



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

Mestrado

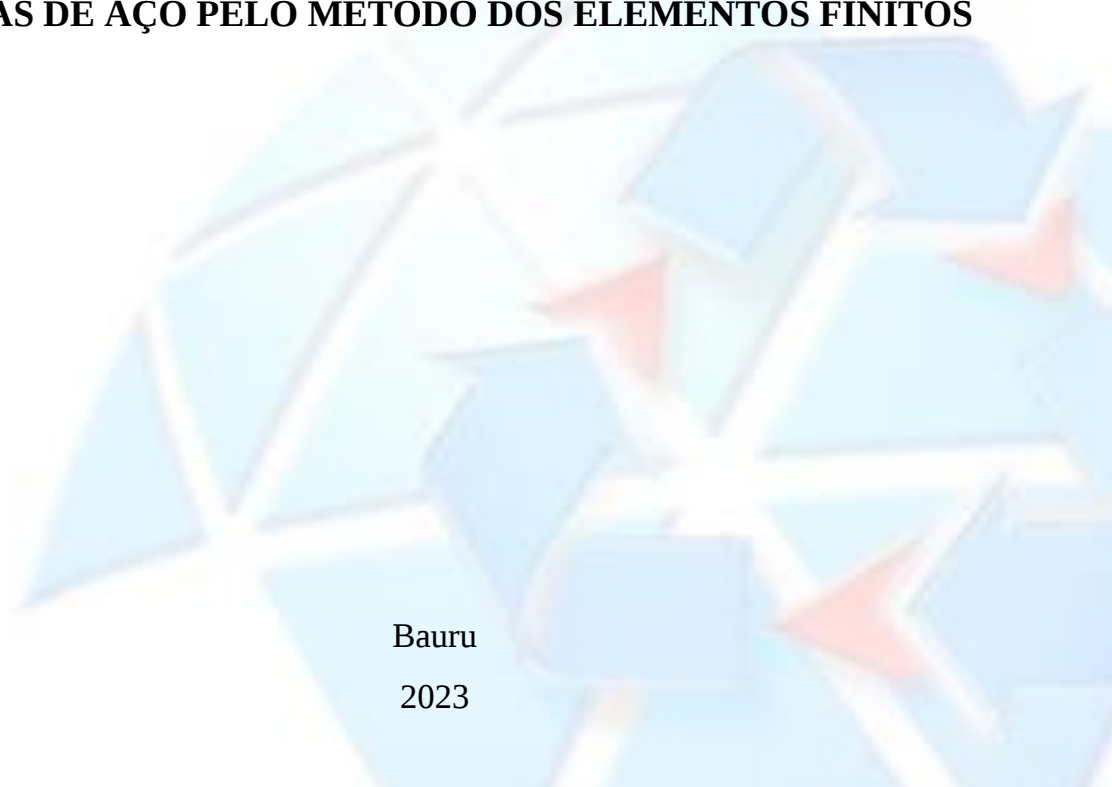
Engenharia Civil e Ambiental

ALANA HELENA CARA SIQUEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM
FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Bauru

2023



ALANA HELENA CARA SIQUEIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS DE
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM
FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Civil e Ambiental da Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Área de
Concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Luís Manzoli.

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Alexandre
Rodrigues.

Bauru
2023



S618e	Siqueira, Alana Helena Cara Estudo do comportamento mecânico de pavimentos de concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço pelo Método dos Elementos Finitos / Alana Helena Cara Siqueira. -- Bauru, 2023 114 f. : il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Osvaldo Luís Manzoli Coorientador: Eduardo Alexandre Rodrigues 1. Comportamento mecânico. 2. Lajes de pavimento rígido. 3. Agregado reciclado. 4. Fibras de aço. 5. Elementos Finitos. I. Título.
-------	---

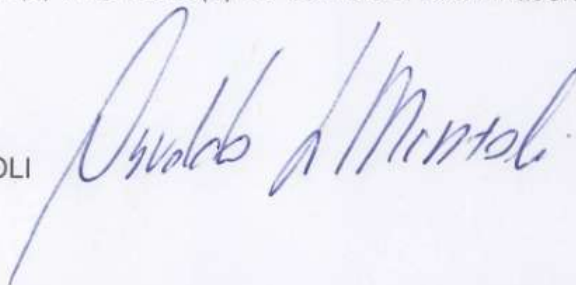
Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ALANA HELENA CARA SIQUEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de abril do ano de 2023, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós Graduação/Via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ALANA HELENA CARA SIQUEIRA, intitulada **ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO CONSTITUÍDOS TOTAL E PARCIALMENTE POR AGREGADO RECICLADO E FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. OSVALDO LUIS MANZOLI (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. LUÍS ANTÔNIO GUIMARÃES BITENCOURT JÚNIOR (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / Universidade de São Paulo - USP, Prof. Dr. LEANDRO MOUTA TRAUTWEIN (Participação Virtual) do(a) Departamento de Estruturas / Universidade Estadual de Campinas. Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. OSVALDO LUIS MANZOLI



PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA
ALUNA: **ALANA HELENA CARA SIQUEIRA**

DE: "ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO CONSTITUÍDOS TOTAL E
PARCIALMENTE POR AGREGADO RECICLADO E FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS"

PARA:

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PAVIMENTOS
DE CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM
FIBRAS DE AÇO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Bauru, 19 de abril de 2023.


Prof. Dr. Osvaldo Luis Manzoli
Orientador(a)

*A meus pais, Magda e Aderbal, e
agora minha estrelinha, vó Flor.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me capacitar a concluir este curso e por toda força nos momentos difíceis. Gratidão também a minha mãe, Magda; meu pai, Aderbal; meu avô, Augusto e agora minha estrelinha, vó Floripes, pessoas importantes da minha vida, as quais, cada uma da sua maneira, contribuíram com a minha formação humana, ética e acadêmica. Reconheço ainda o apoio incondicional do meu irmão, Aderbal Augusto, e do meu amor, Luís Pedro, que sempre estiveram ao meu lado quando precisei.

Agradecimento especial a meu orientador, Prof. Dr. Osvaldo Luís Manzoli, que desde o primeiro dia de curso, sempre me forneceu seu apoio, mostrando ser um exemplo de profissional compreensível e atencioso. Muito obrigada pela orientação, conhecimento compartilhado e paciência que teve comigo, tanto na época das disciplinas obrigatórias, quanto no decorrer da pesquisa.

Muito grata também a meu coorientador, Prof. Dr. Eduardo Alexandre Rodrigues, e meu grupo de pesquisa, composto por Marcela Gimenes e Pedro Rogério Cleto. Muito obrigada por toda dedicação, conhecimento, tempo disponível e por me auxiliarem desde o início dessa caminhada.

Deixo meu agradecimento ainda a UNESP, seus docentes, servidores e principalmente a Faculdade de Engenharia de Bauru, onde tive o privilégio de desenvolver esta pesquisa, com todo o suporte necessário.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida e por outros recursos relacionados a esta pesquisa, que contribuíram para a minha conquista do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

RESUMO

O ramo da construção civil está em constante evolução e por trás dos efeitos positivos que isso proporciona, se encontra uma consequência não muito agradável, representada pelo aumento da quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD). Na maioria das vezes, a solução encontrada para o depósito destes resíduos consiste no seu despejo em aterros ou lixões e até mesmo em terrenos baldios e regiões próximas a rios e estradas. Este fato contribui com a geração de danos ambientais e por isso a utilização dos RCD como agregado reciclado torna-se uma saída sustentável para o problema em questão. Neste contexto, esta pesquisa visa determinar se a técnica de modelagem numérica baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF) consegue prever adequadamente o comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado (CAR) reforçado com fibras de aço aplicado em lajes de pavimentos rígidos e lajes lisas armadas, contribuindo assim com o estudo da reutilização dos RCD. A modelagem tridimensional das lajes utiliza elementos finitos unidimensionais de barra para discretizar as barras e fibras de aço, que são acoplados por meio dos elementos finitos de acoplamento (EFAs) na malha de elementos tetraédricos da matriz de concreto, levando-se em consideração a perda de aderência existente entre o concreto e as fibras, assim como o modelo de dano à tração do concreto e os modelos constitutivos de seus reforços, ressaltando que o concreto é modelado como um material homogêneo (escala macroscópica). A metodologia aplicada se mostrou adequada, visto que os resultados numéricos foram semelhantes aos experimentais, apontando que o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais por reciclados diminuiu a capacidade de resistência mecânica, ductilidade e dissipação de energia das lajes de concreto, sendo estes efeitos revertidos com a adição de fibras de aço na estrutura. Diferentes valores de resistência à compressão do concreto, cuja britagem origina os agregados reciclados, também influenciaram o comportamento mecânico das lajes de pavimentos rígidos.

Palavras-chave: Comportamento mecânico; Lajes de pavimento rígido; Agregado reciclado; Fibras de aço; Elementos Finitos.

ABSTRACT

The civil construction area is in constant evolution and even though it provides very positive effects, there is a not very pleasant consequence, represented by the increase in the amount of construction and demolition waste (CDW). Usually, the solution found for the disposal of these residues consists of dumping them in landfills or dumps and even in vacant lots and regions close to rivers and roads. This fact contributes to the generation of environmental damage, which is why the use of CDW as recycled aggregate becomes a sustainable solution to this problem. In this context, this research aims to determine if the numerical modeling technique based on the Finite Element Method (FEM) can adequately predict the mechanical behavior of recycled aggregate concrete (RAC) reinforced with steel fibers applied to rigid pavement slabs and reinforced flat slabs, thus contributing to the study of the reuse of CDW. The three-dimensional modeling of the slabs uses unidimensional finite elements to discretize the bars and steel fibers, which are coupled through the coupling finite elements (CFEs) in the tetrahedral elements mesh of the concrete matrix, considering the loss of adhesion between the concrete and the fibers, as well as the concrete tensile damage model and the constitutive models of its reinforcements, emphasizing that concrete is modeled as a homogeneous material (macroscopic scale). The applied methodology proved to be adequate, as the numerical results were similar to the experimental ones, indicating that the increase in the percentage of replacement of natural aggregates by recycled ones decreased the mechanical resistance capacity, ductility and energy dissipation of the concrete slabs, but these effects were reversed with the addition of steel fibers in the structure. Different values of compressive strength of concrete, whose crushing originates the recycled aggregates, also influenced the mechanical behavior of the rigid pavement slabs.

Keywords: Mechanical behavior; Rigid pavement slabs; Recycled aggregate; Steel fibers; Finite Elements.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Principais categorias de agregado graúdo reciclado (Adaptada de BAI et al., 2020).....	6
Figura 3.2 Ilustração do “efeito parede” e ZTI (quadrado vermelho) (Adaptada de WANG et al., 2021).	6
Figura 3.3 Diagrama esquemático do agregado graúdo reciclado de concreto (Adaptada de BAI et al., 2020).....	7
Figura 3.4 Agregado reciclado no CAR (Adaptada de WANG et al., 2021).....	7
Figura 3.5 Efeito ponte de transferência de tensões.	8
Figura 3.6 Fibras utilizadas no CAR: (a) fibras de aço com ancoragens nas extremidades; (b) fibras de aço onduladas; (c) fibras de basalto; (d) fibras de polipropileno; (e) fibras de vidro (XIE et al., 2021).	9
Figura 3.7 Pavimento flexível.	12
Figura 3.8 Pavimento rígido (FRASSON JR et al., 2020).....	12
Figura 3.9 Camadas de um pavimento flexível (a) e rígido (b) (Adaptada de MOHD TAHIR et al., 2022).....	13
Figura 4.1 Comportamento cíclico do modelo de dano do CAR em um teste uniaxial.	28
Figura 4.2 Modelo elastoplástico perfeito.	29
Figura 4.3 Definição do modelo numérico para consolo de concreto armado baseado em EFAs: (a) geração da malha de concreto; (b) geração dos vergalhões e correspondente discretização; (c) procedimento de acoplamento; e (d) detalhamento dos EFAs (Adaptada de BITENCOURT et al., 2018).	30
Figura 4.4 EFA 3D - elemento tetraédrico de 4 nós com o nó de acoplamento (a) e procedimento de acoplamento (b).	32
Figura 4.5 Curva característica do modelo de aderência do CEB <i>fib</i> Model Code 2010 (CEB FIB MODEL CODE 2010, 2013).....	34
Figura 5.1 Dimensões da laje com duas camadas de concreto diferentes modelada numericamente.	38
Figura 5.2 Configuração do experimento (Adaptada de BRAND; AMIRKHANIAN; ROESLER, 2013).	39
Figura 5.3 Apoio elástico contínuo unilateral das lajes, modelado por elementos finitos lineares.....	40
Figura 5.4 Área de influência dos elementos de apoio.	40
Figura 5.5 Condições de contorno natural e essencial.	41
Figura 5.6 Malha de elementos finitos da laje com duas camadas de concreto diferentes.	42
Figura 5.7 Curvas carga x deslocamento das lajes “NAT100”.	43
Figura 5.8 Curvas carga x deslocamento das lajes “RCA-NAT”.	44
Figura 5.9 Curvas carga x deslocamento das lajes “RCA100”.	45
Figura 5.10 Curvas carga x deslocamento das lajes “NAT100”, “RCA-NAT” e “RCA100”.	46
Figura 5.11 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “NAT100 – NUMÉRICO”, “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	48
Figura 5.12 Distribuições de dano por tração das lajes “NAT100 – NUMÉRICO”, “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	49
Figura 5.13 Configuração de ruptura das lajes experimentais (Adaptada de BRAND; AMIRKHANIAN; ROESLER, 2013).	50
Figura 5.14 Malha de elementos finitos das fibras de aço.	51
Figura 5.15 Malha dos EFAs das fibras de aço no concreto.	52
Figura 5.16 Discretização da fibra de aço utilizada nas modelagens.....	53
Figura 5.17 Curva do comportamento aderência-deslizamento proposta para a modelagem.	54
Figura 5.18 Curvas carga x deslocamento referentes às lajes “RCA-NAT – NUMÉRICO”, “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”.	54
Figura 5.19 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	55
Figura 5.20 Distribuições de dano por tração das lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	56
Figura 5.21 Curvas carga x deslocamento referentes às lajes “RCA100 – NUMÉRICO”, “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”.	57
Figura 5.22 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	58
Figura 5.23 Distribuições de dano por tração das lajes “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	59
Figura 5.24 Curvas carga x deslocamento das lajes sem fibras de aço modeladas numericamente.	62
Figura 5.25 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes sem fibras de aço, no final do carregamento.	63
Figura 5.26 Distribuições de dano por tração das lajes sem fibras de aço, no final do carregamento.	64

Figura 5.27	Curvas carga x deslocamento das lajes com fibras de aço modeladas numericamente.....	65
Figura 5.28	Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes com fibras de aço, no final do carregamento.	67
Figura 5.29	Distribuições de dano por tração das lajes com fibras de aço, no final do carregamento.	68
Figura 5.30	Dimensões da laje e seus reforços (unidade: mm) (Adaptada de XIAO et al., 2019).	69
Figura 5.31	Configuração do carregamento (XIAO et al., 2019).	70
Figura 5.32	Dimensões da laje utilizada no experimento (a) e dimensões da laje modelada numericamente (b).	71
Figura 5.33	Condições de contorno essencial e natural desta modelagem.	72
Figura 5.34	Malha de elementos finitos de concreto.	73
Figura 5.35	Malha de elementos finitos das armaduras (a) e de seus EFAs (b).	73
Figura 5.36	Malha de elementos finitos das fibras de aço (a) e de seus EFAs (b).	73
Figura 5.37	Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC0”.	76
Figura 5.38	Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC50-0%”.	77
Figura 5.39	Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC50-0,5%”.	78
Figura 5.40	Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC50-1,0%”.	79
Figura 5.41	Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC100-0%”.	80
Figura 5.42	Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC100-0,5%”.	81
Figura 5.43	Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC100-1,0%”.	82
Figura 5.44	Curvas carga x deslocamento das lajes contendo 0, 50 e 100% de agregado reciclado sem fibras de aço.	83
Figura 5.45	Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RAC0 - NUMÉRICO”, “RAC50-0% – NUMÉRICO” e “RAC100-0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	84
Figura 5.46	Distribuições de dano por tração das lajes “RAC0 - NUMÉRICO”, “RAC50-0% – NUMÉRICO” e “RAC100-0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	85
Figura 5.47	Processo de formação de fissuras de punção. Fissura radial formada por tensões tangenciais (a); fissuras tangenciais formadas por tensões radiais (b) e configuração de ruptura (c) (FERREIRA; OLIVEIRA, 2007).	85
Figura 5.48	Curvas carga x deslocamento das lajes contendo 50% de agregado reciclado, com teor de fibras variando em 0; 0,5 e 1,0%.	86
Figura 5.49	Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	87
Figura 5.50	Distribuições de dano por tração das lajes “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	87
Figura 5.51	Curvas carga x deslocamento referentes às lajes contendo 100% de agregado reciclado, com teor de fibras variando em 0; 0,5 e 1,0%.	88
Figura 5.52	Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	89
Figura 5.53	Distribuições de dano por tração das lajes “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.	90
Figura 5.54	Falha de perfuração das lajes de concreto “RAC0” (a); “RAC50-0%” (b); “SFRAC50-0,5%” (c); “SFRAC50-1,0%” (d); “RAC100-0%” (e); “SFRAC100-0,5%” (f); “SFRAC100-1,0%” (g) (XIAO et al., 2019).	90

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1. Especificações técnicas e normativas sobre agregado reciclado (AR) de alguns países.	15
Tabela 3-2. Requisitos geométricos, físico-mecânicos e químicos de agregado reciclado (AR) para aplicação em concreto.	17
Tabela 3-3. Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios.	18
Tabela 3-4. Condições de aplicação de agregado reciclado (AR) em concreto por especificação analisada.	19
Tabela 3-5. Requisitos técnicos para agregado reciclado (AR) aplicado em pavimentos.	20
Tabela 4-1. Valores básicos da energia de fratura G_{F0} (Nmm/mm ²).	36
Tabela 5-1. Quantidade de elementos finitos tetraédricos das malhas.	42
Tabela 5-2. Parâmetros dos concretos “NAT100” e “RCA100”.	42
Tabela 5-3. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “NAT100”, “RCA-NAT” e “RCA100”.	46
Tabela 5-4. Quantidade de elementos finitos das malhas.	52
Tabela 5-5. Parâmetros das fibras de aço.	53
Tabela 5-6. Parâmetros referentes ao acoplamento das fibras de aço no concreto.	53
Tabela 5-7. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “RCA-NAT – NUMÉRICO”, “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”.	55
Tabela 5-8. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “RCA100 – NUMÉRICO”, “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”.	57
Tabela 5-9. Parâmetros dos concretos modelados.	61
Tabela 5-10. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes sem fibras de aço modeladas numericamente.	62
Tabela 5-11. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com fibras de aço modeladas numericamente.	65
Tabela 5-12. Quantidade de elementos finitos das malhas.	74
Tabela 5-13. Parâmetros da armadura e das fibras de aço.	74
Tabela 5-14. Parâmetros do concreto.	75
Tabela 5-15. Parâmetro referente ao acoplamento das barras de aço no concreto.	75
Tabela 5-16. Parâmetros referentes ao acoplamento das fibras de aço no concreto.	75
Tabela 5-17. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes contendo 0, 50 e 100% de agregado reciclado sem fibras de aço.	83
Tabela 5-18. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com 50% de agregado reciclado e variados teores de fibras de aço.	86
Tabela 5-19. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com 100% de agregado reciclado e variados teores de fibras de aço.	88

LISTA DE ABREVIações

A37:	Laje cujo concreto possui o agregado A e resistência igual 37 MPa
A37 – 0,5%:	Laje A37 com 0,5% de fibra de aço.
A37 – 1,0%:	Laje A37 com 1,0% de fibra de aço.
AG:	Agregado graúdo
A37 – G37:	Laje com duas camadas de concreto (A37 e G37)
A37 / G37 – 0,5%:	Laje A37 – G37 com 0,5% de fibra de aço
A37 / G37 – 1,0%:	Laje A37 – G37 com 1,0% de fibra de aço
AM:	Agregado miúdo
AR:	Agregado reciclado
ARC/ARCO:	Agregado reciclado de concreto
ARCE:	Agregado reciclado cerâmico
ARCI:	Agregado reciclado cimentício
ARM:	Agregado reciclado misto
B37:	Laje cujo concreto possui o agregado B e resistência igual 37 MPa
B37 – 0,5%:	Laje B37 com 0,5% de fibra de aço.
B37 – 1,0%:	Laje B37 com 1,0% de fibra de aço.
B37 – G37:	Laje com duas camadas de concreto (B37 e G37)
B37 / G37 – 0,5%:	Laje B37 – G37 com 0,5% de fibra de aço
B37 / G37 – 1,0%:	Laje B37 – G37 com 1,0% de fibra de aço
CAR:	Concreto com agregado reciclado
EFA:	Elemento finito de acoplamento
G37:	Laje cujo concreto possui o agregado G e resistência igual 37 MPa

IP:	Índice de plasticidade
ISC:	Índice de Suporte Califórnia
LL:	Limite de liquidez
MEF:	Método dos Elementos Finitos
NAT100:	Laje com 100% de agregado natural
PARF:	Pavimento asfáltico recuperado fracionado
RAC0:	Laje de concreto convencional (agregado natural), sem fibras de aço
RAC50-0%:	Laje com 50% de agregado reciclado, sem fibras de aço
RAC100-0%:	Laje com 100% de agregado reciclado, sem fibras de aço
RCA100:	Laje com 100% de agregado reciclado
RCA100-0,5%:	Laje RCA100 com 0,5% de fibra de aço
RCA100-1,0%:	Laje RCA100 com 1,0% de fibra de aço
RCA-NAT:	Laje com duas camadas de concreto (convencional e com agregado reciclado)
RCA-NAT-0,5%:	Laje RCA-NAT com 0,5% de fibra de aço
RCA-NAT-1,0%:	Laje RCA-NAT com 1,0% de fibra de aço
RCD:	Resíduos de construção e demolição
SFRAC50-0,5%:	Laje com 50% de agregado reciclado e 0,5% de fibra de aço
SFRAC50-1,0%:	Laje com 50% de agregado reciclado e 1,0% de fibra de aço
SFRAC100-0,5%:	Laje com 100% de agregado reciclado e 0,5% de fibra de aço
SFRAC100-1,0%:	Laje com 100% de agregado reciclado e 1,0% de fibra de aço
ZTI:	Zona de transição interfacial

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIACÕES	vi
SUMÁRIO.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1 Agregado Reciclado.....	5
3.2 Fibras de aço	8
3.3 Aplicação de agregados reciclados em pavimentos.....	11
3.4 Recomendações Normativas.....	14
3.5 Estruturas que podem sofrer ruptura por punção	21
3.6 Modelos numéricos.....	22
4 METODOLOGIA	24
4.1 Primeira fase: Pré-processamento.....	24
4.2 Segunda fase: Processamento	24
4.3 Terceira fase: Pós-processamento.....	35
4.4 Parâmetros	35
5 RESULTADOS.....	37
5.1 Descrição da modelagem referente ao estudo do comportamento mecânico de lajes de concreto de pavimento rígido constituídas por agregado reciclado e fibras de aço.....	37
5.1.1 <i>Discussão dos resultados referentes ao estudo do comportamento mecânico de lajes de concreto de pavimento rígido constituídas por agregado reciclado e fibras de aço</i>	<i>43</i>
5.1.2 <i>Adição de fibras de aço nas lajes com CAR.....</i>	<i>51</i>
5.1.3 <i>Discussão dos resultados obtidos com a inserção das fibras de aço.....</i>	<i>54</i>
5.2 Descrição da modelagem referente ao estudo do comportamento mecânico de lajes de pavimento rígido constituídas por agregados reciclados de concretos com diferentes resistências à compressão	60
5.2.1 <i>Discussão dos resultados referentes ao estudo do comportamento mecânico de lajes de pavimento rígido constituídas por agregados reciclados de concretos com diferentes resistências à compressão</i>	<i>61</i>
5.3 Capacidade do modelo numérico em representar rupturas por punção	69

5.3.1	<i>Descrição do estudo de caso e da modelagem utilizada</i>	69
5.3.2	<i>Discussão dos resultados obtidos</i>	75
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
6.1	Conclusões	92
6.2	Trabalhos futuros	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

O concreto pode ser definido como a massa fabricada pela utilização de um meio de cimentação, o qual corresponde normalmente ao produto da reação entre o cimento hidráulico e a água. Pode-se dizer que o concreto é constituído por diferentes variedades de cimento, além de possuir pozolana, cinzas volantes, escória de alto forno, microsílica, aditivos, polímeros, fibras e permitir a substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto (ARC). Para ser considerado um bom concreto, a mistura deve ser satisfatória tanto no seu estado endurecido quanto no fresco, em que é conduzido do misturador à cofragem (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Os agregados possuem capacidade de influenciar a resistência do concreto, pois caso tenham características inadequadas, o concreto resultante não será muito resistente, além do que a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto também são fatores dependentes de suas propriedades (NEVILLE, 2016). Como o concreto representa um dos insumos mais empregados pelo ser humano, torna-se claro a importância ambiental da produção de seus materiais constituintes e, por isso, a busca por diferentes fontes de sua matéria-prima revela-se uma alternativa para a redução da utilização dos recursos naturais. Como o volume ocupado pelos agregados no concreto tradicional é superior a 70%, é evidente que o emprego de elementos alternativos acarretaria vantagens consideráveis, como por exemplo, a redução no consumo de agregados naturais e controle de gastos com a energia relativa à fabricação e deslocamento de tais agregados (PALURI et al., 2021).

A fabricação do concreto e a produção de resíduos de construção e demolição (RCD) fazem parte de um grupo fundamental que colabora para o contínuo lançamento de dióxido de carbono na atmosfera e, por isso, vários países estão buscando meios para diminuir seus RCD, estabelecendo leis e aumentando a conscientização, por meio de diversos métodos e assim proteger o meio ambiente (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Apesar de contribuir com a sustentabilidade, estudos indicam que o concreto com agregado reciclado (CAR) possui propriedades inferiores ao concreto convencional, por isso a introdução das fibras de aço surge como solução para aperfeiçoamento de suas características mecânicas. Com tamanho adequado para se combinar com o concreto fresco sem grandes complicações, as fibras de aço dispõem de benefícios como maior resistência à tração e capacidade de deformação (XIE et al., 2021).

As fibras auxiliam o CAR aumentando sua resistência à compressão e seu pico de tensão e deformação, além de diminuir a declividade da curva tensão-deformação no pós-pico, aumentando assim a tenacidade e ductilidade deste tipo de concreto. O módulo de elasticidade também é afetado com a utilização de agregado reciclado, sofrendo decréscimo em seu valor, assim como a resistência à flexão e à tração, condições estas que podem ser alteradas por meio das fibras (XIE et al., 2021).

Além disso, o experimento realizado por Xiao et al. (2019) apontou que apesar da capacidade de cisalhamento por punção de lajes de CAR ser inferior a das lajes com agregados naturais, a inclusão das fibras de aço proporcionou aumento desta propriedade entre 7% e 15%, além do aperfeiçoamento de outros fatores como ductilidade, deformação e consumo de energia.

A Índia, país considerado o segundo maior consumidor de agregados triturados do mundo, está se desenvolvendo cada vez mais no emprego de resíduos ou materiais reciclados para a produção de agregados na pavimentação. Desta forma, considerando que o uso deste tipo de material nos pavimentos pode ser realizado sem grandes beneficiamentos, tem-se a descoberta de uma excelente opção em relação aos agregados naturais (PALURI et al., 2021).

Neste contexto, sabendo-se das propriedades essenciais relacionadas ao comportamento de pavimentos de concreto, como módulo de elasticidade, resistência à flexão e resistência de fadiga do concreto, visando o aperfeiçoamento de tais propriedades, pesquisadores recomendaram o emprego de fibras de aço (PALURI et al., 2021). Alguns dos benefícios da utilização do concreto reforçado com fibras são a redução de fissuras, aumentando a absorção composta de energia e resistência residual (CHAN et al., 2019).

No Brasil, existem normas como a ABNT NBR 15115:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos e a ABNT NBR 15116:2021: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios, que abordam as exigências necessárias para se utilizar agregados reciclados na pavimentação em camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimentação ou revestimento primário de vias não pavimentadas, assim como no concreto com e sem função estrutural. Entretanto, como a reciclagem deste tipo de resíduo ainda é um assunto relativamente novo em âmbito nacional, é normal que surjam dúvidas em determinados aspectos relacionados à normatização destes materiais, o que justifica a necessidade de se estudar cada vez mais este assunto.

Portanto, visto que os RCD estão aumentando atualmente, o emprego de agregados graúdos reciclados, oriundos deste tipo de resíduo, no lugar dos agregados naturais utilizados na fabricação do concreto, torna-se uma opção sustentável para este problema. Desta forma, a justificativa para o desenvolvimento desta pesquisa baseia-se no fato de que a existência de uma estratégia de modelagem pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) que estime adequadamente o comportamento mecânico do CAR com fibras de aço complementar as metodologias experimentais, visto que as abordagens numéricas permitem que simulações complexas sejam realizadas de maneira menos onerosa e demorada e também contribuiria com o estudo do concreto que utiliza agregados reciclados, colaborando assim com a sustentabilidade.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo consiste em avaliar a potencialidade e validação da modelagem tridimensional aplicada, via MEF, para prever o comportamento mecânico de dois tipos de lajes: as de pavimentos rígidos e as lisas de concreto armado, ambas apresentando em sua composição agregados graúdos reciclados de concreto e fibras de aço. Desta forma, para o objetivo principal ser atingido, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a capacidade de carga de flexão de lajes de concreto de pavimento rígido, que possuem em sua constituição agregados reciclados oriundos da britagem do mesmo concreto e de concretos com diferentes resistências à compressão;
- Avaliar a capacidade do modelo numérico em representar o comportamento ao puncionamento de lajes lisas de concreto armado, viabilizando assim uma nova ferramenta numérica de modelagem para outros pesquisadores, que tenham como objetivo principal em seus trabalhos, o estudo da ruptura por punção, a qual pode ocorrer tanto em lajes lisas como em pisos industriais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agregado Reciclado

O crescimento da população aliado ao desenvolvimento econômico proporciona uma consequência preocupante caracterizada pelo crescimento da quantidade de resíduos sólidos, oriundos tanto de práticas comerciais ou industriais. Frequentemente, o destino final destes resíduos consiste nos aterros sanitários, mas existem também as deposições em corpos d'água e valas de drenagem, o que acaba prejudicando da mesma forma os ambientes aquáticos. Além da toxicidade que esses resíduos podem acarretar tanto para a vida humana quanto animal e vegetal, seu acúmulo nos aterros impossibilita uma utilização mais produtiva dos terrenos, influenciando, portanto, não somente o âmbito ambiental como também o social e econômico, deixando evidente as consequências da ausência de sustentabilidade deste tipo de descarte (MADUABUCHUKWU NWAKAIRE et al., 2020).

A construção civil é o ramo industrial que mais consome matérias-primas, por isso o uso de agregados reciclados de RCD é uma necessidade. O concreto, considerado o material industrial mais utilizado pela humanidade, é constituído por cimento e agregados, os quais não são renováveis, apesar de existirem em grandes quantidades no planeta (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011). Entretanto, uma solução viável para este problema é a utilização de ARC e agregado reciclado de tijolo na produção do concreto, os quais podem substituir parcial ou totalmente os agregados naturais no concreto (NOVAK et al., 2020). Portanto, o uso de agregados reciclados contribuiria para a redução da quantidade de resíduos, preservação dos recursos naturais, redução dos problemas ambientais e das despesas relacionadas ao descarte de resíduos e também diminuição do alto custo de transporte dos agregados retirados de pedreiras localizadas em áreas isoladas.

Os RCD são obtidos através da construção, renovação e demolição de edifícios, estradas e outras infraestruturas, além da escavação de terrenos relacionados às práticas construtivas. Eles abrangem vários tipos de materiais residuais, como concreto, asfalto, tijolos, telhas, madeira, aço e solo (TULADHAR; MARSHALL; SIVAKUGAN, 2020). O CAR é o concreto que utiliza resíduos britados para substituir parcial ou totalmente os agregados convencionais e define-se como agregado reciclado, o agregado provindo da reciclagem dos RCD ou de outro resíduo que possa ser aplicado no concreto (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

As principais categorias de agregado graúdo reciclado são os ARC (o mais utilizado na área da construção), agregado reciclado de tijolo e o agregado reciclado misto (ARM),

ilustrados na Figura 3.1, ressaltando que materiais como madeira, restos de papel, plásticos e outros poluentes também podem estar presentes nestes agregados (BAI et al., 2020).



Figura 3.1 Principais categorias de agregado graúdo reciclado (Adaptada de BAI et al., 2020).

No preparo do concreto, o cimento é misturado com os agregados de concreto, os quais por possuírem diâmetro maior que o do cimento acabam formando uma “parede” na zona adjacente ao agregado. O cimento, por sua vez, devido as suas dimensões e formatos diversificados, não consegue estabelecer contato direto com o agregado, desta forma os vazios formados próximos aos agregados serão completos por pequenos grãos de cimento, ar e água, como demonstrado pela Figura 3.2. Este fenômeno caracteriza o “efeito parede”, sendo a região próxima ao agregado uma cobertura esférica de espessura em μm , conhecida como zona de transição interfacial (ZTI), cuja capacidade de carga é menor do que a da argamassa a granel, visto ser uma região em que há uma parcela maior de pequenos grãos e vazios (WANG et al., 2021).

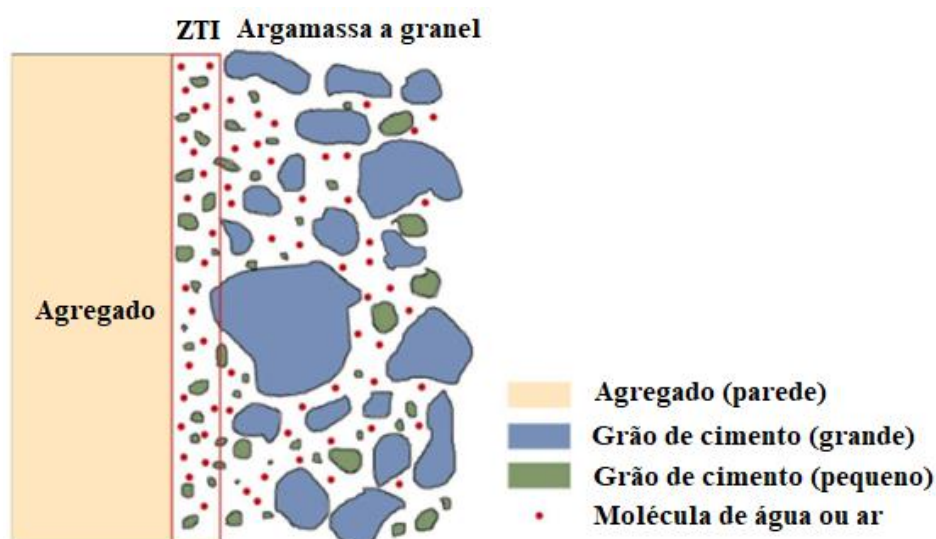


Figura 3.2 Ilustração do “efeito parede” e ZTI (quadrado vermelho) (Adaptada de WANG et al., 2021).

A constituição do ARC normalmente é dividida em agregado natural e a camada de argamassa velha, como ilustrado na Figura 3.3 (BAI et al., 2020).



Figura 3.3 Diagrama esquemático do agregado graúdo reciclado de concreto (Adaptada de BAI et al., 2020).

Em termos percentuais, os agregados reciclados são constituídos por 65 a 70% em volume de agregado graúdo natural e 30 a 35% em volume de argamassa aderida. Desta forma, o concreto que possui este tipo de agregado terá duas ZTIs: a antiga, formada pelo agregado graúdo natural com a argamassa velha e a nova ZTI, gerada entre o agregado reciclado e a argamassa nova, como demonstra a Figura 3.4 (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018).



Figura 3.4 Agregado reciclado no CAR (Adaptada de WANG et al., 2021).

Desta forma, como o volume de ZTI é maior no CAR, sua porosidade aumenta, reduzindo assim o valor de propriedades mecânicas como resistência à compressão, flexão e tração, se comparado com o concreto constituído por agregados naturais (WANG et al., 2021).

O estudo de Xiao, Li e Zhang (2005), conduzido em Xangai (China), demonstrou a influência da aplicação de agregados graúdos reciclados de concreto na resistência à compressão do concreto. Através do experimento realizado, constatou-se que a resistência à compressão do prisma para o concreto convencional foi de 26,9 MPa, porém este valor reduziu para 25,4; 23,6; 24,2 e 23,8 MPa ao substituir os agregados naturais por reciclados nas porcentagens de 30; 50; 70 e 100, respectivamente. Já para a resistência à compressão do cubo, o valor de 35,9 MPa para o concreto com agregados naturais foi reduzido para 34,1; 29,6; 30,3 e 26,7 MPa referentes nesta ordem aos concretos constituídos por 30; 50; 70 e 100% de agregados reciclados.

González-Fonteboa e Martínez-Abella (2008), por sua vez constataram que a resistência à compressão do cilindro aos 28 dias para o concreto convencional foi de 36,04 MPa, reduzindo para 35,85 MPa quando o concreto continha 50% de agregados graúdos reciclados, obtidos de detritos de demolição (de estruturas de concreto, principalmente), na Espanha. Já para a resistência à compressão do cubo na mesma idade, o valor de 42,93 MPa, relativo ao concreto convencional, caiu para 42,77 MPa ao se utilizar 50% de agregados reciclados. Ainda considerando o concreto convencional e o com 50% de agregado reciclado, a resistência média de ruptura à tração para 28 dias foi reduzida de 3,15 MPa para 3,00 MPa, respectivamente e o módulo de elasticidade estático médio de 32 227,84 MPa para 28 576,54 MPa.

Já Thomas, Thaickavil e Wilson (2018) relataram redução da resistência à compressão em torno de 1,5 a 5% para concretos com 25% de ARC (cujos tamanhos foram proporcionados para atender os requisitos de classificação da norma indiana IS: 383) e de 11 a 19%, quando a porcentagem de substituição dos agregados foi de 100%. A redução relativa à resistência à tração foi cerca de 2–8% e 7-19%, para concretos com 25% e 100% de agregados reciclados, respectivamente. Na resistência à flexão, a diminuição foi de 2-5% para substituição de 25% dos agregados naturais e de 7 a 17% para o nível de substituição de 100%. Em relação ao módulo de elasticidade, a redução consistiu em 31–39% para as misturas contendo 100% de ARC e em 5%, quando a substituição por agregados reciclados foi de 25%.

3.2 Fibras de aço

Visando melhorar o modo de falha frágil do CAR, tem-se empregado fibras na constituição do concreto. O mecanismo de reforço pode ser descrito da seguinte forma: quando o concreto começa a fissurar, as fibras conectam as fissuras e transmitem as tensões dispersas, através do efeito ponte (Figura 3.5), gerando como consequência redução da largura e área das fissuras, assim como sua propagação (XIE et al., 2021).

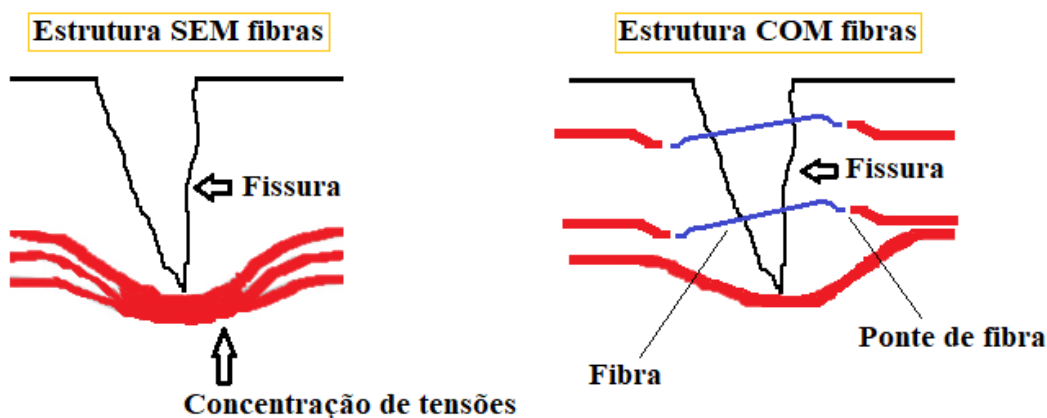


Figura 3.5 Efeito ponte de transferência de tensões.

As fibras mais utilizadas no CAR são: fibras de aço, fibras de basalto, fibras de polipropileno e fibras de vidro, ilustradas na Figura 3.6 (XIE et al., 2021), ressaltando que este trabalho em específico foca na aplicação das fibras de aço.

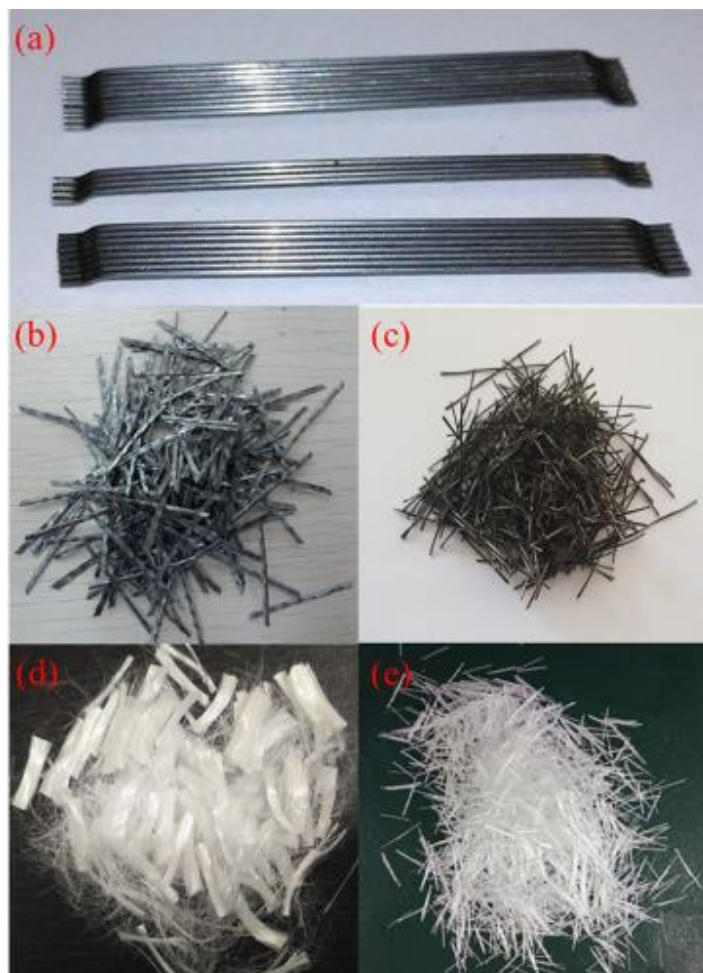


Figura 3.6 Fibras utilizadas no CAR: (a) fibras de aço com ancoragens nas extremidades; (b) fibras de aço onduladas; (c) fibras de basalto; (d) fibras de polipropileno; (e) fibras de vidro (XIE et al., 2021).

Carneiro et al. (2014), por exemplo, observaram em seus ensaios (cujos alguns procedimentos foram auxiliados por normas brasileiras) que o concreto convencional apresentava valor de resistência à compressão correspondente a 29,9 MPa, resistência à tração indireta de 3,21 MPa e resistência à flexão de 3,62 MPa, porém estes valores aumentaram para 34,3 MPa; 3,96 MPa e 3,92 MPa, respectivamente, ao se utilizar fibras de aço com ponta em gancho, em uma fração volumétrica de 0,75%. O módulo de elasticidade, todavia sofreu redução de 31,1 GPa para 30,9 GPa. Realizando a substituição dos agregados graúdos naturais por 25% de agregado graúdo reciclado na composição do concreto, teve-se como valor de resistência à compressão 32,6 MPa, resistência à tração indireta 3,17 MPa e resistência à flexão 3,34 MPa; com a inclusão de 0,75% de fibras de aço, tais propriedades se elevaram para os

valores de 36,9 MPa; 3,87 MPa e 4,62 MPa, respectivamente. Porém, assim como o concreto convencional, o módulo de elasticidade para o concreto com 25% de agregado graúdo reciclado decresceu de 32,1 GPa para 28,5 GPa, ao se adicionar as fibras de aço.

Paluri et al. (2021) em seus estudos, amparados por normas indianas em certos procedimentos, verificaram que para o concreto convencional sem fibras de aço, aos 28 dias, a resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tração foram equivalentes a 50,46 MPa; 6,51 MPa e 4,90 MPa, respectivamente. Entretanto, com a adição das fibras de aço no teor de 1% do volume de concreto, nesta mesma ordem, as resistências se elevaram para 54,48 MPa; 9,28 MPa e 7,02 MPa. O mesmo fenômeno ocorreu para o concreto com 50% de agregado reciclado, o qual sem fibras atingiu resistência à compressão de 43,14 MPa, resistência à flexão de 6,35 MPa e resistência à tração de 4,41 MPa. Porém, com teor de 1% de fibras, os valores subiram para 47,78 MPa; 8,56 MPa e 6,32 MPa, respectivamente. Os valores referentes às propriedades mecânicas do concreto com 100% de agregados reciclados também se elevaram com a adição de 1% de fibras de aço. Sem o reforço proporcionado pelas fibras, a resistência à compressão correspondeu a 38,64 MPa, resistência à flexão 5,36 MPa e resistência à tração 3,97 MPa, porém com as fibras, as resistências aumentaram para 42,99 MPa; 7,72 MPa e 6,02 MPa, respectivamente.

Entretanto, em alguns estudos foi percebido uma queda na resistência à compressão, com a adição das fibras. As fibras formam redes interligadas no concreto, o que contribui no aumento da resistência, porém elas devem ser distribuídas de maneira homogênea na matriz. Por isso, a diminuição da resistência à compressão deve-se à distribuição desigual da fibra, ao não se aplicar o teor de fibra correto ou também em função das fracas propriedades de ligação entre as fibras e o cimento. Outro ponto notável referente à substituição de agregados naturais por reciclados é em relação à deformação no pico de tensão, a qual aumenta conforme aumenta a taxa de substituição de agregados reciclados, porém o pico de tensão da curva tensão-deformação diminui, aumentando-se a inclinação dos segmentos ascendentes e descendentes, características estas devidas a menor resistência e módulo de elasticidade do agregado reciclado. Desta forma, as fibras servem para aumentar o pico de tensão e deformação e achatar a fase descendente da curva tensão-deformação do CAR, contribuindo assim na melhora de tenacidade e ductilidade deste tipo de concreto (XIE et al., 2021).

Deve-se destacar contudo que a elevação da resistência está intimamente relacionada com o teor adequado de fibras; nos estudos de Gao e Zhang (2018) por exemplo, foi constatado que o efeito da fibra de aço na resistência à flexão do concreto com agregado graúdo reciclado

de concreto não foi muito significativo quando o teor da fibra foi inferior a 0,5% em volume ou superior a 2%. O que não aconteceu com teor de fibras variando de 0,5 a 1% em volume, pois neste caso a resistência à flexão elevou-se conforme aumentava-se o teor das fibras de aço.

3.3 Aplicação de agregados reciclados em pavimentos

Pesquisas indicam a possibilidade de utilização dos ARC em base e sub-base de rodovia e pavimentos de concreto e asfáltico, levando-se em consideração que o desempenho dos pavimentos rodoviários relaciona-se diretamente com as propriedades do ligante e dos agregados. Sabe-se que os agregados constituem de 62% a 68% em volume de revestimento de pavimento de concreto e 80% a 85% em volume de revestimento de pavimento asfáltico (cerca de 95% da mistura asfáltica são agregados e os outros 5%, aglutinante betuminoso em peso). Os agregados são os grandes responsáveis pela transferência de carga e representam a maior proporção em peso e volume das misturas asfálticas e de concreto, demonstrando desta forma, a influência que sua qualidade e propriedades exercem sobre o desempenho do pavimento. O agregado reciclado normalmente possui propriedades físicas de qualidade inferior em comparação aos agregados naturais, o que deve-se à presença de materiais deletérios e outras partículas materiais como tijolos, argila e madeira em sua constituição, além das propriedades do concreto de origem, por isso deverá atingir requisitos mínimos padrões, analisados por meio de testes, antes de sua aplicação nos pavimentos (MADUABUCHUKWU NWAKAIRE et al., 2020).

Um pavimento é uma estrutura que suporta cargas veiculares e que deve garantir planicidade e resistência ao deslizamento suficientes para quem trafegará. Sem o pavimento, as cargas repetidas que os veículos impõem e as severas condições ambientais são capazes de deformar o leito da estrada ou até mesmo levá-lo a falha. Existem normalmente dois tipos de pavimentos, os flexíveis e os rígidos (Figura 3.7 e 3.8), classificados conforme a composição e desempenho dos materiais aplicados em sua camada superior. Como a natureza do material que constitui sua camada superior define o tipo de pavimento, no caso dos pavimentos flexíveis ou pavimentos asfálticos, são utilizados materiais asfálticos. Já os pavimentos rígidos ou pavimentos de concreto são dotados de duas camadas estruturais: a laje de concreto e a sub-base, conforme ilustrado na Figura 3.9 (MOHD TAHIR et al., 2022).



Figura 3.7 Pavimento flexível.



Figura 3.8 Pavimento rígido (FRASSON JR et al., 2020).

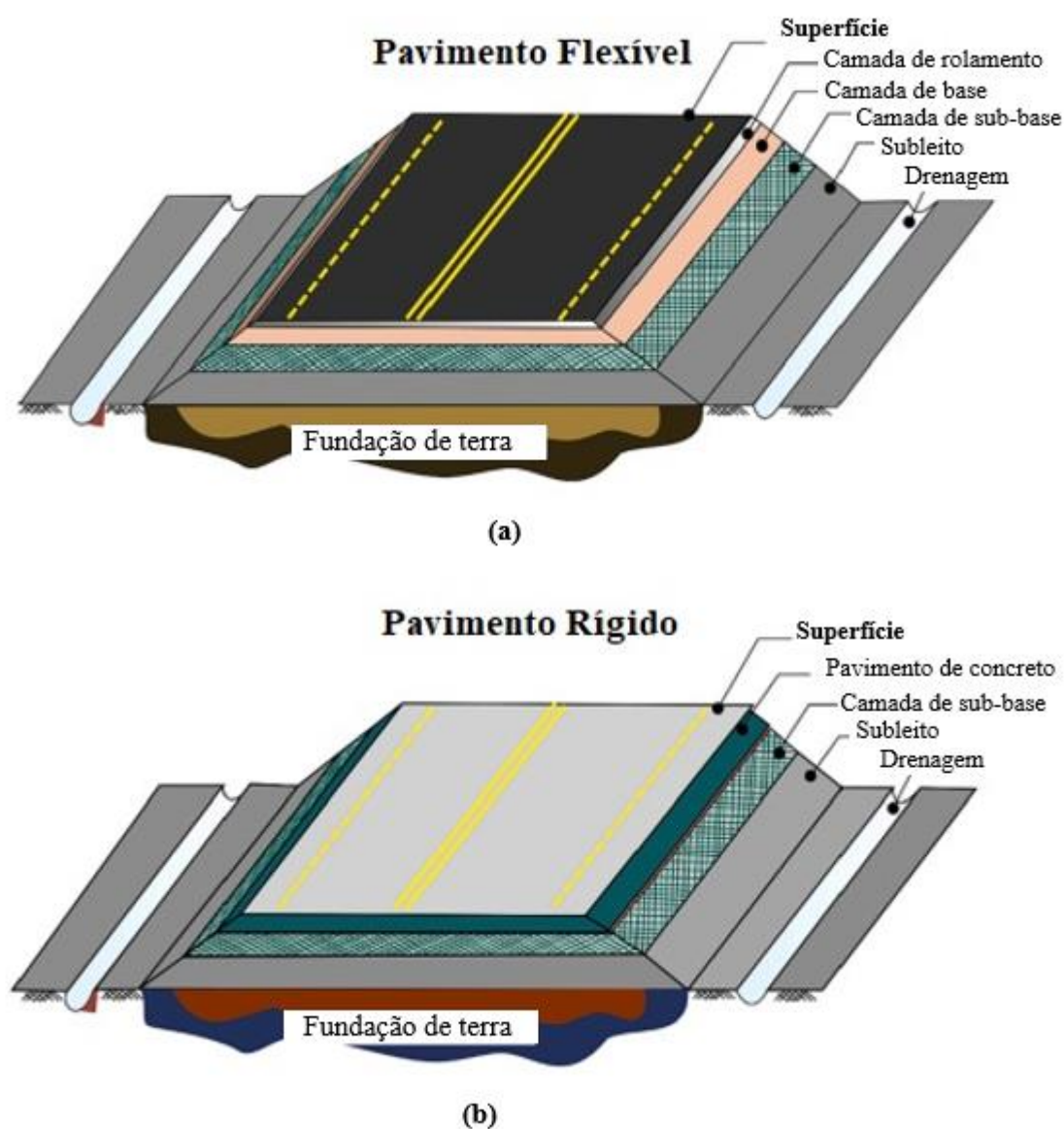


Figura 3.9 Camadas de um pavimento flexível (a) e rígido (b) (Adaptada de MOHD TAHIR et al., 2022).

Em relação aos pavimentos rígidos, os quais são feitos de concreto, a análise de seu comportamento e performance devido ao emprego de ARC pode ser determinada em função das propriedades do próprio concreto. Sabe-se que os agregados reciclados podem desencadear a redução da resistência à compressão, à tração, à flexão e do módulo de elasticidade, os quais se estabelecem como parâmetros principais para avaliação do desempenho do concreto aplicado, por exemplo, nos pavimentos. A resistência à compressão revela-se uma propriedade que decresce quando se eleva o número de agregados reciclados, o que deve-se ao fato desses agregados possuírem menor densidade, assim como a ligação interfacial ser enfraquecida, em função da argamassa aderida. Entretanto, estudos indicam que os agregados reciclados afetam

menos a resistência à tração, assim como a resistência à flexão e o módulo de elasticidade quando comparados com a diminuição que resistência à compressão sofre, características essas que viabilizam o uso deste tipo de agregado nos concretos que servirão de revestimento para pavimentos rígidos (MADUABUCHUKWU NWAKAIRE et al., 2020).

Outra maneira de contribuir com a redução do consumo de agregados naturais é a utilização de ARC em pavimentos asfálticos, os quais exigem grande quantidade de agregados, visto ser o segundo material de construção mais comumente fabricado no mundo, depois do concreto. Entretanto, deve-se atentar ao desempenho deste pavimento, pois as misturas com este tipo de agregado tendem a apresentar fissuras, em função da argamassa aderida nos agregados reciclados. A argamassa normalmente é mais fraca e porosa devido à formação de cristais mais fracos no processo de hidratação e principalmente próximo ao agregado, na ZTI. Existem algumas opções de reverter esta desvantagem, como por exemplo, a remoção da argamassa, através de tratamento ácido ou aquecimento, porém há a possibilidade deste procedimento gerar agregados arredondados, os quais não são apropriados para misturas asfálticas (MIKHAILENKO et al., 2021).

3.4 Recomendações Normativas

A Resolução CONAMA nº 307, publicada no ano de 2002, teve como objetivo determinar as condições e responsabilidades em relação ao gerenciamento dos RCD, sendo publicado no ano seguinte, pela Prefeitura de São Paulo, uma especificação de serviço em respeito à utilização de agregado reciclado na pavimentação. Portanto, em função dessas diretrizes, a ABNT no ano de 2004 estabeleceu normas referentes à administração dos RCD, quando reciclados, explicitando quais deveriam ser os requisitos necessários para um manejo apropriado, beneficiamento e uso. Depois disso foi determinado pela Prefeitura de São Paulo, o Decreto nº 48.075, em 2006, que obrigava o emprego de agregados reciclados em atividades de pavimentação do município (ALBERTE; HANDRO, 2021).

A Tabela 3-1 expõe de maneira concisa as especificações técnicas e normativas para os agregados reciclados, provenientes dos RCD.

Tabela 3-1. Especificações técnicas e normativas sobre agregado reciclado (AR) de alguns países.

País	Norma	Ano	Aplicação do AR				
			Pavi- mentos	Con- creto	Arga- massas	Terraple- nagem	Outros
Brasil	NBR 15115 (ABNT, 2004a)	2004	X				
	NBR 15116 (ABNT, 2004b)	2004	X	X			
Alemanha	DIN 4226-100 (DEUTSCHES..., 2002)	2002		X	X		
	DAfStb (GONÇALVES; BRITO, 2010)	2010		X			
	TLGESTEIN-STB (ROAD..., 2004)	2004	X				
Áustria	OBRV; OGRB (AUSTRIAN..., 2004)	2004	X				X
Austrália	CSIRO HB155 (COMMONWEALTH..., 2002)	2002	X	X			
	DPTI (DEPARTMENT..., 2001)	2001	X			X	
Bélgica	PTV 406 (ORGANISME..., 2016)	2016	X		X	X	
	NBN B15-001 (BELGIUM..., 2006)	2006		X			
Espanha	EHE-08 (MINISTERIO..., 2008)	2008		X			
	IHOBE/País Basco (SOCIEDAD..., 2011)	2011	X	X	X	X	
	GEAR (GRÊMIO..., 2012)	2012	X	X		X	X
	AOPJA/Andaluzia (AGENCIA..., 2015)	2015	X	X			
Estados Unidos	MDOT (MICHIGAN..., 2012)	2012	X	X			
	TxDOT (TEXAS..., 2014)	2014	X				
	FDOT (FLORIDA..., 2017)	2017		X			
Holanda	CUR (CUR AANBEVELING, 1984)	1984		X			
	NEN 5905 (ROYAL..., 2005)	2005		X			
	RAW (HENDRIKS; JANSSEN; VÁZQUEZ..., 2005)	2005	X			X	
Hong Kong	WBTC N° 12 (DEVELOPMENT BUREAU..., 2002)	2002	X	X			
Inglaterra	UKBS 8500-2 (BRITISH..., 2006)	2006		X			
	BRE DIGEST 433 (BUILDING..., 1998)	1998		X			
Japão	JIS A 5021 / JIS A 5022 / JIS A 5023 (JAPANESE..., 2005, 2007, 2006)	2005, 2007, 2006		X			
Suíça	OT 70085 (CONFÉDÉRATION..., 2006)	2006		X			
	SN 670 142/143/144 (SWISS..., 1998a, 1998c, 1998d)	1998	X			X	
França (*)	TC 121-DRG (RILEM, 1994)	1994		X			

Nota: *âmbito internacional.

Fonte: ALBERTE; HANDRO (2021).

É necessário ressaltar que a ABNT NBR 15116:2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos foi cancelada e substituída pela ABNT NBR 15116:2021: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios, a qual determina quais as condições a serem seguidas para produção e utilização do agregado reciclado provindo de resíduos da construção civil classe A em argamassas e concretos de cimento Portland e, portanto, não mais em pavimentos, como mostrado na Tabela 3-1.

De acordo com a ABNT NBR 15116:2021, a classe A de resíduos refere-se aos resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação (e outras obras de infraestrutura, assim como solos provenientes de terraplanagem) e de edificações (provindos de componentes cerâmicos, argamassa e concreto); inclui também os resíduos obtidos do preparo e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto.

Em relação ao emprego de agregados reciclados destinados à produção de concreto, a Tabela 3-2 resume os principais requisitos necessários nas normativas e especificações técnicas.

Tabela 3-2. Requisitos geométricos, físico-mecânicos e químicos de agregado reciclado (AR) para aplicação em concreto.

País	Norma	Classificação		Requisitos para o agregado											
		Norma	Unificada	Dimensão mínima (mm)	Densidade Seca a forno (kg/m³)	Absorção de água (%)	Teor de cloretos (%)	Teor de sulfatos (%)	Teor de finos (%)	Abrasão Los Angeles (%)	passante na peneira 4 mm	Torrões de argila (%)	Índice de forma (%)	Compostos de enxofre (%)	
Brasil	NBR 15116 (ABNT, 2004)	ARC	ARC	-	-	AG ≤ 7; AM ≤ 12	≤ 1	≤ 1	AG ≤ 10; AM ≤ 15	-	-	≤ 2	-	-	
		ARM	ARM	-	-	AG ≤ 12; AM ≤ 17			AG ≤ 10; AM ≤ 20	-	-		-	-	
Alemanha	DIN 4226-100 (DEUTSCHES..., 2002)	Tipo 1	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 10	≤ 0,04	≤ 0,8	-	-	-	-	-	-	
		Tipo 2	ARC			≤ 15			-	-	-	-	-		
		Tipo 3	ARCE	-	≥ 1.800	≤ 20			-	-	-	-	-	-	-
		Tipo 4	ARM	-	≥ 1.500	-	0,15	-	-	-	-	-	-	-	
Austrália	HB 155 (COMMONWEALTH..., 2002)	Classe 1A	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 6	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Classe 1B	ARM		≥ 1.800	≤ 8	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bélgica	NBN B15-001 (BELGIUM..., 2006)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2.100	≤ 9	≤ 0,06	≤ 1	< 3	-	-	-	-	-	
		ARM	ARM		≥ 1.600	≤ 18			< 5	-	-	-	-	-	
Espanha	EHE-08 (MINISTÉRIO..., 2008)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 7	≤ 0,05	≤ 0,08	< 10	≤ 40	≤ 5	≤ 0,6	-	-	
	Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco (2011)	ARM	ARM	-	≥ 2.100	≤ 12	-	-	-	≤ 50	-	-	-	-	
		GEAR - RT - 04 (GREMIO..., 2012)	ARH	ARC	-	-	≤ 11%	≤ 0,05	≤ 0,8	≤ 15 ^{a)}	≤ 50	-	-	≤ 35	≤ 1%
		ARMh	ARC	-	-	-	≤ 18 ^{b)}			≤ 40	-	-			
		ARMc	ARM	-	-	≤ 8%	-			-	-	-			
	GEAR - RT - 05 (GREMIO..., 2012)	ARH	ARC	4 mm	-	-	≤ 0,05	≤ 0,8	< 10	Concreto estrutural: ≤ 50%	≤ 5	Estrutural ≤ 0,25	≤ 35	-	
		ARMh	ARC		-	Estrutural ≤ 9						Não estrut. ≤ 0,6			
		ARMc	ARM		-	Não estrut. ≤ 12						-		-	
EUA	FDOT (FLORIDA..., 2017), TxDOT (TEXAS..., 2014) and MDOT (MICHIGAN..., 2012)	ARC	ARC	4 mm	-	-	-	-	-	≤ 40	-	≤ 0,25	-	-	
Holanda	NEN 5905 (ROYAL..., 2005)	ARC	ARC	-	≥ 2.000	-	≤ 0,05	≤ 1	-	≤ 40	-	-	-	≤ 1	
ARM	ARM	-	-	-		-			-						
Hong Kong	WBTC N° 12 (DEVELOPMENT T..., 2002)	ARC	ARC	4 mm	≥ 2.000	≤ 10	≤ 0,05	≤ 1	< 4	-	≤ 5	-	-	-	
Inglaterra	BS 8500-2 (BRITISH..., 2002)	ARC	ARC	4 mm	-	-	-	≤ 1	< 5	-	-	-	-	-	
		AR	ARCE		-	-	-	c)	< 3	-	-	-	-	-	
	BRE DIGEST 433 (BUILDING..., 1998)	AR I	ARCE	4 mm	≥ 2.000	-	-	≤ 1	-	-	-	-	-	-	
		AR II	ARC			-	-		-	-	-	-	-	-	
Japão	Building Contractors Society of Japan (1977)	AR	ARM	-	≥ 2.200	AG ≤ 7; AM ≤ 13	-	-	-	-	-	-	-	-	
	JIS A 5021 (JAPANESE..., 2005)	ARH	ARC	-	≥ 2.500	AG ≤ 3; AM ≤ 3,5	≤ 0,04	-	-	≤ 35	-	-	-	-	
	JIS A 5022 (JAPANESE..., 2007)	ARM	ARC	-	AG ≥ 2.300; AM ≥ 2.200	AG ≤ 5; AM ≤ 7	-	-	-	-	-	-	-	-	
	JIS A 5023 (JAPANESE..., 2006)	ARL	ARC	-	-	AG ≤ 7; AM ≤ 13	-	-	-	-	-	-	-	-	
Suíça	OT 70085 (CONFÉDÉRATION..., 2006)	ARC	ARC	-	-	-	≤ 0,12	≤ 1	-	-	-	-	-	-	
		ARM	ARM	-	-	-			-	-	-	-	-	-	
Internacional	Rilem (1994)	AR Tipo 1	ARCE	4 mm	≥ 1.500	≤ 20	-	≤ 1	< 5	-	-	-	-	-	
		AR Tipo 2	ARC		≥ 2.000	≤ 10	-			-	-	-	-	-	
		AR Tipo 3	ARM		≥ 2.000	≤ 3	-			-	-	-	-	-	-

Nota: AG: Agregado graúdo; AM: Agregado miúdo.

a) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 8%;

b) No caso de pré-fabricados de blocos e bancos ≤ 10%;

c) Limites devem ser determinados de forma isolada, caso a caso.

Fonte: ALBERTE; HANDRO (2021).

Com a atualização da norma brasileira, a ABNT NBR 15116:2021 possui novos requisitos, os quais foram listados na Tabela 3-3, ressaltando que estes são para os agregados reciclados das subclasses: agregado reciclado de concreto (ARCO); agregado reciclado cimentício (ARCI), constituído por materiais cimentícios, podendo ter pequenos teores de cerâmica vermelha; ARM, composto tanto por materiais cimentícios quanto cerâmicos e também para os agregados reciclados totais e/ou compostos (o agregado composto é aquele formado pela mistura do agregado reciclado com o natural e/ou britado).

Tabela 3-3. Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios.

Ensaio		Limite %
Materiais indesejáveis ^a (G ₄)	Teor	< 1
Argila em torrões	Teor	< 3
Sulfatos	Teor	< 0,1
Cloretos	Teor para concreto simples	< 0,2
	Teor para concreto armado	< 0,1
	Teor para concreto protendido	< 0,01
Absorção de água	Classe ARCO	< 7
	Classe ARCI ou ARM	< 12
Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10

a: São considerados materiais indesejáveis os fragmentos de natureza orgânica, como madeiras, plástico, betume e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso.

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 15116 (2021).

A Tabela 3-4, por sua vez, apresenta as principais condições de aplicação de agregado reciclado no concreto.

Tabela 3-4. Condições de aplicação de agregado reciclado (AR) em concreto por especificação analisada.

País	Norma	Classificação		Aplicação	Substituição (%)		Condições de uso	Resistência máxima (ou classe) do concreto produzido
		Nor- ma	Unifi- cada		Agrega- do graúdo	Agrega- do miúdo		
Brasil	NBR 15116 (ABNT, 2004)	ARC ARM	ARC ARM	Não estrutural	≤ 100		- -	C15
Alemanha	DIN 4226-100 (DEUTSCHES..., 2002)	Tipo 1	ARC	Estrutural	≤ 45	0	Classes de exposição X0, XC1 a XC4, XF1-XF3, XA1. Não é permitido o uso em concreto protendido	35 MPa
		Tipo 2	ARC		≤ 35	0		
		Tipo 3	ARCE	Não estrutural e argamassas	-		Concreto sem função estrutural e argamassas	-
		Tipo 4	ARM		-			-
Austrália	HB 155 (COMMONWEALT H..., 2002)	Classe 1A	ARC	Concreto	≤ 30	0	Concretos estruturais com ajustes de dosagens, permeabilidade e propriedades e encolhimento inferiores	40 MPa
		Classe 1B	ARM		≤ 100	0		25 MPa
Bélgica	NBN B15-001 (BELGIUM..., 2006)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20	0	Classes de exposição X0 e XC1	C30/C7
		ARM	ARM	Não estrutural	≤ 100	0	-	C16/20
Espanha	EHE-08 (MINISTERIO..., 2008)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20	0	Exceto em concreto protendido	40 MPa
	Sociedad Pública De Gestión Ambiental Del Gobierno Vasco (2011)	ARM	ARM	Não estrutural	≤ 100		-	C15
	GEAR - RT - 04 (GREMIO..., 2012)	ARH	ARC	Pré-fabricados de concreto	20 a 100	-	Condições climáticas favoráveis e sem exposição ao congelamento e descongelamento	-
		ARMh	ARC			-		-
	GEAR - RT - 05 (GREMIO..., 2012)	ARMc	ARM	Misturas para concreto	-	-	-	Estrutural: 30 MPa; Não estrutural: 20 MPa
		ARH	ARC			-		
ARMh		ARC	-					
EUA	FDOT (FLORIDA..., 2017)	ARC	ARC	Não estrutural	-	-	-	-
	TxDOT (TEXAS..., 2014)	ARC	ARC	Não estrutural	-	-	-	-
	MDOT (MICHIGAN..., 2012)	ARC	ARC	Não estrutural	-	-	-	-
Holanda	NEN 5905 (ROYAL..., 2005)	ARC	ARC	Concreto	≤ 100	-	Condições climáticas favoráveis e ambientes não agressivos	C40/C50
		ARM	ARM		-			20 MPa
Hong Kong	WBTC N° 12 (DEVELOPMENT.., 2002)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 20	0	-	35 Mpa
				Não estrutural	≤ 100	0	-	20 MPa
Inglaterra	BS 8500-2 (BRITISH..., 2002)	ARC	ARC	Estrutural	≤ 100	0	Classes de exposição X0, XC1, XC3, XC4, XF1, DC-1	C40/50
		AR	ARCE	Não estrutural	≤ 20	0		C16/20
	BRE DIGEST 433(BUILDING..., 1998)	AR I	ARCE	Estrutural	-	0	-	C20
		AR II	ARC		-	0	-	C35
		AR III	ARM		Concretos	≤ 20	0	-
Japão	Building Contractors Society of Japan (1977)	AR	ARM	Não estrutural	≤ 100		Elementos de fundação	18 MPa
	JIS A 5021 (2005)	ARH	ARC	Estrutural	-		-	45 MPa
	JIS A 5022 (JAPANESE..., 2006)	ARM	ARC		-		Não expostos ao gelo e ao degelo	-
	JIS A 5023 (JAPANESE..., 2007)	ARL	ARC	Não estrutural	≤ 100		-	-
Suíça	OT 70085 (JAPANESE..., 2006)	ARC	ARC	Concreto	≤ 100		-	-
		ARM	ARM				-	-
Internacional	RILEM (1994)	AR Tipo 1	ARCE	Concreto	≤ 100	Não recomendado	Ambientes secos e úmidos sem exposição química agressiva	C16/20

Fonte: ALBERTE; HANDRO (2021).

Pela Tabela 3-4 percebe-se que a maioria dos países não considera agregados miúdos para o concreto, visto ser difícil para as linhas de produção de agregados reciclados separar os contaminantes presentes nas porções mais finas do resíduo de entrada (ALBERTE; HANDRO, 2021).

Importante ressaltar ainda que a norma brasileira atualizada permite o uso de agregados reciclados em compósitos ou produtos com e sem função estrutural. Segundo ABNT NBR 15116:2021, é recomendável utilizar a subclasse ARCO para usos estruturais, com substituição limitada a 20% da massa de agregados totais, e as classes ARCO, ARCI e ARM para utilizações não estruturais, com substituição de até 100% da massa de agregados naturais.

A Tabela 3-5, por sua vez, expõe as principais exigências para a utilização do agregado reciclado em pavimentos.

Tabela 3-5. Requisitos técnicos para agregado reciclado (AR) aplicado em pavimentos.

País	Classificação	Aplicações		Índice de Forma (%)	Abrasão Los Angeles (%)	Absorção de água (%)	Equiva-lente de areia	ISC (%)	Teor de sulfatos (%)	Plasticidade
Brasil	ARC e ARM	Reforço de subleito		< 3*	-	-	-	≥ 12	≤ 2	-
		Sub-base de pavimento e revestimento primário			-	-	-	≥ 20		-
		Base de pavimento			-	-	-	≥ 60		-
Alemanha	ARC e ARM	Camadas não ligadas hidráulicamente		≤ 50	≤ 40	≤ 0,5	-	-	-	-
		Pavimento de concreto			≤ 32		-	-	-	-
Austrália	AR Classe I	Pavimentação, serviços de terraplenagem		-	≤ 30	-	-	-	-	LL < 25; IP < 6
	AR Classe II			≤ 45	-	-	-	-	-	LL < 28; IP < 8
	AR Classe III				-	-	-	-	-	LL < 35; IP < 15
Estados Unidos	ARC	Bases de pavimento, acostamentos, aterros		-	≤ 50	-	-	-	≤ 0,3	LL < 35; IP < 10
Espanha	ARC e ARM	Bica corrida em camadas de pavimento		≤ 35	T2: ≤ 35 T3 e T4: ≤ 40	-	> 35	-	c) < 0,2 d) < 0,7	-
		Serviços de terraplenagem e aterros		-	-	-	> 30	a) > 20 b) > 40		-
	ARC	Camadas granulares de pavimento	Bica corrida reciclada de concreto em vias de tráfego T2 a T4	≤ 35	T2: < 35; T3 e T4, Ciclovias e passeios: < 40	AG: < 7 AM < 7	> 35	> 40	c) < 0,5 d) < 0,7	-
	ARM I				Bica corrida reciclada mista I em vias de tráfego T2 a T4	T3 e T4, Ciclovias e passeios: < 40	AG: < 9; AM < 12			> 30
	ARM II	Sub-base de pavimento	Bica corrida reciclada mista II em vias de tráfego T4		T4, Ciclovias e passeios: < 40	AG: < 11 AM < 14	> 25			> 20
	ARC	Camadas granulares de pavimento	Tráfego T0 a T4	≤ 35	T0, T1 e T2: ≤ 35; T3 e T4: ≤ 40	-	T0, T1 e T2: > 40;	-	≤ 0,5	-
	ARC		Tráfego T1 a T4			-	-	-		-
	ARCE		Tráfego T3 e T4			-	T3 e T4: > 35	-		-
Holanda	ARM	Pavimento, terraplenagem e nivelamento de terra		-	≤ 60	-	-	≥ 50	-	-
Hong Kong	ARC	Sub-base de pavimento		-	-	-	-	≥ 30	≤ 1	-

Legenda: LL: Limite de liquidez; IP: Índice de plasticidade; ISC: Índice de Suporte Califórnia.

Fonte: ALBERTE; HANDRO (2021).

De acordo com a Tabela 3-5, o Brasil segue como o país mais rígido em relação ao índice de forma, seguido pela Espanha e Alemanha. Em relação ao Índice de Suporte Califórnia (ISC), nota-se que os limites brasileiros aumentam conforme a camada que utiliza agregado reciclado se aproxima da base do pavimento.

Vale ressaltar também que como auxílio para projetos de pavimentos de concreto, tem-se a Prática Recomendada ABNT PR 1011:2021: Projeto de pavimentos urbanos em concreto, que apresenta os requisitos e procedimentos para o dimensionamento de pavimentos de concreto simples e reforçados, seja com armadura ou fibras. Desta forma, através da PR o projetista consegue determinar os esforços solicitantes nas placas de concreto, assim como sua espessura, resistência à tração na flexão e taxas de armadura ou fibras estruturais, de forma a alcançar resultados mais apropriados a cada contexto.

3.5 Estruturas que podem sofrer ruptura por punção

Como um dos objetivos específicos deste trabalho é verificar se a modelagem utilizada consegue representar rupturas por punção, apresenta-se, brevemente, possíveis casos em que a ruptura por punção pode existir.

Estruturalmente falando, os pisos industriais são considerados estruturas em laje apoiadas na superfície inferior, cuja função consiste na transferência das cargas para a sub-base e depois para o solo. Suas camadas típicas são: subleito; sub-base; camada de isolamento; membrana deslizante e piso industrial de concreto. As cargas que atuam nos pisos industriais geralmente são armazenadas em prateleiras ou em contêineres, cujas “pernas” transferem carga pontual para o piso. Por isso, a punção consiste em um mecanismo de ruptura que deve ser considerado no projeto deste tipo de estrutura, assim como os materiais que possam estar localizados no piso ou armazenados em prateleiras e contêineres, além das máquinas e veículos que possam trafegar, como empilhadeiras e caminhões, durante a etapa de previsão de cargas (JUHASZ; SCHAUL, 2019).

As lajes lisas, por sua vez, são elementos estruturais de concreto armado apoiados diretamente em pilares sem a utilização de vigas, sendo muito aplicados em edifícios residenciais e industriais. Sua resistência última é normalmente dada pela capacidade de cisalhamento à punção na interface laje-pilar. A falha por punção, apesar de ser considerada frágil e capaz de gerar colapsos repentinos, pode ser evitada através de métodos de reforço, como, por exemplo, as fibras (ALOTAIBI et al., 2021). As fibras de aço na conexão laje-pilar proporcionam melhora na ductilidade e na capacidade de absorção de energia do concreto, contribuindo assim para um melhor desempenho, seja pelo aumento da resistência ou pela

transformação das falhas para um modo mais dúctil. Outra vantagem relacionada consiste na redução do acúmulo de tensões nas extremidades das trincas de flexão e cisalhamento, o que contém a propagação das trincas (MUSSE et al., 2018).

3.6 Modelos numéricos

Atualmente, ensaios experimentais não são os únicos instrumentos possíveis para o estudo do comportamento mecânico do CAR reforçado ou não com fibras, visto que é possível a previsão deste comportamento através de modelos numéricos adequados, sendo o MEF, um dos mais utilizados pois, como já demonstrado em várias pesquisas de modelagem, provou garantir resultados numéricos muito semelhantes aos experimentais.

Gaedicke, Roesler e Evangelista (2012), por exemplo, realizaram uma análise tridimensional que visava estimar discretamente o início da fissura e seu crescimento, além da capacidade de carga à flexão de lajes de concreto apoiadas em fundação elástica sob modo I de carregamento. No sentido pré-definido onde a fissura se localizaria na laje, o modelo de elementos finitos introduzia elementos de fissuras coesivas, sendo utilizado para representar a relação tensão-abertura de fissura, um modelo de amolecimento bilinear. A metodologia conseguiu determinar a capacidade de carga de flexão da laje, que foi comparada com resultados experimentais, além de proporcionar informações a respeito de áreas de concentração de tensão e posições de propagação de trincas para diversos níveis de carregamento.

Choubey, Kumar e Chakradhara Rao (2016), por sua vez, verificaram as utilizações do modelo de fissura fictícia e do modelo de fratura duplo-K, visando obter os parâmetros de fratura para propagação de fissura no concreto que possui diferentes teores de agregado graúdo reciclado de concreto. A modelagem exigia as propriedades do material, que foram obtidas através de relações empíricas tendo posse dos valores de resistência à compressão. Neste estudo também foram definidos os parâmetros de fratura do concreto com agregados convencionais e reciclados, realizando-se por fim uma análise comparativa. Com os resultados obtidos foi possível declarar que ambos os modelos convencionais de fratura podem ser realizados no estudo referente ao comportamento à fratura do concreto com diferentes porcentagens de agregado reciclado.

Wang et al. (2022) tinham como finalidade em sua pesquisa apresentar resultados experimentais do CAR reforçado com fibra sob compressão cíclica em testes de baixo ciclo, indicando a evolução do dano e a deformação residual e também propor um modelo constitutivo

que previsse esse comportamento. Além disso, foi estudada também a lei de desenvolvimento da deformação residual; propostas as relações entre deformação residual e deformação de descarga/deformação de recarga e fornecidas as equações tensão-deformação de descarga/tensão-deformação de recarga. No estudo, foi possível obter a lei de evolução do dano para este tipo de concreto e um novo modelo de dano, representado pela deformação residual. Ainda foi apresentado um modelo constitutivo de dano de acoplamento tensão-deformação, o qual garantiu bons resultados em relação ao caminho de descarregamento, caminho de recarga, desenvolvimento de deformação residual e de danos.

Já Rodrigues et al. (2021) tinham como objetivo prever numericamente o mecanismo de falha de vigas de flexão produzidas com agregado natural e reciclado, testadas experimentalmente por Casuccio et al. (2008). Para isso, no modelo numérico foi considerado o concreto como material heterogêneo em mesoescala e uma técnica de fragmentação de malha composta por elementos finitos sólidos de interface munidos de um modelo de dano por tração. Recorreu-se também a uma estratégia multiescala concorrente, em que elementos finitos de acoplamento (EFAs) conectavam as regiões de macro e mesoescala, o que contribuiu na redução dos custos computacionais. Os resultados numéricos indicaram a capacidade do modelo multiescala concorrente em prever adequadamente o mecanismo de ruptura por tração do CAR.

4 METODOLOGIA

A estratégia de modelagem tridimensional e simulações numéricas desenvolvidas nesta metodologia para lajes de pavimentos e lisas, constituídas por CAR e fibras de aço, foram realizadas por meio de três fases, sendo baseadas no MEF. Importante ressaltar que as análises numéricas deste trabalho não ocorreram nas escalas micro e mesoscópica, as quais, apesar de proporcionarem resultados mais precisos, são mais onerosas computacionalmente dependendo do problema, como nos casos em que deve-se simular lajes com diferentes porcentagens de substituição do agregado natural pelo reciclado. Por este motivo foi adotado o modelo macroscópico, no qual propriedades elásticas e de fratura homogeneizadas (propriedades médias) são adotadas nos parâmetros, ou seja, o CAR é considerado homogêneo. Apesar de ser uma análise mais simples, o tempo computacional é reduzido e bons resultados sobre o comportamento mecânico da estrutura são apresentados.

Como dito anteriormente, a modelagem é dividida em três fases, como serão detalhadas.

4.1 Primeira fase: Pré-processamento

Nesta fase, através do programa comercial de pré e pós-processamento GiD®, desenvolvido pelo CMNE (“*International Center for Numerical Methods in Engineering*”) da Universidade Politécnica da Catalunha, foi efetuada a modelagem geométrica dos componentes das lajes de concreto, a definição das condições de contorno essenciais e naturais e a geração das malhas de elementos finitos de cada material (concreto, armaduras e fibras de aço) de maneira independente umas das outras, com a adoção de elementos finitos tetraédricos para representar o concreto e unidimensionais de barra para as armaduras e fibras de aço.

4.2 Segunda fase: Processamento

Nesta fase foi realizada a análise numérica do arquivo de dados traduzidos com base no desenho gerado pelo GiD®, através do programa computacional *in-house* de elementos finitos em MATLAB®. No código do MATLAB® encontra-se o modelo de dano à tração do concreto (com comportamento elástico linear em compressão), o modelo constitutivo das barras e fibras de aço e também os parâmetros necessários para realizar a técnica de acoplamento responsável por compatibilizar malhas não conformes.

O modelo de dano do concreto segue o modelo independente de taxa proposto por Cervera, Oliver e Manzoli (1996), detalhado a seguir, com a simplificação de que o comportamento compressivo é assumido como elástico linear.

A Teoria da Mecânica de Danos Contínuos baseia-se no conceito de tensão efetiva, dada por:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}_0 : \epsilon \quad (4.1)$$

sendo $\mathbf{D}_0$, o tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem usual; ϵ , o tensor de deformação de segunda ordem e $(:)$, o produto tensorial contraído em dois índices. Com a adaptação proposta neste modelo de dano escalar, o tensor de tensão efetiva é separado em duas componentes: uma relativa à contribuição de tração, índice (+) e outra a de compressão (-) (Equações 4.2 e 4.3), entretanto existe apenas uma variável de dano interno: a referente às contribuições de tensão de tração:

$$\bar{\sigma}^+ = \langle \bar{\sigma} \rangle = \sum_{i=1}^3 \langle \bar{\sigma}_i \rangle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \quad (4.2)$$

$$\bar{\sigma}^- = \rangle \bar{\sigma} \langle = \sum_{i=1}^3 \rangle \bar{\sigma}_i \langle \mathbf{p}_i \otimes \mathbf{p}_i \quad (4.3)$$

sendo $\bar{\sigma}_i$, o valor de tensão principal i do tensor $\bar{\sigma}$; $\mathbf{p}_i$, o vetor unitário referente à sua respectiva direção principal; $\otimes$, o produto tensorial; $\langle . \rangle$, colchetes Macaulay e os símbolos $\rangle . \langle$ são tais que $\langle x \rangle + \rangle x \langle = x$.

Portanto, a lei constitutiva fica definida como:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + \bar{\sigma}^- \quad (4.4)$$

com:

$$0 \leq d^+ \leq 1$$

em que σ representa o tensor de tensão de Cauchy e d^+ , a variável de dano de tração.

O dano refere-se ao surgimento de descontinuidades superficiais na forma de microfissuras, quantificadas macroscopicamente através da medição da variação das propriedades elásticas do material. Matematicamente, a variável dano é a variação de volume/área do material, ou seja, é a relação entre a área degradada por processos inelásticos em relação à área não danificada. Dessa forma, uma variável escalar de dano igual a zero representa um estado teoricamente não danificado e quando igual a um, um estado totalmente danificado (WANG et al., 2022).

Esta lei constitutiva, que define um modelo isotrópico, prevê falhas em modo I e mistas, modos I e II.

Com o objetivo de trabalhar com conceitos de carga, descarga ou recarga, é preciso definir uma nova grandeza escalar, a tensão equivalente, que possibilitará comparar diferentes estados de tensão tridimensionais. A tensão de tração efetiva equivalente $\bar{\tau}^+$ é obtida por:

$$\bar{\tau}^+ = \sqrt{\bar{\sigma}^+ : \mathbf{D}_0^{-1} : \bar{\sigma}^+} \quad (4.5)$$

sendo $\mathbf{D}_0^{-1}$, o tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem inverso.

A tensão equivalente representa quantitativamente e de modo unidimensional o estado de tensão de um ponto, por isso é possível a comparação de seu valor com as tensões limites. Desta forma, para determinar o domínio elástico e o início do crescimento da degradação é necessário introduzir o critério de dano de tração, g^+ , o qual é dado em função da tensão de tração efetiva equivalente ($\bar{\tau}^+$) e do valor limite de dano r^+ .

$$g^+(\bar{\tau}^+, r^+) = \bar{\tau}^+ - r^+ \leq 0 \quad (4.6)$$

Em que a variável r^+ representa o limite de dano atual, ou seja, seu valor administra a extensão da superfície de dano em expansão. Portanto, as leis de evolução do dano podem ser definidas da seguinte maneira:

$$r^+ = \max(r_0^+, \max(\bar{\tau}^+)), \quad d^+ = G^+(r^+) \quad (4.7)$$

Desta forma, depois de atingir o domínio plástico, r^+ assumirá o maior valor alcançado por $\bar{\tau}^+$ durante o processo de carregamento.

Sendo G^+ , uma função de aumento monótono apropriada, obtida pela observação experimental e r_0^+ , a propriedade do material no estágio inicial (sem aplicação de carregamento) ligada à tração uniaxial. No início da análise, o valor inicial do limite de dano é: $r_0^+ = f_t$, sendo f_t , a resistência à tração do material.

Para esta metodologia, a regra de evolução do dano de tração é:

$$d^+ = 1 - \frac{r_0^+}{r^+} e^{A^+ (1 - \frac{r^+}{r_0^+})} \quad (4.8)$$

A Equação 4.8 representa o amolecimento de um ensaio de tração unidimensional de concreto. Com esta lei de evolução para d^+ , tem-se uma área entre a curva tensão-deformação e o eixo de deformação, que define a energia disponível para dissipação, relacionada com a energia de fratura do concreto. O parâmetro A^+ é obtido pela Equação 4.9 que associa a energia

de fratura do material com o comprimento característico (l_{ch}), o qual garante a conservação da energia dissipada pelo material.

$$\frac{1}{A^+} = \frac{1}{2\bar{H}^+} \left(\frac{1}{l_{ch}} - \bar{H}^+ \right) \geq 0 \quad (4.9)$$

Em que $\bar{H}^+$ depende das propriedades do material e é dado por:

$$\bar{H}^+ = \frac{(r_0^+)^2}{2G_f^+} = \frac{(f_0^+)^2}{2EG_f^+} \quad (4.10)$$

sendo G_f^+ , a energia de fratura de tração por unidade de área; f_0^+ , a resistência à tração uniaxial e E , o módulo de elasticidade.

Para uma melhor compreensão do comportamento cíclico do modelo de dano à tração do CAR utilizado nesta metodologia, tem-se a Figura 4.1, que considera um teste uniaxial realizado em apenas um elemento finito de 4 nós, de comprimento característico igual a 1. Ressalta-se que a curva encontra-se normalizada e o comportamento à compressão é assumido como elástico linear.

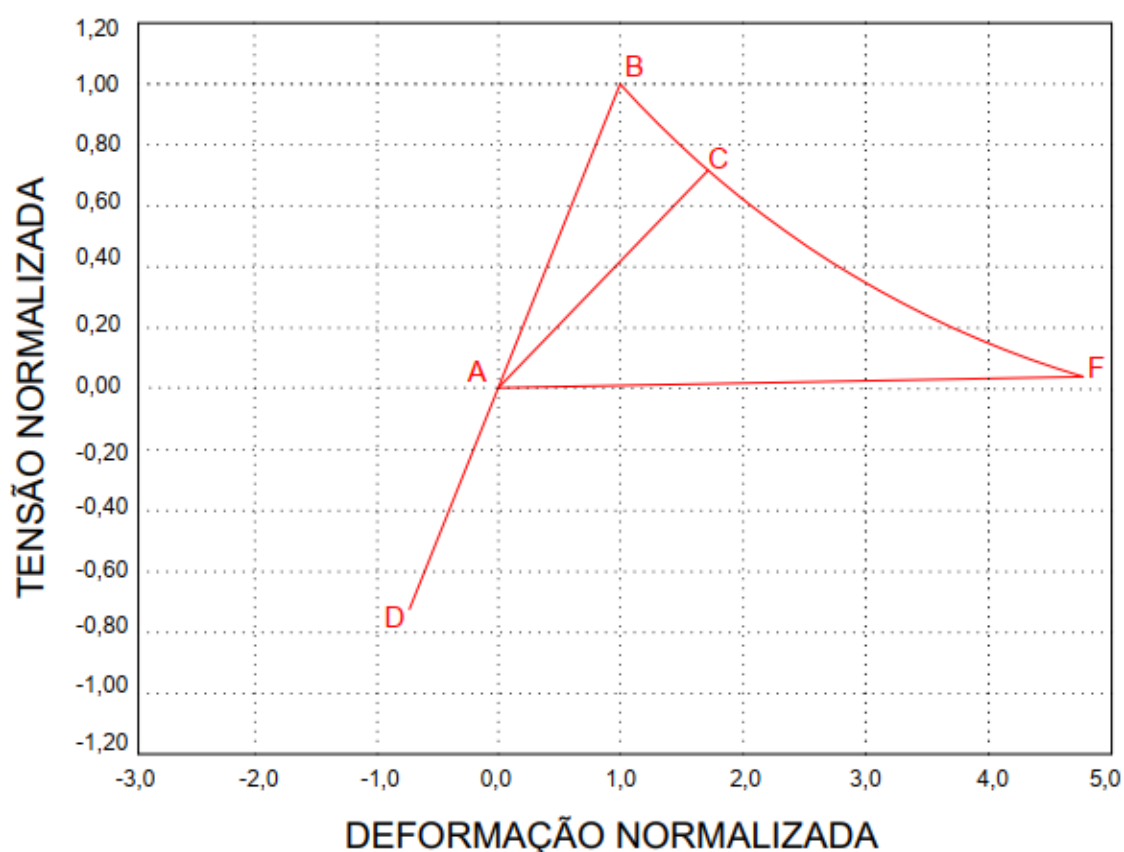


Figura 4.1 Comportamento cíclico do modelo de dano do CAR em um teste uniaxial.

Pela Figura 4.1, percebe-se que o concreto é submetido a tensões de tração sendo esticado, em regime elástico linear, até a tensão atingir seu valor máximo (f_t) (AB); a partir desse momento acontece o processo de abrandamento (*softening*) do concreto, representado pelo ramo descendente da curva tensão-deformação, indicando assim sua redução gradual de resistência (BC), ocorrendo em seguida, através da diminuição da tração imposta, descarregamento secante (CA). Uma nova inversão sugere recarga em compressão e com isso recuperação da rigidez, em comportamento elástico linear (AD). Em seguida, ocorre um descarregamento secante (DA). A reversão final demonstra recarga em tração até atingir um segundo pico, representado pelo ponto C (AC), onde ao retirar o carregamento é possível ver novamente a ocorrência do comportamento *softening* do concreto até a tensão se aproximar do valor zero (CF), instante a partir do qual dá-se início a um descarregamento secante (FA).

Em relação às barras e fibras de aço, o modelo constitutivo adotado para descrever o comportamento mecânico foi o elastoplástico perfeito (Figura 4.2), caracterizado pela formação de um patamar de escoamento (deformação plástica), após a tensão de escoamento do aço (f_y) ser atingida. Neste modelo, enquanto o material se encontra no domínio elástico linear, a

deformação (ε) é diretamente proporcional à tensão (σ) através do módulo de elasticidade (E_s). Mais detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em Simo e Hughes (1998).

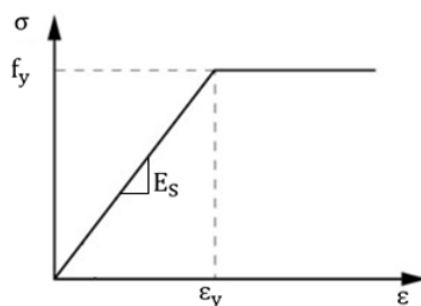


Figura 4.2 Modelo elastoplástico perfeito.

Como as malhas de elementos finitos das barras, fibras de aço e do concreto eram completamente independentes umas das outras, foi necessário realizar seus acoplamentos, rígido e não rígido, por meio dos EFAs. Como funciona este tipo de estratégia e as fórmulas que regem este comportamento serão detalhados a seguir, segundo Bitencourt et al. (2018).

Inicialmente, é necessário discretizar a malha de concreto de acordo com a geometria escolhida; depois são definidas as barras de aço (assim como as fibras), seguida pela discretização de sua malha; por fim definem-se os EFAs, que descrevem a interação entre as malhas independentes e não conformes. A estrutura do EFA é composta pelos nós do elemento de concreto, acrescentado de um nó, o nó de acoplamento, que consiste no nó solto da barra ou fibra de aço, pertencente ao domínio do mesmo elemento de concreto. A Figura 4.3 ilustra este processo.

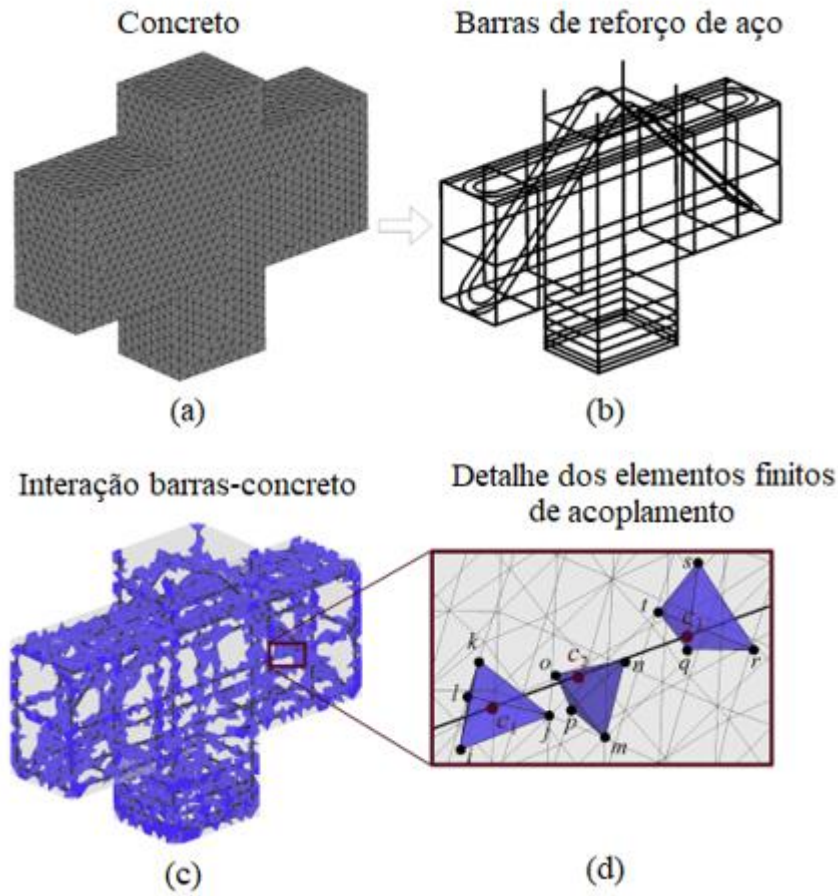


Figura 4.3 Definição do modelo numérico para consolo de concreto armado baseado em EFAs: (a) geração da malha de concreto; (b) geração dos vergalhões e correspondente discretização; (c) procedimento de acoplamento; e (d) detalhamento dos EFAs (Adaptada de BITENCOURT et al., 2018).

Portanto, de acordo com a Figura 4.3 (d), com os nós de reforço c_1 , c_2 e c_3 surgem os seguintes EFAs: $EFA_1 = \{i, j, k, l, c_1\}$, $EFA_2 = \{m, n, o, p, c_2\}$ e $EFA_3 = \{q, r, s, t, c_3\}$, ressaltando que a introdução dos EFAs não gera aumento no número de graus de liberdade do sistema.

Como as malhas dos materiais são discretizadas de maneira independente, depois de realizado o acoplamento, a contribuição das barras e fibras de aço são inseridas no vetor de força interna global, $\mathbf{F}^{\text{int}}$, e na matriz de rigidez, $\mathbf{K}$:

$$\mathbf{F}^{\text{int}} = \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^C} \mathbf{F}_{e,\Omega^C}^{\text{int}}}_{\text{elementos de concreto}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^B} \mathbf{F}_{e,\Omega^B}^{\text{int}}}_{\text{barras}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^F} \mathbf{F}_{e,\Omega^F}^{\text{int}}}_{\text{fibras}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^{EFA}} \mathbf{F}_{e,\Omega^{EFA}}^{\text{int}}}_{\text{elementos de acoplamento}} \quad (4.11)$$

e

$$\mathbf{K} = \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^C} \mathbf{K}_{e,\Omega^C}}_{\text{elementos de concreto}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^B} \mathbf{K}_{e,\Omega^B}}_{\text{barras}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^F} \mathbf{K}_{e,\Omega^F}}_{\text{fibras}} + \underbrace{\mathbf{A}_{e=1}^{\text{nel}\Omega^{EFA}} \mathbf{K}_{e,\Omega^{EFA}}}_{\text{elementos de acoplamento}} \quad (4.12)$$

sendo $\mathbf{A}$, o operador de montagem de elementos finitos.

O primeiro termo das Equações 4.11 e 4.12 relaciona-se ao subdomínio do concreto (Ω^C), o segundo ao subdomínio das barras (Ω^B), o terceiro ao subdomínio das fibras (Ω^F) e o quarto aos EFAs introduzidos.

A interação concreto-barra pode ser descrita da seguinte forma: considera-se um elemento finito isoparamétrico de domínio Ω^e , com nn nós e funções de forma $\bar{N}_i(\mathbf{X})(i = 1, nn)$, definidas para os pontos materiais $\mathbf{X} \in \Omega^e$, de maneira que o deslocamento, $\mathbf{U}$, seja aproximado em função de seus deslocamentos nodais, $\mathbf{D}_i (i = 1, nn)$:

$$\bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{nn} \bar{N}_i(\mathbf{X}) \mathbf{D}_i \quad (4.13)$$

O EFA corresponde a um elemento finito que possui os nós do elemento finito isoparamétrico padrão, mais um nó adicional, $nn + 1$, denominado nó de acoplamento, localizado no ponto material $\mathbf{X}_c \in \Omega^e$. Portanto, para casos em 3D, como neste trabalho, a composição do EFA consiste nos quatro nós do elemento isoparamétrico tetraédrico padrão escolhido mais o nó de acoplamento (Figura 4.4).

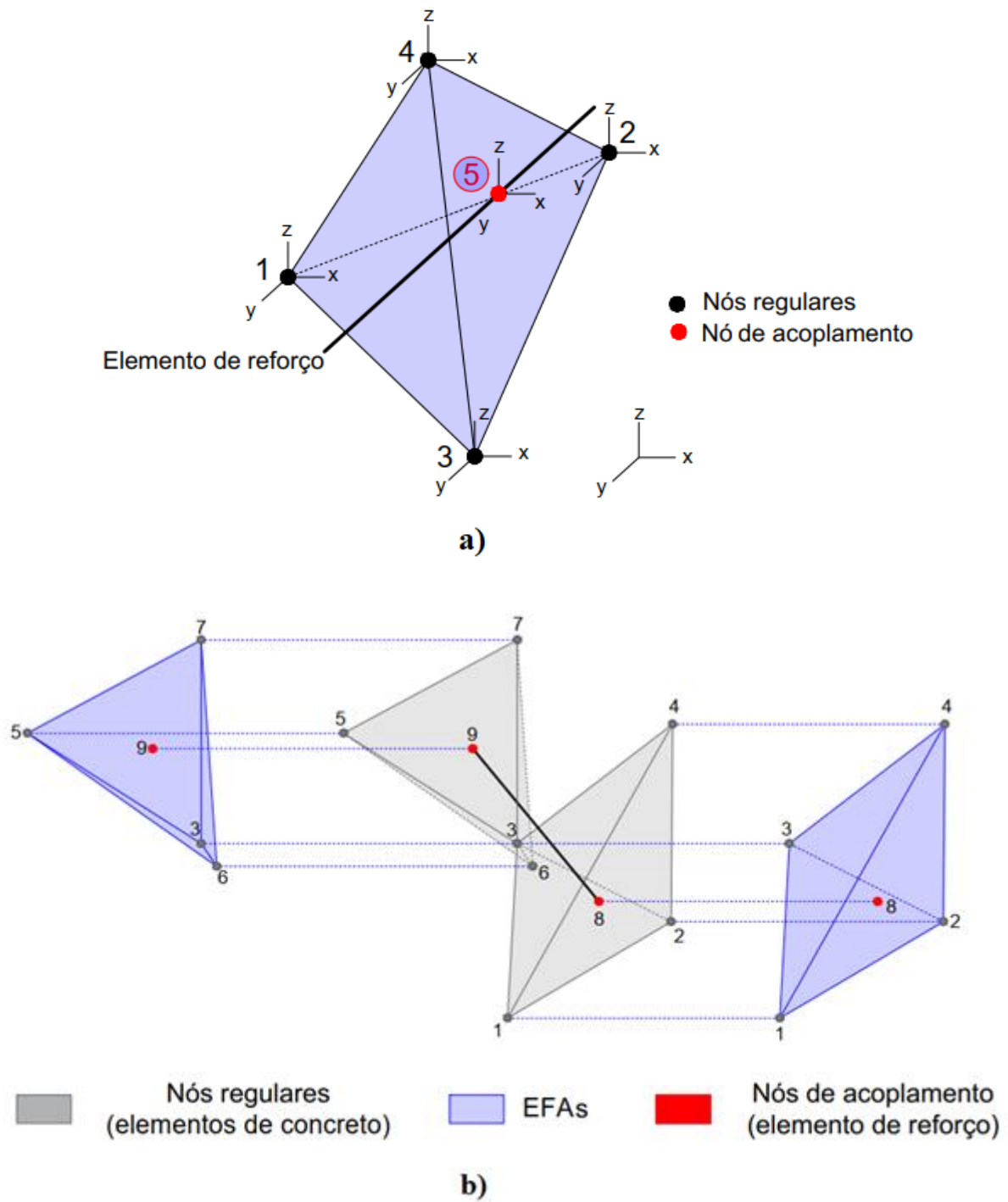


Figura 4.4 EFA 3D - elemento tetraédrico de 4 nós com o nó de acoplamento (a) e procedimento de acoplamento (b).

Portanto, o deslocamento relativo, $\llbracket \mathbf{U} \rrbracket$, pode ser calculado da seguinte forma:

$$\llbracket \mathbf{U} \rrbracket = \mathbf{D}_{nn+1} - \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{X}_c) = \mathbf{D}_{nn+1} - \sum_{i=1}^{nn} \bar{N}_i(\mathbf{X}_c) \mathbf{D}_i = \mathbf{B}_e \mathbf{D}_e \quad (4.14)$$

sendo $\mathbf{B}_e$, uma matrix de estrutura:

$$\mathbf{B}_e = [-\bar{\mathbf{N}}_1(\mathbf{X}_c) -\bar{\mathbf{N}}_2(\mathbf{X}_c) \dots -\bar{\mathbf{N}}_{nn}(\mathbf{X}_c) \mathbf{I}] \quad (4.15)$$

$$-\bar{\mathbf{N}}_i = \bar{N}_i \mathbf{I};$$

- $\mathbf{I}$ = matriz identidade (de ordem 2 ou 3, respectivamente para problemas 2D e 3D).

Em relação ao armazenamento dos componentes de deslocamento do EFA, este é realizado da seguinte maneira:

$$\mathbf{D}_e = \{\mathbf{D}_1 \ \mathbf{D}_2 \ \dots \ \mathbf{D}_{nn+1}\} \quad (4.16)$$

Sendo o vetor de força interna do EFA definido como:

$$\mathbf{F}_e^{int} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{F}(\llbracket \mathbf{U} \rrbracket) \quad (4.17)$$

onde $\mathbf{F}(\llbracket \mathbf{U} \rrbracket)$ corresponde à força de reação em função do deslocamento relativo $\llbracket \mathbf{U} \rrbracket$.

Portanto, a matriz de rigidez tangente do EFA pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{K}_e = \frac{\partial \mathbf{F}_e^{int}}{\partial \mathbf{D}_e} = \mathbf{B}_e^T \mathbf{C}_{tg} \mathbf{B}_e \quad (4.18)$$

em que $\mathbf{C}_{tg} = \partial \mathbf{F}(\llbracket \mathbf{U} \rrbracket) / \partial \llbracket \mathbf{U} \rrbracket$ corresponde ao operador tangente da relação constitutiva entre a força de reação e o deslocamento relativo.

No acoplamento da armadura com a matriz cimentícia foi aplicado o conceito de malhas sobrepostas, ou seja, aconteceu o acoplamento de elementos de reforço linear (barras de aço) na malha de concreto. Para este caso, foi considerado o acoplamento como rígido (total compatibilidade de deslocamentos) em relação ao comportamento aderência-deslizamento existente entre o concreto e a barra de aço, descrevendo assim um sistema de aderência perfeita. Para este caso, a compatibilidade de deslocamento é regida pela relação elástica linear entre a força de reação e o deslocamento relativo, conforme demonstrado pela Equação 4.19, ressaltando que um alto valor de rigidez elástica deve ser adotado para o valor de $\tilde{C}$ na matriz de constantes elásticas, $\mathbf{C}$ (Equação 4.20):

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} \llbracket \mathbf{U} \rrbracket = \mathbf{C} \mathbf{B}_e \mathbf{D}_e \quad (4.19)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C} & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{C} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{C} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$\tilde{C}$ consiste em um parâmetro de penalidade no deslocamento relativo e a força de interação $\mathbf{F}$ na Equação 4.19 é limitada. Desta forma, altos valores de constantes elásticas

acarretam em componentes de deslocamento relativo $\llbracket \mathbf{U} \rrbracket$ próximas a zero (BITENCOURT et al., 2018). A variação de $\tilde{C} \cong 10^6$ a $\tilde{C} \cong 10^9$ (N/mm) é recomendada por Bitencourt et al. (2015) para o acoplamento rígido, por isso nesta metodologia foi adotado o valor de $\tilde{C} = 10^7$ N/mm.

Já na representação do comportamento de aderência-deslizamento entre as fibras de aço e o concreto foi considerado um acoplamento não rígido para os elementos finitos que acoplaram estes dois materiais, ou seja, é admitido deslocamento relativo entre as diferentes malhas, enquanto ocorre o processo de carregamento. As fibras utilizadas como base de parâmetros foram as do experimento de Xiao et al. (2019), as quais eram do tipo arame com ancoragens nas extremidades, entretanto, deve-se destacar que na modelagem elas foram representadas como fibras retas, distribuídas com posição e orientação aleatórias, de maneira não uniforme, porém sem violar as condições de contorno impostas nas lajes.

O efeito da ancoragem foi contabilizado ao longo do comprimento da fibra, através do modelo de aderência-deslizamento adotado, que no caso deste trabalho foi o proposto pelo CEB *fib* Model Code 2010 (2013) para armadura convencional, a partir de resultados de ensaios de arrancamento. Desta forma, o comportamento de aderência-deslizamento entre o concreto e as fibras de aço foi representado pela relação entre a tensão local de cisalhamento (τ) que age na interface reforço-matriz e o deslocamento relativo (s) entre reforço e matriz (Figura 4.5).

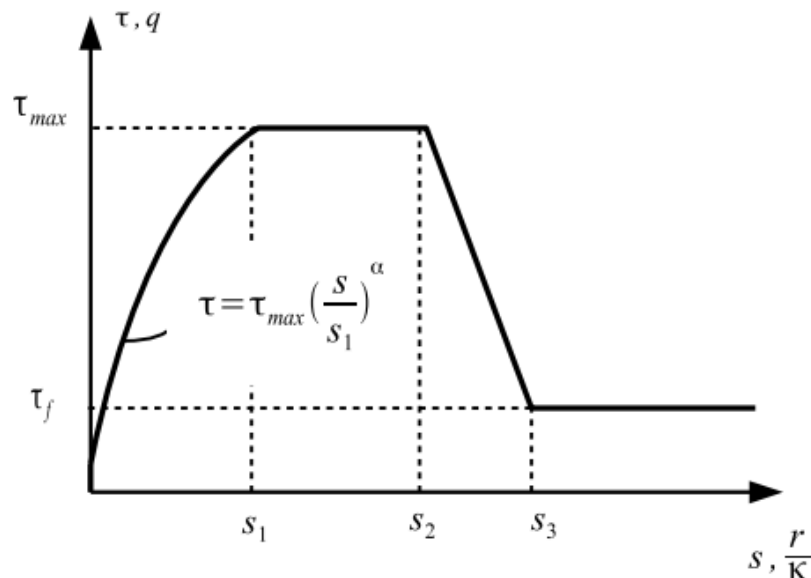


Figura 4.5 Curva característica do modelo de aderência do CEB *fib* Model Code 2010 (CEB FIB MODEL CODE 2010, 2013).

Analisando a Figura 4.5, percebe-se que entre 0 e s_1 , a tensão aumenta exponencialmente com ordem α até alcançar τ_{max} (tensão de cisalhamento máxima), permanecendo neste valor

para os deslocamentos entre s_1 e s_2 . Entre s_2 e s_3 ocorre uma perda contínua de aderência, até o momento em que s supera s_3 e passa a ter τ_f como tensão de cisalhamento residual.

Como a modelagem deste trabalho adotou o comportamento de aderência-deslizamento proposto pelo CEB *fib* Model Code 2010 (2013), as Equações 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 foram as utilizadas para descrever os trechos da curva do modelo de perda de aderência:

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha & \text{se } s \leq s_1 \\ \tau_{max} & \text{se } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_{max} - \frac{(\tau_{max} - \tau_f)(s - s_2)}{(s_3 - s_2)} & \text{se } s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_f & \text{se } s > s_3 \end{cases} \quad \begin{matrix} (4.21) \\ (4.22) \\ (4.23) \\ (4.24) \end{matrix}$$

Em que α , τ_{max} , τ_f e s_i ($i = 1, 2, 3$) correspondem a parâmetros relacionados à resistência do concreto (f_{ck}), geometria da barra (nervurada ou lisa), situação de confinamento (confinado ou não confinado) e condição de aderência (boa ou ruim), conforme CEB *fib* Model Code 2010 (2013).

Relevante ressaltar também que os modelos de dano (concreto) e constitutivos (barras e fibras de aço), além dos diferentes tipos de interação entre as malhas não conformes aplicados nas modelagens foram integrados por meio de um esquema de integração implícito-explícito chamado Impl-Ex, que possibilita a resolução do problema em apenas uma iteração. (OLIVER; HUESPE; CANTE, 2008).

4.3 Terceira fase: Pós-processamento

Por meio do arquivo de saída do MATLAB®, pode-se ver a deformação ocorrida nas lajes na interface de pós-processamento do GiD® e assim realizar a análise das fraturas resultantes.

4.4 Parâmetros

Os parâmetros fundamentais necessários para a modelagem do concreto são: módulo de elasticidade (E), resistência média à compressão (f_{cm}), resistência média à tração ($f_{ct,m}$) e energia de fratura (G_F). Os módulos de elasticidade (E) foram fornecidos pelos artigos dos autores de quem as modelagens realizadas nesta pesquisa se basearam.

A determinação da resistência média à tração ($f_{ct,m}$) foi obtida por duas maneiras diferentes, de acordo com a ABNT NBR 6118 (2014):

- Para as simulações em que o valor da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) não era fornecido nas informações dos ensaios experimentais, o valor da resistência média à tração ($f_{ct,m}$) foi estimado por:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}} \text{ (Concretos de classes até C50)} \quad (4.25)$$

com f_{ck} representando a resistência característica à compressão do concreto.

- Para as simulações em que o valor da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) era fornecido pelos resultados experimentais, o valor da resistência à tração direta (f_{ct}) foi obtido por:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (4.26)$$

- Para a energia de fratura (G_F), nos casos em que seu valor não estava presente nas referências experimentais, foi realizado a seguinte estimativa, segundo CEB-FIP Model Code 1990 (1993):

$$G_F = G_{F0} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,7} \quad (4.27)$$

sendo f_{cm} , a resistência média à compressão e G_{F0} , uma constante, cujo valor se altera de acordo com o diâmetro máximo (d_{max}) dos agregados, conforme Tabela 4-1:

Tabela 4-1. Valores básicos da energia de fratura G_{F0} (Nmm/mm²).

d_{max} (mm)	G_{F0} (Nmm/mm ²)
8	0,025
16	0,030
32	0,058

Fonte: CEB-FIP Model Code 1990 (1993).

5 RESULTADOS

5.1 Descrição da modelagem referente ao estudo do comportamento mecânico de lajes de concreto de pavimento rígido constituídas por agregado reciclado e fibras de aço

Brand, Amirkhanian e Roesler (2013, 2014) estudaram o efeito de agregados reciclados na capacidade de carga máxima de flexão de 16 lajes de concreto de pavimento rígido. Havia dois tipos de lajes: as com uma camada de concreto e as com duas camadas, sendo as misturas de concreto do tipo: 45% de agregado graúdo de pavimento asfáltico recuperado fracionado (PARF); 45% de agregado PARF com macrofibras sintéticas de polipropileno/polietileno; 100% de ARC graúdo; mistura de 45-55% de PARF – ARC, respectivamente, e 100% agregado natural (concreto de controle); além disso foi utilizada uma mistura ternária de materiais cimentícios, que consistia em peso de 55% de cimento Portland Tipo 1, 35% de escória de alto-forno moída Grau 100 e 10% de cinza volante Classe C; para cada tipo de mistura foram construídas 2 lajes de pavimento. A técnica de aplicação de pavimentos com duas camadas tem o seguinte propósito: a camada inferior é mais espessa do que a camada superior e tem como função oferecer resistência à flexão da laje composta; já a camada superior constituída normalmente com materiais de alta qualidade, tem como finalidade aprimorar características da superfície como ruído, atrito ou qualidade de condução.

As lajes de pavimento mediam 1800 mm por 1800 mm com 150 mm de espessura, conforme a Figura 5.1. Oito lajes possuíam uma única camada de concreto e as outras oito, duas camadas, com os 100 mm inferiores da laje sendo de CAR e os 50 mm superiores de concreto natural típico. O suporte da fundação das lajes de concreto para a realização dos testes era uma caixa de contenção de solo constituída por uma camada granular permeável de 50 mm coberta com um geotêxtil, dispondo sobre ele agregados miúdos compactados, provindos da britagem de concreto, em uma camada de 200 mm nivelada antes de cada ensaio. As lajes foram posicionadas no leito do solo de maneira a permitir o carregamento de sua borda média pelo atuador, sendo testadas monotonicamente em relação à falha por flexão. A placa de carga possuía 6129 mm² e foi centrada na borda central das lajes, sendo carregadas a uma taxa de deslocamento do atuador de 1 mm por minuto.

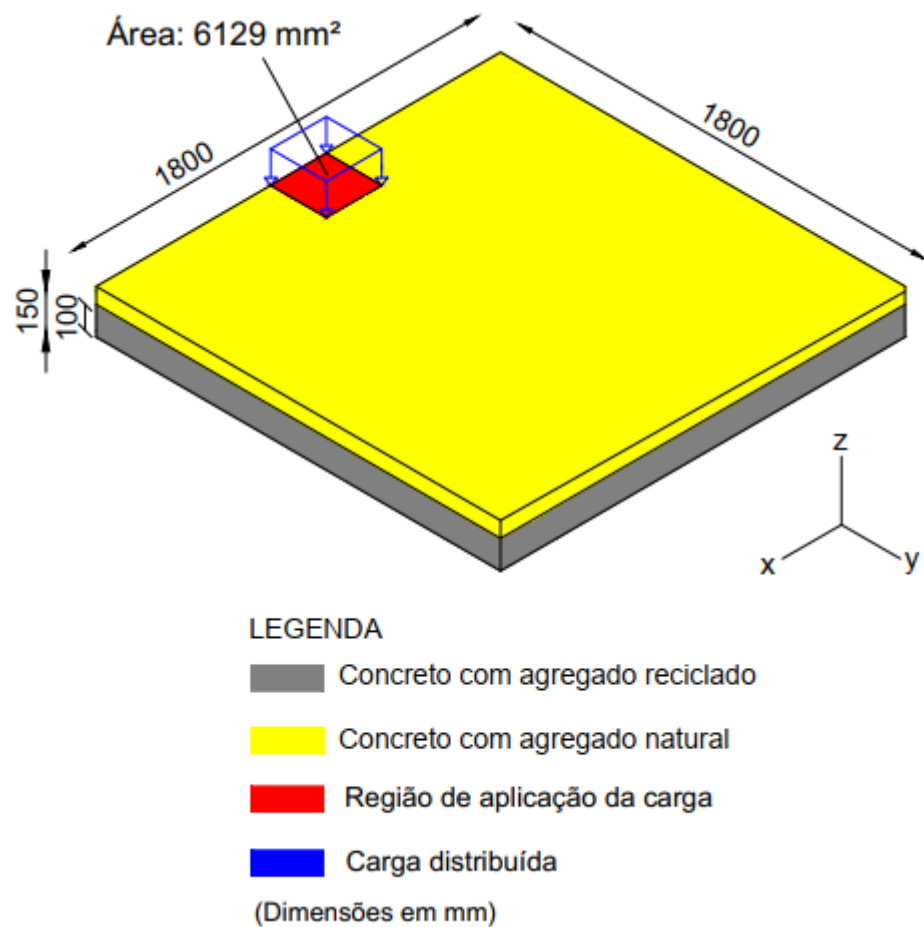


Figura 5.1 Dimensões da laje com duas camadas de concreto diferentes modelada numericamente.

Antes de iniciar o experimento, foi aplicada uma carga de assentamento tipicamente inferior a 10 kN. O teste durou até depois de atingir o pico de carga de flexão, percebido por meio de fissuras de flexão e no momento em que a carga começou a diminuir. A configuração do ensaio pode ser visualizada na Figura 5.2.

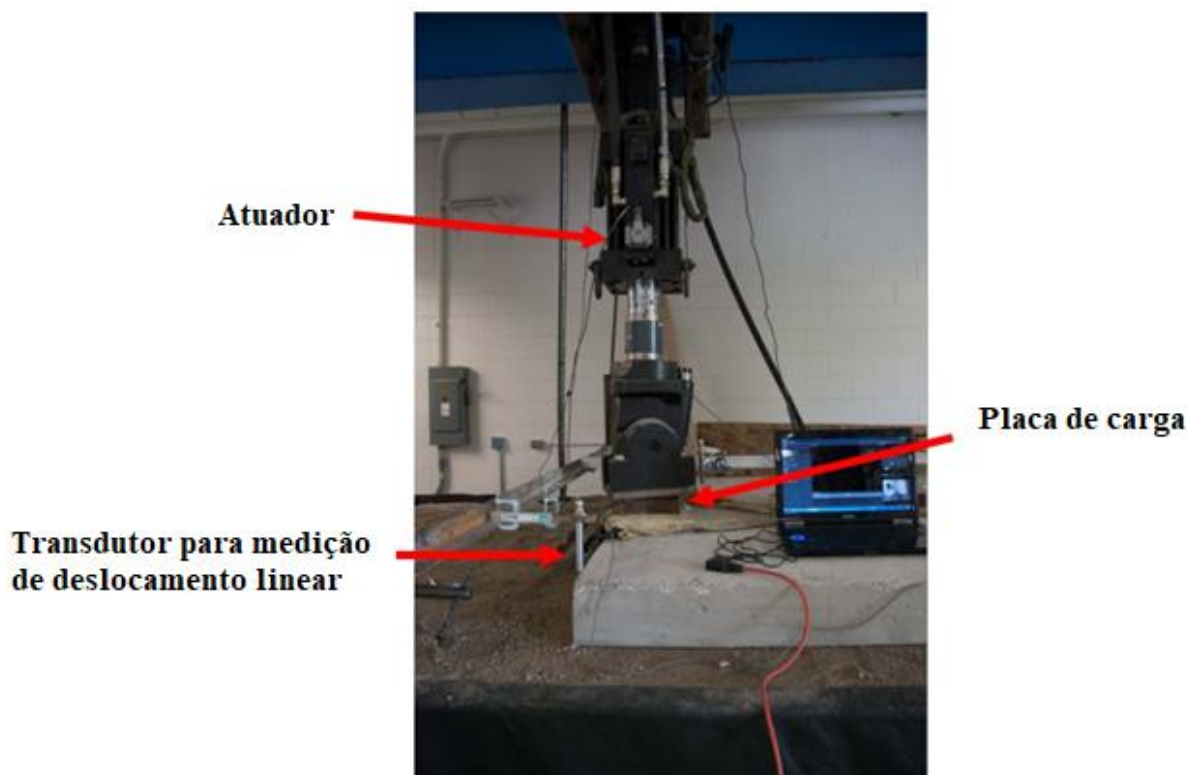


Figura 5.2 Configuração do experimento (Adaptada de BRAND; AMIRKHANIAN; ROESLER, 2013).

A análise numérica baseada nos estudos experimentais de Brand, Amirkhanian e Roesler (2013, 2014) foi realizada para três tipos de lajes de concreto de pavimento rígido: as que continham 100% de agregado natural (concreto de controle) com uma única camada de concreto (“NAT100”); as de duas camadas de concreto, sendo a camada inferior (100 mm) com 100% de ARC e a superior (50 mm) de concreto natural típico (“RCA-NAT”) e as que possuíam 100% de ARC com uma única camada de concreto (“RCA100”).

A modelagem foi realizada considerando a mesma geometria original da laje experimental, aplicando durante as simulações carga de modo incremental com 4000 (para “NAT100” e “RCA100”) e 4700 (para “RCA-NAT”) passos de carregamento (o aumento no número de passos de carregamento aconteceu para que a curva numérica alcançasse o valor de sua carga de pico) e controle do deslocamento no sentido de aplicação da carga de 0,003 mm por passo.

Ressalta-se que o apoio, ilustrado na Figura 5.3, foi modelado como elementos finitos unidimensionais de barra, sendo um suporte elástico contínuo unilateral, desta forma, por ser unilateral, o apoio resiste elasticamente apenas à compressão e, portanto, não oferece resistência ao deslocamento vertical ascendente ocasionado pelas forças de tração.

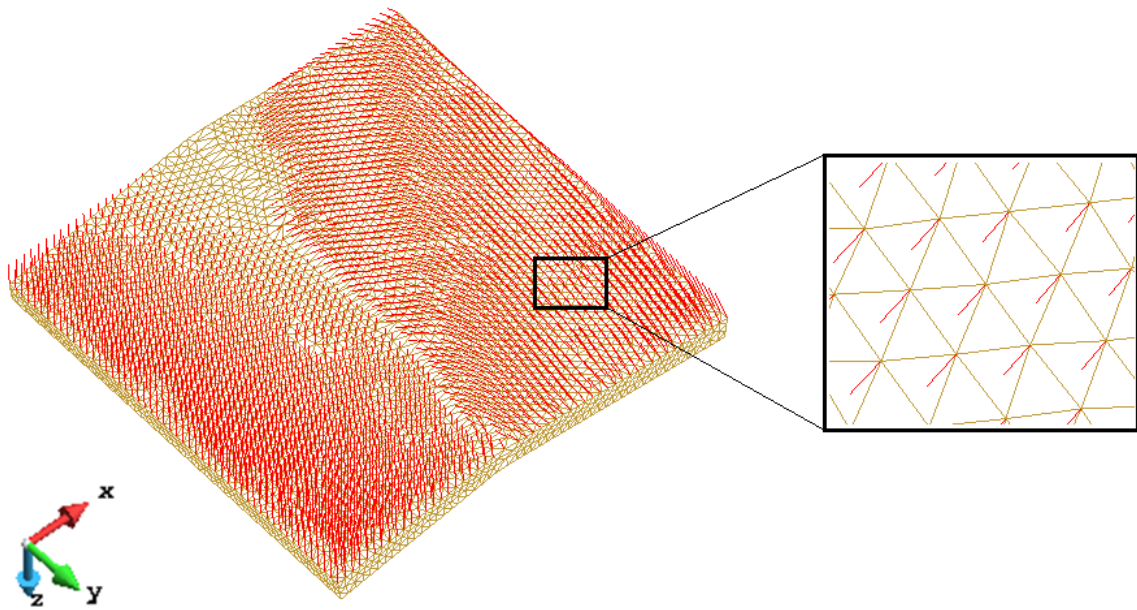


Figura 5.3 Apoio elástico contínuo unilateral das lajes, modelado por elementos finitos lineares.

A rigidez do apoio foi obtida através da multiplicação de sua área de influência pelo módulo de reação do apoio igual a 0,03 MPa/mm, valor ajustado de maneira a garantir adequados trechos iniciais ascendentes das respostas estruturais e assim garantir compatibilidade com os resultados experimentais. A área de influência, por sua vez, consiste na soma de 1/3 de todas as áreas das faces triangulares (constituintes do elemento tetraédrico de concreto), cujo nó em comum representa a localização do elemento de barra do apoio, como ilustrado na Figura 5.4.

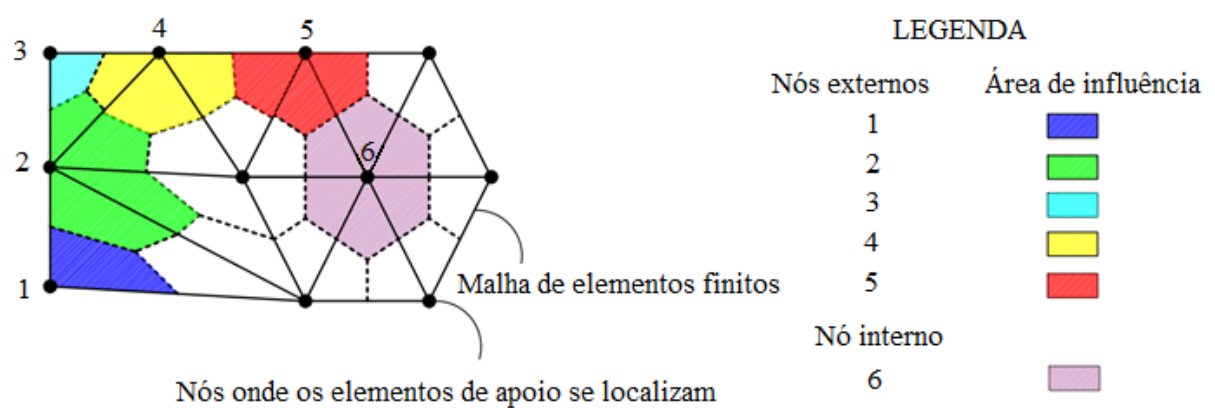
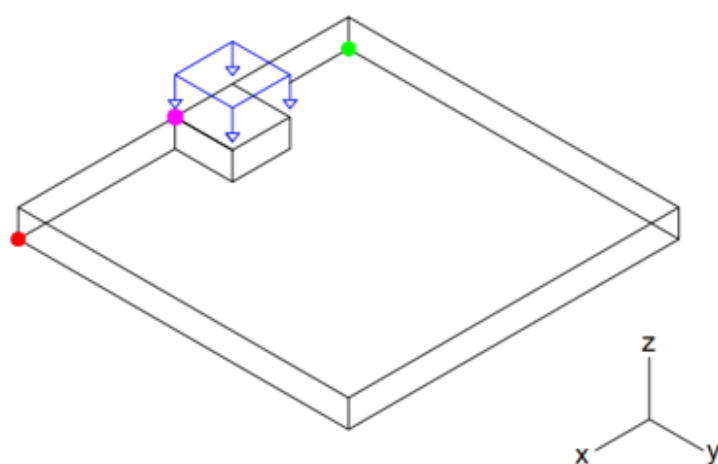


Figura 5.4 Área de influência dos elementos de apoio.

A Figura 5.5 ilustra as condições de contorno utilizadas nesta modelagem.



LEGENDA

- Nó com deslocamento restrito na direção Y
- Nó com deslocamento restrito nas direções X e Y
- Carga distribuída
- Nó com deslocamento controlado

Figura 5.5 Condições de contorno natural e essencial.

De acordo com a Figura 5.5, a condição de contorno essencial é representada pelo nó 22 900 (em vermelho; coordenadas: $x = 1800$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0$ mm) com deslocamento restrito na direção Y e pelo nó 17 697 (em verde; coordenadas: $x = 0$ mm, $y = 0$ mm, $z = 0$ mm) com deslocamento restrito nas direções X e Y, possibilitando assim que a estrutura não rotacione. A carga distribuída (condição de contorno natural), representada em azul, foi ajustada de acordo com a estratégia de controle de deslocamento do nó 20 657 (circulado em rosa; coordenadas: $x = 917,1429$ mm; $y = 0$ mm; $z = 150$ mm) sob a carga, tal que a cada passo de carregamento o referido nó deslocasse verticalmente 0,003 mm.

A Figura 5.6 ilustra a malha de elementos finitos da laje com duas camadas de concreto diferentes, ressaltando que foi considerado aderência perfeita entre as duas camadas, tratando-se de uma malha compatível com nós coincidentes. Vale destacar que todas as lajes foram modeladas com duas camadas, portanto a diferenciação entre elas se dava posteriormente, através da definição dos parâmetros do concreto (convencional ou com agregado reciclado) que constituía cada camada.

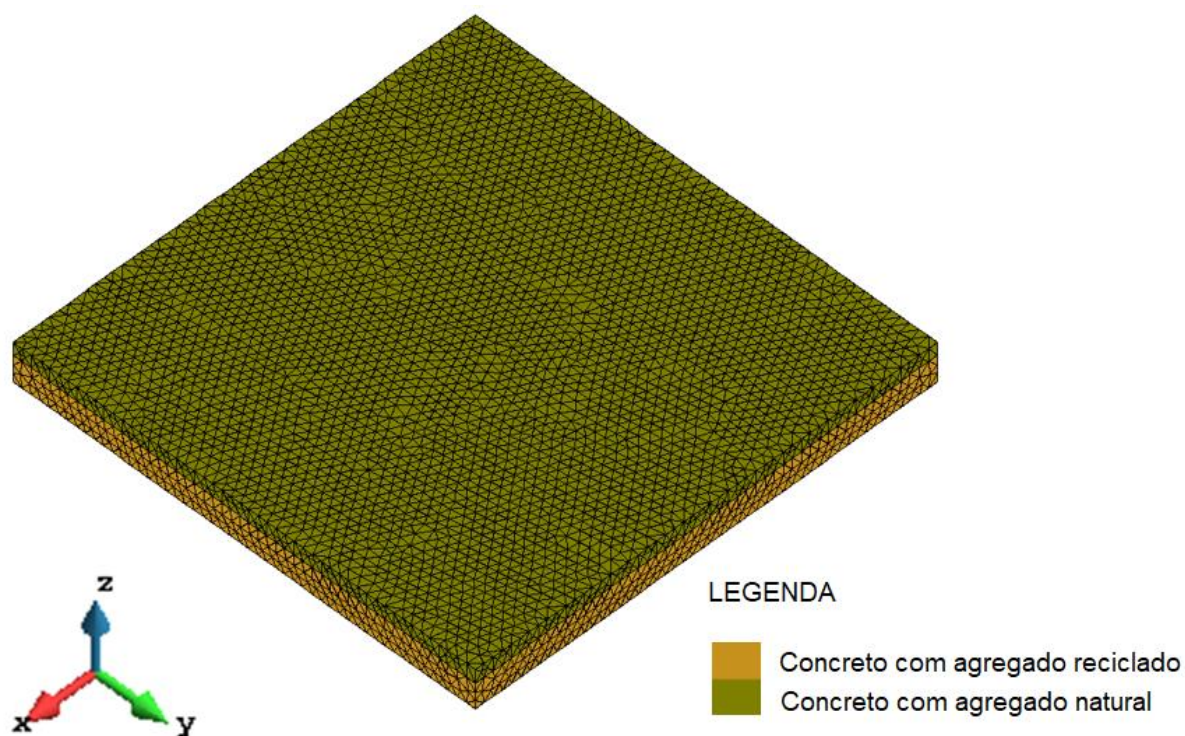


Figura 5.6 Malha de elementos finitos da laje com duas camadas de concreto diferentes.

A Tabela 5-1 apresenta a quantidade de elementos finitos para cada malha presente nas lajes modeladas.

Tabela 5-1. Quantidade de elementos finitos tetraédricos das malhas.

Número de elementos finitos tetraédricos de cada malha		
Amostra	Concreto com agregado natural	Concreto com agregado reciclado
NAT100	114 844	0
RCA-NAT	39 362	75 482
RCA100	0	114 844

Ressalta-se que a altura média dos elementos finitos tetraédricos de concreto era de aproximadamente 35 mm.

Os parâmetros dos concretos utilizados nesta modelagem se encontram na Tabela 5-2.

Tabela 5-2. Parâmetros dos concretos “NAT100” e “RCA100”.

Amostra	Módulo de elasticidade- E (MPa)	Resistência à tração direta- f_{ct} (MPa)	Energia de fratura- G_F (N/mm)	Coefficiente de Poisson
NAT100	$3,86 \cdot 10^4$	3,60	0,0738	0,2
RCA100	$3,11 \cdot 10^4$	3,16	0,0845	0,2

O módulo de elasticidade e a energia de fratura foram disponibilizados pelos resultados experimentais; já a resistência à tração foi calculada pela Equação 4.26, através do valor da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) aos 28 dias, fornecida por meio do ensaio experimental. Para o coeficiente de Poisson, uma vez que não foi informado seu valor no experimento, adotou-se o valor típico de 0,2.

5.1.1 *Discussão dos resultados referentes ao estudo do comportamento mecânico de lajes de concreto de pavimento rígido constituídas por agregado reciclado e fibras de aço*

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes contendo 100% de agregado natural com uma única camada de concreto, “NAT100”, estão representadas na Figura 5.7.

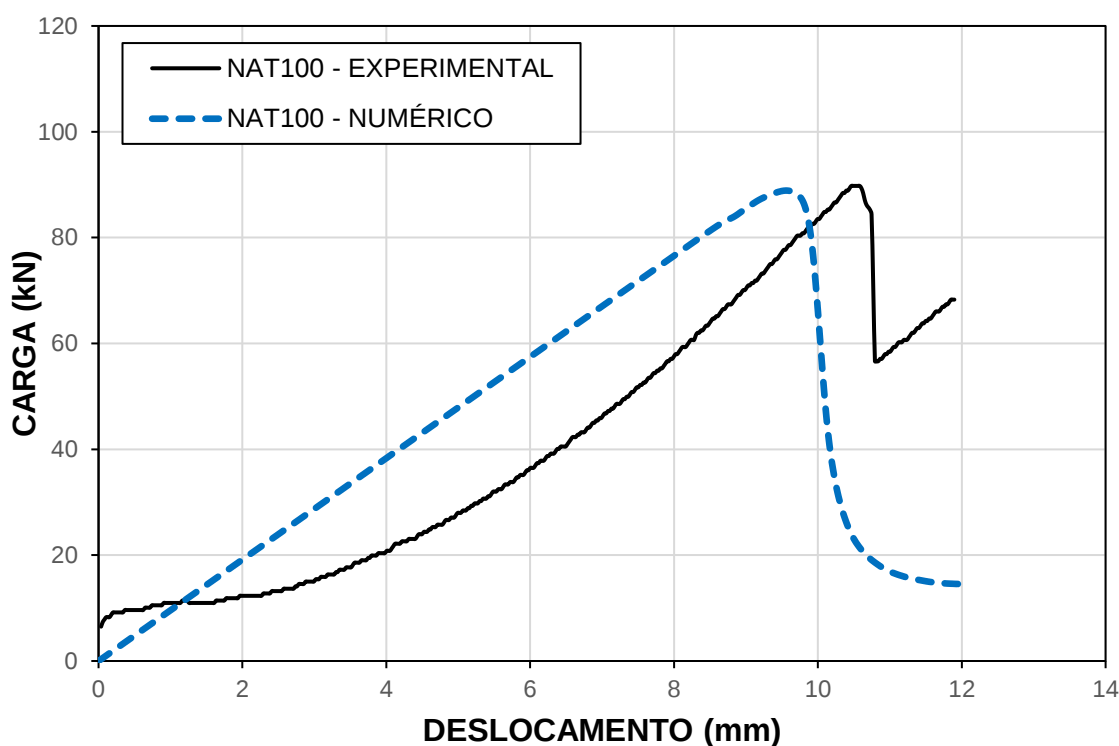


Figura 5.7 Curvas carga x deslocamento das lajes “NAT100”.

A Figura 5.7 evidencia que a modelagem numérica da laje com agregados naturais obteve resultados semelhantes aos experimentais. Para a curva “NAT100 – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 89,50 kN com deslocamento correspondente a 10,52 mm. Para a curva “NAT100 – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 88,89 kN com deslocamento de 9,56 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes contendo duas camadas de concreto, a inferior (100 mm) com 100% de agregado reciclado e a superior (50 mm) de concreto natural típico, “RCA-NAT”, estão representadas na Figura 5.8.

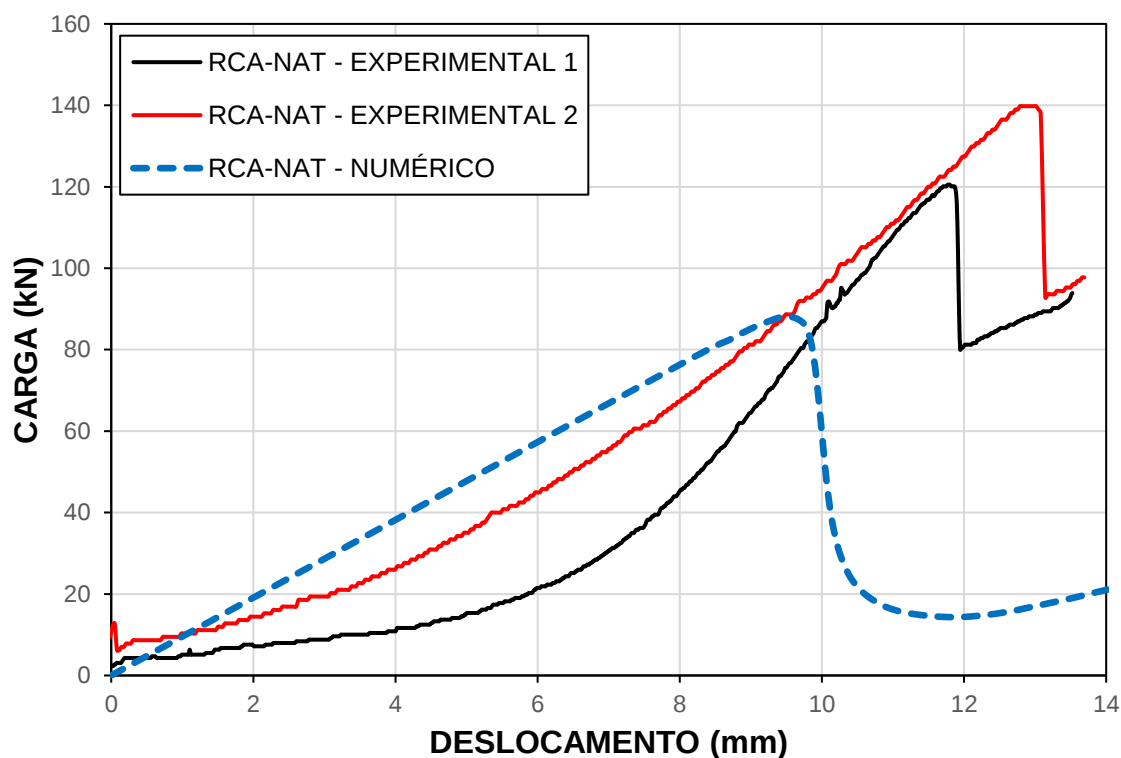


Figura 5.8 Curvas carga x deslocamento das lajes “RCA-NAT”.

Pela análise da Figura 5.8, percebe-se que as curvas experimentais e numérica não alcançaram o mesmo valor de carregamento máximo. Para a curva “RCA-NAT – EXPERIMENTAL 1”, o valor da carga máxima foi de 121,60 kN com deslocamento correspondente a 11,78 mm. Em relação à curva “RCA-NAT – EXPERIMENTAL 2”, o valor da carga máxima foi de 137,30 kN e o deslocamento correspondente a 12,90 mm. Já para a curva “RCA-NAT – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 88,17 kN com deslocamento de 9,50 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes contendo 100% de agregado reciclado com uma única camada de concreto, “RCA100”, estão representadas na Figura 5.9.

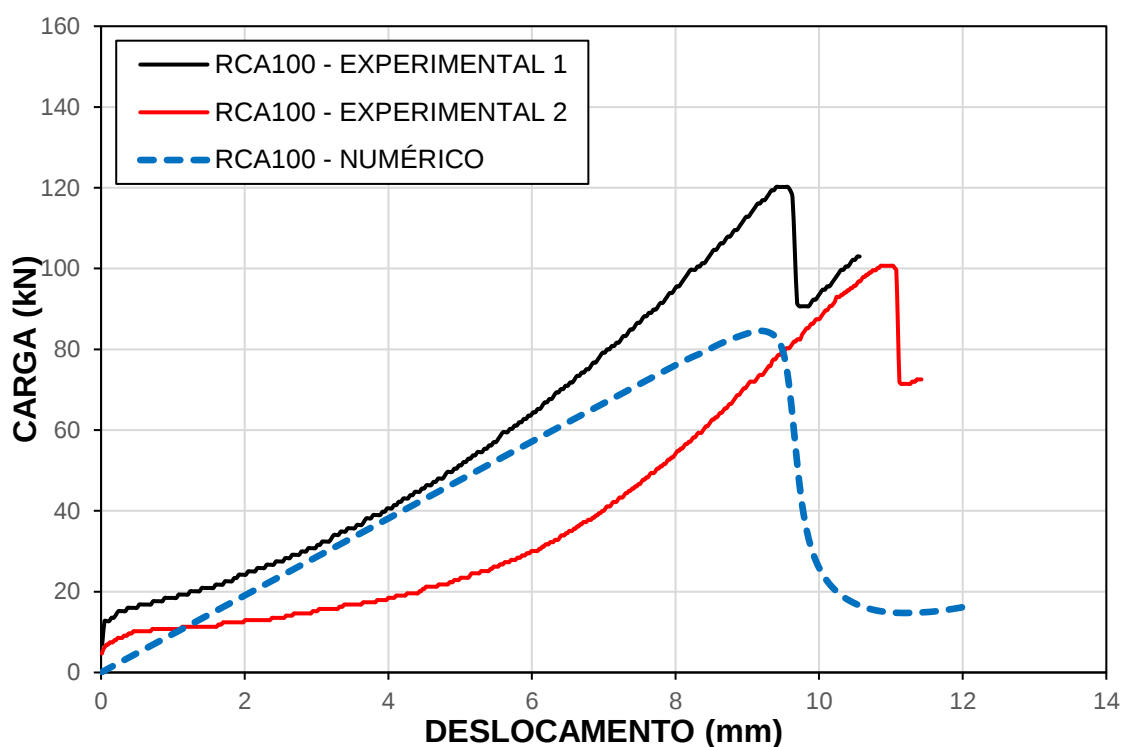


Figura 5.9 Curvas carga x deslocamento das lajes “RCA100”.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 5.9, percebe-se que a carga de pico da modelagem numérica ficou mais próxima da obtida pela laje EXPERIMENTAL 2. Para a curva “RCA100 – EXPERIMENTAL 1”, o valor da carga máxima foi de 119,20 kN com deslocamento correspondente a 9,48 mm. Em relação à curva “RCA100 – EXPERIMENTAL 2”, o valor da carga máxima foi de 99,60 kN e o deslocamento correspondente a 10,94 mm. Já para a curva “RCA100 – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 84,58 kN com deslocamento de 9,19 mm.

A Figura 5.10 ilustra uma comparação entre as curvas numéricas e experimentais das lajes “NAT100”, “RCA-NAT” e “RCA100”, enquanto a Tabela 5-3 apresenta um comparativo entre os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

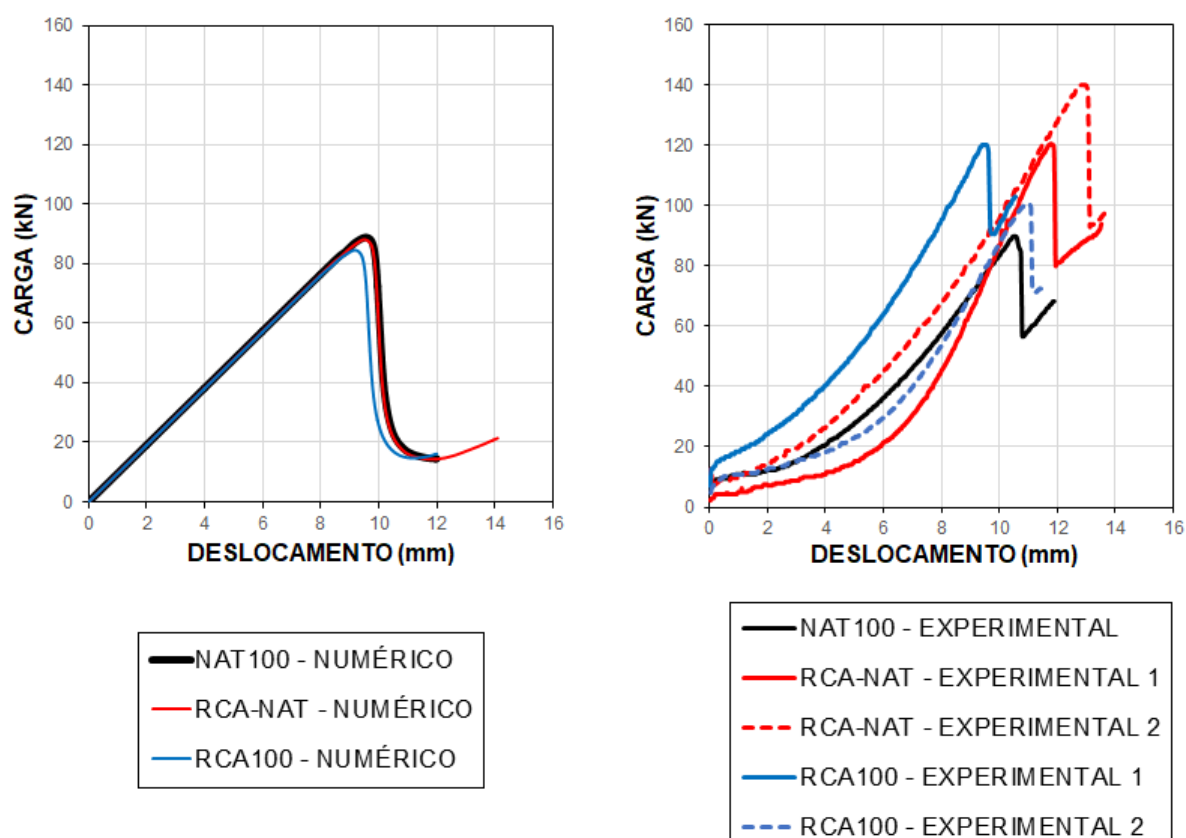


Figura 5.10 Curvas carga x deslocamento das lajes “NAT100”, “RCA-NAT” e “RCA100”.

Tabela 5-3. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “NAT100”, “RCA-NAT” e “RCA100”.

Amostra	Deslocamento (mm) - NUMÉRICO	Deslocamento (mm) - EXPERIMENTAL 1-2	Carga de pico (kN) - NUMÉRICA	Carga de pico (kN) – EXPERIMENTAL 1-2
NAT100	9,56	10,52	88,89	89,50
RCA-NAT	9,50	11,78 - 12,90	88,17	121,60 - 137,30
RCA100	9,19	9,48 - 10,94	84,58	119,20 - 99,60

Os resultados apresentados na Figura 5.10 e Tabela 5-3 indicam que as lajes com uma e duas camadas de CAR tiveram cargas de pico maiores do que em relação à laje com uma camada de concreto com agregado natural. Esses resultados foram contraintuitivos, pois com os dados apresentados na Tabela 5-2, de módulo de elasticidade (E) e resistência à tração direta (f_{ct}), esperava-se uma menor capacidade de flexão da laje com agregados reciclados, porém como a energia de fratura do CAR foi maior que a do concreto com agregado natural, concluiu-se que as propriedades de fratura, não as propriedades de resistência, controlaram a falha das lajes, justificando assim as maiores cargas de pico para as lajes com agregado reciclado.

No caso deste estudo, os autores do experimento justificam que a maior energia de fratura do CAR pode ser devido à fonte e qualidade do agregado reciclado e/ou ao uso de materiais cimentícios suplementares. Outra possível explicação seria a de que concretos com fraca ligação agregado-pasta podem resultar em energia de fratura semelhante ou maior que a do concreto com agregado natural, baseado na possibilidade de que a ligação fraca força as fissuras de falha a se propagarem ao redor dos agregados, através da ZTI fraca, contribuindo assim com o aumento da energia total dissipada, por meio da criação de mais área de superfície de fratura.

Em relação aos resultados numéricos, eles sugerem que a utilização de agregados reciclados apresenta o mesmo efeito dos agregados naturais, entretanto é preciso destacar que como observado pela Tabela 5-2, existe uma diminuição da resistência à tração direta e um aumento da energia de fratura ao substituir agregados convencionais por reciclados, ocorrendo desta forma uma compensação, responsável por fazer a laje com CAR apresentar cargas de pico parecidas com a da laje de agregado natural.

A Figura 5.11 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 5 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “NAT100 – NUMÉRICO”, “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”, ilustrando a Figura 5.12, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

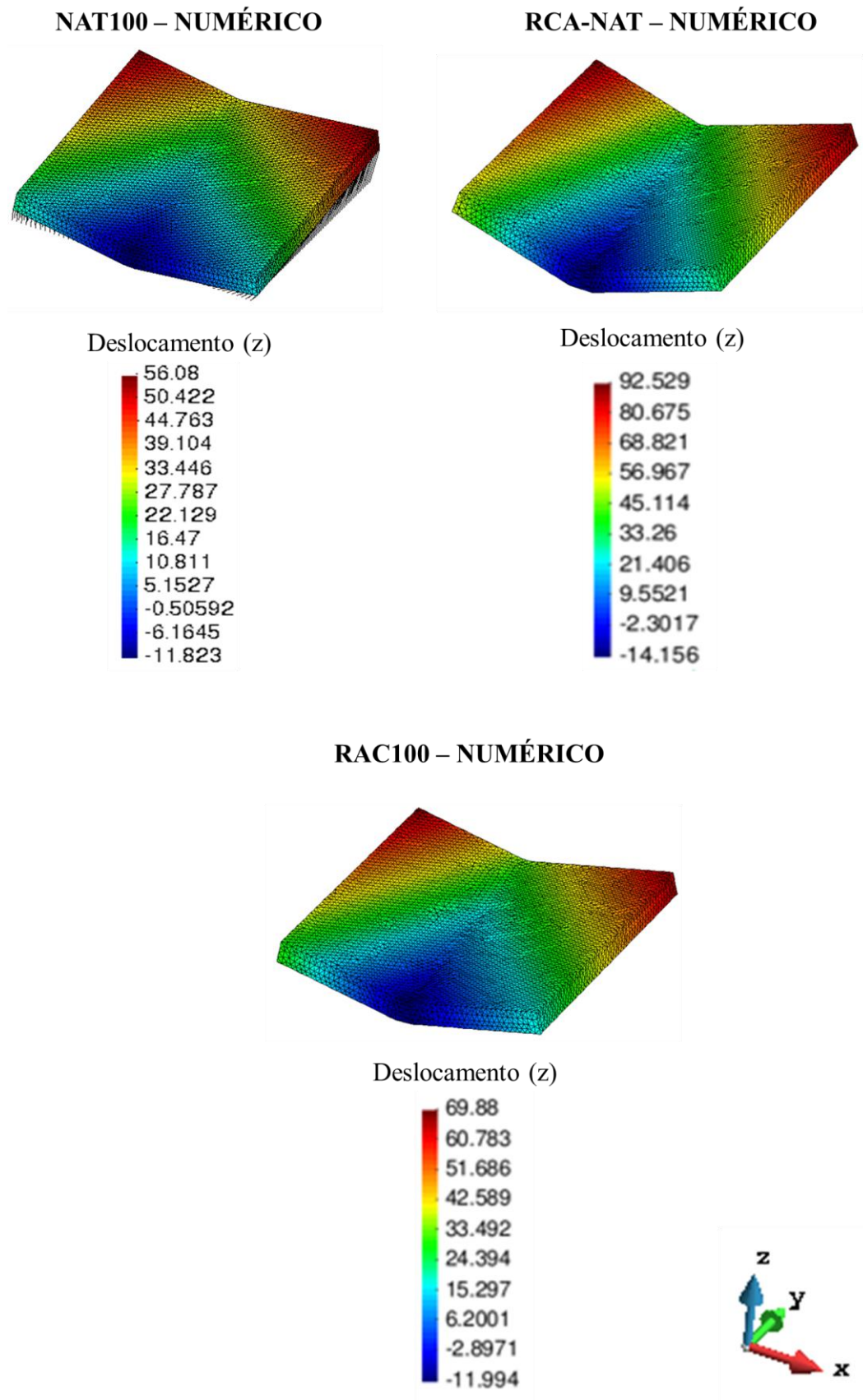


Figura 5.11 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “NAT100 – NUMÉRICO”, “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

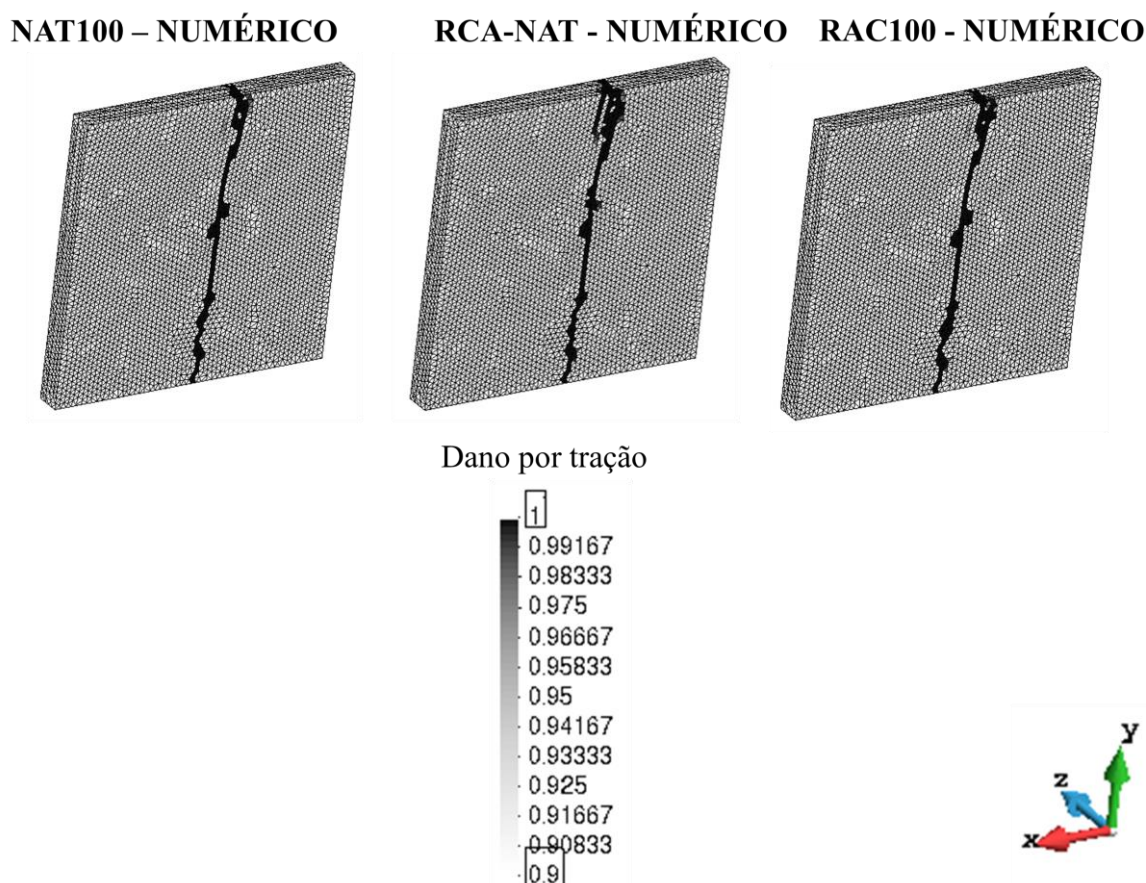


Figura 5.12 Distribuições de dano por tração das lajes “NAT100 – NUMÉRICO”, “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

Pela análise das figuras conclui-se que as lajes falharam pelo mecanismo de flexão, como indicado pelas fissuras propagadas ao longo do meio da laje. É possível observar ainda, os altos valores de deslocamento vertical ascendente ocasionado pelas forças de tração, em função do apoio elástico contínuo unilateral (representado pelos elementos finitos unidimensionais de barra plotados na Figura 5.11, laje “NAT100 – NUMÉRICO”), e que a presença de agregados reciclados na estrutura contribui para aumentar a concentração de deformação na região de fratura (Figura 5.11, lajes “RCA-NAT – NUMÉRICO” e “RCA100 – NUMÉRICO”).

A configuração de ruptura das lajes experimentais pode ser visualizada na Figura 5.13.

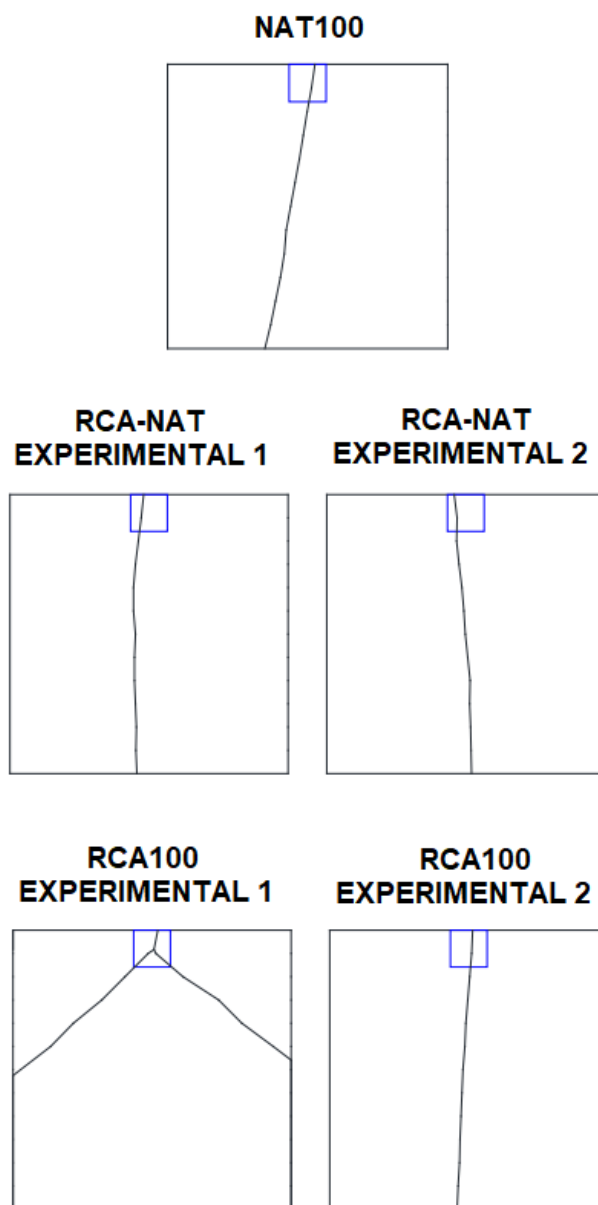


Figura 5.13 Configuração de ruptura das lajes experimentais (Adaptada de BRAND; AMIRKHANIAN; ROESLER, 2013).

Por meio das imagens é possível perceber que a maioria das fissuras se propagaram ao longo do meio da laje (fissuras de flexão), com exceção da laje “RCA100 – EXPERIMENTAL 1”, em que a propagação ocorreu nos lados adjacentes da laje e não na borda paralela oposta ao atuador. Os autores justificam que este comportamento ocorreu possivelmente em função da compactação excessiva do solo próximo ao atuador devido à alta pressão, por isso, após cada quarto teste de laje, o solo era escavado perto da área carregada e compactado novamente.

5.1.2 Adição de fibras de aço nas lajes com CAR

Este tópico dos resultados tem como objetivo demonstrar o efeito provocado na capacidade de carga máxima de flexão das lajes com CAR modeladas no item “5.1”, através da inserção de fibras de aço no concreto. Para isso, como já explicado anteriormente, as fibras utilizadas como base de parâmetros foram as do experimento de Xiao et al. (2019), que eram do tipo arame com ancoragens nas extremidades, porém foram modeladas como fibras retas, com comprimento médio de 50 mm e diâmetro de 0,9 mm, nas proporções volumétricas de 0,5% e 1,0%. Importante ressaltar que as fibras foram colocadas apenas no concreto que possuía agregado reciclado e dispostas com posição e orientação aleatórias, de maneira não uniforme, na região onde esperava-se a ruptura, ou seja, no meio da laje, em 1/3 do volume do CAR, sem violar as condições de contorno e sendo acopladas na malha de concreto por meio dos EFAs.

Desta forma, as lajes modeladas foram as de duas camadas de concreto, sendo a camada inferior (100 mm) com 100% de agregado reciclado e a superior (50 mm) de concreto natural típico com 0,5% e 1,0% de fibras de aço (“RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, respectivamente) e as com uma única camada de concreto que possuíam 100% de agregado reciclado com 0,5% e 1,0% de fibras (“RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, respectivamente).

As Figuras 5.14 e 5.15 ilustram as malhas de elementos finitos das fibras de aço e de seus EFAs criadas nesta modelagem.

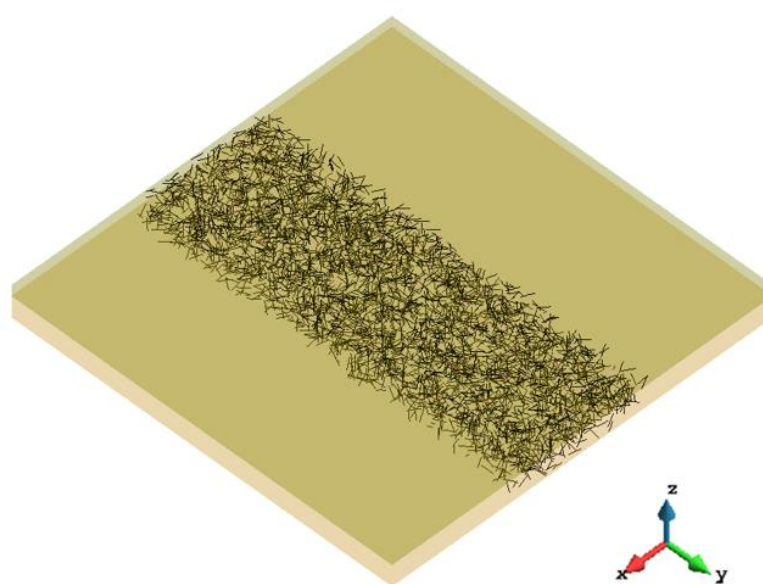


Figura 5.14 Malha de elementos finitos das fibras de aço.

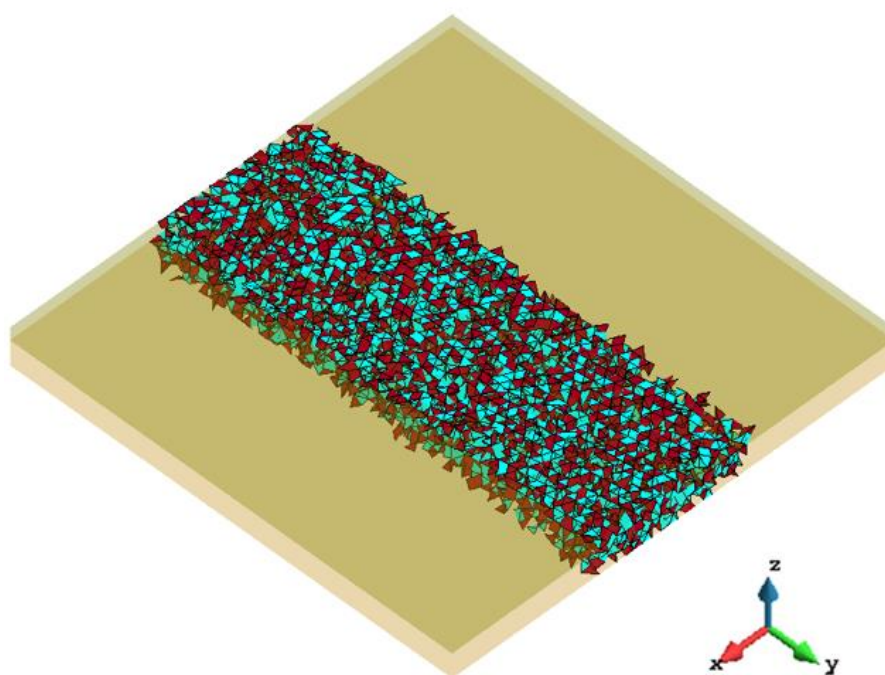


Figura 5.15 Malha dos EFAs das fibras de aço no concreto.

A Tabela 5-4 apresenta a quantidade de elementos finitos para cada malha das lajes modeladas.

Tabela 5-4. Quantidade de elementos finitos das malhas.

Número de elementos finitos de cada malha				
Amostra	Concreto com agregado natural (elementos tetraédricos)	Concreto com agregado reciclado (elementos tetraédricos)	Fibras de aço (elementos lineares)	Elementos finitos de acoplamento (elementos tetraédricos)
RCA-NAT – 0,5% RCA-NAT – 1,0%	39 362	75 482	9 000	12 000
RCA100 – 0,5% RCA100 – 1,0%	0	114 844	13 500	18 000

Ressalta-se que cada fibra de aço possuía comprimento médio de 50 mm, sendo discretizada em 3 elementos finitos de 2 nós, como ilustrado na Figura 5.16, portanto haviam 3000 e 4500 fibras modeladas, para as lajes “RCA-NAT” e “RCA100”, respectivamente. O mesmo número de fibras para diferentes teores pode ser explicado pelo fato de ter sido utilizada a mesma malha de elementos finitos para os dois casos, alterando-se apenas os valores da área e perímetro da fibra corresponde a cada teor nos parâmetros do modelo numérico. Em relação ao EFA tetraédrico, sua altura correspondia à aproximadamente 55 mm.

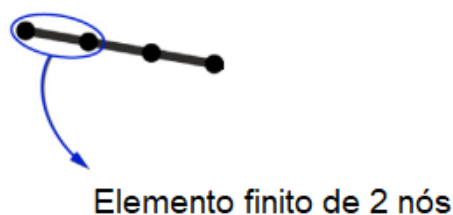


Figura 5.16 Discretização da fibra de aço utilizada nas modelagens.

Para realizar esta modelagem, os parâmetros das fibras e os referentes ao seu acoplamento no concreto, listados nas Tabelas 5-5 e 5-6, respectivamente, foram inseridos no mesmo modelo numérico utilizado nas lajes do item “5.1”. Além disso, com o intuito das curvas numéricas alcançarem o valor de sua carga de pico, alterou-se o número de passos de carregamento para 4700; 5700; 6000 e 7000, para as lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO”; “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”; “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, respectivamente.

Tabela 5-5. Parâmetros das fibras de aço.

Módulo de Elasticidade – E (MPa)	Resistência ao escoamento – F_y (MPa)
2.10 ⁵	390

O módulo de elasticidade é relativo à armadura que Xiao et al. (2019) utilizou nas lajes armadas que haviam em seu experimento, assumindo o mesmo valor para as fibras de aço modeladas deste caso. Para a resistência ao escoamento foi adotado o valor de 390 MPa.

Tabela 5-6. Parâmetros referentes ao acoplamento das fibras de aço no concreto.

$\tau_{\max}$ (MPa)	τ_f (MPa)	α	s_1 (mm)	s_2 (mm)
8,50	4,50	0,4	0,01	6,50

Esses valores de parâmetros para o acoplamento das fibras de aço no concreto foram recomendados por Trindade et al. (2020), o que faz com que a curva do comportamento aderência-deslizamento desta modelagem seja a representada pela Figura 5.17.

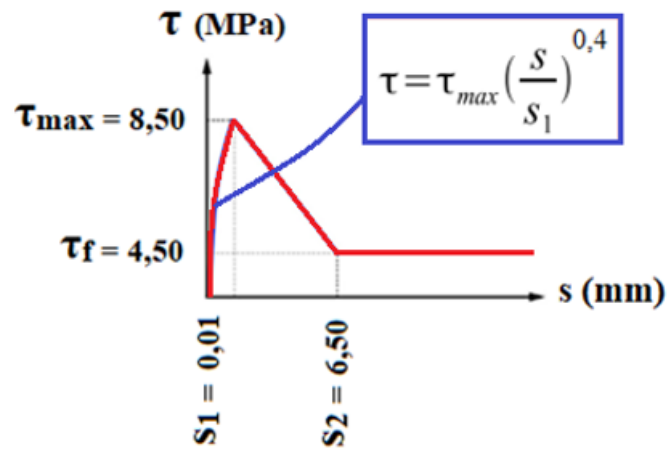


Figura 5.17 Curva do comportamento aderência-deslizamento proposta para a modelagem.

5.1.3 Discussão dos resultados obtidos com a inserção das fibras de aço

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO” estão representadas na Figura 5.18. Como forma de destacar o efeito das fibras na estrutura, a curva “RCA-NAT – NUMÉRICO” também foi plotada.

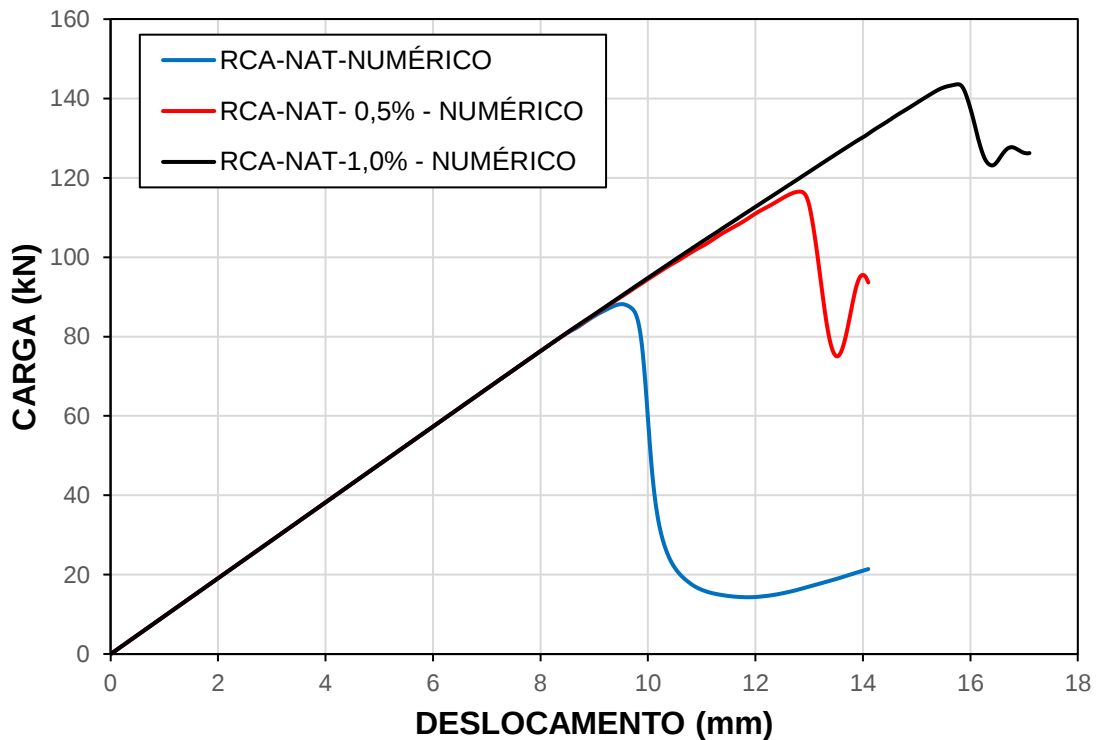


Figura 5.18 Curvas carga x deslocamento referentes às lajes “RCA-NAT – NUMÉRICO”, “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”.

A Tabela 5-7 apresenta um comparativo entre os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

Tabela 5-7. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “RCA-NAT – NUMÉRICO”, “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”.

Amostra	Deslocamento (mm)	Carga de pico (kN)
RCA-NAT – NUMÉRICO	9,50	88,17
RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO	12,82	116,52
RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO	15,77	143,56

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que com o aumento do teor de fibras ocorre uma melhora na carga última de flexão, na dissipação de energia e na ductilidade da estrutura, visto que os deslocamentos antes de chegar na carga máxima de ruptura aumentaram, logo as lajes sofreram deformação plástica relevante antes de falhar.

A Figura 5.19 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 5 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, ilustrando a Figura 5.20, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

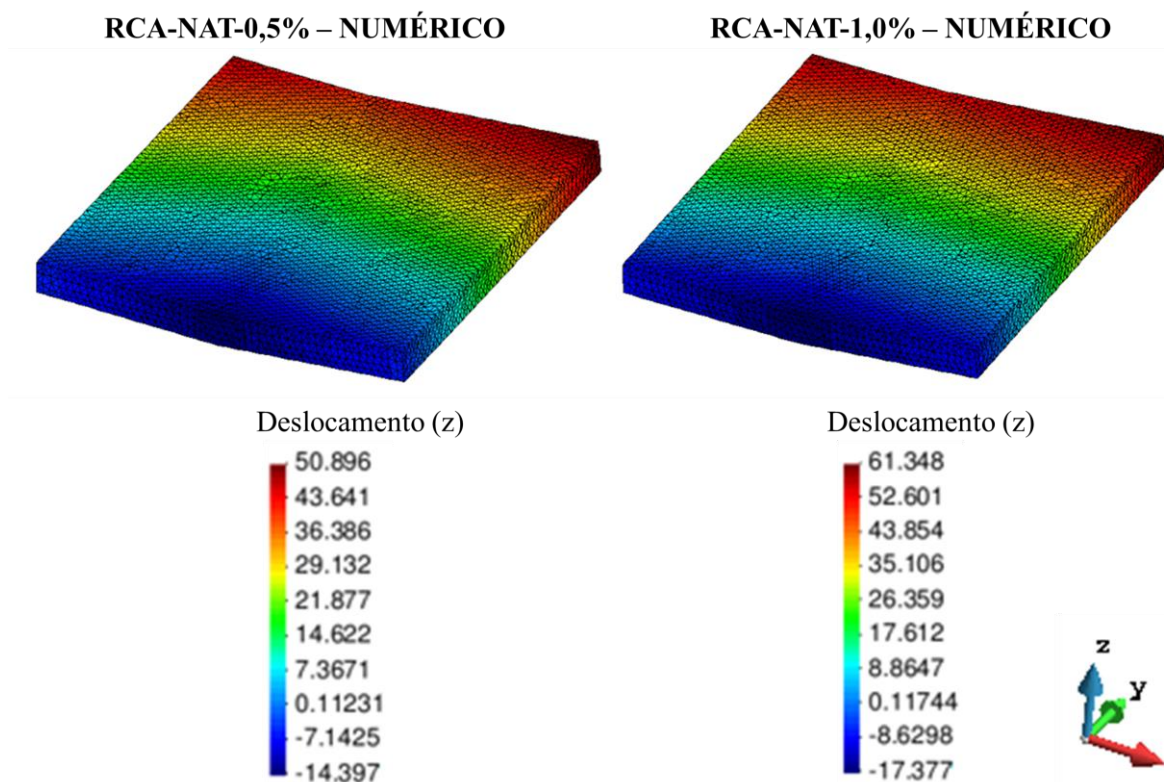


Figura 5.19 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

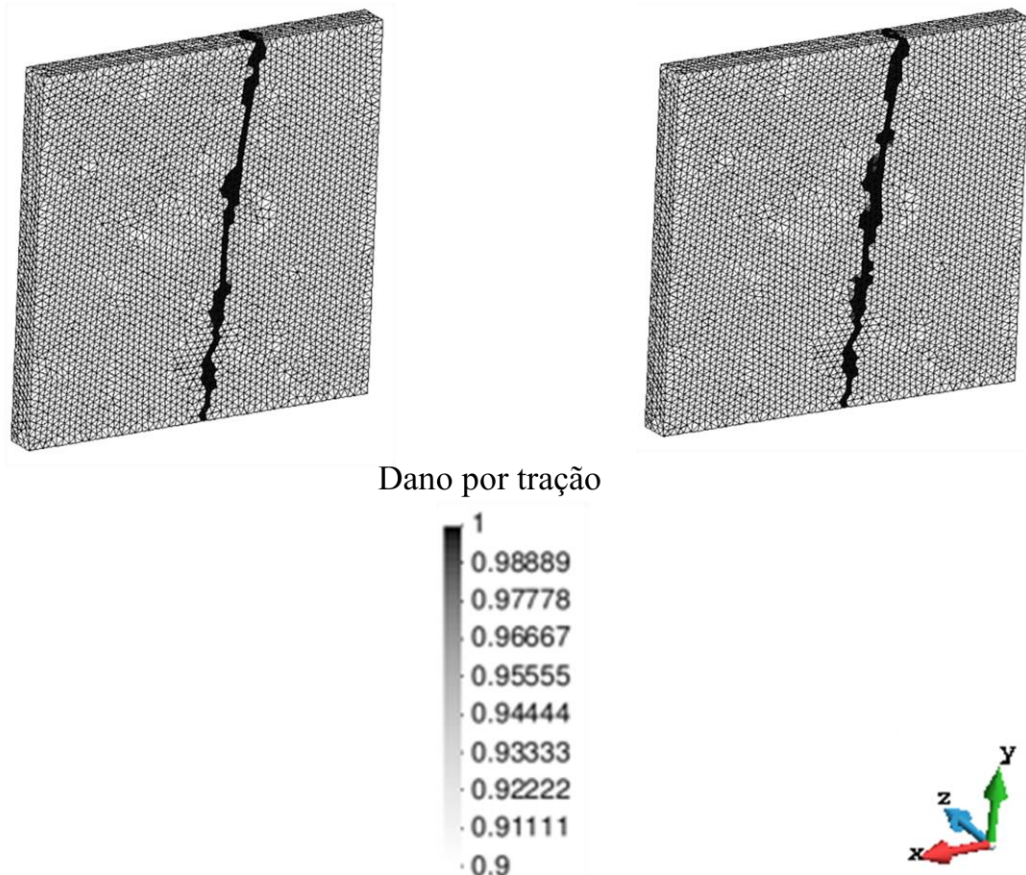
RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO**RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO**

Figura 5.20 Distribuições de dano por tração das lajes “RCA-NAT-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA-NAT-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

É possível concluir que as lajes com fibras também falharam pelo mecanismo de flexão, obtendo da mesma forma que o caso anterior altos valores de deslocamento vertical ascendente, devido ao tipo de apoio, sendo notável também que a adição das fibras de aço provocou considerável diminuição de deformação na região de fratura (Figura 5.19).

Já as curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO” estão representadas na Figura 5.21. Para destacar o efeito das fibras na estrutura, a curva “RCA100 – NUMÉRICO” também foi plotada.

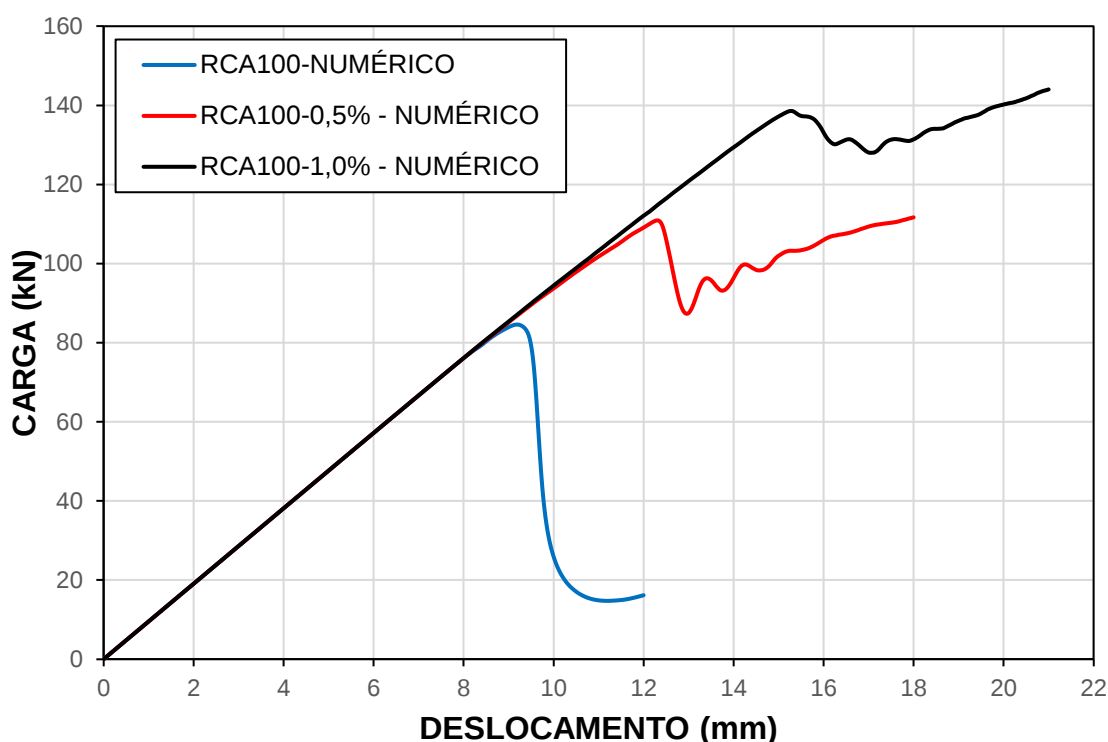


Figura 5.21 Curvas carga x deslocamento referentes às lajes “RCA100 – NUMÉRICO”, “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”.

A Tabela 5-8 apresenta um comparativo entre os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

Tabela 5-8. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes “RCA100 – NUMÉRICO”, “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”.

Amostra	Deslocamento (mm)	Carga de pico (kN)
RCA100 – NUMÉRICO	9,19	84,58
RCA100-0,5% – NUMÉRICO	12,30	110,91
RCA100-1,0% – NUMÉRICO	15,28	138,58

Apesar das lajes serem constituídas 100% por agregados reciclados, percebe-se que a introdução das fibras de aço acarretou o mesmo efeito benéfico visualizado no caso anterior, ou seja, aumento na carga última de flexão, ductilidade e dissipação de energia. Um detalhe perceptível na Figura 5.21 é que após o alcance da primeira carga de pico, a curva carga x deslocamento sofre uma queda e logo em seguida volta a ascender, sugerindo assim a existência de duas cargas máximas. Entretanto, deve-se deixar claro que o segundo pico é devido ao solo, ou seja, o apoio no solo é o responsável por fazer a laje resistir a mais carregamento, mesmo ela já tendo atingido seu primeiro pico de carga (e assim iniciado o processo de formação de fissuras), fato que não aconteceria, por exemplo, se a laje estivesse apoiada pelas suas arestas

em vigas. Este é o motivo pelo qual, a primeira carga de pico atingida ser a considerada para as análises dos resultados.

A Figura 5.22 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 5 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, ilustrando a Figura 5.23, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

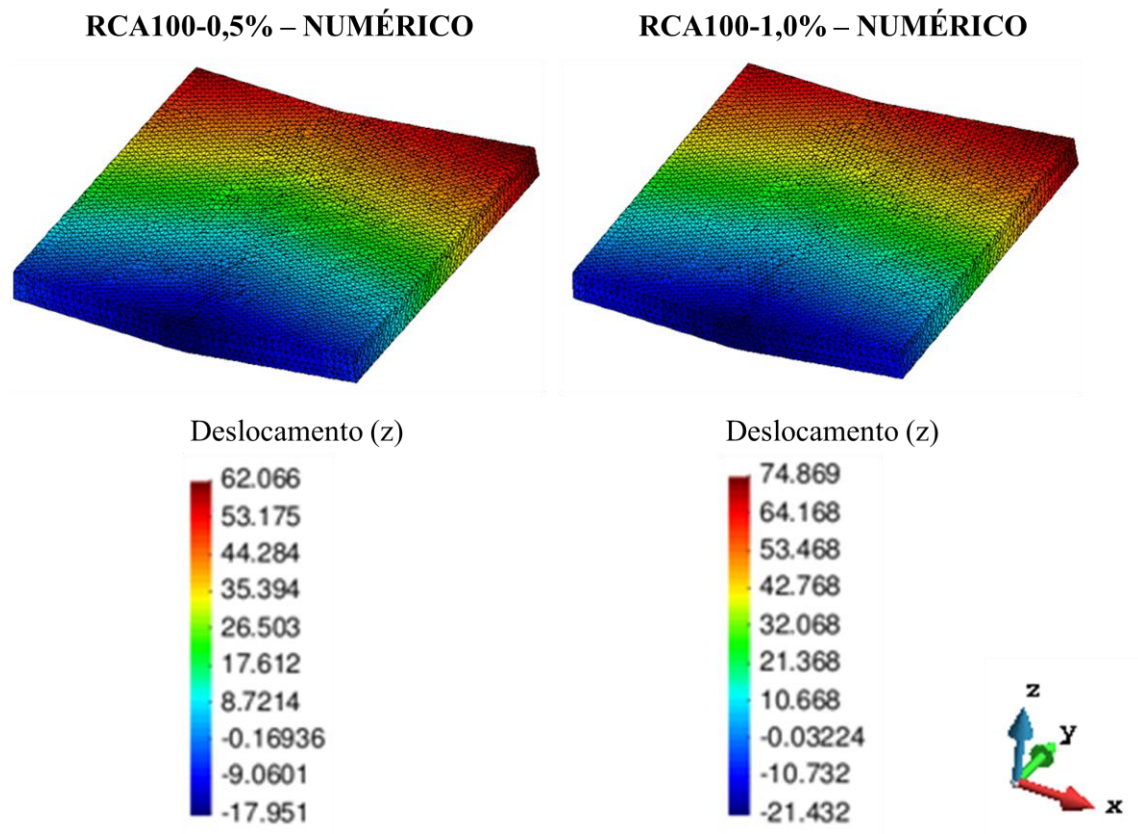
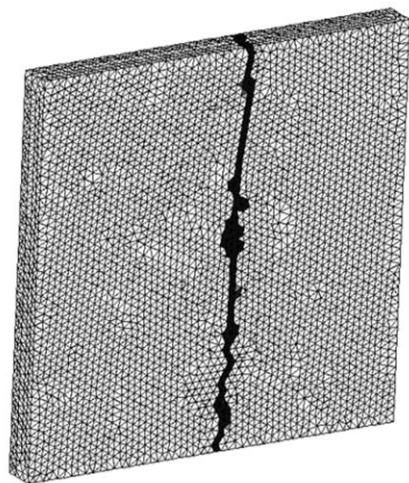
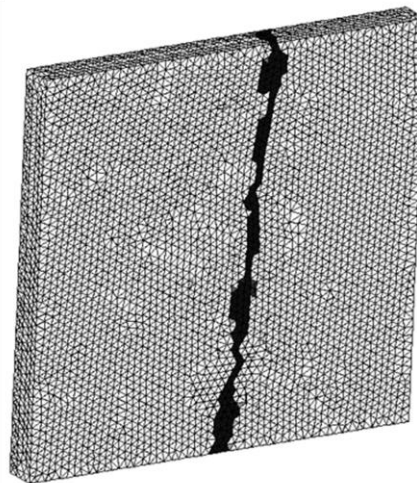


Figura 5.22 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

RCA100-0,5% – NUMÉRICO**RCA100-1,0% – NUMÉRICO**

Dano por tração

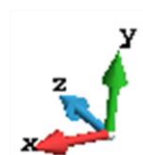
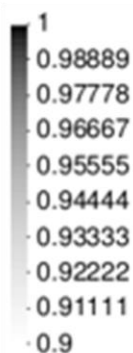


Figura 5.23 Distribuições de dano por tração das lajes “RCA100-0,5% – NUMÉRICO” e “RCA100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

Neste caso, nota-se também padrões de ruptura por flexão, assim como grandes deslocamentos verticais ascendentes e que as fibras proporcionaram menos concentração de deformação na região de fratura.

5.2 Descrição da modelagem referente ao estudo do comportamento mecânico de lajes de pavimento rígido constituídas por agregados reciclados de concretos com diferentes resistências à compressão

Os resultados obtidos através de ensaios de flexão em vigas entalhadas e ensaios de compressão uniaxial em cilindros padronizados, realizados por Casuccio et al. (2008) e listados na Tabela 5-9, foram utilizados como parâmetros nos mesmos modelos numéricos (com e sem fibras de aço) correspondentes à modelagem das lajes de pavimento rígido das seções “5.1” e “5.1.2”.

No experimento em questão, apenas os agregados graúdos foram substituídos por agregados reciclados e os concretos utilizados foram divididos em três séries, baseadas nos valores de resistência à compressão, que correspondiam a 18, 37 e 48 MPa. Dentro de cada série havia três concretos, os quais se diferenciavam conforme o tipo de agregado graúdo, que consistiam em duas variedades de agregado reciclado e um natural. Os dois reciclados eram resultantes da britagem de concretos antigos (mais de dois anos): um identificado como A, provindo de um concreto de alta resistência à compressão ($f'c = 55 \pm 5$ MPa, aos 28 dias) e outro como B, obtido de um concreto de resistência normal à compressão ($f'c = 30 \pm 5$ MPa, aos 28 dias); o agregado natural era a brita granítica (G).

Neste estudo, as modelagens das lajes de pavimento rígido, com uma camada, foram realizadas com os seguintes concretos: o que possuía brita granítica natural (G) de resistência à compressão igual 37 MPa (“G37”); o com agregados obtidos da britagem do concreto de alta resistência ($f'c = 55 \pm 5$ MPa, aos 28 dias) e resistência à compressão equivalente a 37 MPa (“A37”) e por último, o concreto que continha agregados oriundos da britagem do concreto de resistência normal ($f'c = 30 \pm 5$ MPa, aos 28 dias) com resistência à compressão igual a 37 MPa (“B37”). Devido ao fato da escala adotada para as modelagens numéricas ser a macroscópica, torna-se possível a utilização dos resultados experimentais dos ensaios de caracterização do concreto como parâmetros numéricos deste material.

Além disso, foram modeladas também lajes de pavimento rígido constituídas por duas camadas de concreto, a camada inferior (100 mm) com 100% de agregado reciclado de concreto de alta resistência (A) e resistência normal (B) e a superior (50 mm) de concreto com agregado natural (G), formando as misturas: “A37 – G37” e “B37 – G37”. Teores de fibras de aço iguais a 0,5% e 1,0% também foram adicionados em todas as lajes com agregados reciclados, objetivando analisar qual seria o efeito provocado na capacidade de carga máxima de flexão

das estruturas, dando origem então, às lajes com uma camada de concreto: “A37 – 0,5%”; “A37 – 1,0%”; “B37 – 0,5%” e “B37 – 1,0%” e com duas camadas: “A37 / G37 – 0,5%”; “A37 / G37 – 1,0%”; “B37 / G37 – 0,5%” e “B37 / G37 – 1,0%”.

Tabela 5-9. Parâmetros dos concretos modelados.

Amostra	Módulo de elasticidade - E (MPa)	Resistência à tração direta- f_{ct} (MPa)	Energia de fratura - G_F (N/mm)	Coefficiente de Poisson
G-37	$3,31 \cdot 10^4$	3,69	0,147	0,164
A-37	$2,88 \cdot 10^4$	3,60	0,107	0,168
B-37	$2,83 \cdot 10^4$	3,15	0,081	0,166

O módulo de elasticidade, a energia de fratura e o coeficiente de Poisson foram disponibilizados pelos resultados experimentais. A resistência à tração, por sua vez, foi calculada pela Equação 4.26, por meio do valor da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$), fornecida pelo ensaio experimental.

As fibras de aço assim com seus parâmetros foram os mesmos utilizados na seção “5.1.2”.

5.2.1 Discussão dos resultados referentes ao estudo do comportamento mecânico de lajes de pavimento rígido constituídas por agregados reciclados de concretos com diferentes resistências à compressão

As curvas carga x deslocamento obtidas para as modelagens numéricas das lajes sem fibras de aço estão representadas na Figura 5.24.

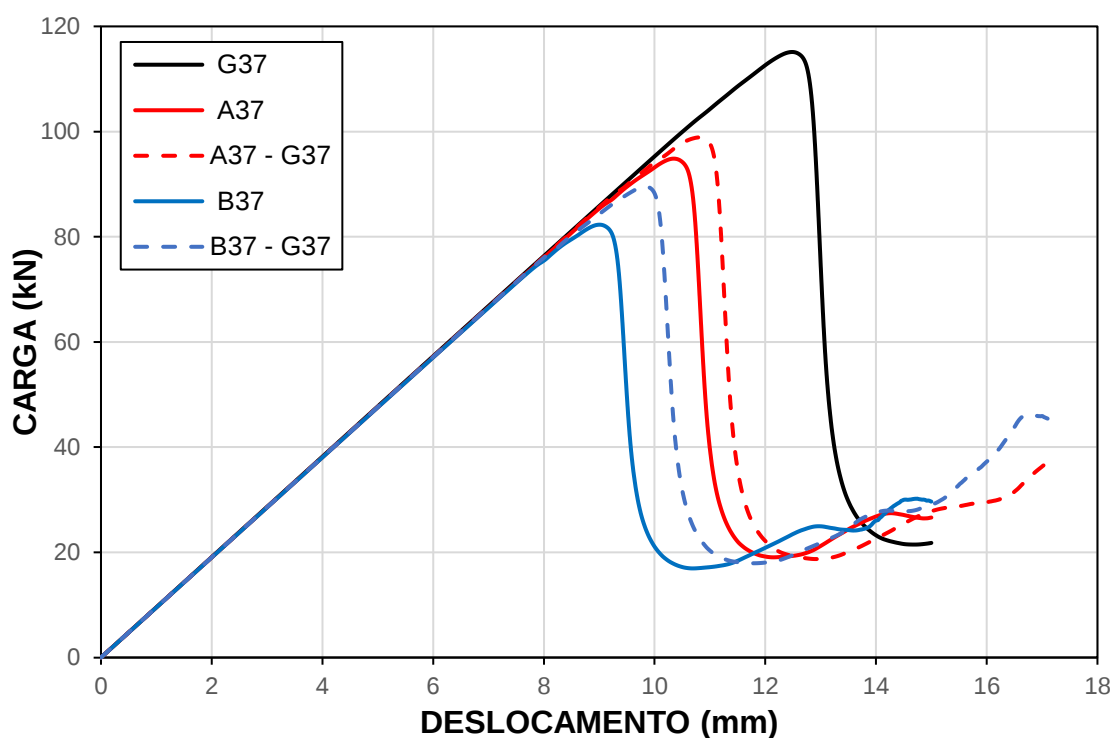


Figura 5.24 Curvas carga x deslocamento das lajes sem fibras de aço modeladas numericamente.

A Tabela 5-10 apresenta os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

Tabela 5-10. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes sem fibras de aço modeladas numericamente.

Amostra	Deslocamento (mm)	Carga de pico (kN)
G37	12,49	115,13
A37	10,35	94,86
B37	9,00	82,30
A37 – G37	10,81	98,89
B37 – G37	9,83	89,54

Conforme os resultados apresentados, apenas com o aumento da substituição de agregados naturais por reciclados, já é possível notar uma redução na capacidade de carga última de flexão, ductilidade e dissipação de energia da estrutura. Considerando então a influência gerada pela resistência à compressão do concreto que dá origem ao agregado reciclado, percebe-se que tais propriedades, para as lajes que possuem agregados provenientes da britagem do concreto de alta resistência, melhoram em relação àquelas com agregados oriundos da britagem do concreto de resistência normal. Em relação ao tipo de laje, aquelas constituídas parcialmente por agregado natural possuem melhores propriedades do que as com 100% de agregado reciclado (comparando, claro, lajes com o mesmo de tipo de agregado reciclado).

A Figura 5.25 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 5 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes sem fibras de aço, ilustrando a Figura 5.26, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

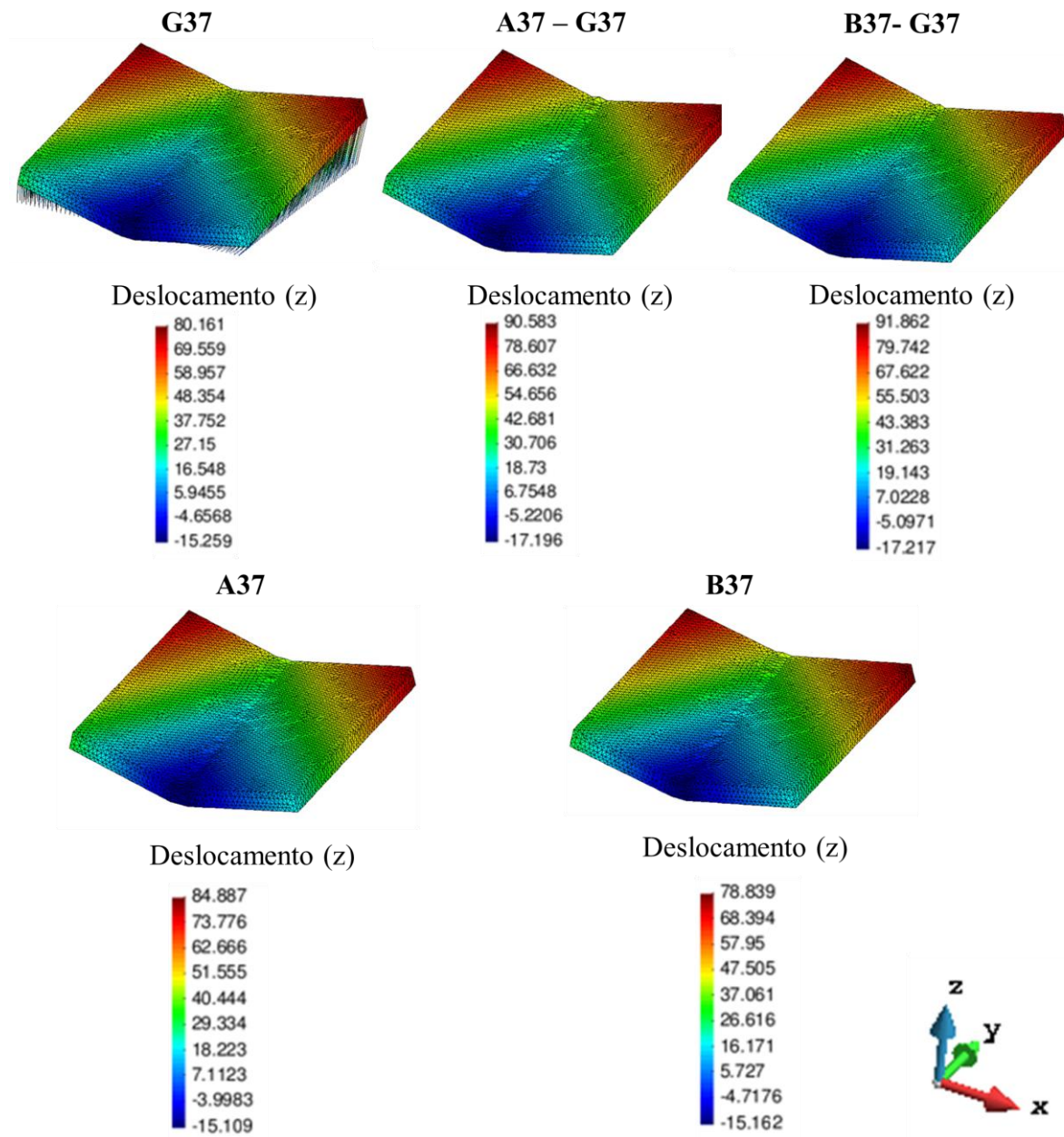


Figura 5.25 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes sem fibras de aço, no final do carregamento.

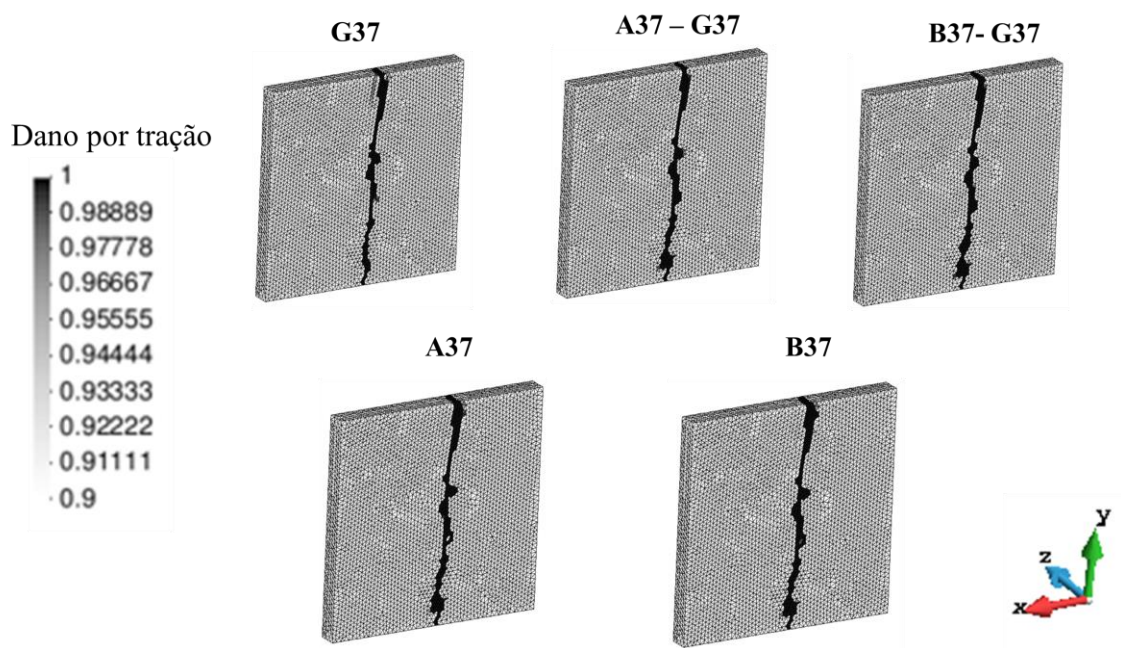


Figura 5.26 Distribuições de dano por tração das lajes sem fibras de aço, no final do carregamento.

É possível concluir pelas imagens que as lajes falharam pelo mecanismo de flexão; houve também altos valores de deslocamento vertical ascendente (os elementos de apoio foram plotados na Figura 5.25, laje “G37”) e para todas as lajes, independente da presença ou não de agregados reciclados, foi observado considerável concentração de deformação na região de fratura (Figura 5.25).

Como proposto, foram adicionados teores de fibras de aço iguais a 0,5% e 1,0% em todas as lajes que possuíam agregado reciclado, objetivando analisar qual o efeito provocado na capacidade de carga máxima de flexão das estruturas. Os resultados obtidos através das curvas carga x deslocamento desta modelagem estão representados na Figura 5.27.

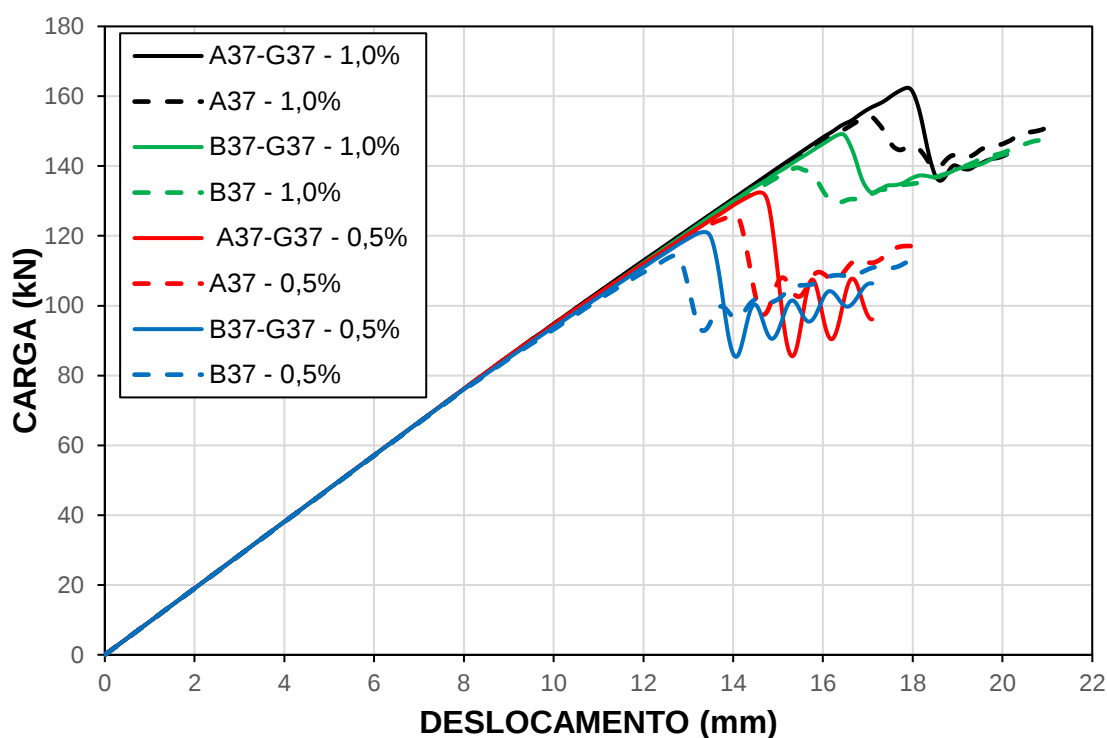


Figura 5.27 Curvas carga x deslocamento das lajes com fibras de aço modeladas numericamente.

A Tabela 5-11 apresenta os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

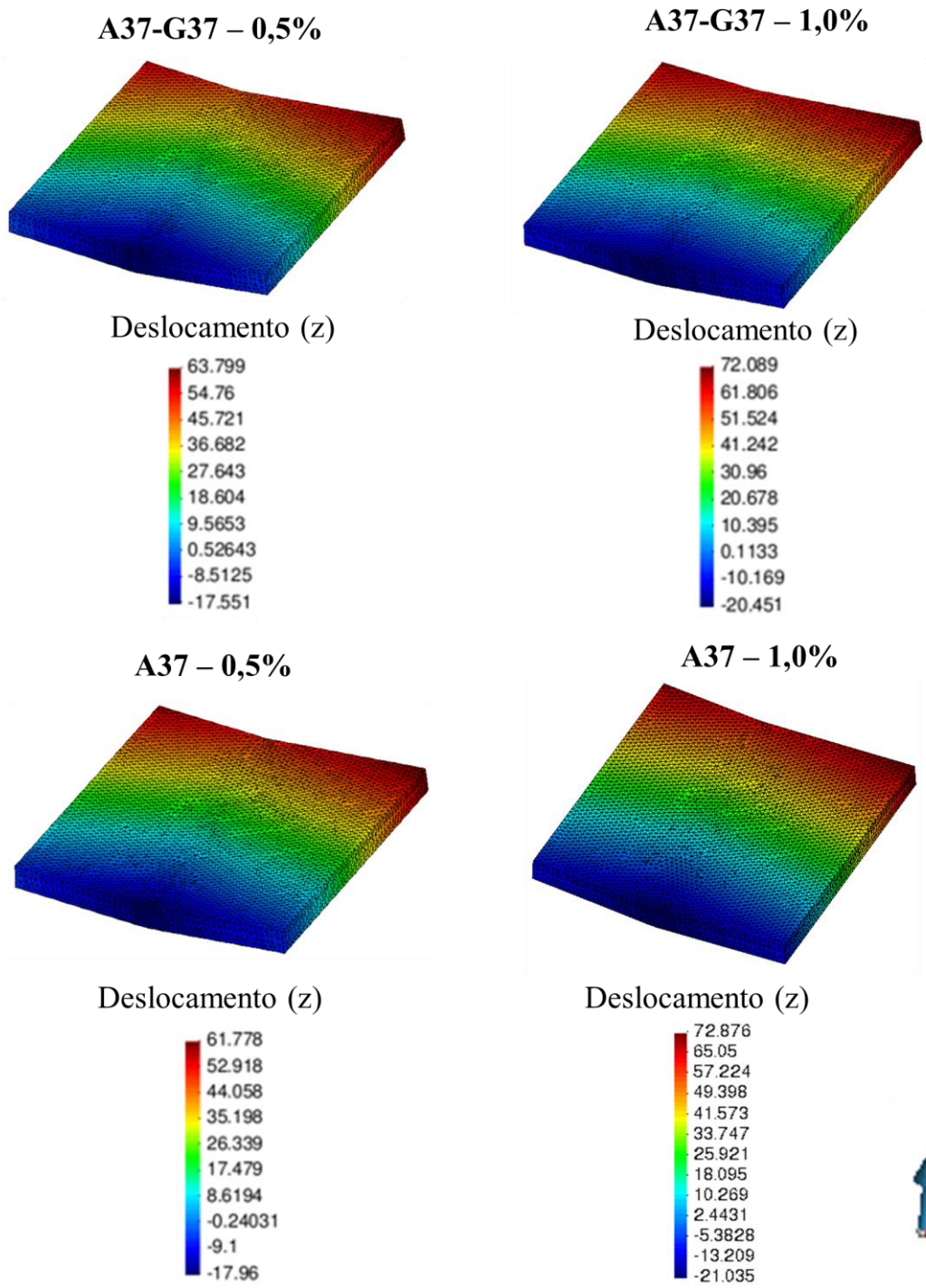
Tabela 5-11. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com fibras de aço modeladas numericamente.

Amostra	Deslocamento (mm)	Carga de pico (kN)
A37-G37 – 1,0%	17,89	162,42
A37 – 1,0%	17,04	154,21
B37-G37 – 1,0%	16,42	149,17
B37 – 1,0%	15,43	139,50
A37-G37 – 0,5%	14,60	132,45
A37 – 0,5%	14,02	126,13
B37-G37 – 0,5%	13,36	121,10
B37 – 0,5%	12,72	114,47

Conforme os resultados apresentados, conclui-se que as maiores cargas de flexão foram obtidas para as lajes que continham teor de fibra correspondente a 1,0%. Considerando o tipo de laje, percebe-se que as lajes compostas por duas camadas de concreto, uma com agregado natural e outra com reciclado, possuem melhores resistências do que aquelas com apenas uma camada de CAR. Já em relação à origem do agregado reciclado, as estruturas que continham o agregado A, ou seja, o agregado obtido da britagem do concreto de alta resistência, foram as que apresentaram maiores cargas de pico.

A Figura 5.28 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 5 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes com fibras de aço, ilustrando a

Figura 5.29, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.



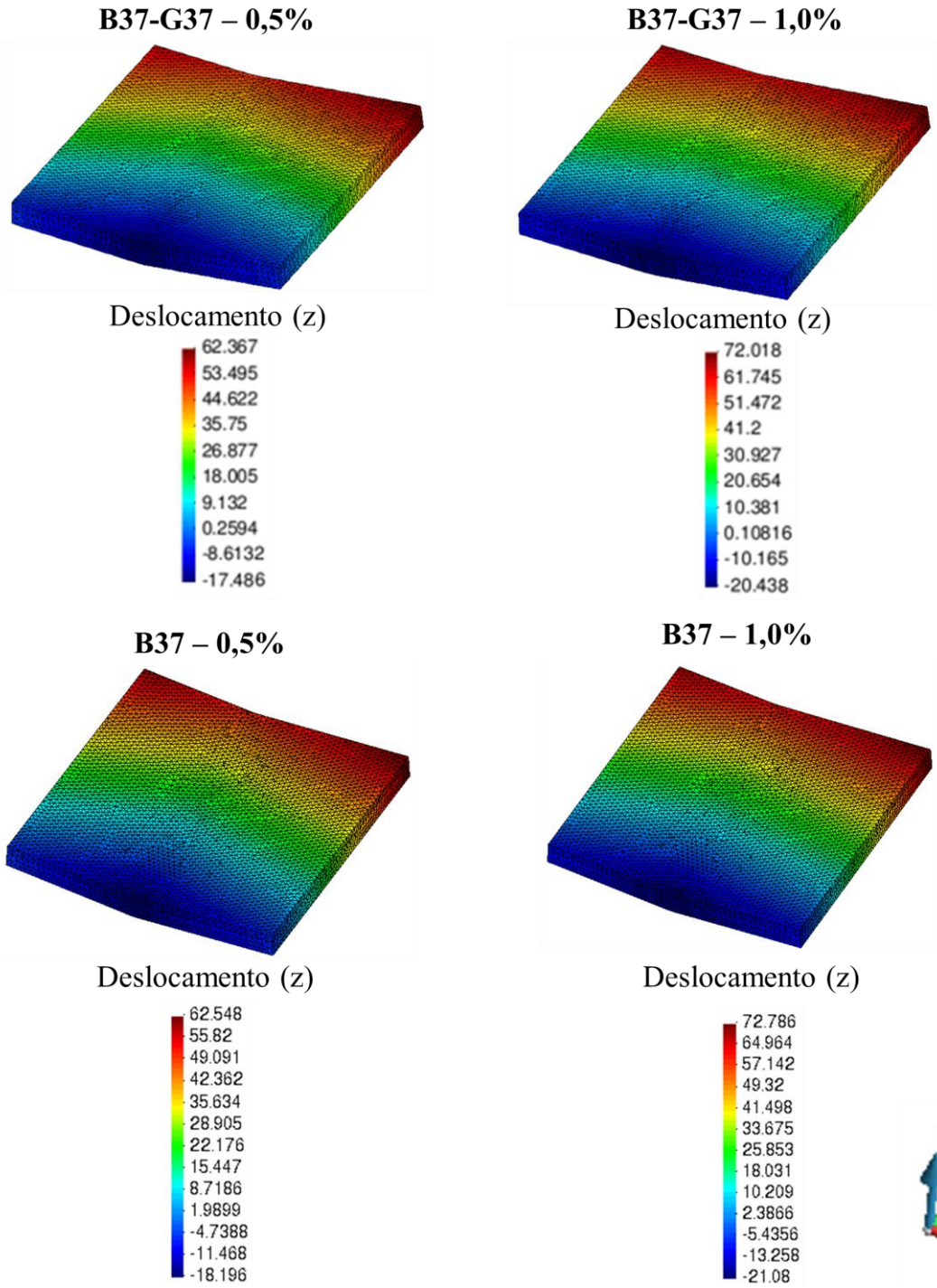


Figura 5.28 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes com fibras de aço, no final do carregamento.

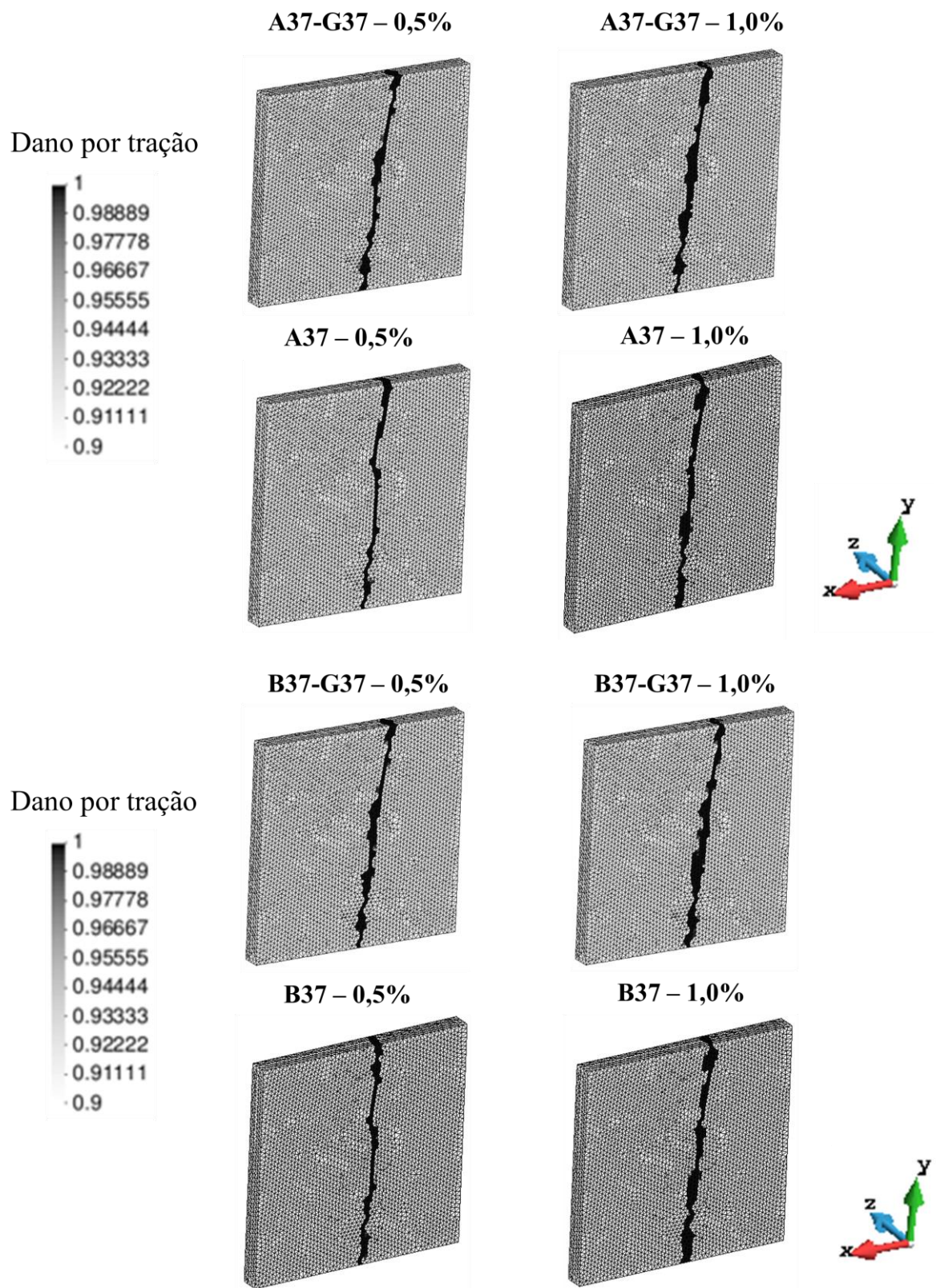


Figura 5.29 Distribuições de dano por tração das lajes com fibras de aço, no final do carregamento.

As figuras indicam ruptura por flexão e o quanto as fibras contribuíram para reduzir a deformação na região onde as lajes fraturaram (Figura 5.28).

5.3 Capacidade do modelo numérico em representar rupturas por punção

Este tópico dos resultados tem como objetivo avaliar se a modelagem utilizada na metodologia desta pesquisa é capaz de representar rupturas por punção. Para isto, como forma de validar as respostas numéricas, foi escolhido um estudo de caso experimental sobre o comportamento ao puncionamento de lajes lisas armadas, que serviu como base de comparação dos resultados.

5.3.1 Descrição do estudo de caso e da modelagem utilizada

Xiao et al. (2019) ensaiaram experimentalmente 8 lajes lisas de concreto armado com conteúdo variado de agregado graúdo reciclado e relação volumétrica de fibra, objetivando analisar qual seria o comportamento ao puncionamento das lajes. No experimento foram empregados dois tipos de agregados graúdos: os naturais, que consistiam em pedras de cascalho e os reciclados, obtidos pela demolição do concreto de resistência 30 MPa e que tinham dois tamanhos, os de 5-15 mm e os de 15-25 mm. As fibras utilizadas eram de aço do tipo arame com ancoragens nas extremidades, dotadas com comprimento médio de 50 mm e diâmetro de 0,9 mm; em relação às suas proporções volumétricas, estas correspondiam a 0,5% e 1,0%. Ressalta-se também que a armadura das lajes eram barras com nervuras laminadas a quente, possuindo 12 mm de diâmetro e espaçadas a cada 100 mm, conforme a Figura 5.30.

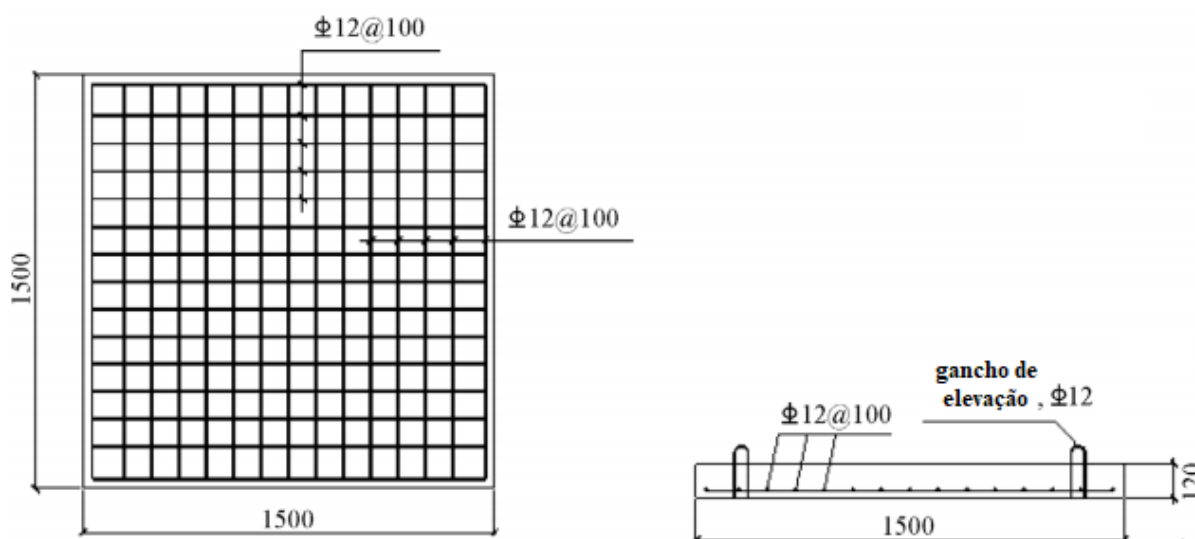


Figura 5.30 Dimensões da laje e seus reforços (unidade: mm) (Adaptada de XIAO et al., 2019).

As lajes possuíam dimensões de 1500 mm x 1500 mm x 120 mm, profundidade efetiva de 99 mm e valor de taxa de armadura de 1,142%, sendo dispostas em um pórtico de concreto

armado e devidamente encaixadas por cantoneiras de aço, de forma a simular condições de contorno de quatro arestas simplesmente apoiadas. A carga foi imposta, através de uma coluna tubular de aço quadrada, preenchida com concreto por um macaco hidráulico e aumentava com velocidades de carga e descarga uniformes, até a ruína das lajes. A Figura 5.31 ilustra a configuração de carregamento descrita.



Figura 5.31 Configuração do carregamento (XIAO et al., 2019).

A metodologia desta pesquisa permitiu a construção das curvas numéricas carga x deslocamento, referentes às lajes contendo 0% (“RAC0”), 50% (“RAC50-0%”) e 100% (“RAC100-0%”) de agregado reciclado sem fibras de aço; das lajes que continham 50% de agregado reciclado com 0,5% e 1,0% de fibras (“SFRAC50-0,5%” e “SFRAC50-1,0%”, respectivamente) e das formadas por 100% de agregado reciclado com 0,5% e 1,0% de fibras (“SFRAC100-0,5%” e “SFRAC100-1,0%”, respectivamente), sendo as fibras modeladas como fibras retas, inseridas com posição e orientação aleatórias, de maneira não uniforme, em todo o volume do CAR e acopladas através dos EFAs.

Devido à simetria do problema, a modelagem foi realizada considerando somente um quarto da geometria original da laje, aplicando durante as simulações carga de modo incremental com 1500 passos de carregamento e controle do deslocamento no sentido de aplicação da carga de 0,04 mm por passo. Vale destacar também que as fibras de aço foram geradas após a aplicação das condições de contorno de simetria.

A localização da carga distribuída aplicada na laje modelada é demonstrada na Figura 5.32, ressaltando que o apoio elástico contínuo unilateral, de maneira semelhante à modelagem da seção “5.1”, foi simulado por meio de elementos finitos unidimensionais de barra, sendo sua rigidez obtida através da multiplicação de sua área de influência pelo módulo de reação do apoio de 0,4 MPa/mm, o qual se mostrou um valor adequado para representar o pórtico de concreto armado com as cantoneiras de aço e também a rigidez inicial das curvas numéricas. A obtenção da área de influência também segue os mesmos critérios da modelagem realizada na seção “5.1”.

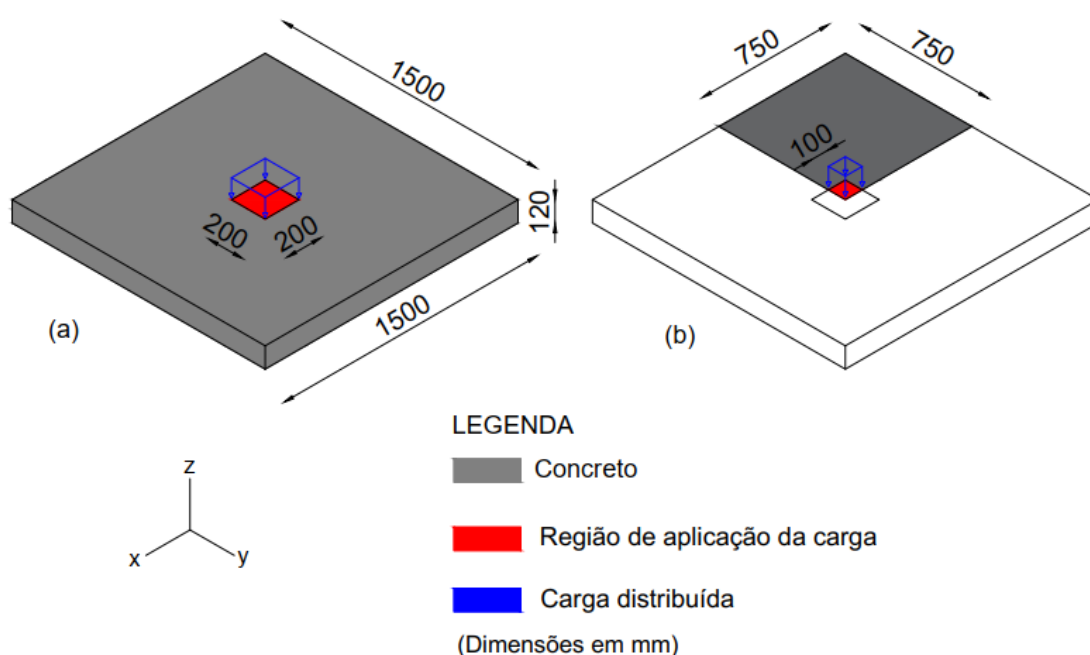
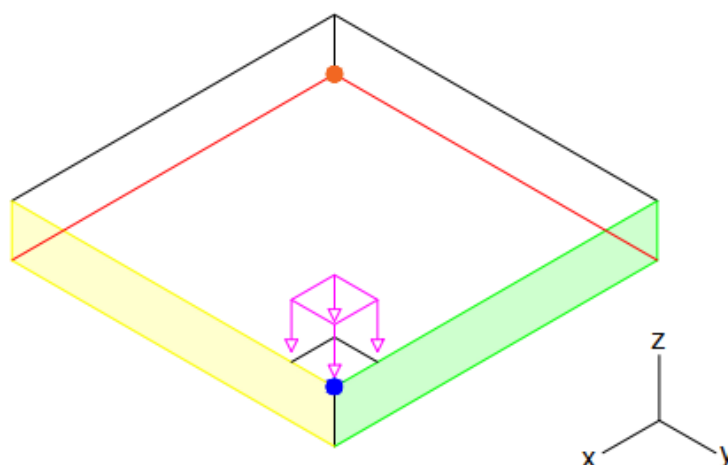


Figura 5.32 Dimensões da laje utilizada no experimento (a) e dimensões da laje modelada numericamente (b).

A Figura 5.33 ilustra as condições de contorno utilizadas nesta modelagem.



LEGENDA

- Apoio elástico contínuo unilateral
- Superfície com deslocamento restrito na direção X (simetria)
- Superfície com deslocamento restrito na direção Y (simetria)
- Carga distribuída
- Nó com deslocamento controlado
- Nó localizado em $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$

Figura 5.33 Condições de contorno essencial e natural desta modelagem.

De acordo com a Figura 5.33, as arestas em vermelho representam o apoio elástico contínuo unilateral. Como apenas um quarto da laje foi modelada, o movimento de pontos na direção “onde a laje continuaria” ocasionaria a perda da simetria do problema, por isso as superfícies em amarelo e verde tiveram seus deslocamentos restritos em suas respectivas direções (condição de contorno essencial). A carga distribuída (condição de contorno natural), representada em rosa, foi ajustada de acordo com a estratégia de controle de deslocamento do nó 8319 (circulado em azul; coordenadas: $x = 750$ mm, $y = 750$ mm, $z = 120$ mm) sob a carga, tal que a cada passo de carregamento o referido nó deslocasse verticalmente 0,04 mm.

As Figuras 5.34, 5.35 e 5.36 ilustram as malhas de elementos finitos da modelagem numérica deste caso.

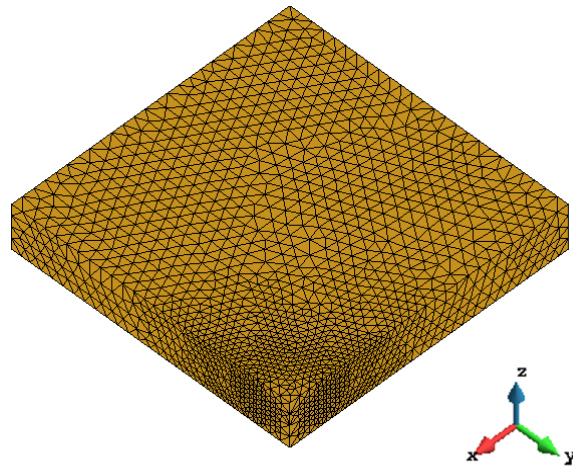


Figura 5.34 Malha de elementos finitos de concreto.

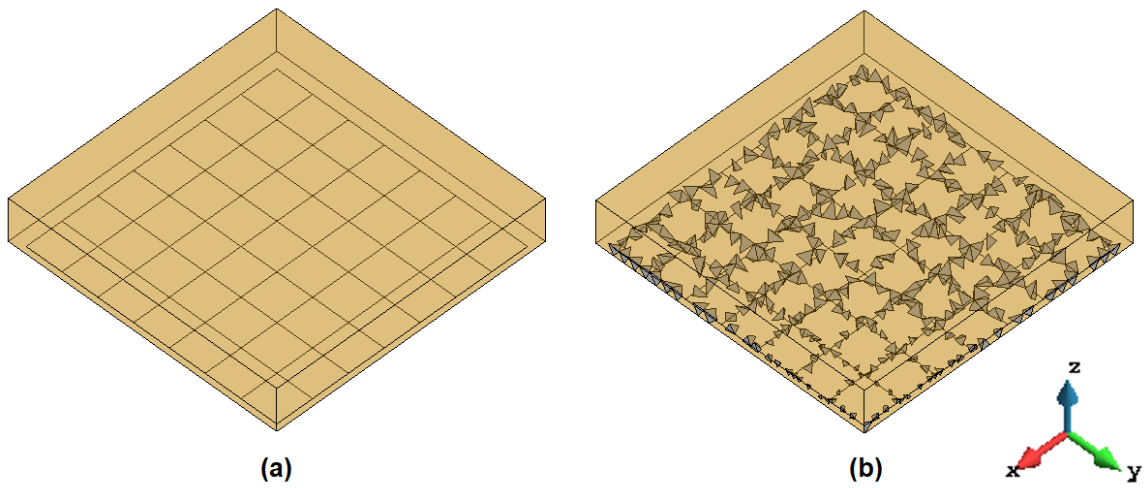


Figura 5.35 Malha de elementos finitos das armaduras (a) e de seus EFAs (b).

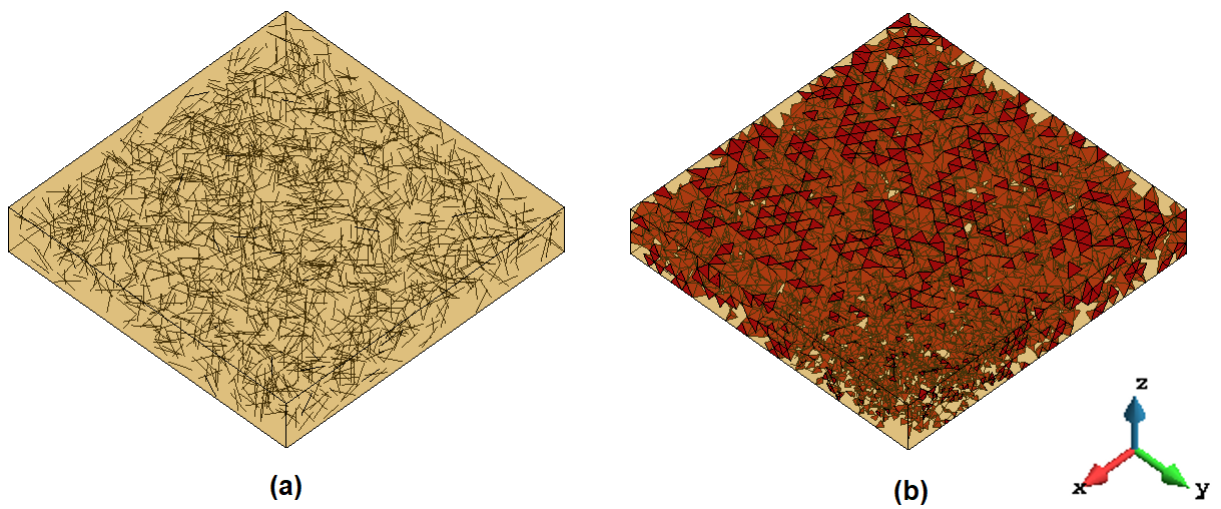


Figura 5.36 Malha de elementos finitos das fibras de aço (a) e de seus EFAs (b).

A Tabela 5-12 apresenta a quantidade de elementos finitos para cada malha das lajes modeladas.

Tabela 5-12. Quantidade de elementos finitos das malhas.

Número de elementos finitos de cada malha					
Amostra	Concreto (elementos tetraédricos)	Armadura (elementos lineares)	Fibras de aço (elementos lineares)	EFAs da armadura (elementos tetraédricos)	EFAs das fibras de aço (elementos tetraédricos)
RAC0; RAC50-0% RAC100-0%	39 176	368	0	380	0
SFRAC50-0,5%; SFRAC50-1,0%; SFRAC100-0,5% SFRAC100-1,0%	39 176	368	4 000	380	6 000

Ressalta-se que na região de aplicação da carga, onde a malha de elementos finitos foi refinada, a altura média dos elementos finitos tetraédricos de concreto era de aproximadamente 12 mm; no restante da malha, 30 mm. Já em relação às fibras de aço e barras de armadura, cada uma foi discretizada em 2 e 23 elementos finitos de 2 nós, respectivamente, portanto haviam 2000 fibras e 16 barras de aço modeladas. Conforme explicado anteriormente, o mesmo número de fibras para diferentes teores deve-se ao fato de ter sido utilizada a mesma malha de elementos finitos para ambos os casos; a diferença ocorreu na modificação dos valores da área e perímetro da fibra corresponde a cada teor nos parâmetros do modelo numérico, ressaltando que o comprimento médio de uma fibra correspondia a 50 mm e de uma barra de armadura, a 700 mm. Os EFAs tetraédricos das fibras e armaduras, por sua vez, possuíam altura aproximada de 30 mm e 35 mm, respectivamente.

Os parâmetros calculados e utilizados nesta modelagem numérica se encontram nas Tabelas 5-13, 5-14, 5-15 e 5-16.

Tabela 5-13. Parâmetros da armadura e das fibras de aço.

Módulo de Elasticidade – E (MPa)	Resistência ao escoamento – F_y (MPa)
2.10^5	390

O módulo de elasticidade foi obtido pelos resultados experimentais e assumiu-se o mesmo valor para as fibras. Para a resistência ao escoamento foi adotado o valor de 390 MPa.

Tabela 5-14. Parâmetros do concreto.

Amostra	Módulo de elasticidade - E (MPa)	Resistência média à tração - $f_{ct,m}$ (MPa)	Energia de fratura - G_F (N/mm)	Coefficiente de Poisson
RAC0	$3,73.10^4$	3,50	0,1205	0,2
RAC50-0%	$2,96.10^4$	3,10	0,1061	0,2
SFRAC50-0,5%	$2,96.10^4$	3,10	0,1061	0,2
SFRAC50-1,0%	$2,96.10^4$	3,10	0,1061	0,2
RAC100-0%	$2,74.10^4$	2,80	0,0952	0,2
SFRAC100-0,5%	$2,74.10^4$	2,80	0,0952	0,2
SFRAC100-1,0%	$2,74.10^4$	2,80	0,0952	0,2

O módulo de elasticidade foi fornecido pelos resultados experimentais; a resistência à tração foi calculada de acordo com a Equação 4.25, a partir do valor da resistência característica à compressão do concreto, dado pelos autores do experimento, e a energia de fratura através da Equação 4.27. Para o coeficiente de Poisson, como não foi informado o valor no experimento, adotou-se o valor típico de 0,2.

Tabela 5-15. Parâmetro referente ao acoplamento das barras de aço no concreto.

Parâmetro de penalidade $\tilde{C}$ (N/mm)
1.10^7

Tabela 5-16. Parâmetros referentes ao acoplamento das fibras de aço no concreto.

τ_{max} (MPa)	τ_f (MPa)	α	s_1 (mm)	s_2 (mm)
8,50	4,50	0,4	0,01	6,50

Esses valores de parâmetros de acoplamento das fibras foram recomendados por Trindade et al. (2020).

5.3.2 Discussão dos resultados obtidos

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 0% de agregado reciclado e 0% de fibras de aço, “RAC0”, estão representadas na Figura 5.37.

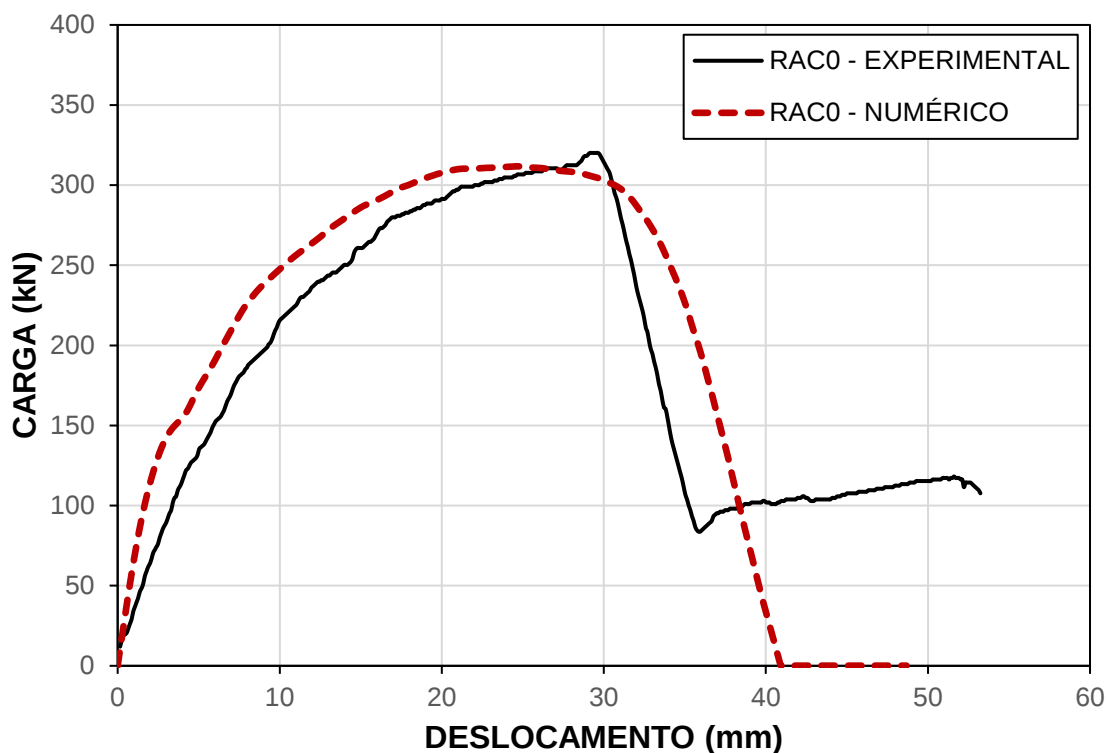


Figura 5.37 Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC0”.

Por meio da Figura 5.37, nota-se que a resposta fornecida pela modelagem numérica utilizada neste estudo para a laje de concreto sem agregados reciclados e fibras de aço foi coerente com o resultado encontrado pelos experimentos. Para a curva “RAC0 – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 320,00 kN com deslocamento correspondente a 29,28 mm. Para a curva “RAC0 – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 311,74 kN com deslocamento de 24,64 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 50% de agregado reciclado e 0% de fibras de aço, “RAC50-0%”, estão representadas na Figura 5.38.

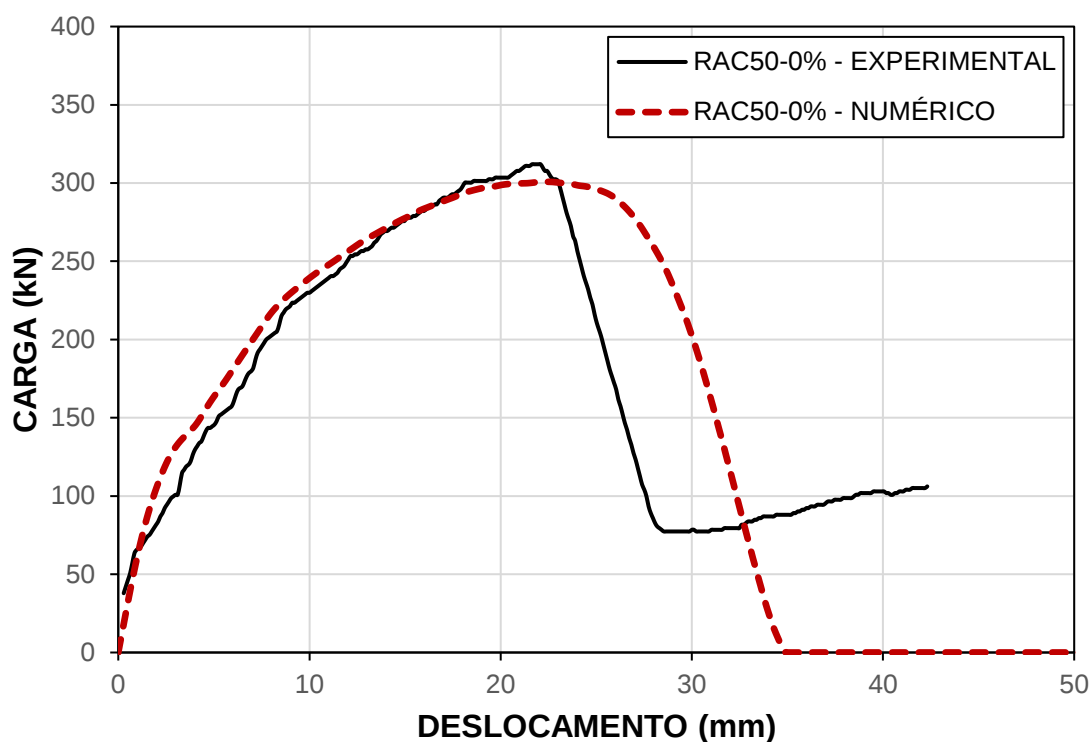


Figura 5.38 Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC50-0%”.

A Figura 5.38 evidencia a semelhança existente entre as respostas numérica e experimental, visto que ambos os gráficos atingiram cargas de pico muito próximas. Para a curva “RAC50-0% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 307,10 kN com deslocamento correspondente a 22,34 mm. Para a curva “RAC50-0% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 300,78 kN com deslocamento de 22,52 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 50% de agregado reciclado e 0,5% de fibras de aço, “SFRAC50-0,5%”, estão representadas na Figura 5.39.

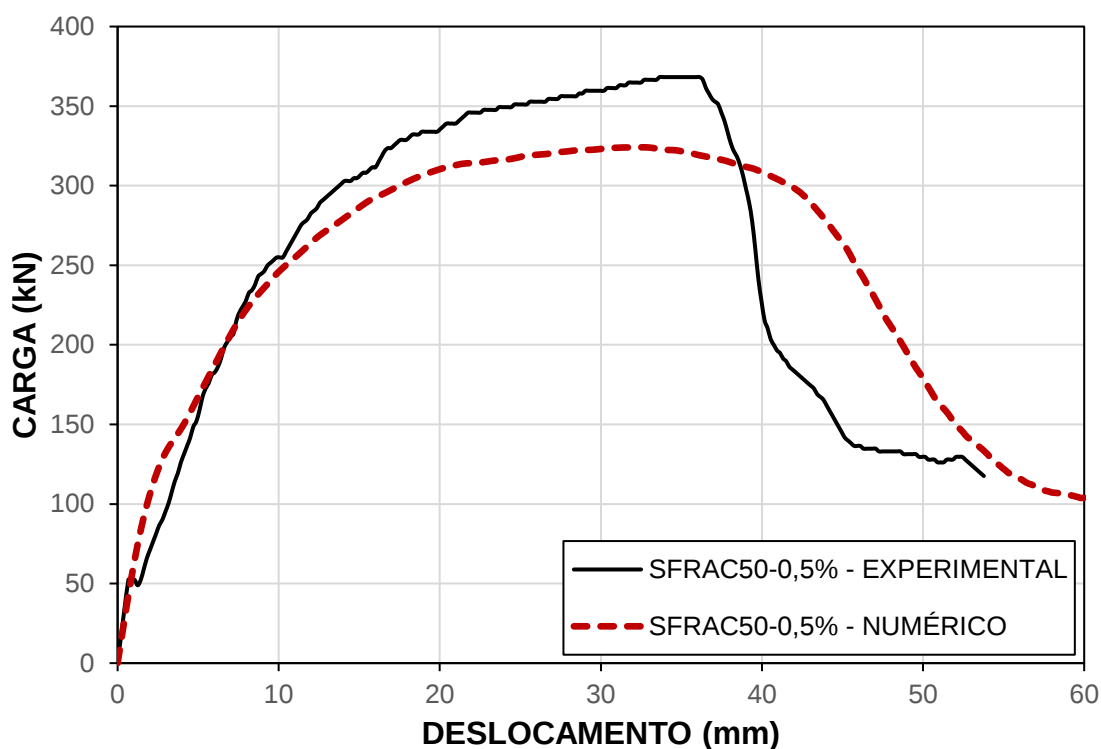


Figura 5.39 Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC50-0,5%”.

Para a laje com 50% de agregado reciclado e 0,5% de fibras de aço, percebe-se através da Figura 5.39 que a resposta numérica apresentou valor de deslocamento referente à carga de pico próximo ao experimental. Para a curva “SFRAC50-0,5% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 366,80 kN com deslocamento correspondente a 35,36 mm. Para a curva “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 324,13 kN com deslocamento de 32,48 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 50% de agregado reciclado e 1,0% de fibras de aço, “SFRAC50-1,0%”, estão representadas na Figura 5.40.

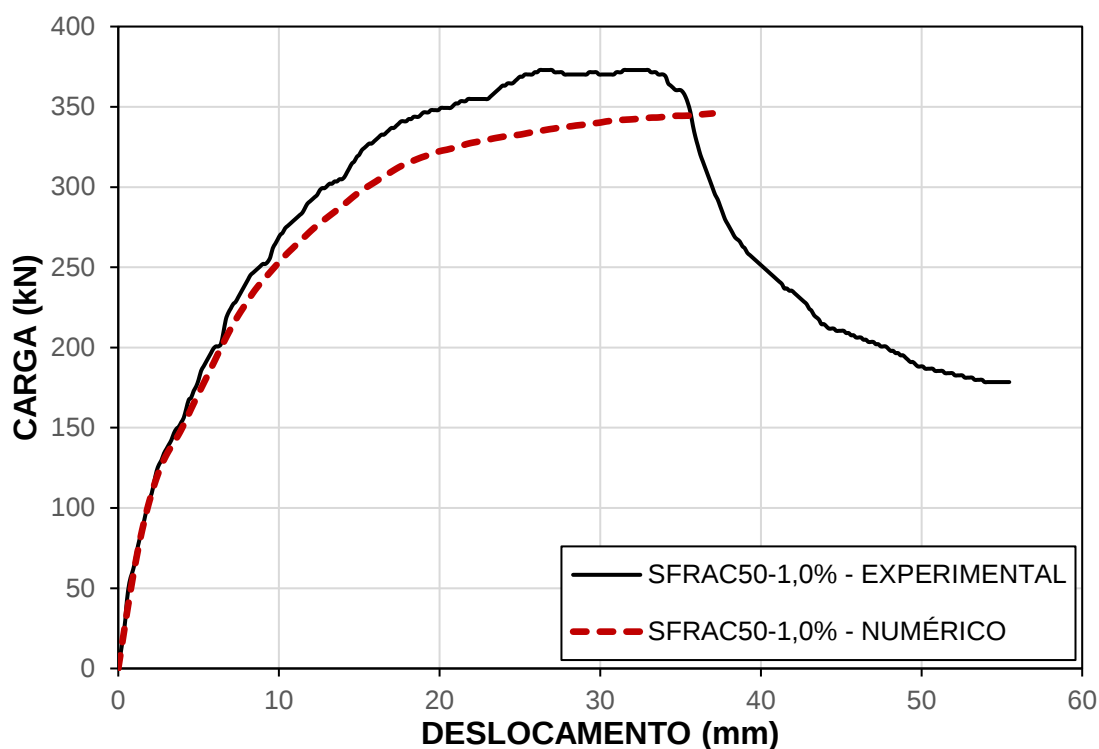


Figura 5.40 Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC50-1,0%”.

Como pode-se observar, para a laje com 50% de agregado reciclado e 1,0% de fibras de aço, os resultados numérico e experimental foram bem semelhantes. Para a curva “SFRAC50-1,0% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 370,60 kN com deslocamento correspondente a 32,95 mm. Para a curva “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 345,88 kN com deslocamento de 37,00 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 100% de agregado reciclado e 0% de fibras de aço, “RAC100-0%”, estão representadas na Figura 5.41.

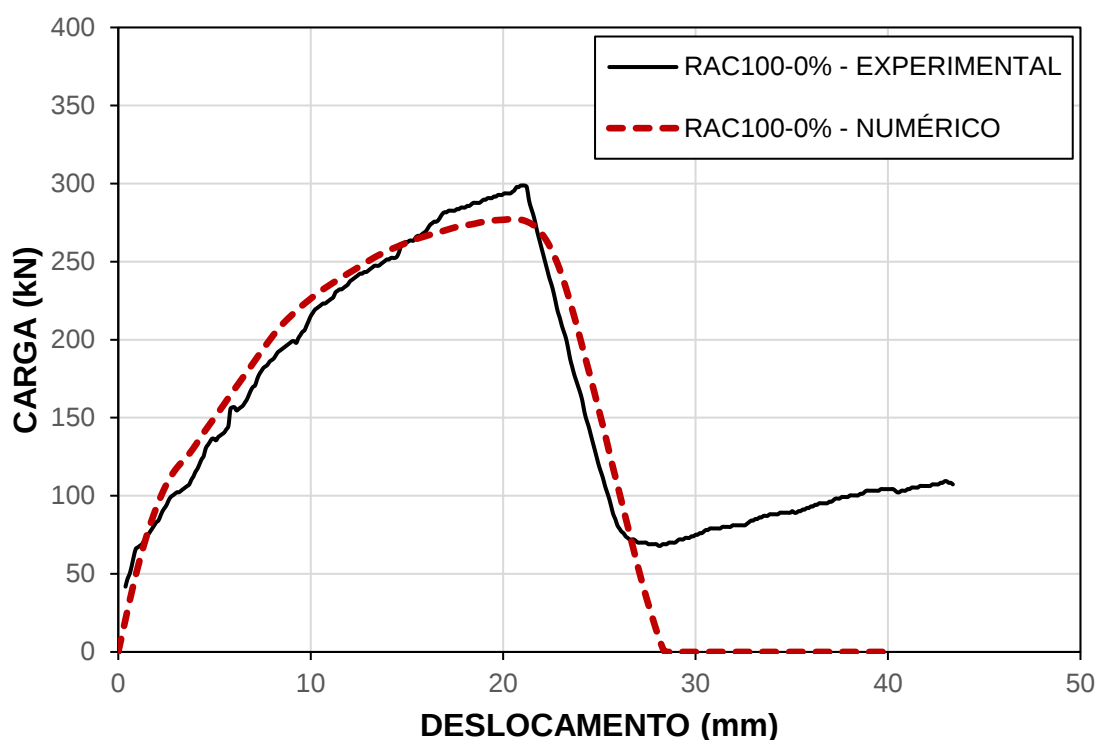


Figura 5.41 Curvas carga x deslocamento para as lajes “RAC100-0%”.

A Figura 5.41 demonstra resultados parecidos, com uma pequena variação em relação aos valores obtidos numérico e experimentalmente para o carregamento máximo que a laje suporta. Para a curva “RAC100-0% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 303,40 kN com deslocamento correspondente a 23,48 mm. Para a curva “RAC100-0% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 277,20 kN com deslocamento de 20,44 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 100% de agregado reciclado e 0,5% de fibras de aço, “SFRAC100-0,5%”, estão representadas na Figura 5.42.

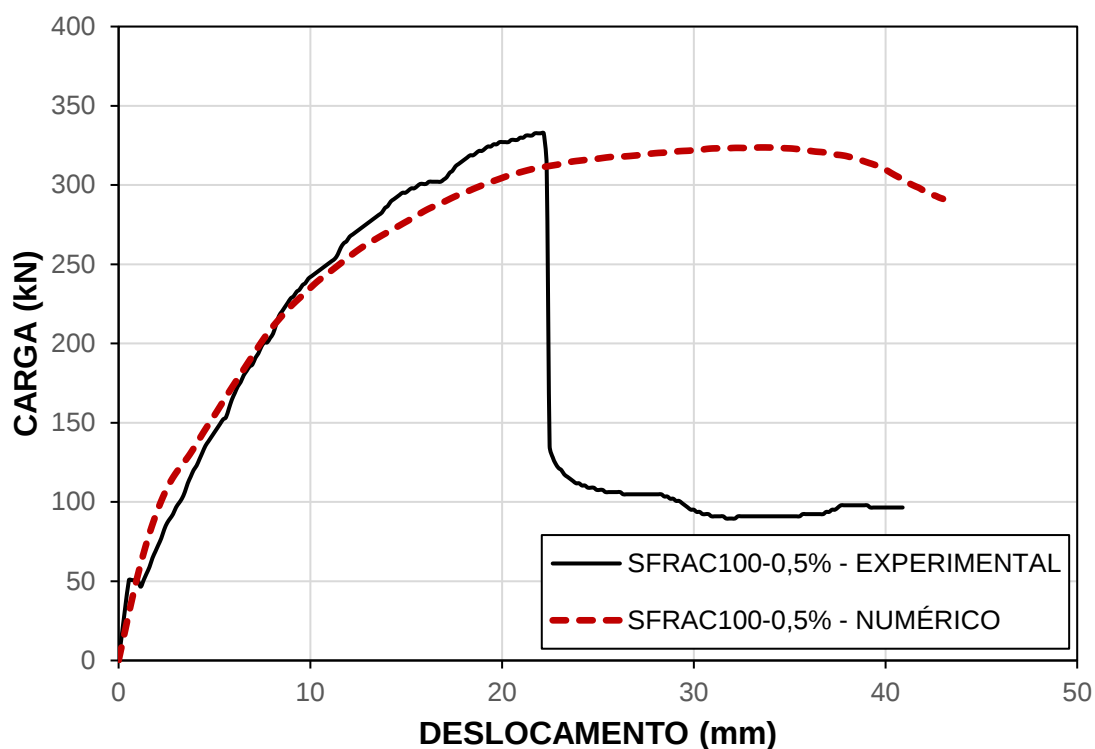


Figura 5.42 Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC100-0,5%”.

Os resultados revelam coerência em relação à carga de pico. Para a curva “SFRAC100-0,5% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 331,20 kN com deslocamento correspondente a 21,98 mm. Para a curva “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 323,72 kN com deslocamento de 33,52 mm.

As curvas carga x deslocamento obtidas para as lajes de concreto contendo 100% de agregado reciclado e 1,0% de fibras de aço, “SFRAC100-1,0%”, estão representadas na Figura 5.43.

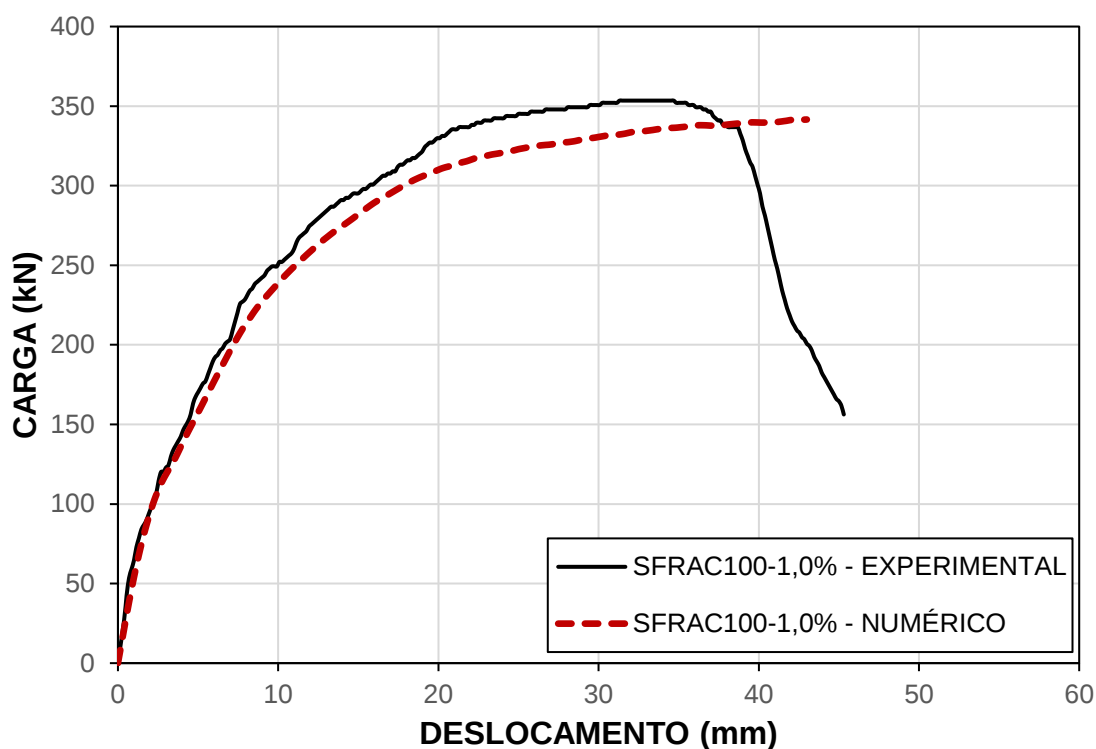


Figura 5.43 Curvas carga x deslocamento para as lajes “SFRAC100-1,0%”.

Novamente, as cargas finais de perfuração foram muito parecidas. Para a curva “SFRAC100-1,0% – EXPERIMENTAL”, o valor da carga máxima foi de 350,20 kN com deslocamento correspondente a 34,30 mm. Para a curva “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO”, os valores foram: carga máxima de 341,66 kN com deslocamento de 42,40 mm.

A Figura 5.44 ilustra uma comparação entre as curvas numéricas e experimentais das lajes contendo 0, 50 e 100% de agregado reciclado sem adição de fibras de aço, enquanto a Tabela 5-17 apresenta um comparativo entre os deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

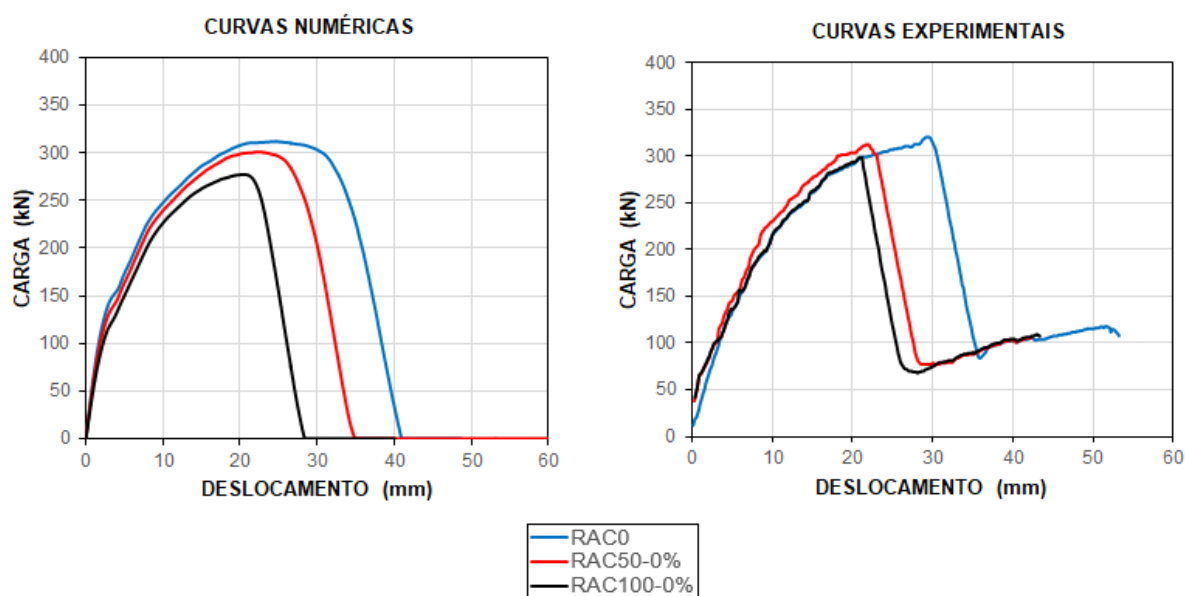


Figura 5.44 Curvas carga x deslocamento das lajes contendo 0, 50 e 100% de agregado reciclado sem fibras de aço.

Tabela 5-17. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes contendo 0, 50 e 100% de agregado reciclado sem fibras de aço.

Amostra	Deslocamento (mm) - NUMÉRICO	Deslocamento (mm) - EXPERIMENTAL	Carga de pico (kN) - NUMÉRICA	Carga de pico (kN) - EXPERIMENTAL
RAC0	24,64	29,28	311,74	320,00
RAC50-0%	22,52	22,34	300,78	307,10
RAC100-0%	20,44	23,48	277,20	303,40

Analisando a Figura 5.44 e os dados da Tabela 5-17 pode-se concluir que a metodologia foi capaz de reproduzir resultados semelhantes aos experimentais. Além disso, com o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais por reciclados houve uma queda no valor da carga final de perfuração e da dissipação de energia, devido à diminuição das propriedades de fratura homogeneizadas, acarretada pelo aumento percentual de agregados reciclados na estrutura.

A Figura 5.45 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 3 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “RAC0 - NUMÉRICO”, “RAC50-0% – NUMÉRICO” e “RAC100-0% – NUMÉRICO” e a Figura 5.46, suas respectivas distribuições de dano por tração (em duas vistas diferentes), sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

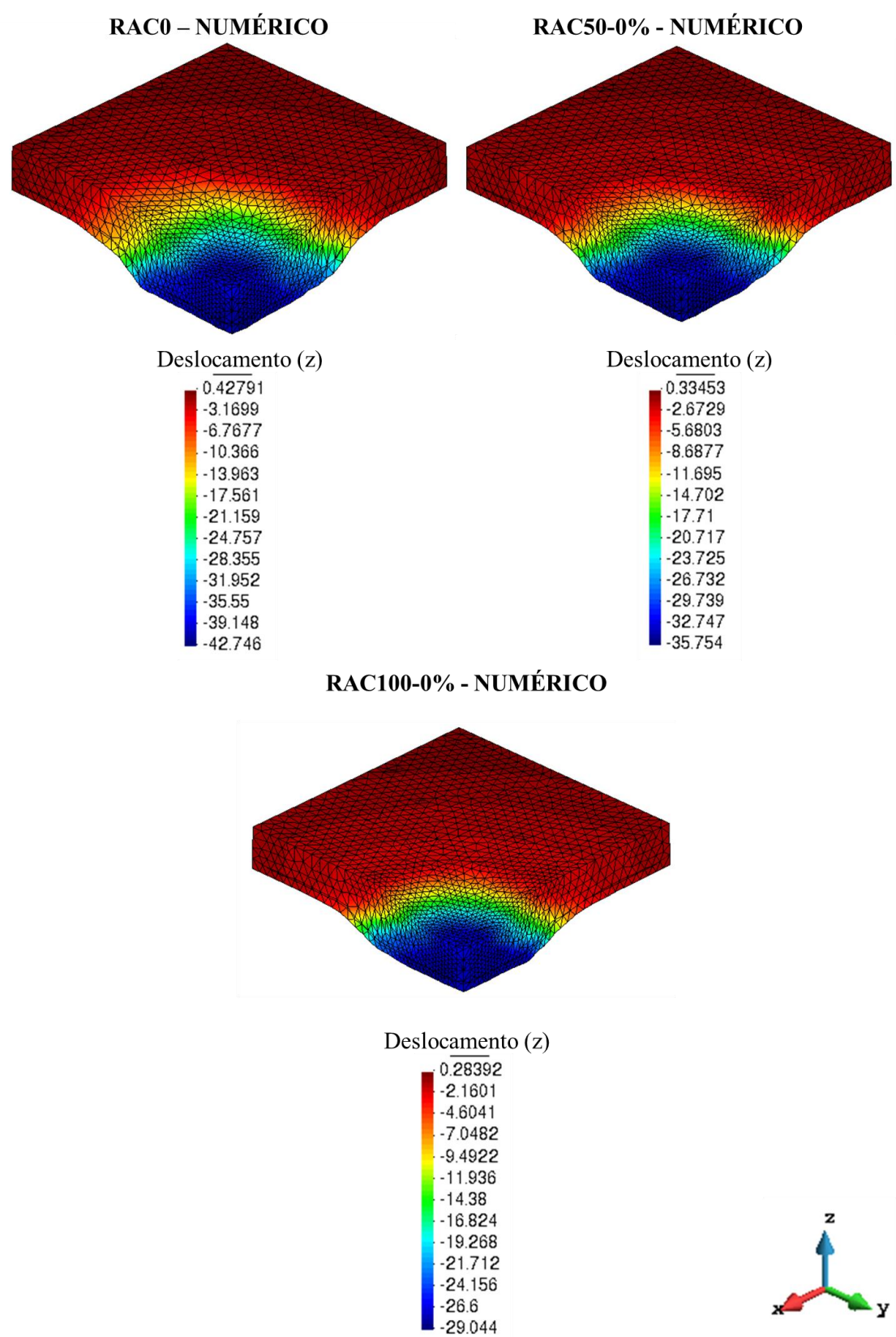


Figura 5.45 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “RAC0 - NUMÉRICO”, “RAC50-0% – NUMÉRICO” e “RAC100-0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

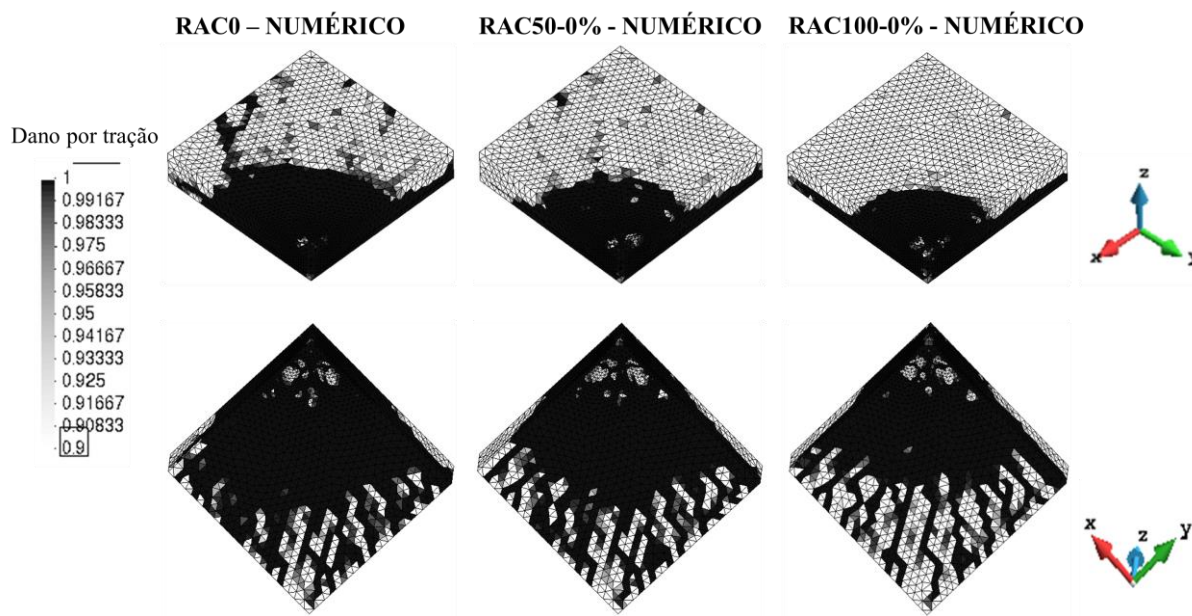


Figura 5.46 Distribuições de dano por tração das lajes “RAC0 - NUMÉRICO”, “RAC50-0% – NUMÉRICO” e “RAC100-0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

Pela análise das figuras é perceptível o padrão de falha por punção, já que houve a formação de um cone oblíquo e também de fissuras radiais e tangenciais, características deste tipo de ruptura, conforme ilustrado na Figura 5.47.

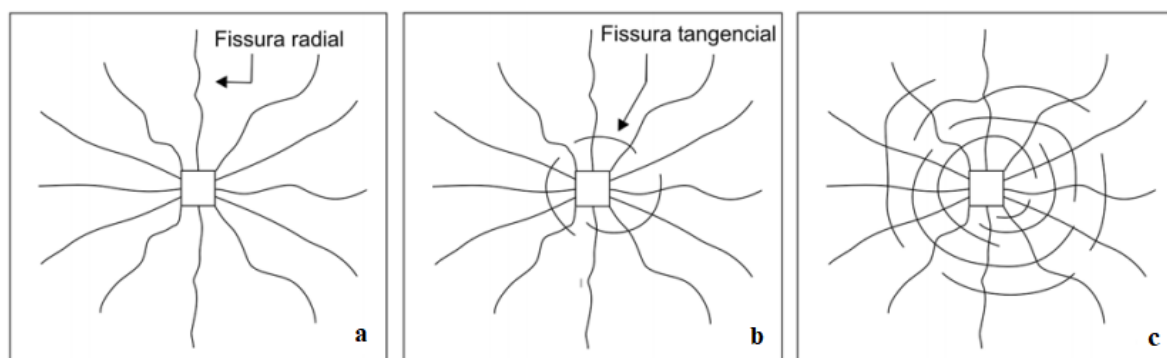


Figura 5.47 Processo de formação de fissuras de punção. Fissura radial formada por tensões tangenciais (a); fissuras tangenciais formadas por tensões radiais (b) e configuração de ruptura (c) (FERREIRA; OLIVEIRA, 2007).

Em relação às lajes que continham 50% de agregado reciclado e com variados teores de fibras de aço, a Figura 5.48 demonstra uma comparação entre as curvas numéricas e experimentais destas lajes. Visando destacar o efeito do agregado reciclado na estrutura, a curva “RAC0” também foi plotada.

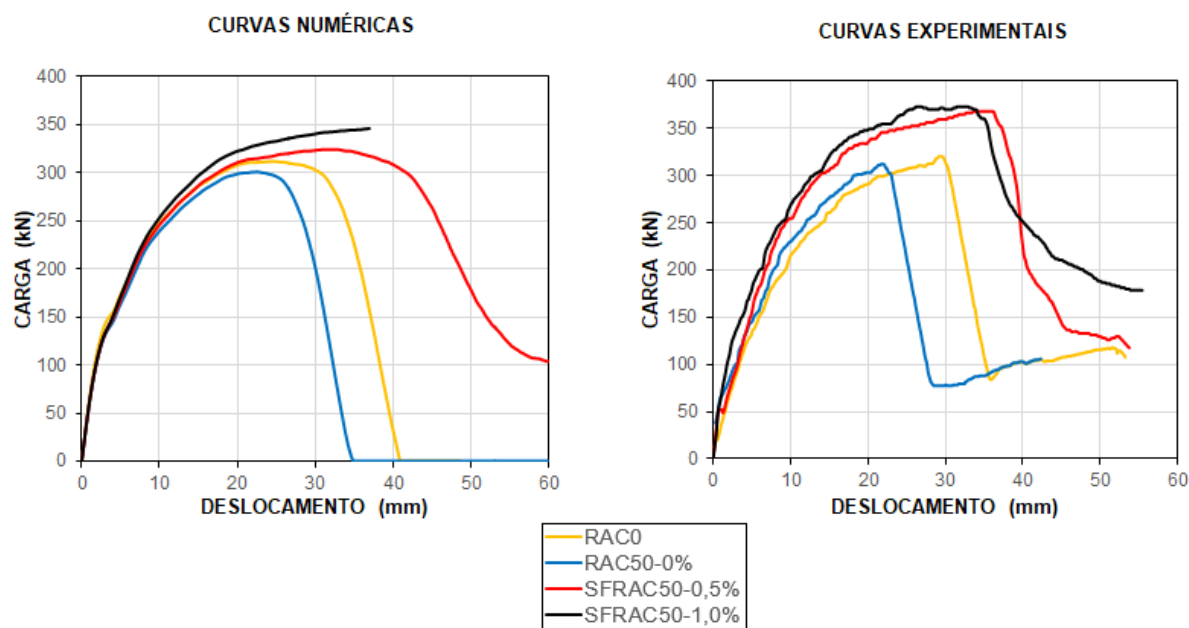


Figura 5.48 Curvas carga x deslocamento das lajes contendo 50% de agregado reciclado, com teor de fibras variando em 0; 0,5 e 1,0%.

A Tabela 5-18 traz uma comparação em relação aos deslocamentos referentes às cargas de pico destas curvas.

Tabela 5-18. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com 50% de agregado reciclado e variados teores de fibras de aço.

Amostra	Deslocamento (mm) - NUMÉRICO	Deslocamento (mm) - EXPERIMENTAL	Carga de pico (kN) - NUMÉRICA	Carga de pico (kN) - EXPERIMENTAL
RAC0	24,64	29,28	311,74	320,00
RAC50-0%	22,52	22,34	300,78	307,10
SFRAC50-0,5%	32,48	35,36	324,13	366,80
SFRAC50-1%	37,00	32,95	345,88	370,60

De acordo com a Figura 5.48 e a Tabela 5-18, conclui-se que o modelo numérico reproduziu de maneira apropriada os resultados experimentais e também que a adição das fibras de aço melhorou tanto a capacidade de punção quanto a de dissipação de energia das lajes com agregado reciclado.

A Figura 5.49 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 3 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO” e a Figura 5.50, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

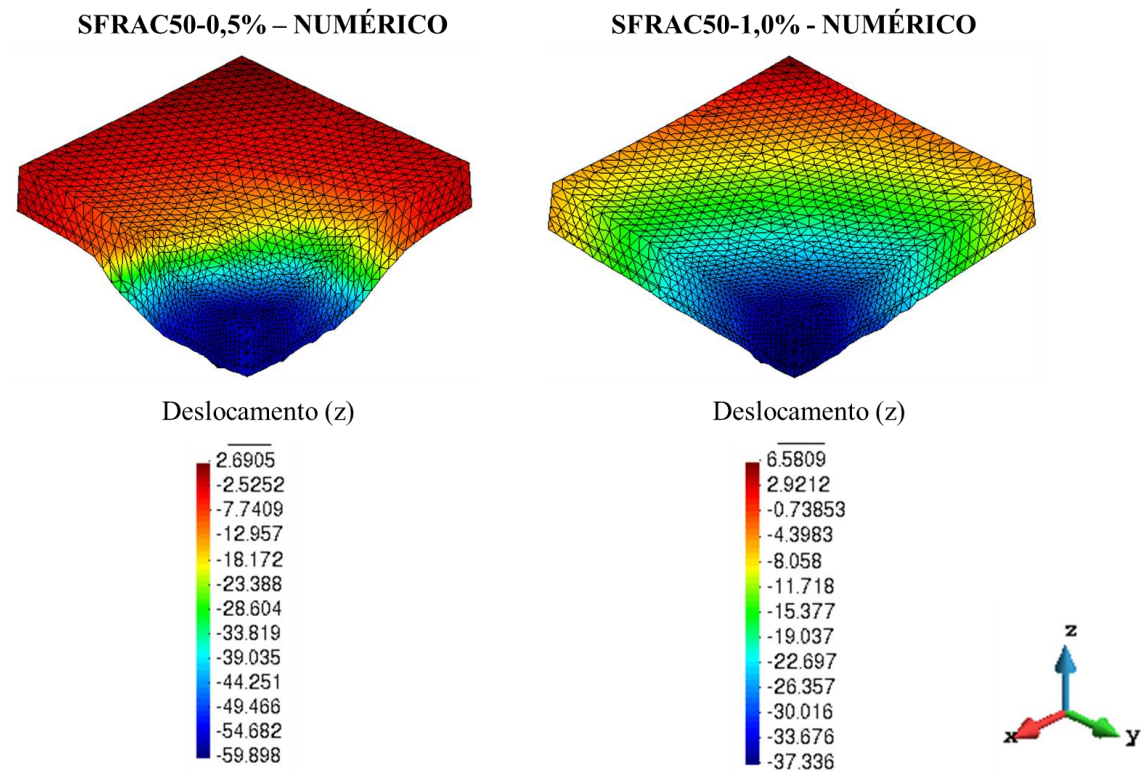


Figura 5.49 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

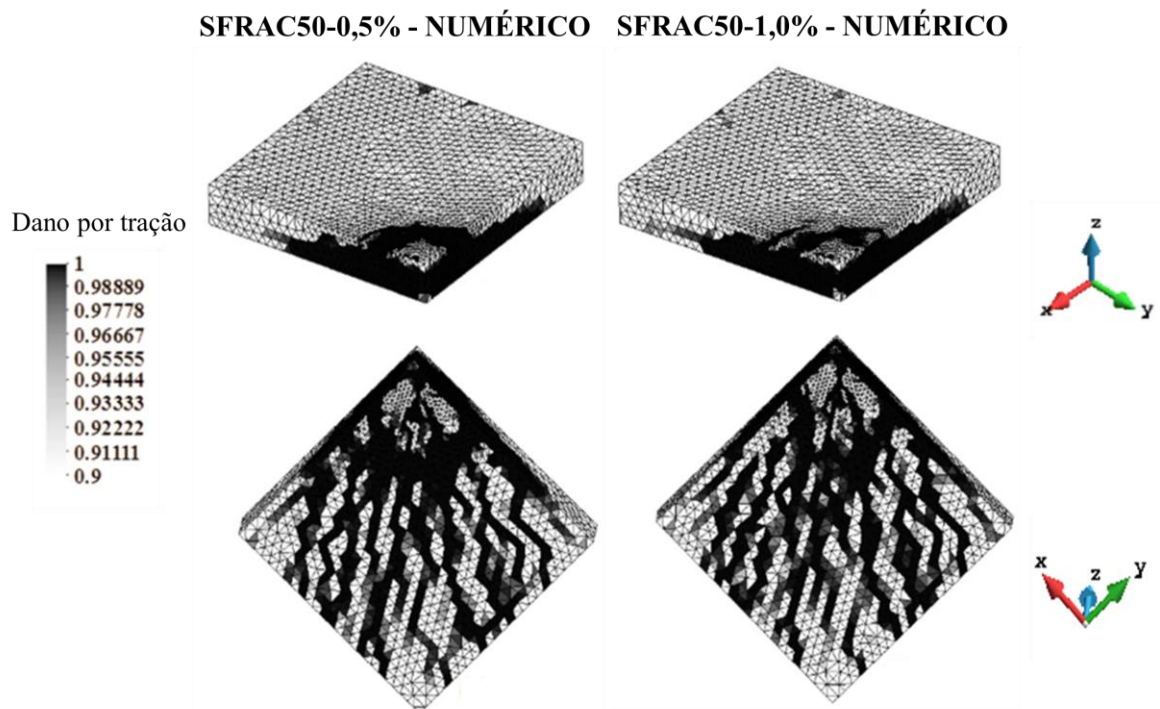


Figura 5.50 Distribuições de dano por tração das lajes “SFRAC50-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC50-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

A análise das figuras mostra que o aumento do teor de fibras de aço melhora a integridade do cone de corte, contribuindo na mudança do padrão de falha por punção para o de flexo-punção, assim como ocorreu nos resultados experimentais. Na flexo-punção ocorre a formação dos cones de punção no momento em que a carga máxima é atingida, entretanto devido ao aumento da quantidade de fibras, a deformação da armadura aumenta, fazendo com que atinja seu limite de escoamento, sendo este um comportamento característico de flexão, podendo ser identificado pela formação de patamares nas curvas das lajes que possuem fibras da Figura 5.48.

Já os resultados numéricos e experimentais encontrados para as lajes com 100% de agregado reciclado e diferentes porcentagens de fibras de aço podem ser resumidos e comparados, através da Figura 5.51 e Tabela 5-19. De forma semelhante ao caso anterior, para destacar o efeito do agregado reciclado na estrutura, a curva “RAC0” também foi plotada.

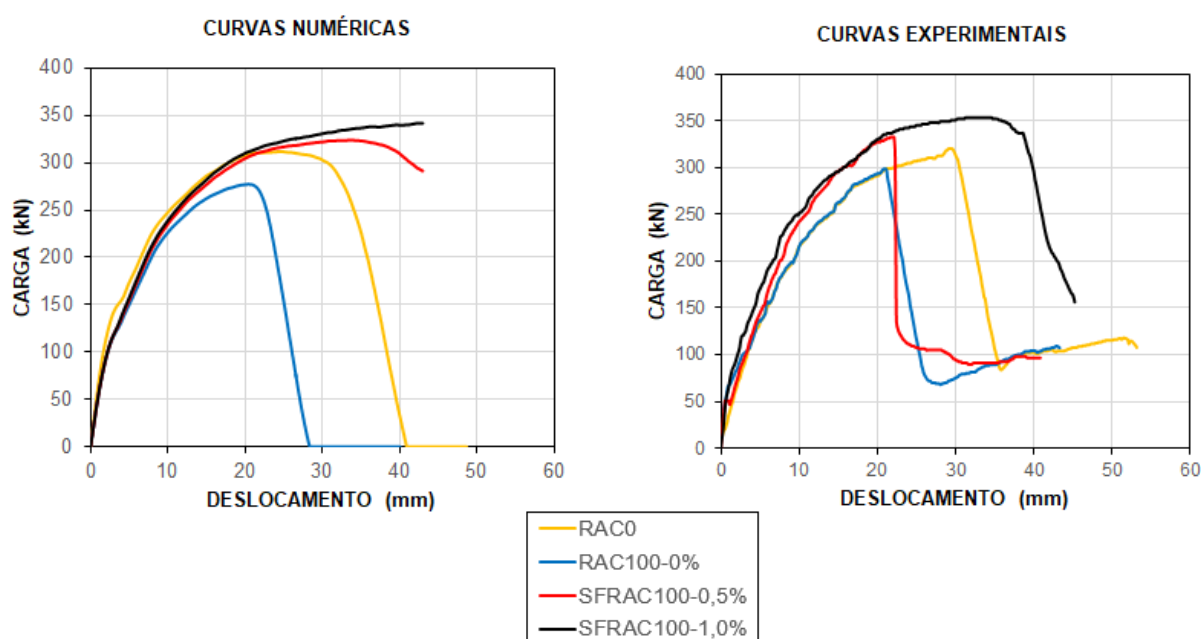


Figura 5.51 Curvas carga x deslocamento referentes às lajes contendo 100% de agregado reciclado, com teor de fibras variando em 0; 0,5 e 1,0%.

Tabela 5-19. Deslocamentos referentes às cargas de pico das lajes com 100% de agregado reciclado e variados teores de fibras de aço.

Amostra	Deslocamento (mm) - NUMÉRICO	Deslocamento (mm) - EXPERIMENTAL	Carga de pico (kN) - NUMÉRICA	Carga de pico (kN) - EXPERIMENTAL
RAC0	24,64	29,28	311,74	320,00
RAC100-0%	20,44	23,48	277,20	303,40
SFRAC100-0,5%	33,52	21,98	323,72	331,20
SFRAC100-1%	42,40	34,30	341,66	350,20

De acordo com os resultados apresentados, nota-se certa semelhança entre as respostas numéricas e experimentais, além dos benefícios que as fibras de aço geram conforme aumenta-se seu teor, como por exemplo: melhora na carga última de punção, na ductilidade (capacidade da estrutura de sofrer deformação plástica considerável antes de falhar) e na dissipação de energia.

A Figura 5.52 ilustra a configuração deformada (fator de escala de 3 vezes) com os deslocamentos em mm no eixo z (direção vertical) das lajes: “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO” e a Figura 5.53, suas respectivas distribuições de dano por tração, sendo ambas as figuras obtidas no final do carregamento.

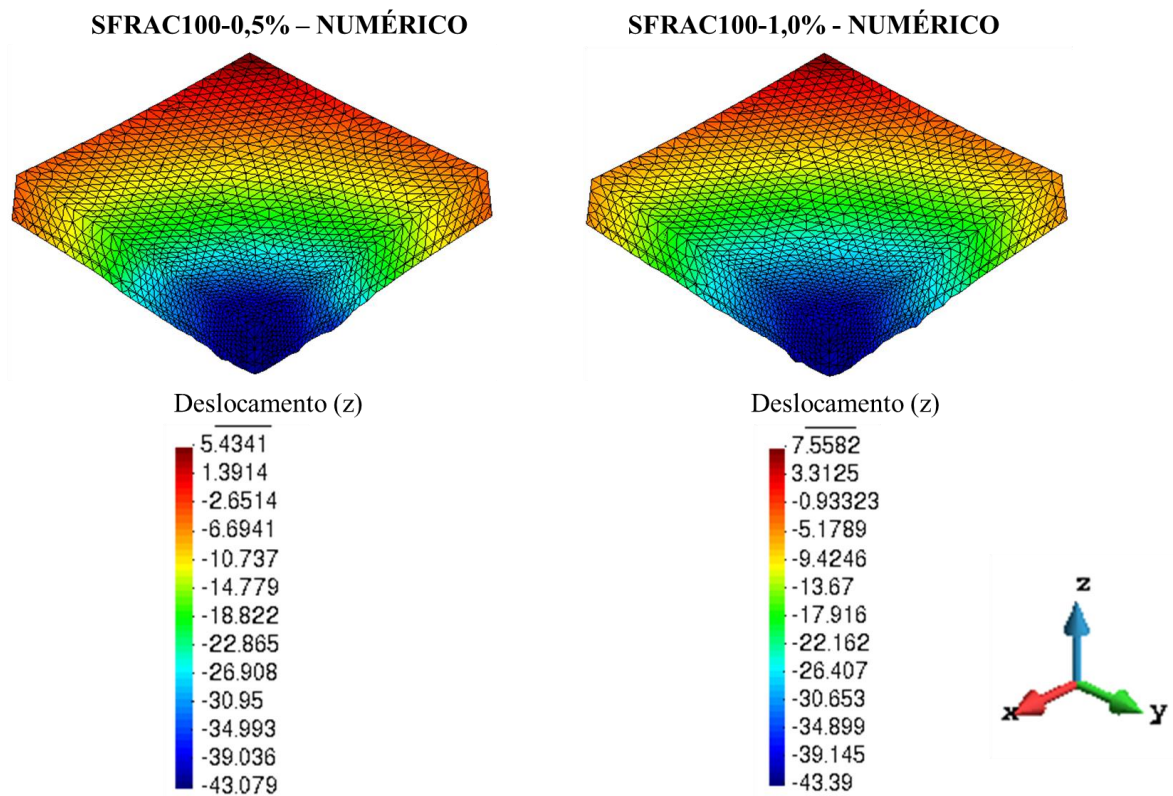


Figura 5.52 Deslocamentos (mm) no eixo z das lajes “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

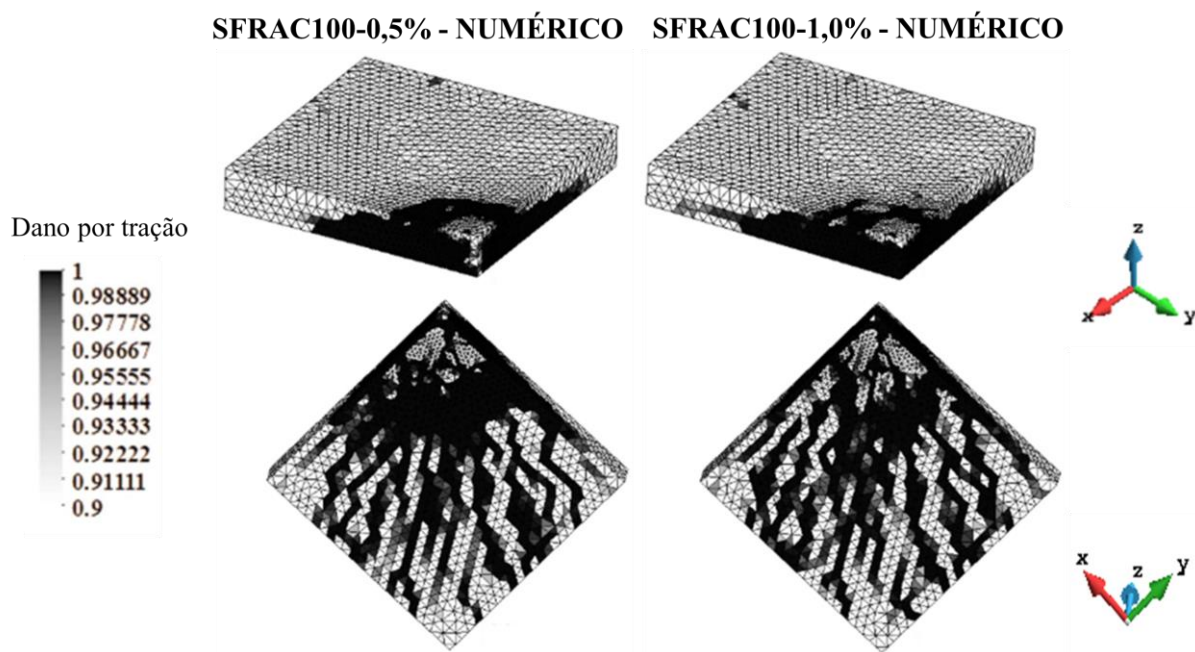


Figura 5.53 Distribuições de dano por tração das lajes “SFRAC100-0,5% – NUMÉRICO” e “SFRAC100-1,0% – NUMÉRICO”, no final do carregamento.

Por meio das figuras é possível visualizar que ainda há padrões de ruptura por punção, entretanto neste caso fica mais claro a transição do padrão de falha por punção para o de flexo-punção, especialmente para a laje “SFRAC100-1,0%”.

A configuração de ruptura das lajes experimentais pode ser visualizada na Figura 5.54.

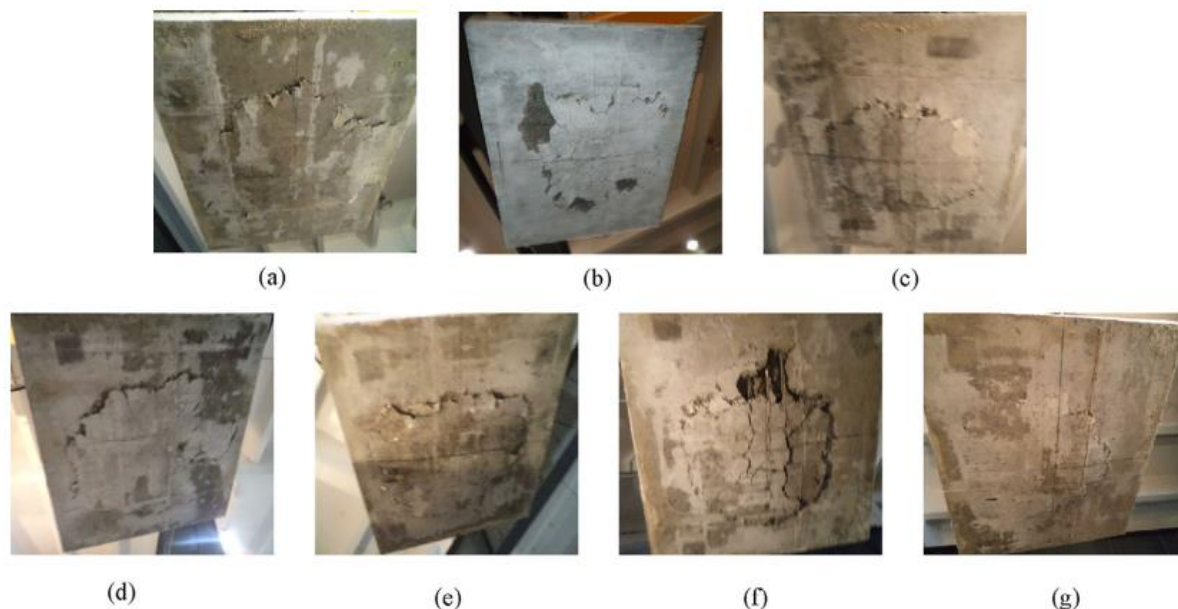


Figura 5.54 Falha de perfuração das lajes de concreto “RAC0” (a); “RAC50-0%” (b); “SFRAC50-0,5%” (c); “SFRAC50-1,0%” (d); “RAC100-0%” (e); “SFRAC100-0,5%” (f); “SFRAC100-1,0%” (g) (XIAO et al., 2019).

Conforme a Figura 5.54 e comentários dos autores do experimento, durante a ruptura por punção, o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais por reciclados

reduziu a integridade da superfície da laje, sendo significativo o fenômeno de desprendimento parcial do cone de punção, porém aumentando o teor das fibras de aço, tanto a superfície da laje quanto a integridade do cone de corte foram melhoradas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

Este estudo visou verificar se a modelagem numérica tridimensional de lajes de pavimento rígido e lajes lisas de concreto armado com agregado reciclado e fibras de aço gerava resultados a respeito do comportamento mecânico dessas estruturas semelhantes às respostas experimentais obtidas por outros pesquisadores, destacando que as análises numéricas foram realizadas através do programa de elementos finitos em MATLAB®, cujo código possuía informações como o modelo de dano à tração do concreto, o modelo constitutivo das barras e fibras de aço e também os parâmetros de acoplamento para compatibilização de malhas não conformes.

De acordo com os primeiros resultados numéricos apresentados nessa dissertação, para as lajes de concreto de pavimento rígido sem fibras de aço, a aplicação de carga em sua borda média causou falha pelo mecanismo de flexão. Ressalta-se que ao substituir agregados naturais por reciclados, nos parâmetros de resistência do concreto ocorreu uma diminuição da resistência à tração direta e um aumento da energia de fratura, gerando assim uma compensação, responsável por fazer a laje com agregado reciclado apresentar carga de pico semelhante à da laje com agregado natural. Todavia, com o aumento do teor de fibras de aço ocorreu melhora na carga última de flexão, ductilidade e dissipação de energia das estruturas.

Os segundos resultados numéricos deste estudo foram em relação a lajes de concreto de pavimento rígido com e sem fibras de aço, também carregadas em sua borda média, porém com agregados reciclados provindos da britagem de concretos com resistências normal e alta. Importante ressaltar que para estas lajes não houve a compensação nos valores de parâmetros de resistência do concreto como no caso anterior, ou seja, ao substituir agregado natural por reciclado, tanto a resistência à tração, quanto a energia de fratura diminuíram, o que gerou diferentes influências no comportamento mecânico das lajes.

Neste caso e considerando as estruturas sem fibras, foi notado que as lajes tiveram ruptura por flexão e que o aumento da substituição de agregados naturais por reciclados causou redução na capacidade de carga última de flexão, ductilidade e dissipação de energia, de modo geral. Ao considerar então a resistência do concreto que gerava o agregado reciclado, percebeu-se que tais propriedades foram maiores para as lajes que possuíam agregados provenientes da britagem do concreto de alta resistência. Na comparação de lajes com o mesmo de tipo de agregado reciclado, as que apresentam parcialmente agregado natural possuíam propriedades

melhores do que aquelas com constituição completa de agregado reciclado. Com a adição de fibras de aço, verificou-se que a maior carga última de flexão foi a da laje com maior teor de fibra (1,0%), composta por duas camadas de concreto, uma com agregado natural e outra com agregado reciclado resultante da britagem do concreto de alta resistência.

Os últimos resultados discutidos foram referentes ao estudo da punção em lajes lisas de concreto armado com agregado reciclado e fibras de aço. As respostas numéricas indicaram que a substituição de agregados naturais por reciclados diminuiu o valor da carga final de perfuração e da dissipação de energia das lajes. Entretanto, a adição das fibras de aço não só reverteu este efeito negativo como também, através do aumento de seu teor, melhorou a ductilidade, a integridade do cone de corte e auxiliou na mudança do padrão de falha por punção para o de flexo-punção.

Desta forma, conclui-se que as respostas numéricas reproduziram bem os resultados experimentais, permitindo assim a validação da metodologia aplicada e tornando possível sua utilização em outros casos que exijam a previsão do comportamento mecânico de pavimentos rodoviários, lajes lisas ou outro tipo de estrutura com agregado reciclado e fibras de aço.

6.2 Trabalhos futuros

Um dos objetivos específicos desta pesquisa foi verificar se a modelagem tridimensional utilizada era capaz de representar o comportamento ao puncionamento de lajes lisas de concreto armado e, através dos resultados obtidos, conclui-se que o modelo possui esta capacidade, permitindo assim estudos futuros mais aprofundados e relacionados à ruptura por punção em outros tipos de laje ou até mesmo em pisos industriais. Adaptações no modelo numérico são também bem vindas, pois assim seria possível a modelagem com outras variedades de fibras, como as de basalto, polipropileno e vidro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, jun. 2018.

ALBERTE, E. P. V.; HANDRO, J. B. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 305–320, set. 2021.

ALOTAIBI, E. et al. Prediction of Punching Shear Capacity for Fiber-Reinforced Concrete Slabs Using Neuro-Nomographs Constructed by Machine Learning. **Journal of Structural Engineering**, v. 147, n. 6, jun. 2021.

ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. DE. Concreto com agregados reciclados. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, p. 1731-1767, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

BAI, G. et al. An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 240, p. 117978, abr. 2020.

BITENCOURT, L. A. G. et al. A coupling technique for non-matching finite element meshes. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 290, p. 19–44, jun. 2015.

BITENCOURT, L. A. G. et al. Modeling reinforced concrete structures using coupling finite elements for discrete representation of reinforcements. **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 149, p. 32–44, set. 2018.

BRAND, A. S.; AMIRKHANIAN, A. N.; ROESLER, J. R. Flexural Capacity of Full-Depth and Two-Lift Concrete Slabs with Recycled Aggregates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2456, n. 1, p. 64–72, 1 jan. 2014.

BRAND, A. S.; AMIRKHANIAN, A. N.; ROESLER, J. R. **Flexural capacity of rigid pavement concrete slabs with recycled aggregates**. 2013.

CARNEIRO, J. A. et al. Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 65–72, fev. 2014.

CASUCCIO, M. et al. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1500–1506, jul. 2008.

CERVERA, M.; OLIVER, J.; MANZOLI, O. A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 25, n. 9, p. 987–1010, set. 1996.

CHAN, R. et al. Analysis of potential use of fibre reinforced recycled aggregate concrete for sustainable pavements. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 183–191, maio 2019.

CHOUBEY, R. K.; KUMAR, S.; CHAKRADHARA RAO, M. Modeling of fracture parameters for crack propagation in recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 168–178, mar. 2016.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP model code 1990: Design code**. Thomas Telford Publishing, 1993.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, jan. 2018.

FERREIRA, M. DE P.; OLIVEIRA, D. R. C. DE. Contribuição ao estudo de lajes lisas unidirecionais de concreto armado com pilares retangulares ao puncionamento. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 4, p. 621–628, dez. 2007.

FRASSON JR, D. et al. Restauração de Pavimento em Pista simples com Whitetopping - SC 114. **Revista Estradas - Sociedade dos Técnicos Universitários do DAER**, n. 25, out. 2020.

GAEDICKE, C.; ROESLER, J.; EVANGELISTA, F. Three-dimensional cohesive crack model prediction of the flexural capacity of concrete slabs on soil. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 94, p. 1–12, nov. 2012.

GAO, D.; ZHANG, L. Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 126–136, jan. 2018.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 429–437, abr. 2008.

INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Lausanne: Ernst & Sohn, 2013.

JUHASZ, P. K.; SCHAUL, P. Design of Industrial Floors—TR34 and Finite Element Analysis (Part 2). **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 13, n. 8, 28 ago. 2019.

MADUABUCHUKWU NWAKAIRE, C. et al. Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117444, fev. 2020.

MIKHAILENKO, P. et al. Durability and surface properties of low-noise pavements with recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, p. 128788, out. 2021.

MOHD TAHIR, M. F. et al. Potential of industrial By-Products based geopolymer for rigid concrete pavement application. **Construction and Building Materials**, v. 344, p. 128190, ago. 2022.

MUSSE, T. H. et al. Punching shear in concrete reinforced flat slabs with steel fibers and shear reinforcement. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1110–1121, out. 2018.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2010. ISBN 978-0-273-73219-8.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. ISBN 978-85-8260-366-6.

NOVAK, J. et al. Study on pervious recycled aggregate fiber-reinforced concrete for airfield pavement. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 770, n. 1, p. 012040, 1 fev. 2020.

OLIVER, J.; HUESPE, A. E.; CANTE, J. C. An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 197, n. 21–24, p. 1865–1889, abr. 2008.

PALURI, Y. et al. Effect of fibres on the strength and toughness characteristics of recycled aggregate concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 2537–2540, 2021.

PALURI, Y. et al. Flexural Fatigue Behavior of Steel Fiber-Reinforced Reclaimed Asphalt Pavement–Based Concrete: An Experimental Study. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 26, n. 1, p. 04020053, fev. 2021.

PRÁTICA RECOMENDADA: **ABNT PR 1011: Projeto de pavimentos urbanos em concreto** / Associação Brasileira de Normas Técnicas. – Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

RODRIGUES, E. A. et al. A concurrent multiscale approach for modeling recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 121040, jan. 2021.

SIMO, J. C.; HUGHES, T. J. R. Computational inelasticity. Springer-Verlag New York. 1998.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 349–365, set. 2018.

TRINDADE, Y. T. et al. Design of SFRC members aided by a multiscale model: Part I – Predicting the post-cracking parameters. **Composite Structures**, v. 241, p. 112078, jun. 2020.

TULADHAR, R.; MARSHALL, A.; SIVAKUGAN, N. Use of recycled concrete aggregate for pavement construction. Em: **Advances in Construction and Demolition Waste Recycling**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 181–197.

WANG, B. et al. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, p. 105565, ago. 2021.

WANG, C. et al. Unloading and reloading stress-strain relationship of recycled aggregate concrete reinforced with steel/polypropylene fibers under uniaxial low-cycle loadings. **Cement and Concrete Composites**, v. 131, p. 104597, ago. 2022.

XIAO, J. et al. Punching shear behavior of recycled aggregate concrete slabs with and without steel fibres. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 13, n. 3, p. 725–740, 5 jun. 2019.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, CH. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1187–1194, jun. 2005.

XIE, J. et al. Advances on properties of fiber reinforced recycled aggregate concrete: Experiments and models. **Construction and Building Materials**, v. 277, p. 122345, mar. 2021.