUN, Z. **Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete**. *Cement and Concrete Research. Vol 41*, 1050-1057. 2011.
- LLOBERAS-VALLS, O.; RIXEN, D.J.; SIMONE, A.; SLUYS, L.J. **Multiscale domain decomposition analysis of quasi-brittle heterogeneous materials**. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 89, 1337-1366, 2012.
- LOTFI, S.; EGGIMAN, M.; WAGNER, E.; DEJA, J. **Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology**. *Construction and Building Materials* 95:243-256. 2015.
- MALESEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIC, S. **Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production**. *Sustainability*. 2, 1204-1225; doi:10.3390/su2051204. 2010.
- MAEDO, M. A. **Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha**. *Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP*, 2015.

- MANZOLI, O. L.; GAMINO, A.L.; RODRIGUES, E.A.; CLARO, G.K.S. **Modeling of interfaces in two-dimensional problems using solid finite elements with high aspect ratio.** *Computers and Structures*, v. 94-95, p. 70-82, 2012.
- MANZOLI, O. L. ; MAEDO, M. A. ; RODRIGUES, E. A. ; BITTENCOURT, T. N. **Modeling of multiple cracks in reinforced concrete members using solid finite elements with high aspect ratio.** *Computational Modeling of Concrete Structures. 1ed.* Leiden: CRC Press/Balkema, v. 1, p. 383-392, 2014.
- MANZOLI, O. L.; MAEDO, M.A.; BITENCOURT JUNIOR, L. A. G.; RODRIGUES, E. A. **On the use of finite elements with a high aspect ratio for modeling cracks in quasi-brittle materials.** *Engineering Fracture Mechanics*, v. 153, p. 151-170, 2016.
- MCNEIL, K.; KANG, T.H.K. **Recycled Concrete Aggregates: A Review.** *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.7, pp.61–69, 2013.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3ª Ed. IBRACON. ISBN.: 978-85-98576121, 2008.
- NGO, D.; SCORDELIS, A.C. **Finite element analysis of reinforced concrete beams.** *Journal of the American Concrete Institute Vol. 64*, pp. 152–163. 1967.
- OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C. S.; MATTOS, J. C. **Recycled Aggregate Standardization in Brazil.** *International RILEM conference on the use of recycled concrete materials in buildings and structures.* Barcelona, 2004.
- OLIVER, J.; HUESPE, A. MANZOLI, O.L. **Strong discontinuities and continuum plasticity models: the strong discontinuity approach.** *International Journal of Plasticity 15*, pp. 319-351. 1999.
- OLIVER, J.; HUESPE, A. SÁNCHEZ, P. **A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities: E-FEM vs X-FEM.** *Comput Methods Appl Mech Engng*, 195 (37–40), pp. 4732-475. 2006.
- OLIVER, J.; HUESPE, A.; CANTE, J. **An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems.** *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, v. 197, n. 21, p. 1865–1889, 2008.
- PAUL, S.C.; PANDA, B.; GARG. A. **A novel approach in modelling of concrete made with recycled aggregates.** *Measurement Vol. 115*, pp. 64-72. 2018.
- PENG, Y.; CHU, H.; PU, J. **Numerical Simulation of Recycled Concrete Using Convex Aggregate Model and Base Force Element Method.** *Advances in Materials Science and Engineering*, V. 2016, ID 5075109. 2016.
- PERRAS, M.A., DIEDERICHS, M.S. **A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing.** *Geotechnical and Geological Engineering, Vol.32*, pp. 525-546, 2014.

- POON, C.S.; KOU, S.C. **Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates.** *Construction and Building Materials*, Vol. 18, p. 461-468, 2004.
- RADULOVIC, R.; BRUHNS, O.T.; MOSLER, J. **Effective 3D failure simulations by combining the advantages of embedded strong discontinuity approaches and classical interface elements.** *Engng Fract Mech*, 78 (12), pp. 2470-2485. 2011.
- RAO, M.C.; BHATTACHARYYA, S.K., BARAI, S.V. **Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load.** *Construction Building Materials* 25(1):69–80. 2011.
- RASHID, Y.R. **Analysis of reinforced concrete pressure vessels.** *Nuclear Engineering and Design* Vol. 7, pp. 334–344. 1968.
- RIAZ, M. R.; HAMEED R.; ILYAS, M.; AKRAM, A; SIDDIQI, Z. A. **Mechanical Characterization of Recycled Aggregate Concrete.** *Pak. J. Engg. & Appl. Sci.* Vol. 16, (p.25–32). Janeiro, 2015.
- RILEM TC 121-DRG . **Specifications for concrete with recycled aggregates.** *Materials and Structures* Vol. 27, p. 557-559. 1994.
- RODRIGUES, E.A.; GIMENES, M.; MANZOLI, O.L.; BITENCOURT JR, L.A.G. **Concurrent multiscale model for recycled aggregate concrete.** Submetido à publicação.
- RODRIGUES, E.A.; MANZOLI, O.L.; BITENCOURT JR, L.A.G.; BITTENCOURT, T.N. **2D mesoscale model for concrete based on the use of interface element with a high aspect ratio.** *International Journal of Solids and Structures* 94–95, 112–124, 2016.
- RODRIGUES, E.A. **Um modelo multiescala concorrente para representar o processo de fissuração do concreto.** *Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo*, 2015.
- SÁNCHEZ, M.; MANZOLI, O.L.; GUIMARÃES, L.J.N. **Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique.** *Computers and Geotechnics* Volume 62, pp. 27-39, 2014.
- SIH, G. C.; TOMMASO, A. D. **Fracture mechanics of concrete: Structural application and numerical calculation.** *Martinus Nijhoff Publishers, The Netherlands*. 1984.
- SILVA, R.V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** *Construction and Building Materials*. 2014.
- SIREGAR, A.P.N., RAFIQ, M.I. and MULHERON, M. **Experimental investigation of the effects of aggregate size distribution on the fracture behaviour of high strength concrete.** *Construction and Building Materials*, Vol. 150; pp. 252-259.2017.
- SOUZA NETO, E. A.; PERIC, D.; OWEN, D. R. J. **Computational methods for plasticity: theory and applications.** [S.l.]: *John Wiley & Sons*, 2011.

- TAM, V.W.Y.; GAO, X.F.; TAM, C.M. **Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach.** *Cement and Concrete Research*, Vol 35, 6^a Ed., 1195-1203, 2005.
- TAM, V.W.Y.; TAM, C.M. **A review on the viable technology for construction waste recycling.** *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 47, p. 209-221, 2006.
- ULUBEYLI, S.; KAZAZ, A.; ARSLAN, V. **Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues.** *Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2017.
- VAN MIER, J.G.M. **Fracture processes of concrete: assessment of material parameters for fracture models.** *CRC Press*, 1997.
- VAZQUEZ, E.; ALAEJOS, P.; MARTINEZ, F.; POLANCO, A.; ALEZA, F.; PARRA, J. L.; BURÓN, M. **Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete.** *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, 2004, Barcelona. Proceedings...* França, Elsevier publications, 2004.
- VAZQUEZ, E. **Progress of Recycling in the Built Environment.** *Final Report of the RILEM Technical Committee 217-PRE*. 2013.
- WANG, YANG, YATES JIVKOV, ZHANG **Monte Carlo simulations of mesoscale fracture modelling of concrete with random aggregates and pores.** *Construction and Building Materials*, v. 75, p. 35–45, 2015.
- WITTMANN, F.H. **Structure of Concrete with respect to Crack Formation.** *Fracture Mechanics of Concrete*; pp. 43–74, 1983.
- WRIGGERS, P.; MOFTAH, S.O. **Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour.** *Finite Elements in Analysis and Design* Vol. 42, pp. 623–636, 2006.
- WBTC N. 12/2002. **Specifications facilitating the use of recycled aggregates,** *Works Bureau Technical Circular*, Hong-Kong. 2002.
- XIAO, J.; LIU, Q.; WU, Y.C. **Numerical and experimental studies on fracture process of recycled concrete.** *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 00, pp.1-8. 2012.
- XIAO, J.; LI, W.; SUN, Z.; LANGE, D. A.; SHAH, S.P. **Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation.** *Cement & Concrete Composites*. Janeiro, 2013a.
- XIAO, J.; LI, W.; CORR, D. J.; SHAH, S. P. **Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behavior of modeled recycled aggregate concrete.** *Cement and Concrete Research*. Volume 52, p. 82-99, 2013b.
- XIE, Y.; CORR, D.J.; FENG, J.; ZHOU, H.; SHAH, S.P. **Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC).** *Cement and Concrete Composites*, Vol. 55, p. 223-231. 2015.
- YANG, C.C.; HUANG, R.; YEIH, W.; SUE, I.C. **Aggregate effect on elastic moduli of cement-based composite materials.** *Journal of Marine Science and Tecnology* v.3, 5-10, 1995.

- YANG, J.; DU, Q.; BAO, Y. **Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks.** *Construction Building Materials* 25(4):1935–1945, 2011.
- YOU, M. **Strength criterion for rocks under compressive-tensile stresses and its application.** *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol.7, pp. 434-439*, 2015.
- ZHENG J.J.; LI, C.Q.; ZHOU, X.Z. **Characterization of Microstructure of Interfacial Transition Zone in Concrete.** *ACI Materials Journal*. 2005.