

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FRATURAMENTO EM VIGAS DE CONCRETO  
COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE PET**

**ANA CAROLINA MORATO TEIXEIRA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
AGOSTO DE 2025**

ANA CAROLINA MORATO TEIXEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FRATURAMENTO EM VIGAS DE  
CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO  
COM FIBRAS DE PET**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para a obtenção de  
título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. D. Sc. Niander Aguiar Cerqueira

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

AGOSTO DE 2025

### FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

T266

Teixeira, Ana Carolina Morato.

Análise Experimental do Fraturamento em Vigas de Concreto com Agregado Graúdo Reciclado Reforçado com Fibras de PET / Ana Carolina Morato Teixeira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

213 f. : il.

Bibliografia: 162 - 172.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.

Orientador: Niander Aguiar Cerqueira.

1. fibras de PET. 2. agregado graúdo reciclado. 3. mecânica da fratura. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624


ANA CAROLINA MORATO TEIXEIRA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FRATURAMENTO EM VIGAS DE  
CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO  
COM FIBRAS DE PET**

Dissertação apresentada ao Centro de  
Ciência e Tecnologia da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para a obtenção de  
título de Mestre em Engenharia Civil.


Aprovada em 05/08/2025.

**MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 **NIANDER AGUIAR CERQUEIRA**  
Data: 22/10/2025 09:33:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. D. Sc. Niander Aguiar Cerqueira (Orientador – UENF / LECIV)

Documento assinado digitalmente  
 **DYLMAR PENTEADO DIAS**  
Data: 22/10/2025 09:46:43-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. D. Sc. Dylmar Penteado Dias (UENF / LECIV)

Documento assinado digitalmente  
 **SERGIO LUIS GONZALEZ GARCIA**  
Data: 22/10/2025 16:48:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. D. Sc. Sergio Luis González Garcia (UENF / LECIV)

Documento assinado digitalmente  
 **EDUARDO ATEM DE CARVALHO**  
Data: 22/10/2025 14:19:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. D. Sc. Eduardo Atem de Carvalho (UENF / LAMAV)

Documento assinado digitalmente  
 **ANDRE LUIS CHRISTOFORO**  
Data: 22/10/2025 09:29:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. D. Sc. André Luis Christoforo (UFSCAR / DECIV)

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e ofereceram o suporte necessário.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter estado comigo em cada passo desta jornada. Sua presença constante sustentou-me nos momentos de incerteza, iluminou meu caminho e concedeu-me força, discernimento e sabedoria.

Aos meus pais, Amaury e Jucineide, meu eterno reconhecimento pelo amor, pelo incentivo diário e pelos valores que me transmitiram ao longo da vida — pilares de dedicação, honestidade e resiliência. À minha irmã, Ana Beatriz, agradeço pelo apoio constante, pelas palavras de encorajamento e pelas orações que tanto me fortaleceram.

Ao meu orientador, professor Niander Aguiar Cerqueira, agradeço pela dedicação, paciência nos momentos de dificuldade e constante disponibilidade ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e comprometimento foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Ao professor Guilherme Chagas Cordeiro, agradeço pelo empréstimo do desfiador, bem como pelas recomendações.

Ao professor Sergio Luis González Garcia, minha gratidão pelo apoio na oficina de estruturas.

Ao professor Eduardo Atem de Carvalho, agradeço pela colaboração nos ensaios, pelo conhecimento compartilhado e pela atenção dedicada ao estudo.

Ao professor Alessandro da Silva Rolin, pelo suporte oferecido na etapa de modelagem numérica.

Aos colegas de mestrado Luiz Henrique, Jhonatan, Keize e José Carlos, bem como aos bolsistas do LECIV, deixo meu sincero agradecimento pela ajuda prática em diferentes fases do estudo experimental, pelas trocas de conhecimento e pela parceria diária.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), sou grata pela infraestrutura e pelos recursos financeiros disponibilizados.

Por fim, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta etapa da minha vida acadêmica, expresso minha mais sincera gratidão. Cada gesto, por menor que parecesse, teve grande significado para mim.

"Confie no SENHOR de todo o coração e não se apoie na sua própria inteligência. Lembre de Deus em tudo o que fizer, e ele lhe mostrará o caminho certo." (Provérbios 3:5-6, NTLH)

## RESUMO

Este trabalho investiga o comportamento estrutural à fratura de concretos reforçados com fibras recicladas de polietileno tereftalato (PET) e agregado graúdo reciclado, avaliando quatro diferentes teores de fibra: 0%, 0,5%, 1% e 1,25% em volume de concreto, por meio de ensaios de flexão a três pontos em vigas entalhadas. Os ensaios seguiram os procedimentos da norma RILEM TC 50-FMC para determinação da energia de fratura, e da norma RILEM TC 89-FMT para determinação dos parâmetros  $K_{Ic}$  (fator de intensidade de tensão crítico) e  $CTOD_c$  (*Crack Tip Opening Displacement*). Adicionalmente, empregou-se a técnica de DIC (*Digital Image Correlation*) para análise dos campos de deslocamento, processados no *software* Zeiss Inspect. Observou-se que a adição de fibras de PET reciclado promoveu aumento na energia de fratura: os valores médios passaram de 95,05 N/m no concreto de referência para 143,95 N/m, 129,91 N/m e 148,55 N/m nas vigas com 0,5%, 1% e 1,25% de fibra, respectivamente. O parâmetro  $CTOD_c$  também aumentou, com valores médios de 0,0055 mm (MB-R), 0,0067 mm (MB-0,5), 0,0079 mm (MB-1) e 0,0094 mm (MB-1,25), sugerindo ganho moderado de ductilidade. Os valores de  $K_{Ic}$  também apresentaram evolução: 1,38 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-R), 1,44 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-0,5), 1,59 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-1) e 1,60 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-1,25), indicando maior resistência à propagação da trinca nas vigas com fibras. Além disso, os concretos com fibras apresentaram ruptura mais branda e progressiva, com melhor redistribuição de tensões após o pico de carga. A utilização do agregado graúdo reciclado, embora tenha gerado maior variabilidade nos resultados, não comprometeu o desempenho global das vigas. Este estudo evidencia que a adição de fibras de PET melhora a tenacidade e a resistência à fratura do concreto. O Método A (RILEM TC 50-FMC) mostrou-se adequado para avaliar o ganho global de energia de fratura, destacando o efeito da fibra de PET reciclado na absorção de energia e na mudança de comportamento do concreto. Já o Método B (RILEM TC 89-FMT) apresentou maior sensibilidade à propagação de fissuras, permitindo caracterizar parâmetros fundamentais. Dessa forma, a aplicação conjunta dos dois métodos proporcionou visão mais abrangente do processo de fraturamento, evidenciando tanto os ganhos globais de tenacidade quanto os mecanismos locais de redistribuição de tensões.

**Palavras-chave:** fibras de PET, agregado graúdo reciclado, mecânica da fratura.

## ABSTRACT

This study investigates the fracture behavior of concretes reinforced with recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers and recycled coarse aggregate, evaluating four different fiber contents: 0%, 0.5%, 1%, and 1.25% by concrete volume, through three-point bending tests on notched beams. The tests followed the procedures of RILEM TC 50-FMC for determining the fracture energy and RILEM TC 89-FMT for determining the parameters  $K_{IC}$  (critical stress intensity factor) and  $CTOD_c$  (Crack Tip Opening Displacement). Additionally, the Digital Image Correlation (DIC) technique was employed for the analysis of displacement fields, processed using the Zeiss Inspect software. It was observed that the addition of recycled PET fibers promoted an increase in fracture energy: the average values rose from 95.05 N/m in the reference concrete to 143.95 N/m, 129.91 N/m, and 148.55 N/m in the beams with 0.5%, 1%, and 1.25% fiber, respectively. The  $CTOD_c$  parameter also increased, with average values of 0.0055 mm (MB-R), 0.0067 mm (MB-0.5), 0.0079 mm (MB-1), and 0.0094 mm (MB-1.25), suggesting a moderate gain in ductility. The  $K_{IC}$  values also evolved: 1.38 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-R), 1.44 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-0.5), 1.59 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-1), and 1.60 MPa·m<sup>1/2</sup> (MB-1.25), indicating greater resistance to crack propagation in the beams with fibers. In addition, concretes with fibers presented a milder and more progressive failure, with improved stress redistribution after peak load. The use of recycled coarse aggregate, although leading to greater variability in results, did not compromise the overall performance of the beams. This study demonstrates that the addition of PET fibers enhances the toughness and fracture resistance of concrete. Method A (RILEM TC 50-FMC) proved suitable for assessing the global fracture energy gain, highlighting the effect of recycled PET fiber on energy absorption and the change in concrete behavior. Method B (RILEM TC 89-FMT), in turn, showed greater sensitivity to crack propagation, enabling the characterization of fundamental parameters. Thus, the combined application of both methods provided a broader understanding of the fracture process, evidencing both the global toughness gains and the local mechanisms of stress redistribution.

**Keywords:** PET fibers, recycled coarse aggregate, fracture mechanics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mecanismo de aumento da tenacidade à flexão do concreto com fibras.	23
Figura 2 – <i>Spalling</i> do concreto em situação de incêndio.	24
Figura 3 – Documentos por área temática de 2014 a 2024 ( <i>PET, fibre, recycled e aggregate</i> ).	26
Figura 4 – Modelo de análise de elementos finitos de concreto trifásico e malha de elementos finitos.	36
Figura 5 – Fases do concreto com agregado reciclado.	38
Figura 6 – Navio Tanque S.S. Schenectady (série Liberty).	43
Figura 7 – Gráfico dos valores de densidade à temperatura ambiente para metais, cerâmicas, polímeros e materiais compósitos.	45
Figura 8 – Modos de solicitação ao fraturamento: Modo I (a), Modo II (b) e Modo III (c).	47
Figura 9 – Entalhe elíptico em uma placa plana.	47
Figura 10 – Modelo fictício proposto por Hillerborg.	50
Figura 11 – Esquema do ensaio de viga entalhada.	51
Figura 12 – Ensaio de flexão a três pontos normatizado (dimensões em mm).	52
Figura 13 – Suportes e arranjo dos carregamentos (Método A).	55
Figura 14 – Curva carga-deslocamento.	56
Figura 15 – Esquema de entalhe (Método B).	58
Figura 16 – Gráfico carga-CMOD.	59
Figura 17 – Deslocamentos nodais de elementos finitos triangulares.	63
Figura 18 – Disposição das fibras na matriz de concreto.	64
Figura 19 – Esquema de malha e elementos finitos para as vigas modeladas elaborada por Matos.	65
Figura 20 – Distribuição de fibras na malha de elementos finitos.	66
Figura 21 – Malha de elementos finitos da viga entalhada.	68
Figura 22 – Viga de concreto armado no <i>software</i> ANSYS.	72
Figura 23 – Modelo constitutivo para o concreto.	74
Figura 24 – Método A: dimensões da viga.	76
Figura 25 – Método B: dimensões da viga.	77
Figura 26 – Agregado reciclado antes e depois do processamento no britador de mandíbulas.	81

Figura 27 – Peneiras 12,5 mm e 4,75 mm utilizadas para obtenção de brita 0.....	81
Figura 28 – Material retido na peneira 12,5 mm.....	82
Figura 29 – Separação do agregado graúdo reciclado: a) material selecionado; b) fração descartada.....	82
Figura 30 – Área útil da garrafa PET.....	86
Figura 31 – Desfiador de fibras de PET a partir de garrafas.....	86
Figura 32 – Fibras de PET após o processo de desfiamento e corte.....	87
Figura 33 – Diagrama para obtenção de estimativa da taxa de evaporação.....	89
Figura 34 – Mistura do concreto realizada em betoneira.....	90
Figura 35 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura.....	90
Figura 36 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	91
Figura 37 – Moldagem das vigas (MA-R).....	92
Figura 38 – Processo de cura inicial do concreto.....	93
Figura 39 – Vigas após 24h da concretagem.....	93
Figura 40 – Cura úmida dos corpos de prova.....	93
Figura 41 – Aplicação de tinta branca nas vigas.....	94
Figura 42 – Preparação da superfície dos corpos de prova para aplicação da técnica CID.....	95
Figura 43 – Processo de entalhe das vigas.....	96
Figura 44 – Sequências de discos testados para realização dos entalhes.....	96
Figura 45 – Espessura e altura do entalhe.....	97
Figura 46 – <i>Strain gage</i> – Tipo 1 – KC-70-120-A1-11.....	98
Figura 47 – <i>Strain gage</i> – Tipo 2 – BF120-100AA.....	98
Figura 48 – <i>Strain gage</i> – Tipo 3 – BF120-50AA.....	98
Figura 49 – Terminal D-75.....	99
Figura 50 – Marcação para colagem de <i>strain gage</i> (dimensões em mm).....	101
Figura 51 – Utilização de lupa para posicionamento de <i>strain gage</i> .....	102
Figura 52 – <i>Strain gage</i> após aplicação de cola.....	102
Figura 53 – Processo para secagem dos extensômetros e terminais.....	103
Figura 54 – Aplicação de pasta para solda.....	103
Figura 55 – Procedimento de soldagem dos fios nos terminais dos extensômetros.....	103
Figura 56 – Soldagem dos fios ao terminal.....	104

Figura 57 – Conferência da resistência de <i>strain gage</i> .	104
Figura 58 – Filme de PVC para proteger extensômetros e terminais.	105
Figura 59 – Máquina universal de ensaios Instron 5582.	105
Figura 60 – Apoios para as vigas do Método B.	106
Figura 61 – Interface do <i>software</i> DigiCamControl® na captura de imagens para DIC.	106
Figura 62 – Interface do <i>software</i> Zeiss Inspect (viga MA-1,25-2e).	107
Figura 63 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels.	108
Figura 64 – Indicador e registrador de deformações.	108
Figura 65 – Interface do <i>software</i> Bluehill® utilizado nos ensaios de flexão.	109
Figura 66 – Malha <i>Hex Dominant</i> da viga do Método A.	110
Figura 67 – Malha <i>Hex Dominant</i> da viga do Método B.	110
Figura 68 – Malha <i>Tetrahedrons</i> da viga do Método B.	111
Figura 69 – Trinca pré-malhada da viga do Método B.	112
Figura 70 – Energia de fratura média com erro padrão das vigas do Método A (com entalhe).	117
Figura 71 – Curva força x deslocamento das vigas MA-R (com entalhe).	120
Figura 72 – Curva força x deslocamento das vigas MA-0,5 (com entalhe).	121
Figura 73 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1 (com entalhe).	122
Figura 74 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1,25 (com entalhe).	123
Figura 75 – Energia de fratura x força máxima para as vigas do Método A (com entalhe).	124
Figura 76 – Curva força x deformação das vigas MA (com entalhe e com <i>strain gage</i> ).	125
Figura 77 – Curva força x deslocamento das vigas MA (com entalhe) – ANSYS.	127
Figura 78 – Curva força x deslocamento das vigas MA-R (sem entalhe).	128
Figura 79 – Curva força x deslocamento das vigas MA-0,5 (sem entalhe).	130
Figura 80 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1 (sem entalhe).	130
Figura 81 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1,25 (sem entalhe).	131
Figura 82 – Curva força x deformação das vigas MA (sem entalhe e com <i>strain gage</i> ).	132
Figura 83 – Carga média máxima média com erro padrão das vigas do Método A (sem entalhe).	133

Figura 84 – Viga MB-R-4e após ensaio de flexão.....	138
Figura 85 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-2e.....	140
Figura 86 – Viga MB-0,5-4e após ensaio de flexão.....	141
Figura 87 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-4e.....	141
Figura 88 – Viga MB-1-1e após ensaio de flexão.....	142
Figura 89 – Curva força x CMOD da viga MB-1-1e.....	142
Figura 90 – Curva força x CMOD das vigas MB-1,25-3e e MB-1,25-4e.....	143
Figura 91 – Curva força x CMOD das vigas MB-1,25-4e. ....	144
Figura 92 – Viga MB-1,25-2e após ensaio de flexão.....	145
Figura 93 – Curva força x deformação das vigas MB-R-2e e MB-0,5-2e (com entalhe e com <i>strain gage</i> ).....	146
Figura 94 – Carga máxima média com erro padrão das vigas do Método B (sem entalhe). ....	149
Figura 95 – Curva força x deslocamento das vigas MB-R (sem entalhe).....	150
Figura 96 – Viga MB-R-5 após ensaio de flexão. ....	150
Figura 97 – Curva força x deslocamento das vigas MB-0,5 (sem entalhe). ....	151
Figura 98 – Viga MB-0,5-5 após ensaio de flexão.....	152
Figura 99 – Curva força x deslocamento das vigas MB-1 (sem entalhe). ....	153
Figura 100 – Viga MB-1-5 após ensaio de flexão.....	154
Figura 101 – Curva força x deslocamento das vigas MB-1,25 (sem entalhe). ....	154
Figura 102 – Viga MB-1,25-5 após ensaio de flexão.....	155
Figura 103 – Curva força x deformação das vigas MA (sem entalhe e com <i>strain gage</i> ).....	156

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classes de resistência de concretos estruturais. ....	32
Quadro 2 – Sequência das betonadas. ....	88
Quadro 3 – Vigas do Método A que receberam <i>strain gages</i> . ....	100
Quadro 4 – Vigas do Método B que receberam <i>strain gages</i> . ....	100
Quadro 5 – Diferença entre a malha <i>Hex Dominant</i> e <i>Tetrahedrons</i> . ....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos artigos por base de dados no período de 2014 a 2024.	25
Tabela 4 – Características mecânicas de diferentes fibras para CRF.....	40
Tabela 2 – Dimensões das vigas - TC 50-FCM.....	55
Tabela 3 – Dimensões das vigas - TC 89-FMT.....	58
Tabela 5 – Dimensões das vigas. ....	76
Tabela 6 – Quantitativo de vigas por método, porcentagem de fibra e presença de entalhe. ....	78
Tabela 7 – Cimento - CPV ARI RS.....	79
Tabela 8 – Agregado miúdo – areia. ....	80
Tabela 9 – Agregado graúdo reciclado. ....	80
Tabela 10 – Água.....	83
Tabela 11 – Características técnicas do aditivo superplastificante Glenium 51. ....	84
Tabela 12 – Superplastificante. ....	84
Tabela 13 – Fibras de PET.....	85
Tabela 14 – Resultados do <i>Slump Test</i> . ....	92
Tabela 15 – Dados de entrada para forças aplicadas utilizando ANSYS.....	112
Tabela 16 – Dados de entrada para modelo de elasticidade isotrópica no ANSYS. .....	113
Tabela 17 – Dados de entrada para propriedades de densidade, resistência à tração e à compressão no ANSYS.....	115
Tabela 18 – Energia de fraturamento das vigas (Método A). ....	116
Tabela 19 – Energia de fraturamento média das vigas (Método A). ....	117
Tabela 20 – Velocidade de ensaio e tempo até a carga máxima das vigas (Método A).....	119
Tabela 21 – Forças aplicadas por incremento de deslocamento nos modelos numéricos do Método A.....	127
Tabela 22 – Carga máxima das vigas do Método A (sem entalhe). ....	129
Tabela 23 – Média da carga máxima das vigas do Método A (sem entalhe). ....	129
Tabela 24 – Fator de intensidade de tensão e deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca das vigas do Método B. ....	134
Tabela 25 – Média e desvio-padrão amostral dos parâmetros das vigas do Método B. .....	135

Tabela 26 – Resultados da modelagem do Método B.....	147
Tabela 27 – Carga máxima das vigas do Método B (sem entalhe). ....	148

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ANOVA	Análise de Variância
ANSYS	<i>Analysis System</i> (Sistema de Análise)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CFRC	Compósito de Fibra de Carbono
CID	Correlação de Imagem Digital
CMOD	<i>Crack Mouth Opening Displacement</i> (Deslocamento de Abertura na Boca da Trinca)
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i> (Deslocamento de Abertura na Ponta da Trinca)
CRF	Concreto Reforçado com Fibras
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
DIC	<i>Digital Image Correlation</i> (Correlação de Imagem Digital)
EDX	Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva
EVR	Elementos de Volume Representativos
FMC	<i>Fracture Mechanics of Concrete</i> (Mecânica da Fratura do Concreto)
GFRC	Compósito de Fibra de Vidro
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OS	Poliestireno
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de Vinila
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
ZTI	Zona de Transição Interfacial

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras gregas minúsculas

$\beta$	Número de fragilidade
$\delta$	Deformação na ruptura final da viga
$\sigma_{máx,A}$	Tensão máxima no ponto A
$\sigma_n$	Tensão nominal
$\sigma_N$	Tensão nominal na falha
$\rho_c$	Massa específica
$\omega_A$	Coefficiente de variação da inclinação da linha de regressão
$\omega_C$	Coefficiente de variação do intercepto
$\omega_E$	Coefficiente de variação dos valores do módulo de elasticidade $E_c$
$\omega_X$	Coefficiente de variação dos tamanhos selecionados
$\omega_{YX}$	Coefficiente de variação dos erros

### Letras romanas minúsculas

$a_c$	Comprimento crítico efetivo da trinca
$a_0$	Profundidade inicial do entalhe
$b$	Largura da viga
$d$	Profundidade da viga
$d_0$	Constante empírica
$f_c$	Resistência à compressão do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{cm}$	Resistência média à compressão do concreto
$f_t$	Resistência à tração
$f_{yk}$	Resistência característica do aço
$g$	Aceleração da gravidade
$g(\alpha)$	Taxa de liberação de energia
$m$	Peso próprio da viga / Faixa relativa de dispersão
$m_1$	Massa da viga entre os apoios
$m_2$	Massa da parte do conjunto de carga que não está fixada na máquina

**Letras romanas maiúsculas**

$A_{lig}$	Área do ligamento
$B$	Constante empírica
$C_i$	Primeiro ciclo de carregamento
$C_u$	Medida da deformação do material ao descarregar
$E$	Módulo de elasticidade
$F(\alpha)$	Fator de forma
$G_F$	Energia de fraturamento
$H_0$	Espessura do suporte do medidor de deslocamento
$J_{IC}$	Parâmetro crítico em termos da integral J
$K_{IC}$	Tenacidade à fratura em deformação plana
$K_t$	Fator de concentração de tensão
$L$	Comprimento da viga
$M$	Massa da viga entre os suportes
$P$	Carga aplicada
$P_{máx}$	Carga máxima do ensaio
$S$	Vão de suporte da viga
$W_0$	Área sob a curva carga-deformação
$Y_j$	Pontos de dados

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>22</b>
1.1	METODOLOGIA	25
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
1.3	JUSTIFICATIVAS	28
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>31</b>
2.1	CONCRETO E MATERIAIS ALTERNATIVOS	31
2.1.1	Características principais do concreto	31
2.1.2	Características principais do politereftalato de etileno	33
2.1.3	Concreto com agregado reciclado	34
2.1.4	Concreto com incorporação de politereftalato de etileno	39
2.2	FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DA FRATURA	43
2.2.1	Critério de fratura de Griffith	45
2.2.2	Modos de fratura	46
2.2.3	Fatores de intensidade de tensão	47
2.3	MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE FRATURA	49
2.3.1	Mecânica da fratura experimental	49
2.3.2	Método A (TC 50-FCM – energia de fraturamento)	53
2.3.3	Método B (TC 89-FMT – parâmetros de fratura)	57
2.4	MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA AO CONCRETO	62
2.4.1	Modelagem numérica em concreto com fibras	63
2.4.2	Modelagem numérica da Mecânica da Fratura	67
2.5	MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE ANÁLISE	70
2.5.1	Mecânica da fratura computacional	70
2.5.2	Simulação estrutural via ANSYS	72
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>76</b>
3.1	GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA	76
3.1.1	Dimensões dos corpos de prova	76
3.1.2	Identificação dos corpos de prova	77

3.1.3	Quantitativo dos corpos de prova .....	78
3.2	MATERIAIS .....	79
3.2.1	Cimento .....	79
3.2.2	Agregado miúdo .....	79
3.2.3	Agregado graúdo .....	80
3.2.3.1	Preparação do agregado graúdo reciclado .....	80
3.2.4	Água .....	83
3.2.5	Aditivo superplastificante .....	83
3.2.6	Fibras de PET .....	85
3.2.6.1	Preparação das fibras de PET .....	86
3.3	DOSAGEM DO CONCRETO .....	87
3.4	MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	88
3.4.1	Fôrmas utilizadas na moldagem .....	88
3.4.2	Concretagem e cura dos corpos de prova .....	88
3.5	PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE E INSTRUMENTAÇÃO .....	94
3.5.1	Preparação de superfície para a análise DIC .....	94
3.5.2	Execução do entalhe .....	95
3.5.3	Instrumentação com <i>strain gages</i> .....	97
3.5.3.1	Tipos de <i>strain gages</i> utilizados.....	97
3.5.3.2	Terminais de ligação.....	99
3.5.3.3	Quantitativo de <i>strain gages</i> .....	99
3.5.3.4	Procedimento de colagem e soldagem.....	100
3.6	ENSAIOS.....	105
3.6.1	Ensaio de flexão a três pontos .....	105
3.6.2	Análise numérica .....	109
3.6.2.1	Dados de entrada da modelagem no ANSYS.....	113
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>116</b>
4.1	MÉTODO A .....	116
4.1.1	Método A – com entalhe.....	116
4.1.1.1	Método A – modelagem.....	126
4.1.2	Método A – sem entalhe.....	128
4.2	MÉTODO B .....	133
4.2.1	Método B – com entalhe.....	133
4.2.1.1	Método B – modelagem.....	146

4.2.2	Método B – sem entalhe.....	148
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>158</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	158
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	159
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>162</b>
	<b>APÊNDICE A – DESENHO DAS FÔRMAS.....</b>	<b>173</b>
	<b>APÊNDICE B – INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS DURANTE AS BETONADAS (B1, B2, B3, B5, B6 E B8) .....</b>	<b>174</b>
	<b>APÊNDICE C – SUPERFÍCIES DAS VIGAS APÓS RUPTURA .....</b>	<b>175</b>
	<b>APÊNDICE D – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO DO MÉTODO A .....</b>	<b>180</b>
	<b>APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> CMOD DO MÉTODO B.....</b>	<b>188</b>
	<b>APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO DO MÉTODO B .....</b>	<b>194</b>
	<b>APÊNDICE G – GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO DOS MÉTODOS A E B .....</b>	<b>199</b>
	<b>APÊNDICE H – PARÂMETROS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO ANSYS206</b>	
	<b>ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO CPV ARI RS .....</b>	<b>208</b>
	<b>ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES DOS <i>STRAIN GAGES</i> .....</b>	<b>209</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Mecânica da Fratura é um ramo na engenharia usada na análise da tolerância de defeitos. A aplicação dessa análise por elementos finitos desempenha importante papel no seu progresso, sendo relevante pela utilização de sofisticadas ferramentas computacionais, as quais auxiliam na identificação precisa de pontos críticos em componentes estruturais, proporcionando complemento eficaz no campo da Engenharia (Arana; González, 2002).

Houve notável avanço na compreensão de falhas dos materiais desde a Segunda Guerra Mundial e na capacidade de preveni-las, mas a crescente complexidade das tecnologias modernas tem intensificado os desafios relacionados à fratura, os quais têm sido minimizados graças aos progressos na Mecânica da Fratura (Anderson, 2017).

Esses avanços contribuem para o desenvolvimento de novos materiais e técnicas que abordam falhas estruturais. Tais inovações permitem prever, mitigar falhas e desenvolver elementos estruturais mais resistentes à fratura, melhorando assim a segurança e a confiabilidade das construções.

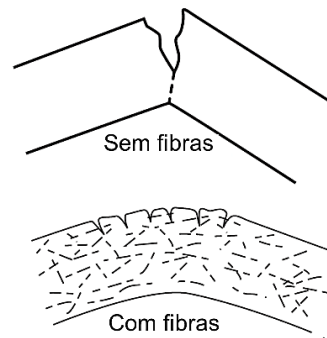
Paralelamente, têm sido investigadas tecnologias para incorporar materiais recicláveis ao concreto, como o uso de PET (politereftalato de etileno) reciclado, que, diante da expressiva quantidade descartada no meio ambiente, surge como uma alternativa sustentável ao ser empregado como fibra de reforço.

O concreto é um material compósito amplamente utilizado na construção civil devido à sua resistência mecânica, versatilidade e facilidade de moldagem. No entanto, é intrinsecamente poroso, apresentando vazios de ar e, eventualmente, microfissuras que podem surgir de retrações, variações térmicas ou esforços mecânicos. Essa porosidade facilita a penetração de agentes agressivos, como íons cloreto e sulfato. Tais agentes podem atingir as armaduras de aço e iniciar o processo de corrosão, comprometendo a durabilidade da estrutura.

Para mitigar tais patologias, têm sido aplicadas técnicas como o uso de aditivos redutores de porosidade, selantes de fissuras e incorporação de fibras no concreto. A propagação de trincas e fissuras é um fenômeno crítico que pode comprometer a integridade estrutural de edificações, reduzindo a durabilidade e aumentando a suscetibilidade a danos estruturais ao longo do tempo.

Fibras de materiais como aço, plástico e vidro, em variados formatos e tamanhos, podem ser empregadas para minimizar fissuras causadas por retração em estruturas. A incorporação dessas fibras pode aumentar a resistência à tração do concreto, limitando a propagação de microfissuras e retardando o desenvolvimento de fissuras por tensão. O concreto reforçado com fibras não falha imediatamente após a formação da primeira fissura, conforme mostra a Figura 1 (Mehta; Monteiro, 2016).

Figura 1 – Mecanismo de aumento da tenacidade à flexão do concreto com fibras.



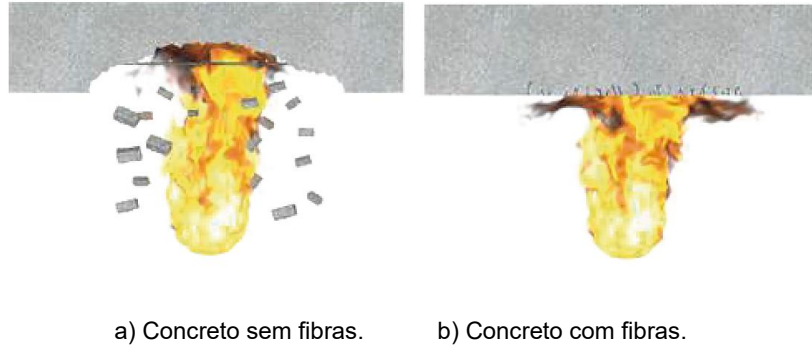
Fonte: Mehta e Monteiro, 2016.

A concentração de tensões através das fissuras causa a ruptura da matriz, levando à extensão contínua até a falha total, caracterizando o comportamento frágil do concreto. No entanto, a adição de fibras com resistência e módulo de elasticidade adequados, em quantidades apropriadas, altera esse comportamento, proporcionando ao concreto maior resistência à propagação de fissuras e reduzindo sua fragilidade (Schettino, 2015).

Uma vantagem do concreto reforçado com fibras é a sua proteção contra incêndios, pois, no concreto tradicional, a água ligada de forma física e química evapora rapidamente por causa do aumento súbito da temperatura durante um incêndio. Quanto mais densa for a matriz do concreto e maior o teor de umidade do material, maior será a pressão do vapor. Caso a pressão de vapor não seja aliviada de maneira suficientemente rápida, pode ocorrer um *spalling* do concreto (Figura 2). No entanto, a adição de fibras de PET proporciona redução significativa ou total do *spalling* do concreto devido ao seu ponto de fusão relativamente baixo, em torno de 160 °C. As fibras começam a derreter quase imediatamente após o início do incêndio, criando um sistema capilar que permite a evaporação da água sem gerar pressão interna elevada (Araújo *et al.*, 2022). Esse derretimento, ao contrário, compromete a

integridade estrutural do material, resultando em uma redução da resistência mecânica sob altas temperaturas.

Figura 2 – *Spalling* do concreto em situação de incêndio.



Fonte: SikaFiber®, 2015.

Além do uso de fibras de PET, a substituição dos agregados naturais por reciclados é outra estratégia adotada para tornar o concreto mais sustentável, contribuindo tanto para a redução da extração de recursos naturais quanto para o reaproveitamento de materiais que seriam descartados em aterros. No entanto, o emprego desses agregados apresenta desafios técnicos, como a maior porosidade, a elevada absorção de água e a variabilidade nas propriedades físicas e mecânicas, o que pode comprometer a trabalhabilidade, a durabilidade e a resistência do concreto. Ainda assim, estudos demonstram que, com a correta caracterização e dosagem dos materiais, é possível obter concretos com desempenho satisfatório para aplicações estruturais, especialmente quando combinados com o reforço por fibras, que atuam na contenção de fissuras e na melhoria do comportamento pós-fissuração (Pedro; Brito; Evangelista, 2016; YIN *et al.*, 2015).

Apesar das limitações associadas ao uso de agregados reciclados — como elevada porosidade, absorção de água e presença de argamassa aderida —, a presente pesquisa optou pela substituição de 100% do agregado grúdo natural por agregado reciclado.

Diversos estudos mostram que substituições parciais de até 30% de agregados naturais por reciclados não afetam significativamente a resistência à compressão do concreto, desde que realizados ajustes na dosagem, cura e uso de aditivos (Poon; Kou; Lam, 2004; Frigione, 2010). Todavia, níveis superiores demandam compensações técnicas, como fibras ou reforço estrutural adicional.

## 1.1 METODOLOGIA

A pesquisa teve como ponto de partida a seleção do tema, que aborda questões relacionadas à fratura em concreto. A escolha desse tema foi fundamentada na oportunidade de ampliar e disseminar conhecimentos acerca da utilização de resíduos na fabricação do concreto. Posteriormente, realizou-se revisão preliminar da literatura existente, identificando lacunas que necessitam ser investigadas.

As principais bases utilizadas para a busca dos artigos científicos foram: CAPES, Taylor & Francis Online, Scopus, SpringerLink e ScienceDirect, utilizando as palavras-chave *concrete*, *PET*, *crack* e *fibre* foram encontrados 1.529 artigos publicados de janeiro de 2014 a dezembro de 2024. Ressalta-se que foram incluídos artigos não abrangidos pela base de dados da Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição dos artigos por base de dados no período de 2014 a 2024.

Base de dados	Artigos de 2014 - 2024
CAPES	14
Taylor & Francis Online	422
Scopus	41
SpringerLink	81
ScienceDirect	971

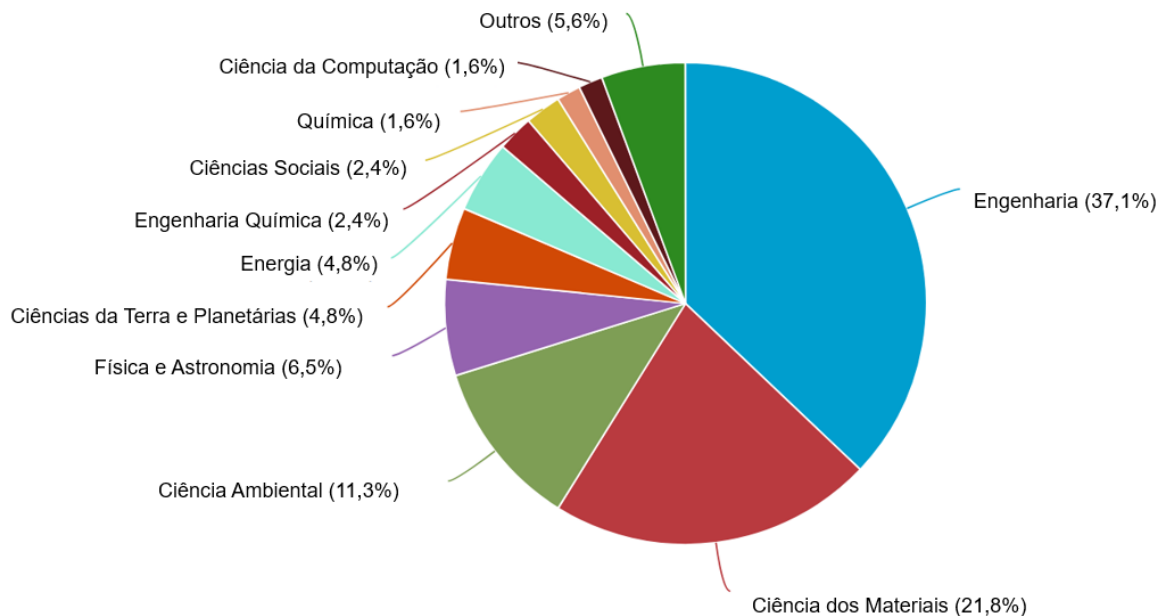
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As buscas foram conduzidas, em sua maioria, em língua inglesa, em virtude da maior abrangência de publicações disponíveis nas bases de dados internacionais consultadas. O recorte temporal de 2014 a 2024 foi estabelecido com o objetivo de concentrar a revisão em estudos recentes, alinhados aos avanços tecnológicos e metodológicos da última década.

A análise bibliográfica realizada na plataforma Scopus, com recorte temporal de 2014 a 2024, indicou a evolução do interesse científico relacionado ao uso de materiais reciclados na construção civil. A busca utilizando os termos *recycled*, *fibre*, *PET* e *aggregate* resultou em 63 publicações, demonstrando aumento moderado na quantidade de estudos envolvendo a aplicação de PET reciclado como reforço em compósitos cimentícios. No entanto, ao restringir os termos para *PET*, *fibre* e *recycled gravel*, apenas um único artigo foi identificado no mesmo intervalo de tempo,

evidenciando a escassez de pesquisas voltadas especificamente ao uso combinado de fibras de PET e agregados reciclados. A distribuição desses documentos por área temática mostra um predomínio das publicações no campo da Engenharia (37,1%), seguido pela Ciência dos Materiais (21,8%) e Ciência Ambiental (11,3%), conforme representado na Figura 3. Esse panorama reforça a relevância crescente da temática na engenharia aplicada e evidencia uma lacuna científica que justifica a importância de estudos mais aprofundados sobre a relação entre agregados reciclados e fibras de PET no concreto.

Figura 3 – Documentos por área temática de 2014 a 2024 (*PET, fibre, recycled e aggregate*).



Fonte: Scopus, 2025.

Com isso, foi estabelecido o problema de pesquisa central: “qual é o comportamento das estruturas de concreto quando são empregadas fibras de garrafas PET e agregado reciclado, levando em consideração a presença de fissuras que possam representar riscos potenciais?” Após a formulação da pergunta de pesquisa, realizou-se uma busca sistemática por estudos relevantes, verificando-se a contribuição do tema para o problema em questão.

Nessa perspectiva, a pesquisa visou abordar o comportamento de estruturas de concreto com incorporação de fibras de PET e agregado reciclado sob fratura, utilizando o *software* comercial ANSYS, que incorpora os conceitos da Mecânica da Fratura por meio do Método dos Elementos Finitos, com o objetivo de avaliar a

integridade estrutural. A modelagem numérica permitiu avaliar os efeitos da adição de fibras de PET recicladas sobre as propriedades mecânicas do concreto, com ênfase nos parâmetros de fratura.

Além da incorporação de fibras, adotou-se a substituição total (100%) do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto. Essa modificação adicionou nova dimensão à análise estrutural, exigindo uma abordagem integrada entre simulação e experimentação para compreender os efeitos combinados dos materiais reciclados no desempenho global do compósito.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O principal objetivo desta dissertação é analisar os mecanismos de fratura em concretos produzidos com fibras de PET e substituição total do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto, por meio de modelagem numérica no *software* ANSYS e validação experimental, com foco nos parâmetros de fratura.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para se atingir o objetivo geral do presente estudo, faz-se necessário os seguintes objetivos específicos:

- avaliar a influência da adição de fibras de PET e da substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado no desempenho mecânico do concreto;
- investigar os parâmetros de fratura do concreto com base no Método A da RILEM TC 50-FMC (1985), voltado à determinação da energia de fraturamento em vigas entalhadas;
- analisar os resultados experimentais segundo o Método B da RILEM TC 89-FMT (1990), para obtenção do fator de intensidade de tensão crítico e do deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca;
- estabelecer correlação entre simulações numéricas e resultados experimentais, verificando a precisão do modelo e a influência dos materiais reciclados no desempenho estrutural do concreto.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS

A Mecânica da Fratura desempenha papel crucial na engenharia estrutural, por fornecer fundamentação teórica e prática para a análise dos mecanismos de falha relacionados à propagação de trincas. Esse campo do conhecimento é essencial para a segurança, a durabilidade e o desempenho de componentes estruturais, especialmente em materiais com comportamento mecânico complexo.

Embora a literatura apresente avanços relevantes em modelagem e caracterização de concretos, ainda se observa uma lacuna quanto à correlação entre os resultados experimentais e as respostas estruturais obtidas por meio de simulações em materiais não convencionais. Este trabalho enfrentou esse desafio por meio da validação cruzada entre os ensaios físicos e os modelos computacionais, promovendo confiabilidade na interpretação dos fenômenos de fratura.

Essa escolha se justifica pela necessidade de avaliar o limite de viabilidade técnica desse tipo de material em aplicações estruturais, especialmente quando combinado com reforço por fibras de PET, que atuam na contenção de fissuras e na melhoria do comportamento pós-fissuração. Estudos como os de Silva, Brito e Veiga (2014) demonstram que, embora o desempenho de concretos com agregados reciclados possa ser inferior, é possível atingir resultados satisfatórios com adequada caracterização, correções na dosagem e uso de adições ou reforços, como as fibras.

Diante desse contexto, em que se busca equilibrar sustentabilidade e desempenho mecânico, a presente pesquisa se justifica pela análise da fratura em concretos fabricados com materiais alternativos, aliando resíduos reciclados e fibras de PET à modelagem computacional aplicada à engenharia estrutural. Nesse sentido, o *software* ANSYS possui recursos capazes de calcular e quantificar parâmetros da Mecânica da Fratura.

Portanto, esta dissertação contribui para o avanço técnico-científico da temática ao integrar diferentes metodologias e analisar o comportamento à fratura. Os dados gerados oferecem suporte para projetos futuros, ampliando o conhecimento sobre o uso de materiais reciclados em aplicações estruturais e promovendo soluções tecnicamente viáveis para o setor da Construção Civil.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, além de apêndices e anexos que complementam as informações apresentadas. A seguir, é descrito o conteúdo de cada capítulo:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Apresenta-se neste capítulo fundamentos teóricos para o desenvolvimento da pesquisa. São discutidos os principais conceitos da Mecânica da Fratura, incluindo fatores de intensidade de tensão, o critério de Griffith e os modos de fratura. Além disso, são descritos os métodos de análise utilizados (Métodos A e B) e modelagens computacionais realizadas no *software* ANSYS. Também são abordados os procedimentos experimentais aplicáveis à investigação de fratura, bem como as propriedades do concreto convencional, do concreto reforçado com fibras de PET e do concreto com agregado graúdo reciclado.

- Capítulo 3 – Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta a metodologia experimental adotada na pesquisa, incluindo a definição da geometria, identificação e quantidade de corpos de prova. São detalhados os materiais constituintes e os procedimentos de preparo do agregado graúdo reciclado e das fibras, moldagem, cura e preparação das vigas. Também são descritos a execução dos entalhes, a instrumentação com *strain gages*, o ensaio de flexão em três pontos e a preparação das superfícies para análise por DIC (*Digital Image Correlation*). Além disso, o capítulo aborda a modelagem numérica no *software* ANSYS para simular o comportamento à fratura de vigas com fibras de PET e agregado reciclado.

- Capítulo 4 – Resultados e Discussões:

Reúne-se neste capítulo os principais resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas simulações numéricas, organizados conforme os métodos de análise de fraturamento adotados. O Método A (TC 50-FCM) foi avaliado em vigas com e sem entalhe, com base nos gráficos de força versus deslocamento, enquanto o Método B (TC 89-FMT) foi analisado a partir dos parâmetros de fratura extraídos dos gráficos força-CMOD, também com e sem entalhe.

- Capítulo 5 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Além das conclusões apresentadas, são apresentadas recomendações para pesquisas futuras, considerando as limitações identificadas no estudo e as possibilidades de aprofundamento no tema.

- Referências

Reúne todas as obras consultadas para a fundamentação teórica e elaboração do trabalho.

- Apêndices e anexos

Incluem informações complementares relevantes, como os desenhos das fôrmas, imagens das vigas após ruptura, gráficos dos ensaios e resultados das simulações no ANSYS. Os anexos apresentam especificações dos materiais utilizados, incluindo composição e propriedades do cimento e dados dos *strain gages*.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que fundamenta a pesquisa, com foco em estudos sobre modelagem numérica de estruturas de concreto, especialmente em concretos com fibras e em abordagens da Mecânica da Fratura. São discutidos conceitos fundamentais, como fatores de intensidade de tensão, modos de fratura e o critério de Griffith, além dos principais métodos normativos utilizados para análise do fraturamento. Também são abordadas simulações estruturais via ANSYS, métodos experimentais aplicados à fratura e estudos sobre concretos modificados com fibras de PET e com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado.

### 2.1 CONCRETO E MATERIAIS ALTERNATIVOS

#### 2.1.1 Características principais do concreto

A importância do concreto como material de construção é notória desde o século XIX, pois suas propriedades físicas e químicas conferem um desempenho estrutural semelhante ao das rochas naturais (Fusco e Onishi, 2017).

O concreto é composto por uma mistura de cimento Portland, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (brita), podendo também incluir aditivos, como aceleradores ou retardadores de pega, fibras, entre outros.

##### a) Massa específica

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2023), os concretos com massa específica normal ( $\rho_c$ ), definidos como aqueles que, após secagem em estufa, apresentam massa específica entre 2000 kg/m<sup>3</sup> e 2800 kg/m<sup>3</sup>, podem ter um valor de 2500 kg/m<sup>3</sup> adotado para o cálculo do peso próprio de estruturas de concreto armado e 2400 kg/m<sup>3</sup> para concreto simples, caso a massa específica real não seja conhecida.

##### b) Resistência à compressão

A principal característica mecânica do concreto, sua resistência à compressão ( $f_c$ ), é determinada por meio de ensaios em corpos de prova cilíndricos, moldados

conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e rompidos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). A NBR 8953 (ABNT, 2015) estabelece classes de resistência do concreto para aplicações estruturais, definidas conforme os valores característicos de resistência à compressão e subdivididas em Grupos I e II, como especificado na Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de resistência de concretos estruturais.

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015).

Através da Curva Estatística de Gauss, que é um gráfico dos valores de  $f_c$  versus a quantidade de corpos de prova, são identificados dois valores fundamentais: a resistência média à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ) e a resistência característica à compressão do concreto ( $f_{ck}$ ).

#### c) Resistência à tração

A determinação da resistência à tração do concreto pode ser realizada por meio de ensaios conforme as normas técnicas NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 12142 (ABNT, 2010), que abrangem o ensaio de tração axial, o ensaio de compressão diametral e o ensaio de tração na flexão.

O concreto, caracterizado por baixa resistência à tração, é complementado pelo aço, que possui alta resistência tanto à tração quanto à compressão, resultando em uma cooperação entre os materiais para resistir aos esforços aplicados.

#### d) Módulo de elasticidade do concreto

De acordo com Parizotto (2017, p. 103) “o módulo de elasticidade ( $E$ ) é determinado pela relação entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação específica ( $\varepsilon$ ) obtidas no

ensaio de corpos de prova conforme a norma ABNT NBR 8522:2008". O ensaio leva em conta o módulo de deformação tangente inicial adquirido aos 28 dias de idade.

### 2.1.2 Características principais do politereftalato de etileno

O politereftalato de etileno é um poliéster termoplástico que se destaca por apresentar propriedades térmicas e mecânicas elevadas, razão pela qual é amplamente utilizado em diferentes setores industriais (Di Lorenzo, 2024). De acordo com Iroh (1999) o PET é um polímero cuja estrutura semicristalina resulta da presença simultânea de regiões cristalinas e amorfas. Essa configuração molecular confere ao material um conjunto de propriedades de interesse tecnológico, como rigidez, estabilidade química, boa resistência mecânica e comportamento térmico adequado para diversas aplicações. Tais características justificam a utilização do PET não na forma de fibras em estudos voltados ao seu emprego como reforço em compósitos cimentícios.

#### a) Estrutura química

O PET apresenta estrutura semicristalina, formada por regiões amorfas e cristalinas. Sua unidade repetitiva é  $-\text{[O-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O-C(O)-C}_6\text{H}_4\text{-C(O)]-}$ , com conformação molecular quase plana. O peso molecular da unidade repetitiva é 192 g/mol, e a célula unitária apresenta parâmetros:  $a = 4,56 \text{ \AA}$ ,  $b = 5,94 \text{ \AA}$ ,  $c = 10,75 \text{ \AA}$ , com ângulos  $\alpha = 98,5^\circ$ ,  $\beta = 112^\circ$  e  $\gamma = 111,5^\circ$  (Iroh, 1999; Mark *et al.*, 1985; Hall, 1984; Sperling, 1992; tadokoro, 1979).

#### b) Massa específica

A densidade do PET situa-se em torno de  $1,41 \text{ g/cm}^3$ , valor consistente com medições obtidas por difração de raios X, que apontam  $1,501 \text{ g/cm}^3$  (Hall, 1984; Mark *et al.*, 1985).

#### c) Propriedades mecânicas

O PET apresenta resistência à tração de aproximadamente 50 MPa, módulo de elasticidade em tração de 1.700 MPa e módulo de flexão de 2.000 MPa. O alongamento na ruptura é da ordem de 180%, e a deformação de escoamento é cerca de 4%. A resistência ao impacto é de 90 J/m, enquanto a dureza atinge R105 na

escala *Rockwell* (Jaquiss; Borman; Campbell, 1982; Brozenick, 1986–1987; Palys; Phillips, 1980; Rubin, 1990).

d) Absorção de água

A absorção de água do PET é inferior a 0,5% após 24 horas, característica que garante estabilidade dimensional e desempenho adequado em ambientes úmidos (Jaquiss; Borman; Campbell, 1982; Brozenick, 1986–1987; Rubin, 1990; Mark *et al.*, 1985).

e) Comportamento térmico

O calor de fusão medido é de aproximadamente 24,1 kJ/mol. O coeficiente de expansão térmica linear é da ordem de  $9,1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  (Mark *et al.*, 1985; Rubin, 1990; Sperling, 1992).

### 2.1.3 Concreto com agregado reciclado

Neste subitem foram selecionados estudos que apresentam contribuições representativas, priorizando pesquisas com abordagem experimental e modelagem numérica, que permitiram compreender efeitos da substituição parcial ou total do agregado natural por reciclado. Embora existam outros trabalhos correlatos, a escolha foi direcionada sobre aqueles que fornecem dados comparativos claros, avaliam diferentes proporções de substituição e consideram tanto propriedades globais quanto comportamento pós-fissuração.

A utilização de agregado reciclado no concreto tem se mostrado uma alternativa sustentável para a construção civil, contribuindo para a redução da extração de recursos naturais e o destino inadequado dos resíduos da construção e demolição. O agregado reciclado é obtido principalmente a partir da britagem e seleção dos resíduos provenientes de estruturas de concreto demolidas, e pode substituir total ou parcialmente o agregado gráudo natural na composição do concreto.

Diversos estudos indicam que a substituição do agregado gráudo natural por agregado reciclado afeta diretamente as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. Em geral, o concreto com agregado reciclado apresenta densidade e resistência à compressão ligeiramente inferiores quando comparados ao

convencional, devido à maior porosidade e absorção do agregado reciclado, que influencia a interface entre a matriz cimentícia e o agregado.

Yang *et al.* (2010) investigaram experimentalmente as propriedades de flexão de 27 vigas de concreto armado com agregados graúdos reciclados e 3 vigas com agregados naturais. Os resultados demonstraram que, sob condições idênticas, as vigas com agregado graúdo reciclado apresentaram deflexão no meio do vão aproximadamente 11% maior que as vigas convencionais, indicando rigidez à flexão inferior. A partir da análise dos ensaios, aqueles autores determinaram coeficientes representativos do comportamento estrutural, o coeficiente de deformação média e o coeficiente de distribuição não uniforme da deformação da armadura longitudinal de tração.

Li e Xiao (2021) investigaram o comportamento mecânico do concreto produzido com agregado reciclado de grande porte, caracterizados por tamanhos entre 25 mm e 80 mm — cerca de três vezes maior que o agregado reciclado convencional. Para isso, adotaram uma modelagem mais realista da composição do agregado, considerando a distribuição aleatória de cascalho e argamassa, e realizaram simulações com o método dos elementos discretos. Foram analisadas propriedades como resistência à compressão, morfologia das fissuras e curvas tensão-deformação sob diferentes níveis de pressão de confinamento e porcentagens de substituição por agregados reciclados. Os resultados indicaram que, mesmo sob condições de confinamento, o concreto com agregado reciclado de grande porte manteve resistência comparável ao concreto convencional, com destaque para o aumento da rigidez. A pressão de confinamento mostrou-se fator determinante na melhora do desempenho mecânico do material.

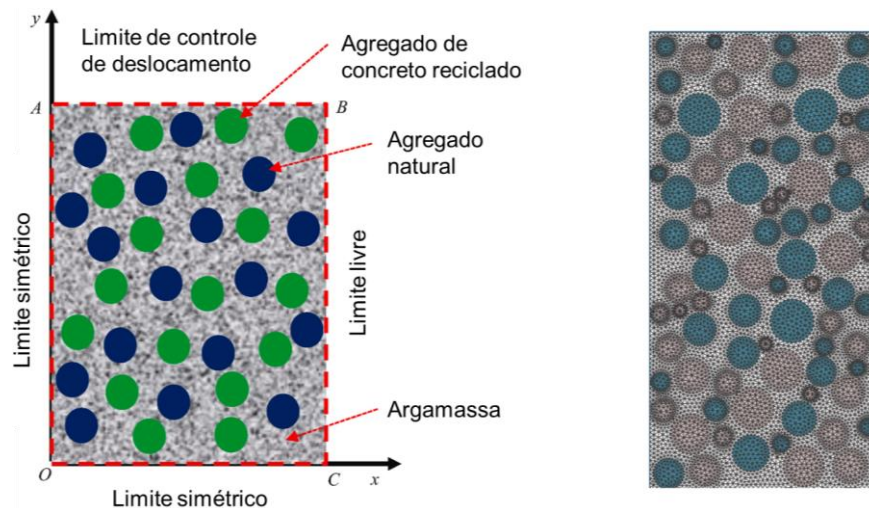
Meddah (2017) discutiu o papel dos agregados reciclados na produção de concretos, com ênfase nas implicações técnicas e ambientais de sua utilização. Ele destaca que a indústria da construção é uma das principais consumidoras de energia e recursos naturais, contribuindo para as emissões globais de dióxido de carbono, sobretudo devido à produção de cimento Portland. Nesse contexto, a substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição surge como alternativa viável para reduzir o impacto ambiental associado à extração de recursos não renováveis. O estudo aponta que as propriedades do concreto com agregados reciclados estão diretamente relacionadas à qualidade do material de origem e ao processo de reciclagem. Recomenda-se

acuidade na dosagem desses materiais, especialmente quando provenientes de concreto demolido, sugerindo-se um limite de substituição em torno de 30% para evitar perdas significativas de desempenho.

Entre os trabalhos correlatos abordados nesta revisão, destaca-se o estudo de Duraiswamy *et al.* (2024), que analisou o desempenho mecânico e a durabilidade de concretos reforçados com fibras plásticas trituradas de sacos de polietileno e garrafas PET, incorporadas em misturas com substituição total do agregado graúdo por resíduos de construção e demolição tratados. Os resultados obtidos indicaram aumento da resistência à flexão e à tração por compressão, especialmente nas dosagens de 0,25% a 1% de fibras, apesar de baixa redução na resistência à compressão. Este estudo serve como referência central para compreender os efeitos da incorporação de resíduos plásticos no concreto e fundamenta a análise dos impactos do agregado reciclado na resistência e durabilidade do material.

Li *et al.* (2024) propuseram um modelo analítico para o cálculo do módulo de elasticidade efetivo de concretos compostos por diferentes proporções de agregado natural e agregado reciclado de concreto (Figura 4).

Figura 4 – Modelo de análise de elementos finitos de concreto trifásico e malha de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de Li *et al.*, 2024.

O estudo apresentou duas formulações: uma para concretos compostos exclusivamente por um tipo de agregado (natural ou reciclado) e outra para concretos contendo uma combinação de ambos. A validade dos modelos foi verificada com base em dados experimentais da literatura e em análises por elementos finitos realizadas por eles. Os resultados indicaram que, ao se considerar o coeficiente de Poisson das

fases do concreto — argamassa, agregado natural e agregado reciclado —, o módulo de elasticidade efetivo estimado é inferior ao calculado por modelos clássicos, como o de Maxwell. O modelo trifásico proposto demonstrou ser simples e eficaz para prever a influência da substituição do agregado natural por reciclado, mostrando que o módulo de elasticidade diminui à medida que aumenta a proporção de agregado reciclado, mas tende a crescer com o aumento da rigidez desse agregado em relação ao natural.

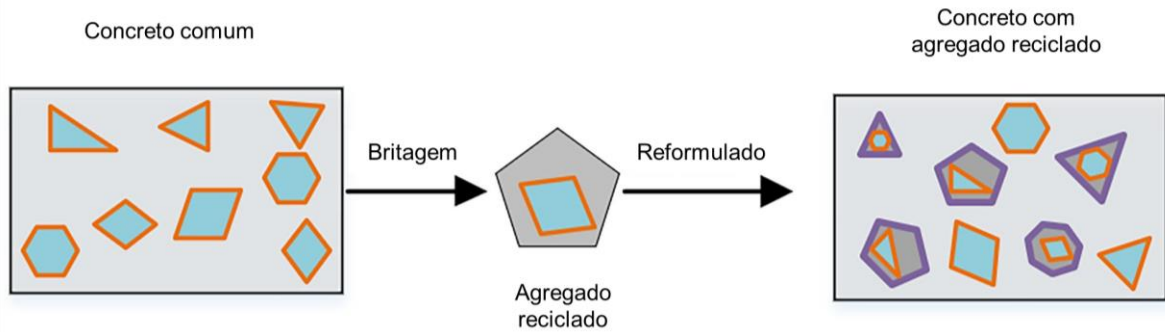
Neupane *et al.* (2025) investigaram o uso do agregado reciclado de concreto como substituto parcial e total do agregado natural no contexto do Nepal, país marcado por frequentes terremotos que geram grandes volumes de entulho de concreto. O estudo avaliou as propriedades mecânicas, padrões de fissuração e resistência de misturas com diferentes percentuais (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Foram observados aumentos na resistência à tração e à flexão, com destaque para as misturas contendo 25% e 50%.

Roknuzzaman *et al.* (2025) avaliaram o potencial de reutilização dos agregados reciclados provenientes de concreto demolido submetidos a múltiplos ciclos de reciclagem, com ênfase no desempenho mecânico do denominado concreto verde. Blocos de concreto foram fragmentados para obtenção de agregados utilizados na produção do concreto verde de primeira geração. Após o período de cura, o concreto verde foi novamente triturado para obtenção dos agregados de segunda geração, processo este reiterado até a quarta geração. Os resultados experimentais demonstraram que os agregados de segunda geração apresentaram propriedades físicas e mecânicas compatíveis com os requisitos normativos para uso em concretagem.

Han *et al.* (2025) investigaram o comportamento de fratura do concreto com agregado reciclado (Figura 5), que se distingue do concreto convencional pela presença de agregados multifásicos, que tornam o processo de fraturamento estrutural mais complexo. Utilizando dados experimentais de ensaios de flexão a três pontos, aqueles autores aplicaram técnicas de aprendizado de máquina, que demonstraram alta precisão preditiva ( $R^2$  de 0,947 e 0,989, respectivamente), porém apresentaram limitação na generalização para corpos de prova de maior escala. A relevância deste estudo reside na necessidade de métodos confiáveis que considerem as características multifásicas dos agregados reciclados para garantir segurança, durabilidade e desempenho adequado em aplicações estruturais, destacando o

potencial da inteligência artificial para a modelagem avançada de fraturas em materiais cimentícios.

Figura 5 – Fases do concreto com agregado reciclado.



Fonte: Adaptado de Han *et al.*, 2025.

Diante dos estudos apresentados, observa-se que a utilização de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais no concreto influencia diretamente as propriedades mecânicas do material, como resistência à compressão, módulo de elasticidade, rigidez e comportamento à fratura.

A literatura demonstra que, mesmo com a presença de fases múltiplas e descontinuidades inerentes aos agregados reciclados, o concreto resultante pode apresentar desempenho satisfatório em diversas aplicações, desde que se adote controle adequado de suas características físicas e mecânicas.

Ensaio experimentais e modelagens numéricas têm sido fundamentais para avaliar essas variações e propor ajustes nas formulações, possibilitando o uso técnico do concreto com agregados reciclados em elementos estruturais com desempenho confiável.

A revisão bibliográfica foi fundamental para o desenvolvimento do presente estudo, pois permitiu sua contextualização no cenário científico atual sobre o comportamento do concreto reforçado com fibras de PET.

Por meio da análise da literatura, foi possível identificar os avanços, lacunas e metodologias empregadas na caracterização mecânica e na avaliação da fratura do material. Esse levantamento bibliográfico não apenas embasou a metodologia adotada, mas também justificou a pertinência da investigação proposta diante das pesquisas existentes.

#### 2.1.4 Concreto com incorporação de politereftalato de etileno

Neste subitem apresentam-se estudos selecionados que fornecem informações experimentais e analíticas sobre o desempenho de concretos com PET, abrangendo diferentes dimensões, teores e formas de fibras. Optou-se por incluir estas pesquisas devido à sua relevância científica e detalhamento experimental, permitindo compreender de forma representativa os efeitos da adição de PET no comportamento estrutural e nas propriedades mecânicas do concreto.

A incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET) no concreto é uma área de pesquisa que tem ganhado relevância devido aos benefícios ambientais e mecânicos proporcionados por esse material reciclado. O uso de PET como reforço, por exemplo, em concretos é uma solução sustentável para a reutilização de resíduos plásticos, contribuindo para a redução da poluição ambiental e aprimoramento das propriedades do concreto.

Durante o desenvolvimento de construções de baixo custo, diversas matérias-primas têm sido empregadas para a obtenção de materiais com baixo impacto ambiental. Prevê-se aumento na utilização de materiais ecológicos em habitações nos próximos anos, visando reduzir tanto o custo quanto as emissões de CO<sub>2</sub> (Juárez *et al.*, 2015).

Os polímeros, incluindo o PET utilizado em garrafas de bebidas, são materiais não degradáveis e reconhecidos como um dos maiores problemas ambientais contemporâneos. O PET é um polímero termoplástico de uso geral, pertencente à família de polímeros de poliéster, caracterizado por sua alta flexibilidade, incoloridade e estrutura semicristalina, podendo variar de semirrígido a rígido conforme o processo de fabricação. O PET apresenta boa estabilidade dimensional, resistência ao impacto, umidade, álcoois e solventes (Asdollah-Tabar; Heidari-Rarani; Aliha, 2021).

Choi *et al.* (2005) determinaram que ao empregar resíduos de garrafas de PET como agregados para concreto, são esperados benefícios que incluem não apenas a redução do peso próprio e da absorção do concreto, mas também a mitigação da poluição ambiental e a promoção da reciclagem de recursos residuais

Fraternali *et al.* (2011) conduziram experimentos que demonstraram que o reforço do concreto com fibras de PET recicladas se qualifica como técnica eficiente para melhorar a resistência térmica, resistência à compressão e tração e ductilidade do concreto.

Foti (2013) realizou uma pesquisa empregando fibras de garrafas de PET como adição à mistura de concreto, substituindo as barras de aço como reforço em pequenas vigas. Os testes de tração realizados nas fibras resultaram em uma resistência à tração média de 160 MPa, valor comparável às fibras convencionais disponíveis no mercado para concreto reforçado com fibras (CRF), conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características mecânicas de diferentes fibras para CRF.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Diâmetro equivalente (<math>\mu m</math>)</b>	<b>Peso específico (<math>10^3 \text{ kg/m}^3</math>)</b>	<b>Módulo elástico (MPa)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento final (%)</b>
Aço	5-500	7,84	200.000	500-2.000	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,60	70.000-80.000	2.000-4.000	2-3,5
Polipropileno	20-200	0,90	5.000-7.000	500-750	8
Nylon	-	1,10	4.000	900	13-15
Carbono	9	1,90	230.000	2.600	1
Acrílico	18	1,18	14.000-19.500	400-1000	3

Fonte: Adaptado de Foti, 2013.

Saikia e Brito (2014) realizaram experimentos que demonstraram redução na densidade do concreto fresco à medida que o teor de agregado de PET aumenta, e observaram que as características de tamanho, forma e textura dos agregados de PET influenciam a relação água/cimento. Além disso, constataram que as misturas de concreto contendo diferentes tipos de agregados de PET apresentam resistência à abrasão superior à do concreto de referência. Aqueles autores enfatizaram a importância de analisar a reutilização de resíduos de PET, considerando seu desempenho a longo prazo e potenciais impactos ambientais em aplicações e condições de serviço específicas.

Hama (2020) realizou um estudo experimental sobre a utilização de resíduos plásticos como agregado miúdo no concreto para mitigar a escassez de agregados naturais e problemas relacionados ao descarte de plásticos. Avaliou-se o desempenho do concreto sob cargas de compressão e a resistência de aderência com os seguintes percentuais de substituição parcial por agregados plásticos: 0% (referência), 10%, 15%, 20% e 25%. Os resultados indicaram que o uso de agregados plásticos reduz a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, além de aumentar

a deformação pré-ruptura sob cargas de compressão em comparação com o concreto de referência. Adicionalmente, a resistência de aderência entre o concreto e a armadura de aço diminuiu com o aumento do teor de agregado plástico, especialmente para agregados de maior granulometria.

Rodrigues *et al.* (2018) investigaram os efeitos da incorporação de diferentes porcentagens de fibra de PET no concreto, visando analisar melhorias na capacidade de deformação. Para avaliar o desempenho do material, foram realizados ensaios laboratoriais de resistência mecânica, incluindo compressão axial e tração por compressão diametral. Observou-se que a adição de fibras de PET melhorou a resistência à tração em comparação ao concreto sem fibras. Contudo, a resistência à compressão apresentou valores inferiores ao concreto de referência. Não houve grande variação nos valores de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral entre os diferentes teores de fibra de PET (4,5%, 5% e 5,5%) após 28 dias de cura.

Wiswamitra *et al.* (2021) estudaram dois tipos de agregado plástico, diferenciados pelo *filler* utilizado: o primeiro sendo um agregado artificial feito de plástico de PET com cinza de casca de arroz, e o segundo com cimento pozolânico Portland. Foram preparadas quatro proporções de mistura de concreto utilizando esses dois tipos de agregado, além de um quinto tipo de concreto com frações de agregados totalmente naturais para referência. Os resultados dos testes indicam que, a partir de 100 °C, o concreto com agregado plástico começou a apresentar fissuras finas visíveis apenas em um microscópio digital. Em contrapartida, no concreto de referência as fissuras começam a aparecer a 200 °C. A presença dessas fissuras reduziu as características mecânicas do concreto. Aos 300 °C e 400 °C, os corpos de prova com agregado plástico mostram-se carbonizados devido à decomposição do PET, além de mais trincas e fendas maiores.

Mohammed, A. e Mohammed, I. (2021) realizaram um estudo experimental comparativo sobre o desempenho do concreto armado com fibra de aço e fibra de PET. Testes experimentais foram conduzidos para destacar o efeito dos parâmetros das fibras de PET, principalmente as dimensões das fibras nas propriedades mecânicas e no comportamento de arrancamento das fibras do concreto. Os resultados mostraram que a existência de fibras de PET no concreto teve influência na abertura de fissuras e na alteração do modo de falha do concreto, por ser menos frágil. Na superfície do concreto rompido, não foi observado arrancamento das fibras

de PET para o concreto submetido à tração e flexão, e os corpos de prova romperam após grande alongamento das fibras plásticas.

Assaad, Khalil e Khatib (2022) investigaram a viabilidade de reduzir a relação água/cimento e/ou incorporar fibras de aço ou látex polimérico para mitigar a queda nas propriedades estruturais de vigas de concreto armado com adições de PET. O PET utilizado, derivado de resíduos de garrafas plásticas trituradas, foi adicionado ao concreto em proporções variando de 1,5% a 4,5% em volume total. Os resultados indicaram que as propriedades simples e estruturais do concreto se degradaram com a adição de PET devido à sua natureza leve e baixa resistência em comparação com os agregados convencionais. A redução da relação água/cimento de 0,55 para 0,46 mostrou-se eficaz para refinar a porosidade da matriz e restaurar as resistências ao cisalhamento e à flexão das vigas de concreto armado.

Araújo *et al.* (2022) conduziram um estudo experimental para avaliar a eficácia das fibras de PET na matriz do concreto, com ênfase na resistência à tração no comportamento pós-fissuração. Ao comparar a resistência à compressão axial com valores de referência (0% de fibras), não houve variação significativa, preservando a integridade estrutural do concreto. As fibras de 80 mm e 100 mm proporcionaram um aumento de até 13% na resistência. Nos ensaios de tração direta, os materiais com fibras de 20 mm apresentaram perda de resistência de 25%, enquanto aqueles com fibras de 60 mm e 80 mm, com teor de 0,5% apresentaram um aumento de 10-18%. O desempenho superior foi observado com as fibras de 100 mm, que apresentaram aumento de resistência de 33% em relação ao concreto de referência, sendo eficazes nos teores de 0,18%, 0,4% e 0,5%.

Suraweera e Silva (2023) definem que o efeito das dimensões das fibras nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de PET é crucial para o desempenho e comportamento do compósito. Fibras mais longas melhoram o comportamento pós-fissuração, aumentando ductilidade e tenacidade, enquanto fibras mais curtas melhoram as propriedades mecânicas e a trabalhabilidade inicial devido à boa dispersão. Fibras de maior diâmetro aumentam as resistências à tração e à flexão, enquanto fibras de menor diâmetro reduzem a largura das fissuras. No entanto, a adição de fibras de PET geralmente diminui a resistência à compressão e a trabalhabilidade devido à formação de vazios.

## 2.2 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DA FRATURA

Kanninen e Popelar (1985) definem a Mecânica da Fratura como uma área da engenharia que quantifica as condições nas quais um corpo sólido pode falhar devido à propagação de uma trinca. Essa área origina-se da combinação de falhas catastróficas em estruturas ao longo do tempo, a qual, por sua vez, impulsionou o avanço no estudo e na melhoria da segurança e desempenho de estruturas. No contexto da integridade estrutural, tal campo da mecânica dedica-se a avaliar a formação, propagação e interrupção das fissuras e, quando relacionada no uso racional, investiga como criar e propagar fissuras de maneira controlada (Ferreira, 2019).

A propagação instável de fissuras, também referida como crescimento não controlado de trincas, é um fenômeno complexo na engenharia, caracterizado pela propagação abrupta e rápida de uma trinca ou fissura em um material sólido. A compreensão dos mecanismos por trás da propagação instável de fissuras é de suma importância, pois é essencial para o desenvolvimento de estratégias de prevenção de falhas em componentes estruturais críticos, como pontes, aeronaves e equipamentos industriais.

Um exemplo histórico da importância de uma análise rigorosa do comportamento estrutural em presença de imperfeições é o caso do navio Liberty USS Schenectady, colapsado em 1941, com os cascos partindo-se transversalmente devido à propagação descontrolada de trincas (Figura 6).

Figura 6 – Navio Tanque S.S. Schenectady (série Liberty).



Fonte: Marcomini, 2020.

No entanto, os materiais podem falhar devido a pequenos defeitos de fabricação, descontinuidades e irregularidades nas microestruturas, que são áreas potenciais de concentração de tensões. Além disso, condições externas, como variações de temperatura e impactos mecânicos, podem facilitar a propagação dessas fissuras. Assim, os princípios da Mecânica da Fratura tornam-se essenciais entre as técnicas utilizadas para avaliar a tolerância ao dano (Ferreira, 2019).

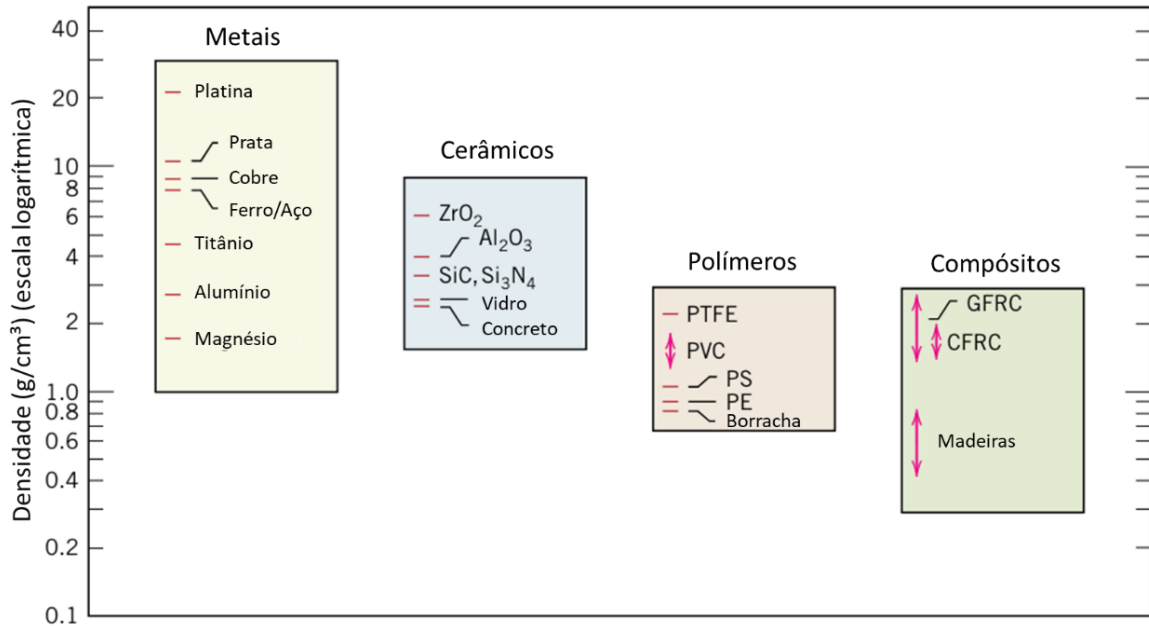
A tolerância ao dano pressupõe a presença de uma fissura inicial no material e utiliza critérios da Mecânica da Fratura para prever ciclos de propagação da fissura em função da magnitude da tensão, empregando *softwares* especializados e programas de inspeções regulares.

Os materiais usados na engenharia são vistos como meios contínuos que se deformam quando expostos a condições de carga externa, podendo ou não retornar à sua forma original, sob uma perspectiva macroscópica. Esses pressupostos, estabelecem uma abordagem na observação da estrutura e do material constituinte. Para analisá-los, divide-se as partes que constituem o sistema ou subdivide-se o meio em pequenos elementos, discretizando o problema, um processo que tipicamente é finito. As partes são denominadas elementos de volume representativos (EVR), podendo o EVR ser conceituado como uma amostra de um volume capaz de representar sua totalidade.

Para fins de análise experimental e numérica, as ordens de grandeza dos EVR variam conforme o tipo de material, assegurando uma precisão adequada na representação dos microprocessos. Para metais e cerâmicas, o EVR é tipicamente da ordem de  $0,1 \text{ mm}^3$ , enquanto para polímeros e a maioria dos compósitos é de  $1 \text{ mm}^3$  (Lemaitre, 1996).

Os materiais sólidos são categorizados de forma conveniente em quatro grupos principais, conforme ilustrado na Figura 7: metais, cerâmicos, polímeros e compósitos. Essa classificação é baseada principalmente na composição química e na estrutura atômica. Adicionalmente, existem outras classes importantes de materiais, como semicondutores e biomateriais. Os compósitos, por sua vez, consistem em combinações planejadas de dois ou mais materiais distintos (Callister; Rethwisch, 2014).

Figura 7 – Gráfico dos valores de densidade à temperatura ambiente para metais, cerâmicas, polímeros e materiais compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2014.

Na escala nanométrica ( $10^{-9}$  m –  $10^{-7}$  m) os cálculos de danos e fraturas implicam simulações atômicas de espaços vazios (poros) e geração de discordâncias, levando-se em conta tanto as dimensões dos grãos quanto a orientação e características de contorno, sendo este estágio de observação essencial para a compreensão dos principais mecanismos que influenciam o comportamento mecânico dos materiais (Ferreira, 2019).

### 2.2.1 Critério de fratura de Griffith

Por meio de uma abordagem termodinâmica, Griffith desenvolveu um embasamento teórico para antecipar a tensão nominal de fratura de sólidos que tenham trincas, estabelecendo uma relação entre a variação total na energia e a variação do tamanho da trinca em um corpo fissurado.

Griffith (1920) considerou que em um material frágil, como concreto e vidro, a diferença entre os valores teóricos e reais da resistência à fratura se explicava pela presença de pequenas fissuras no material.

Experimentalmente, ele demonstrou que, com existência mínima possível (tendendo a zero) de fissuras, a resistência observada aproxima-se da teórica, sendo

necessário explicar como a presença de trincas resultava em menor resistência, cuja explicação é que, quando uma fenda se propaga subitamente (fratura frágil), há aumento da área das faces da fenda, o que corresponde a um aumento da energia superficial exigida para superar a força de coesão dos átomos; esse aumento de energia superficial só pode ser proveniente da energia de deformação elástica (energia potencial) que é liberada quando a trinca se propaga (Quinta, 1994).

O conceito de Griffith foi associado pela primeira vez à fratura frágil de materiais metálicos por Zener e Hollomon em 1944. Logo após, Irwin observou que o balanço de energia do tipo Griffith deve ocorrer entre: (I) a energia de deformação acumulada e (II) a energia superficial somada ao trabalho realizado na deformação plástica. Irwin definiu a 'taxa de liberação de energia' ou 'força motriz da trinca' como a energia total liberada durante a trinca por unidade de aumento no tamanho da fissura (M. Janssen; Wanhill, 2006).

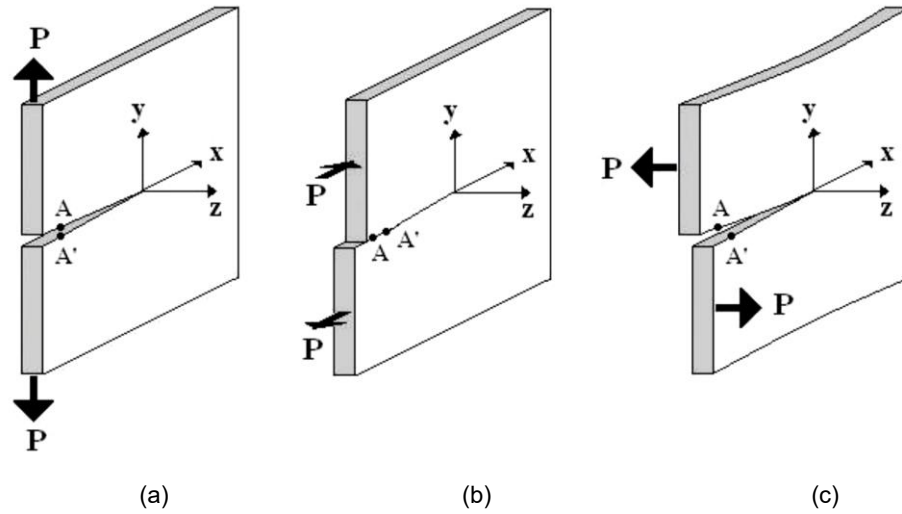
Griffith também reconheceu que, para materiais relativamente dúcteis, a energia necessária para formar novas superfícies de fratura é, geralmente, insignificante em comparação com o trabalho realizado na deformação plástica (M. Janssen; Wanhill, 2006).

### 2.2.2 Modos de fratura

De acordo com Ferreira e Hanai (2017), os modos de sollicitação ao fraturamento são distinguidos conforme os deslocamentos relativos das faces da trinca, causados pelas sollicitações externas (pontos A e A', Figura 8). Os três diferentes modos de sollicitação ao fraturamento, caracterizados pelas componentes de deslocamento,  $u$ ,  $v$  e  $w$ , que se associam sequencialmente aos eixos ortogonais  $x$ ,  $y$  e  $z$  apresentados, são:

- Modo I (abertura) – força aplicada perpendicular ao plano da trinca ( $u=0$ ;  $v \neq 0$ ;  $w=0$ );
- Modo II (escorregamento ou de cisalhamento plano) – carga tende a mover uma face da trinca em relação à outra ( $u \neq 0$ ;  $v=0$ ;  $w=0$ );
- Modo III (rasgamento ou de cisalhamento antiplano) – deslocamento das superfícies paralelo às forças ( $u=0$ ;  $v=0$ ;  $w \neq 0$ ).

Figura 8 – Modos de solicitação ao fraturamento: Modo I (a), Modo II (b) e Modo III (c).

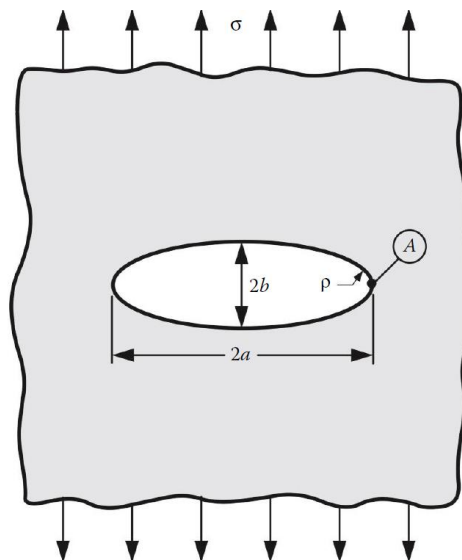


Fonte: Ferreira e Hanai, 2017.

### 2.2.3 Fatores de intensidade de tensão

Em 1913, Inglis estabeleceu o marco inicial na quantificação dos efeitos da concentração de tensão ao investigar entalhes elípticos em placas planas. A Figura 9 demonstra uma placa plana com uma trinca elíptica no centro, submetida a um carregamento uniforme conforme experimento realizado.

Figura 9 – Entalhe elíptico em uma placa plana.



Fonte: Anderson, 2017.

Durante a investigação, Inglis obteve uma expressão para calcular a tensão na extremidade do eixo maior da elipse (Equação 1), considerando a placa com

comprimento  $2a$  e largura  $2b$ , na qual uma tensão perpendicular ao eixo maior eixo é aplicada. Ele considerou que as condições de contorno da placa não são influenciadas pelo entalhe, ou seja, a largura muito maior que  $2b$  e o comprimento muito maior que  $2a$ .

$$\sigma_{m\acute{a}x,A} = \sigma_n \left( 1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (1)$$

sendo:

$\sigma_{m\acute{a}x,A}$  – tensão máxima no ponto A;

$\sigma_n$  – tensão nominal.

Nesse estudo, Inglis determinou o Fator de Concentração de Tensão ( $K_t$ ), descrita pela Equação 2:

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x,A}}{\sigma_n} = \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (2)$$

O efeito proveniente da concentração de tensões aumenta conforme o entalhe se torna mais agudo, ou seja, quanto menor for o raio de curvatura na extremidade da elipse.

A tensão máxima em A pode ser descrita como:

$$\sigma_{m\acute{a}x,A} = K_t \sigma_o = \sigma_o \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right) \quad (3)$$

Sendo  $\rho$  o raio da curvatura na ponta da elipse, calculado por:

$$\rho = \frac{b^2}{a} \quad (4)$$

Embora Inglis tenha elaborado a formulação teórica para a concentração de tensões em torno de entalhes, ele não conseguiu explicar adequadamente por que materiais frágeis, como vidro ou concreto, com entalhes agudos, nem sempre rompiam imediatamente sob carregamentos aplicados. A solução para esse fenômeno foi apresentada por Griffith (1920), que propôs um critério baseado em um princípio energético.

## **2.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE FRATURA**

### **2.3.1 Mecânica da fratura experimental**

A Mecânica da Fratura experimental é uma abordagem fundamental para avaliar o comportamento de estruturas de concreto sob carregamento, permitindo quantificar a resistência à fratura do concreto, parâmetro essencial de projeto e análise de estruturas na engenharia civil. Ensaios laboratoriais foram desenvolvidos para determinar os principais parâmetros da Mecânica da Fratura, como a taxa de liberação de energia e o fator de intensidade de tensão. Dentre eles, destacam-se os ensaios de flexão em vigas entalhadas e os ensaios de tração direta em corpos de prova entalhados, amplamente utilizados na literatura técnica (Karihaloo, 1995; Bažant; Planas, 1998).

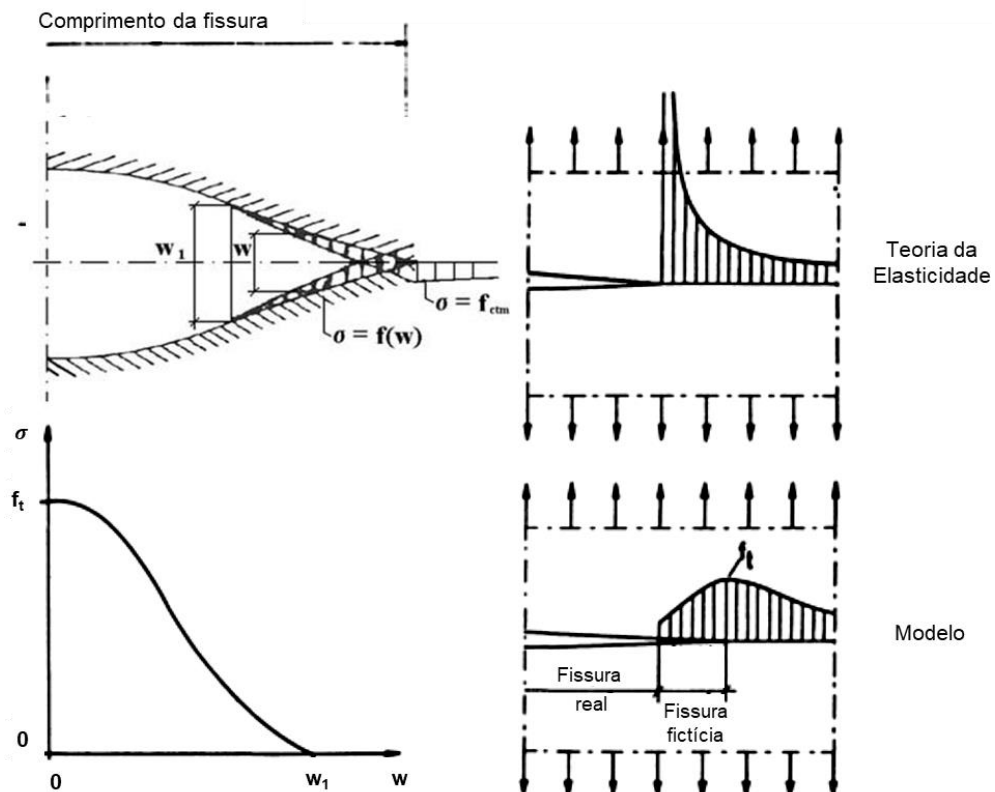
Apesar dos avanços nas técnicas experimentais, a aplicação direta dos resultados obtidos em laboratório para estruturas em escala real ainda é um desafio. Isso se deve, principalmente, às diferenças nas dimensões, taxas de carregamento e condições de contorno entre os corpos de prova e as estruturas reais. Para superar essa limitação, pesquisadores têm proposto métodos de escala baseados em análises dimensionais e na teoria da semelhança (Bažant, 1984; Bažant; Kazemi, 1990). Esses procedimentos permitem estimar o comportamento à fratura de estruturas de concreto em escala real a partir de ensaios em modelos reduzidos, desde que sejam respeitadas as leis de escala apropriadas.

A Mecânica da Fratura experimental tem sido aplicada para investigar os efeitos de diversos fatores sobre a resistência à fratura do concreto, avaliando a influência da composição do concreto (tipo de cimento, agregados, adições minerais), da idade, da umidade, da temperatura e da presença de armaduras (Shah; Swartz; Ouyang, 1995; Gettu; Bažant; Karr, 1990). Esses resultados contribuem para o

desenvolvimento de modelos constitutivos mais realistas e para o aprimoramento de procedimentos de projeto.

Hillerborg, Mod er e Peterson (1976) formularam um modelo de fratura fictícia (Figura 10) que substitui as propriedades convencionais da Mecânica da Fratura, caracterizando a zona de processo de fratura por uma rela o entre a tensão normal e a abertura da fissura, considerada uma propriedade intrínseca do material.

Figura 10 – Modelo fictício proposto por Hillerborg.



Fonte: Adaptado de Elfgr n e Shah, 1989.

Ribeiro e Rodrigues (2009) consideram que a energia de fratura   relevante para o projeto de grandes estruturas de concreto, pois avalia a resistência   propaga o de trincas. A energia de fratura pode ser definida como o esforço médio por unidade de área projetada de fratura necessário para propagar uma fissura, representando a soma das energias associadas a distintos mecanismos de absor o ou dissip o durante o processo de fraturamento.

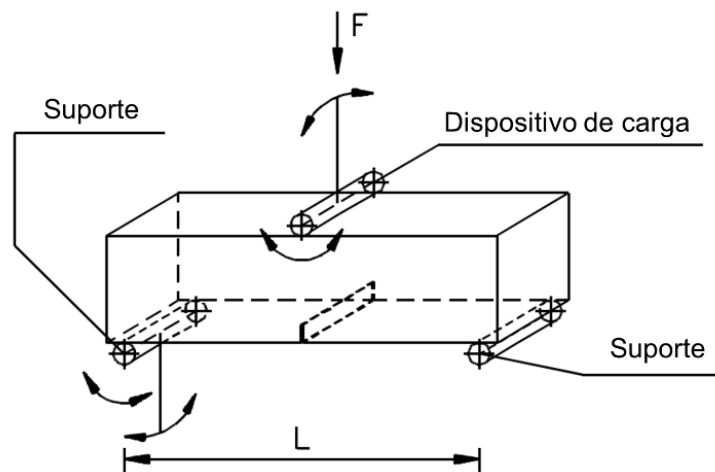
Existem técnicas para avaliar a tenacidade   fratura dos materiais aplicadas a corpos de prova com uma trinca aguda na base do entalhe para garantir a máxima severidade possível de tensões nesse ponto, dentro de certos limites, incluindo a

tenacidade à fratura em deformação plana ( $K_{IC}$ ), o deslocamento crítico de abertura da ponta da trinca ( $CTOD_C$ ) e o parâmetro crítico em termos da integral J ( $J_{IC}$ ). Ensaio de tenacidade à fratura do tipo  $K_{IC}$  são mais apropriados para materiais frágeis e quase-frágeis como o concreto. Em contrapartida, os ensaios  $CTOD_C$  e a integral  $J_{IC}$  permitem determinar parâmetros de tenacidade à fratura para materiais dúcteis de menor resistência mecânica, em condições de deformação elastoplástica (Silva *et al.*, 2018).

Conforme especificado pelo RILEM TC 162 (2003), é recomendado o uso de uma máquina de ensaio capaz de aplicar taxa constante de aumento de deflexão (G) ou CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) na viga, preferencialmente uma máquina de circuito fechado. A rigidez do equipamento deve ser suficientemente alta para evitar zonas de instabilidade na curva (F-CMOD).

Os suportes e o dispositivo de imposição do deslocamento consistem em rolos com diâmetro de  $30\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$  (Figura 11), todos fabricados em aço. Ambos os rolos, incluindo o superior, devem ter capacidade para girar livremente em torno de seu eixo e ser inclinados em um plano perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova.

Figura 11 – Esquema do ensaio de viga entalhada.

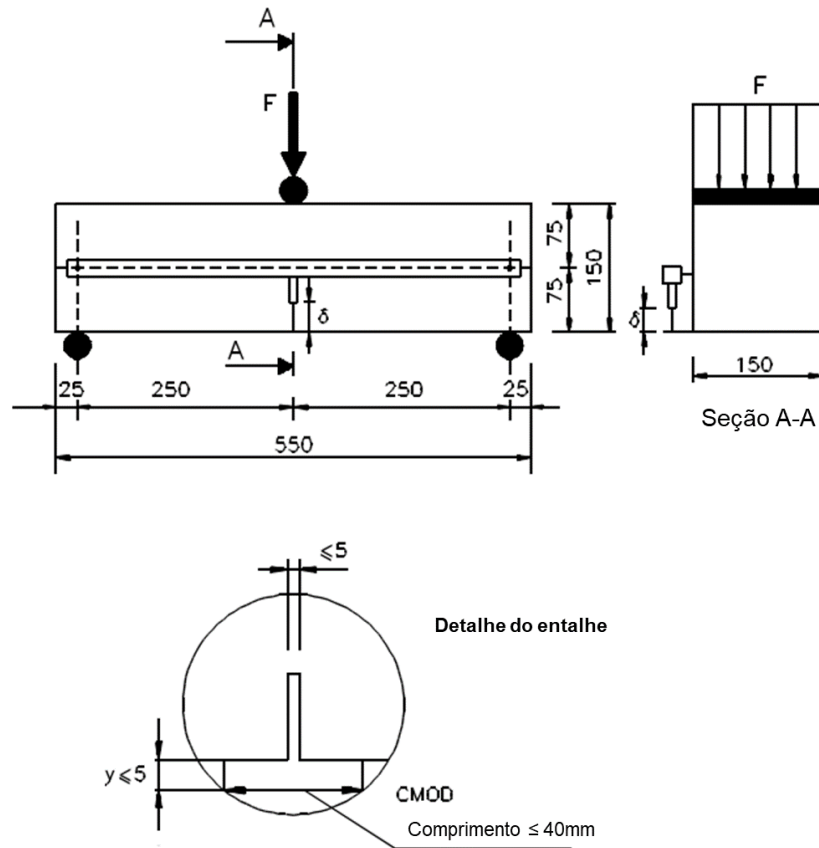


Fonte: Adaptado de RILEM, 2003.

O dispositivo de medição da deflexão deve ser capaz de registrar com precisão a deflexão no centro do vão, excluindo deformações não relacionadas à viga devido às deformações da máquina ou dos suportes. Tipicamente, a deflexão é medida em um lado da viga, e o transdutor deve ser montado com cuidado para minimizar o efeito da rotação. Uma configuração esquemática de medição é ilustrada

na Figura 12. A distância original entre os pontos de referência para medir a abertura inicial da fissura do entalhe (CMOD) não deve exceder 40 mm.

Figura 12 – Ensaio de flexão a três pontos normalizado (dimensões em mm).



Fonte: Adaptado de RILEM, 2003.

Recomenda-se que o sistema de medição da abertura do entalhe seja posicionado ao longo do eixo longitudinal, no meio da largura do corpo de prova, com a distância  $y$  entre a parte inferior do corpo de prova e o eixo do sistema de medição sendo de 5 mm ou menos. A precisão do dispositivo de medição da carga deve ser de 0,1 kN. A precisão da medição da deflexão e do sistema de medição da abertura inicial do entalhe deve ser de 0,01 mm (RILEM, 2003).

Silva *et al.* (2018) realizaram estudo que demonstrou que os tamanhos do entalhe têm influência direta nos resultados de tenacidade à fratura de corpos de prova de concreto. Assim, pode-se concluir que, para os corpos de prova utilizados com as dimensões padronizadas pela RILEM TC 162 (2003) e submetidos ao ensaio de tração na flexão a três pontos, o uso de entalhes com profundidades variando de 11

mm a 15 mm apresenta resultados mais confiáveis para a determinação da tenacidade à fratura do material.

A análise do fraturamento em estruturas de concreto requer a aplicação de métodos experimentais normatizados que permitam estimar parâmetros que descrevam o comportamento do material diante da formação e propagação de trincas. Neste trabalho foram adotados o Método A, proposto pelo comitê TC 50-FCM, e o Método B, recomendado pelo comitê TC 89-FMT. O Método C, também descrito no TC 89-FMT e baseado na teoria do efeito de escala, embora igualmente relevante, não foi aplicado neste estudo devido à elevada demanda experimental associada à sua execução.

### **2.3.2 Método A (TC 50-FCM – energia de fraturamento)**

A especificação 50-FMC (p. 285-290), *Fracture Mechanics of Concrete*, baseia-se no método sugerido por Hillerborg para determinação experimental da energia de fraturamento do concreto. Este método utiliza o ensaio de flexão a três pontos em vigas de concreto simples, que possuem um entalhe central ao longo do vão.

No âmbito do RILEM TC 50-FMC (1985) foram analisados diversos métodos para a medição dos parâmetros da Mecânica da Fratura do concreto. Constatou-se que ensaios baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica só fornecem resultados confiáveis quando os corpos de prova possuem dimensões suficientemente grandes para que a propagação da fissura ocorra em regime de comportamento linear elástico, minimizando os efeitos da zona de processo de fratura.

Contudo, a fabricação e o manuseio de corpos de prova de grandes dimensões apresentam desafios significativos, tornando-as inadequadas para um procedimento de teste padronizado. Portanto, decidiu-se priorizar o estudo de um tipo diferente de teste, que é a determinação da energia de fratura absorvida por unidade de área do plano de fratura durante o teste de ruptura completa dos corpos de prova. Esta medida é representada por  $G_F$ , e sua definição é mostrada na Equação 5 (Hillerborg, 1983).

$$G_F = \frac{\text{energia de fratura absorvida}}{\text{área de fratura}} \quad (5)$$

Para determinar a energia de fratura  $G_F$  em ensaios de concreto, é essencial que a fratura ocorra de maneira controlada, permitindo a medição precisa da absorção de energia associada à fratura por tração. Ensaios instáveis podem resultar em absorção excessiva de energia devido a processos dinâmicos, o que é indesejável. Embora ensaios de tração direta possam medir a absorção de energia, a dificuldade em manter a estabilidade torna-os inadequados para testes-padrão.

Em contrapartida, ensaios de flexão estáveis, especialmente com vigas entalhadas, permitem fratura bem definida e minimizam a absorção de energia em processos irreversíveis fora da zona de fratura, como deformações ou fraturas por compressão. Para minimizar essas deformações, recomenda-se um entalhe de 0,3 a 0,4 vezes a altura da viga, garantindo que as tensões de compressão não excedam o limite elástico, o que é viável se a resistência à compressão for significativamente maior que a resistência à tração, com uma relação mínima de 5 a 10.

Hillerborg (1983) faz as seguintes recomendações técnicas para ensaios de fratura em concreto:

1. utilize um ensaio de flexão a três pontos em vez de um ensaio de flexão em quatro pontos;
2. empregue um entalhe com profundidade considerável;
3. adote corpos de prova de dimensões reduzidas;
4. mantenha uma relação vão/profundidade que não seja excessivamente pequena.

Para que os ensaios sejam conduzidos de maneira estável, é necessário que a máquina de ensaio possua alta rigidez estrutural ou esteja equipada com sistema de controle servo-hidráulico em malha fechada. A estabilidade do teste é caracterizada por uma variação contínua e progressiva da carga e da deformação, sem ocorrências de variações bruscas ou saltos repentinos.

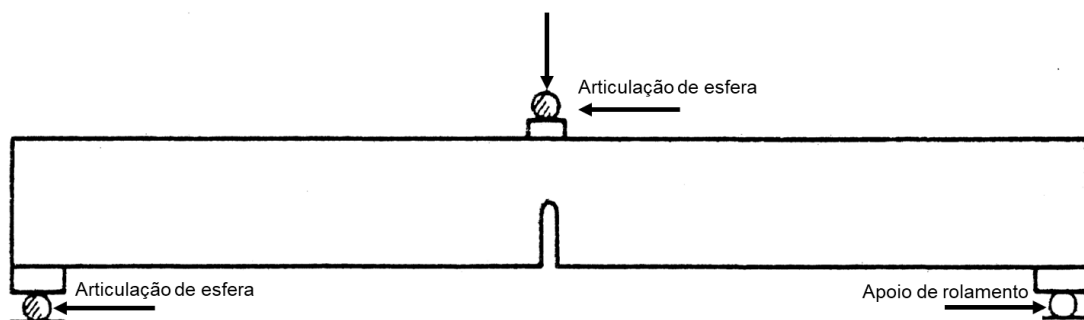
Os suportes e o arranjo dos carregamentos devem ser configurados de modo a garantir que as forças aplicadas na viga sejam estáticas e distribuídas, conforme mostra a Figura 13. As dimensões das vigas estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões das vigas - TC 50-FCM.

$D_{m\acute{a}x}$ (mm)	Altura, $d$ (mm)	Largura, $b$ (mm)	Comprimento, $L$ (mm)	Vão, $l$ (mm)
1 a 16	$100 \pm 5$	$100 \pm 5$	$840 \pm 10$	$800 \pm 5$
16,1 a 32	$200 \pm 5$	$100 \pm 5$	$1.190 \pm 10$	$1.130 \pm 5$
32,1 a 48	$300 \pm 5$	$150 \pm 5$	$1.450 \pm 10$	$1.385 \pm 5$
48,1 a 64	$400 \pm 5$	$200 \pm 5$	$1.640 \pm 10$	$1.600 \pm 5$

Fonte: Adaptado de RILEM, 1985.

Figura 13 – Suportes e arranjo dos carregamentos (Método A).



Fonte: Adaptado de RILEM, 1985.

A medição da deformação no centro da viga deve ser feita em relação a uma linha definida entre dois pontos na viga, localizados acima dos suportes. Alternativamente, é possível medir a deformação no ponto de aplicação da carga em relação ao suporte. A precisão mínima requerida para a medição do deslocamento é de 0,01 mm.

Na impossibilidade de registrar a curva carga-tempo durante o ensaio, a verificação da estabilidade deve ser feita de forma visual, pois a curva carga *versus* deformação pode não evidenciar de maneira clara eventuais instabilidades.

Se o equipamento não contar com controle em malha fechada, recomenda-se que a rigidez do sistema de ensaio seja, ao menos, da ordem de 10 kN/mm para as vigas de menor porte. Para vigas maiores, os valores de rigidez recomendados sobem para cerca de 25, 70 e 150 kN/mm, conforme aumento das dimensões. É importante destacar que esses valores são indicativos e podem variar de acordo com as características do concreto utilizado.

Nos casos em que haja dificuldade em manter a estabilidade do ensaio, é indicado controlar a taxa de deformação com base no deslocamento da abertura da

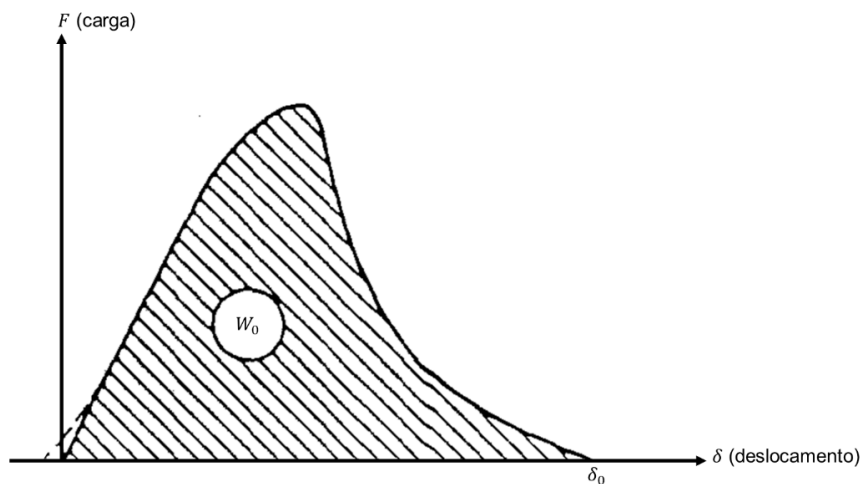
trinca, como forma de minimizar oscilações não desejadas durante a propagação da fissura.

O ensaio é conduzido com taxa de deformação constante para garantir que a carga máxima seja alcançada dentro de 30 a 60 segundos.

A deformação e a carga no centro da viga são registradas até que ela se separe em duas partes. Caso a deformação não seja medida diretamente no corpo de prova, recomenda-se efetuar o carregamento em ciclos entre 5% e 25% da carga máxima antes de registrar a curva carga-deslocamento. A carga deve ser medida com precisão de pelo menos 2% do valor máximo do teste.

A área da seção transversal remanescente após a fratura,  $A_{lig}$ , é calculada como a projeção da zona de fratura em um plano perpendicular ao eixo da viga. O comprimento  $L$  da viga e o vão  $l$  durante o teste devem ser medidos com precisão de pelo menos 1 mm. A curva carga-deslocamento é corrigida para não linearidades em baixas cargas, conforme indicado pela linha tracejada na Figura 14 e a energia  $W_0$ , representada pela área sob a curva, é medida juntamente com o deslocamento  $\delta_0$  na fratura final.

Figura 14 – Curva carga-deslocamento.



Fonte: Adaptado de RILEM, 1985.

Além dos aspectos mencionados, deve-se garantir que o ambiente de teste seja controlado para minimizar quaisquer influências externas na medição da carga e do deslocamento. Isso inclui a estabilização da temperatura e umidade relativa durante o ensaio, especialmente em materiais sensíveis a esses fatores ambientais.

A análise pós-ensaio também pode incluir a avaliação microestrutural da zona de fratura para entender melhor os mecanismos de falha do material.

A energia de fratura é calculada a partir da Equação 6.

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_0}{A_{lig}} [N/m^2 (J/m^2)] \quad (6)$$

onde:

$$m = m_1 + 2 m_2 [kg] \quad (7)$$

Sendo,

$m_1$  – massa da viga entre os apoios, calculado como o peso da viga multiplicado por  $l/L$ ;

$m_2$  – massa da parte do conjunto de carga que não está fixada na máquina, mas acompanha a viga até a falha;

$g$  – aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>);

$\delta_0$  – deslocamento na ruptura final da viga (m);

$A_{lig}$  – área do ligamento (m<sup>2</sup>).

### 2.3.3 Método B (TC 89-FMT – parâmetros de fratura)

A diretriz TC 89-FMT (p. 457-460) baseia-se no método proposto por Jenq e Shah (1985) na determinação do fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{IC}$ ) e do deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca ( $CTOD_c$ ) em concreto por meio de ensaios de flexão a três pontos em vigas entalhadas. O  $K_{IC}$  é calculado na ponta da trinca efetiva crítica com base na carga máxima medida, enquanto o  $CTOD_c$  é determinado no entalhe original da viga, utilizando a mesma carga máxima e o comprimento efetivo crítico da trinca. Esses parâmetros são suficientes para caracterizar a resistência à fratura e a dissipação de energia desse material.

Após o processo de moldagem, as vigas devem ser colocadas em uma câmara de cura com umidade relativa de 100% e temperatura de  $23 \pm 2$  °C durante

as primeiras 24 horas, sendo transferidas para a câmara de cura no segundo dia e mantidas lá até aproximadamente 4 horas antes dos ensaios serem realizados.

As dimensões das vigas, conforme especificado na Tabela 4 e mostrado na Figura 15, são projetadas para agregados com tamanho máximo de 50 mm, sendo:

$P$  – carga aplicada;

$L$  – comprimento da viga;

$S$  – vão de suporte da viga;

$d$  – altura da viga;

$b$  – largura da viga;

$HO$  – espessura do suporte do medidor de deslocamento;

$a_0$  – altura inicial do entalhe;

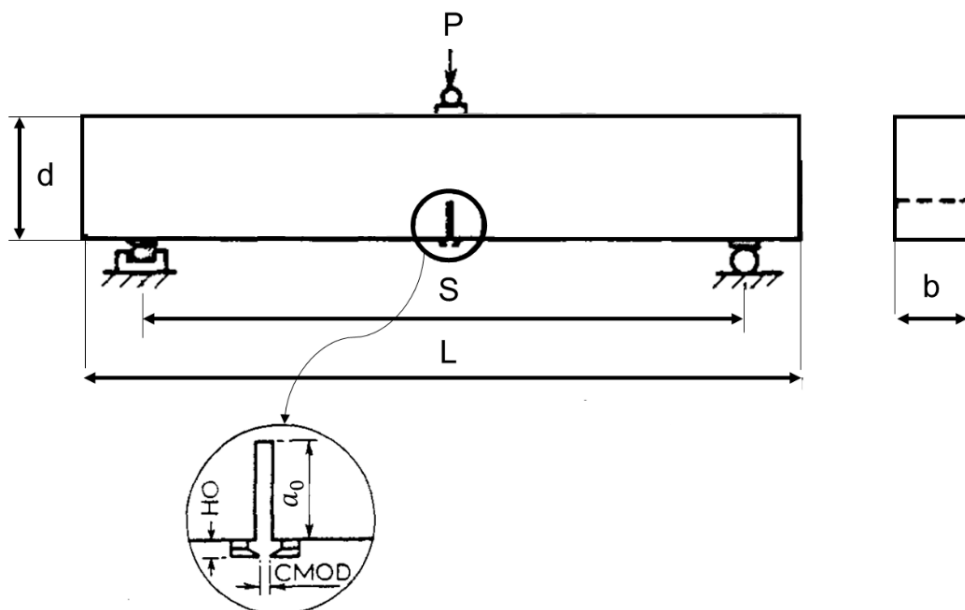
$CMOD$  – deslocamento máximo entre as faces da fissura.

Tabela 4 – Dimensões das vigas - TC 89-FMT.

$D_{máx}$ (mm)	Altura, $d$ (mm)	Largura, $b$ (mm)	Comprimento, $L$ (mm)	Vão, $S$ (mm)
1 a 25	$150 \pm 5$	$80 \pm 5$	$700 \pm 10$	$600 \pm 5$
25,1 a 50	$250 \pm 5$	$150 \pm 5$	$1.100 \pm 10$	$1.000 \pm 5$

Fonte: Adaptado de RILEM, 1990.

Figura 15 – Esquema de entalhe (Método B).



Fonte: Adaptado de RILEM, 1990.

Deve ser feito um entalhe serrado ou pré-moldado com largura inferior a 5 mm. A relação inicial entre a altura do entalhe e a altura da viga ( $a_0/d$ ) deve ser de 1/3. Para cada tipo de material é necessário testar pelo menos quatro vigas. Se o tamanho do agregado for superior a 50 mm, as dimensões das vigas devem ser aumentadas proporcionalmente, mantendo a relação vão/altura de 4.

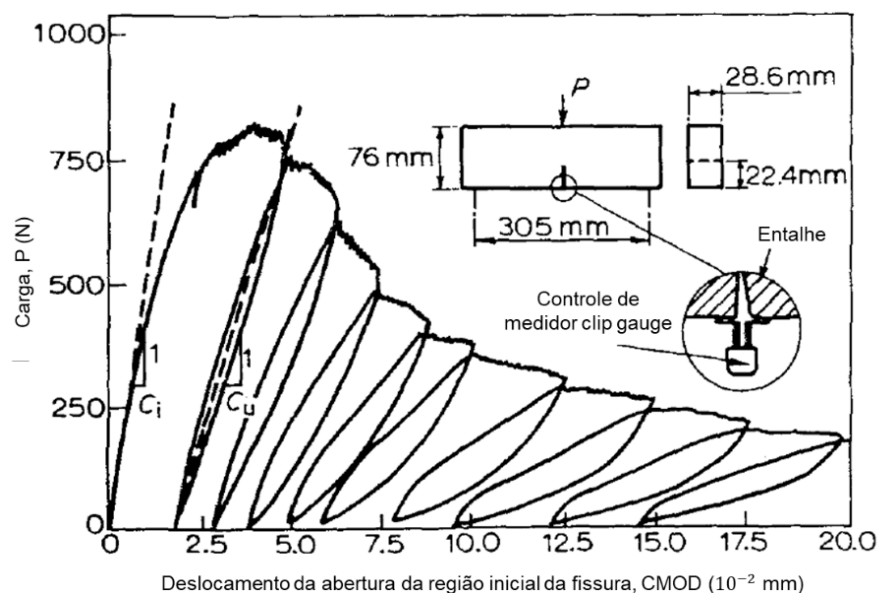
Durante o teste é essencial registrar continuamente o *CMOD* e a carga aplicada, medindo o *CMOD* no centro do entalhe para minimizar erros devido à excentricidade. Além disso, os suportes e os arranjos de carga devem ser configurados de modo que as forças aplicadas na viga sejam estática e distribuídas.

O controle da taxa de carregamento deve seguir incremento constante do deslocamento da abertura da região inicial da fissura (ou deflexão da linha de carga), garantindo que a carga máxima seja alcançada aproximadamente em 5 minutos.

A carga aplicada é descarregada ao passar da carga máxima para aproximadamente 95% dela. Após reduzir a carga a zero, é iniciado um novo carregamento. A taxa de descarregamento e recarregamento não precisa ser idêntica à taxa de carregamento inicial, e cada ciclo de carregamento e descarregamento deve ser concluído em cerca de 1 minuto. O teste requer apenas um ciclo de carregamento e descarregamento.

Um exemplo representativo de resultado de teste, mostrando uma curva carga-CMOD com múltiplos ciclos de carga-descarga, é exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Gráfico carga-CMOD.



Fonte: Adaptado de RILEM, 1990.

A partir dessa curva, é possível determinar o módulo de elasticidade ( $E$ ), o fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{IC}$ ) e o deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca ( $CTOD_c$ ).

A curva carga *versus* CMOD, revela a evolução da carga aplicada ( $P$ ) em função do deslocamento da abertura da fissura na região inicial ( $CMOD$ ), medido em milímetros multiplicado por  $10^{-2}$ . Observa-se que, durante o carregamento inicial, a carga aumenta até um ponto máximo seguido de ciclos de descarga e recarga, característicos dos testes de resistência à fratura.

O valor do módulo de elasticidade é calculado por meio da Equação 8.

$$E = \frac{6 \cdot S \cdot a_0 \cdot V_1(\alpha)}{C_i \cdot d^2 \cdot b} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (8)$$

No qual  $C_i$ , primeiro ciclo de carregamento, é obtido por meio da curva carga-CMOD [N/m]. O termo  $V_1(\alpha)$  é definido conforme a Equação 9.

$$V_1(\alpha) = 0,76 - 2,28\alpha + 3,87\alpha^2 - 2,04\alpha^3 + \frac{0,66}{(1 - \alpha)^2} \quad (9)$$

sendo:

$$\alpha = \frac{a_0 + HO}{d + HO} \quad (10)$$

onde,

$a_0$  – altura do entalhe;

$HO$  – espessura do suporte do medidor;

$d$  – altura da viga.

O comprimento crítico efetivo da trinca,  $a_c$ , obtido através da soma de  $a_0$  com o crescimento estável da trinca na carga máxima, é calculado por meio da Equação 8 e da  $C_u$  (medida da deformação do material ao descarregar) na carga máxima. Utilizando um processo iterativo (tentativa e erro), o comprimento crítico efetivo da trinca é obtido quando a Equação 11 é satisfeita.

$$E = \frac{6 \cdot S \cdot a_c \cdot V_1(\alpha)}{C_u \cdot d^2 \cdot b} \quad (11)$$

$C_u$  é a medida da deformação do material ao descarregar a 95% da carga máxima [N/m].

O fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{IC}$ ) é calculado utilizando-se a Equação 12.

$$K_{IC} = 3(P_{m\acute{a}x} + 0,5M) \frac{S(\pi a_c)^{\frac{1}{2}} F(\alpha)}{2d^2 b} [N/m^{3/2}] \quad (12)$$

No qual o fator de forma  $F(\alpha)$  é determinado pela Equação 13.

$$F(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1 - \alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{\sqrt{\pi^{\frac{1}{2}}(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}} \quad (13)$$

onde,

$$\alpha = a/d;$$

$P_{m\acute{a}x}$  – carga máxima do ensaio (N);

$$M = (m \cdot S)/L \text{ (N);}$$

$M$  – massa da viga entre os suportes (kg);

$m$  – peso próprio da viga (N).

Já para o cálculo do deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca ( $CTOD_c$ ), utiliza-se a Equação 14.

$$CTOD_c = \frac{6P_{m\acute{a}x}S \cdot a_c \cdot V_1(\alpha)}{E \cdot d^2 \cdot b} [(1 - \beta)^2 + (1,081 - 1,149\alpha)(\beta - \beta^2)]^{1/2} [m] \quad (14)$$

tal que

$$\alpha = a_c/d;$$

$$\beta = a_0/a.$$

Quando não é possível realizar um ensaio de flexão a três pontos estável, os valores de conformidade de descarga ( $C_u$ ) podem ser aproximados assumindo que o caminho de descarga retorna à origem. Nesse caso, os valores de tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) e abertura crítica da ponta da trinca ( $CTOD_c$ ), calculados desta maneira, são tipicamente 10 a 25% maiores do que os valores obtidos pela conformidade real de descarga.

O método baseado nos parâmetros  $K_{Ic}$  e  $CTOD_c$  permite prever a carga máxima em estruturas com geometrias variadas por meio da determinação do comprimento crítico efetivo da trinca,  $a_c$ .

A aplicação desses valores permite uma análise coerente da propagação de trincas em diferentes condições de carregamento, incluindo modo misto e ensaios de tração e flexão, consolidando-os como propriedades essenciais para o modelo de fratura do material.

## 2.4 MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA AO CONCRETO

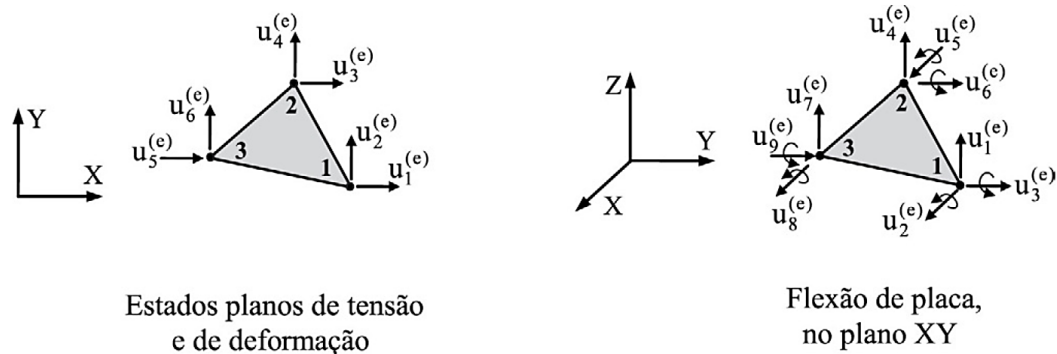
O método dos elementos finitos foi rapidamente adotado por conta de sua versatilidade, aliada à capacidade de descrição mais realista dos problemas de engenharia. A princípio, a utilização do método baseava-se principalmente em intuição e argumentação física. Por volta de 1963, estabeleceu-se a base matemática do método: poderia ser considerado como a resolução de um problema variacional por meio da minimização de um funcional. Desta maneira, poderia ser aplicado a qualquer problema que pudesse ser formulado de forma variacional (Lopes Júnior, 1996).

A técnica de análise por elementos finitos foi desenvolvida com o objetivo de solucionar problemas estruturais complexos que não podiam ser resolvidos de maneira analítica, devido à sua dificuldade ou impossibilidade prática (Silva, A. *et al.*, 2022).

Os modelos estruturais baseados em elementos finitos são formulados pela interpolação dos deslocamentos nodais para definir um campo de deslocamentos em cada elemento. Na Figura 17 os deslocamentos são apresentados para elementos triangulares em estado plano de tensão e deformação, e flexão de placa, referentes ao sistema global. Este campo de deslocamentos representa uma aproximação do modelo matemático original e é diretamente influenciado pelos deslocamentos nodais selecionados. No entanto, as aproximações introduzidas pela discretização são

minimizadas à medida que a malha de elementos finitos é refinada. Com o uso de sistemas computacionais modernos para análise estrutural, é possível construir modelos altamente refinados que simulam detalhes significativos do sistema físico (Soriano, 2014).

Figura 17 – Deslocamentos nodais de elementos finitos triangulares.



Fonte: Soriano, 2014.

#### 2.4.1 Modelagem numérica em concreto com fibras

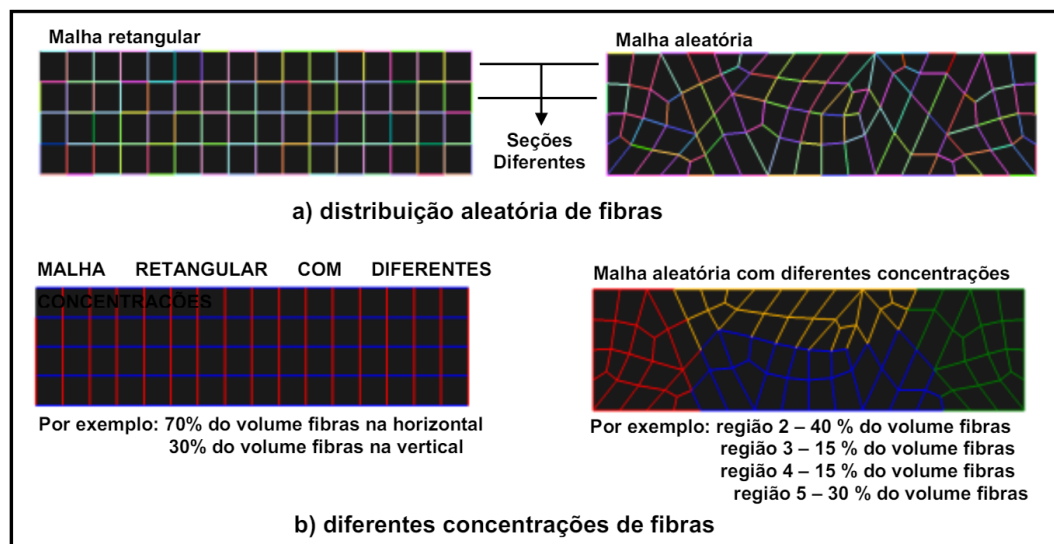
Os trabalhos destacados nesta subseção foram selecionados por sua relevância metodológica e pela representatividade em diferentes abordagens. Enquanto alguns autores avançaram na definição de leis constitutivas e no comportamento pós-pico, outros estudam a influência das fibras sob esforços específicos, o refinamento da discretização numérica ou a aplicação de fibras alternativas. Dessa forma, a seleção buscou contemplar contribuições distintas e complementares, que fundamentam a base teórica da presente pesquisa.

Barros e Figueiras (2001) desenvolveram um modelo numérico para a análise não linear de lajes de concreto reforçado com fibras de aço apoiadas em solo. Utilizando dados experimentais, as principais características da armadura de fibra foram introduzidas nas leis constitutivas do concreto, principalmente no comportamento de tração e pós-pico de compressão. Ressalta-se que mais experimentos devem ser realizados para ajustar as leis constitutivas propostas, sendo que a pesquisa experimental realizada foi limitada a apenas dois tipos de fibras. O comportamento do concreto não fissurado e do concreto entre fissuras foi simulado no regime elastoplástico. O solo ou outro material de base que sustenta a laje de concreto foi simulado por molas distribuídas ortogonalmente à superfície intermediária

da laje, com um modelo elastoplástico simulando o comportamento não linear das molas, considerando a perda de contato entre a base e a laje. O desempenho do modelo foi avaliado utilizando os resultados experimentais fornecidos por Falkner e Teutsch (1993), mostrando boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos.

Sant'ana (2005) analisou numericamente o comportamento do concreto reforçado com fibras de aço (CRF), focando na tenacidade no regime pós-pico até a ruptura. O modelo considerou a aleatoriedade de orientação e a concentração local de fibras, utilizando diferentes malhas para representar a matriz de concreto, como mostra a Figura 18. Resultados mostraram que uma malha retangular limitava a distribuição das fibras, enquanto uma distribuição mais aleatória e fibras mais longas aumentavam a tenacidade. A validação com dados experimentais destacou a necessidade de calibração precisa dos parâmetros de entrada, e simplificações no modelo de interface aço-concreto influenciaram a precisão dos resultados. Apesar das limitações, o modelo mostrou-se eficiente para análises de sensibilidade, sugerindo que um modelo 3D poderia melhorar a simulação da distribuição e orientação das fibras.

Figura 18 – Disposição das fibras na matriz de concreto.



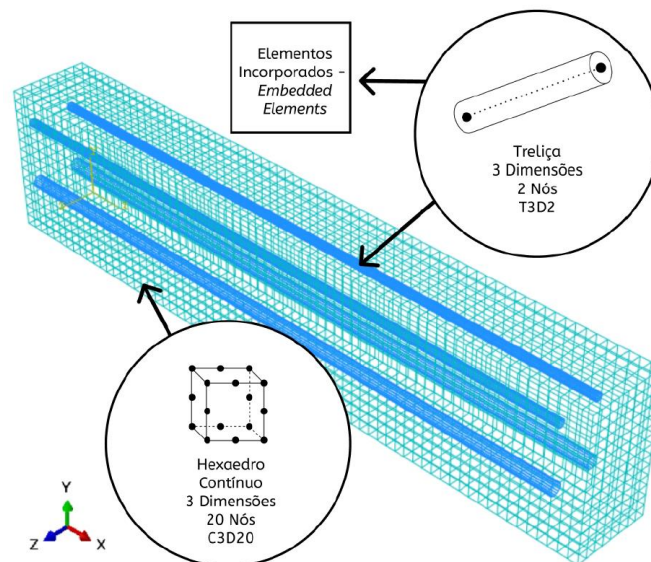
Fonte: Sant'ana, 2005.

Souza (2006) conduziu um estudo sobre modelagens numéricas de vigas de concreto armado, com e sem reforço de fibras metálicas, utilizando o programa DIANA para analisar a energia de fratura sob tensões cisalhantes (modo de fratura II). A

validação das modelagens foi realizada comparando os resultados com dados experimentais disponíveis na literatura, inicialmente com vigas e, em seguida, com prismas de concreto, levando em conta a não-linearidade física do material. Para as vigas, foram aplicadas as teorias de Rankine e Drucker Prager, enquanto para os prismas foram utilizadas teorias da Mecânica da Fratura. Observou-se que a utilização de fibras metálicas reduz significativamente a necessidade de armadura longitudinal para resistir aos esforços de flexão; contudo, ressalta-se que são necessários ensaios adicionais para determinar o volume ideal de fibras a ser utilizado em diferentes resistências do concreto.

Matos (2021) desenvolveu estudo direcionado na geração de malhas de elementos finitos utilizando o ABAQUS SE, conforme mostrado na Figura 19. No contexto da pesquisa, o tamanho global dos elementos foi definido pelo usuário, levando em consideração as dimensões da estrutura para garantir resultados satisfatórios. Experimentalmente, observou-se que a adição de fibras à matriz do compósito aumenta as resistências à compressão uniaxial e biaxial, resultados que são corroborados por análises analíticas.

Figura 19 – Esquema de malha e elementos finitos para as vigas modeladas elaborada por Matos.



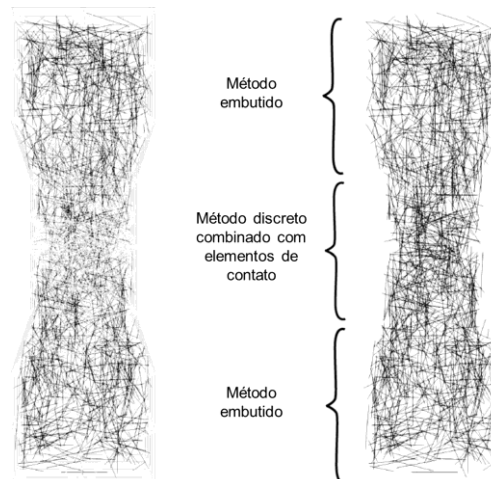
Fonte: Matos, 2021.

Patel, M. e Patel, N. (2023) realizaram estudo sobre o uso de fibra de PET para minimizar ou até evitar o comportamento de falha da junção viga-pilar. A análise pelo MEF foi conduzida no *software* ABAQUS, para comparar o comportamento de

juntas de concreto convencional com resíduos de concreto armado com fibra de PET sob carregamento cíclico. A primeira junção foi feita com concreto convencional e as seis amostras adicionais foram projetadas com inclusões de fibras de PET (0,25% a 1,5%) na região da junta. As juntas viga-pilar com inclusão de 0,5% a 1% de fibras PET apresentaram melhor desempenho em termos de resistência, capacidade de carga, dissipação de energia, capacidade de cisalhamento e comportamento de ductilidade na região da junta.

Rodrigues e Durand (2023) determinaram que o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) melhora o comportamento pós-fissuração do concreto, aumentando sua capacidade de absorção de energia e reduzindo a probabilidade de danos estruturais, resultando em maior resistência a cargas, condições climáticas adversas e agressões químicas. O estudo apresentou abordagem numérica para simular o comportamento do CRFA, utilizando elementos finitos volumétricos combinados com elementos coesivos para prever a fratura do concreto. Resultados numéricos mostram boa concordância com dados experimentais, indicando que esta abordagem é promissora para entender os diversos aspectos envolvidos no processo de falha do CRFA. A distribuição aleatória das fibras de aço obtida é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Distribuição de fibras na malha de elementos finitos.



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Durand, 2023.

Apesar da existência de um número considerável de pesquisas dedicadas à modelagem numérica de concretos reforçados com fibras, optou-se por destacar os trabalhos apresentados nesta subseção em razão de sua relevância metodológica e de sua representatividade no contexto da temática investigada. Barros e Figueiras

(2001) e Sant'ana (2005) contribuíram para o avanço na definição de leis constitutivas e na análise do comportamento pós-pico em concretos com fibras de aço, enquanto Souza (2006) direcionou sua investigação para a avaliação do desempenho sob esforços de cisalhamento, com ênfase na energia de fratura. Matos (2021) abordou o refinamento da discretização numérica, destacando a influência da malha na qualidade dos resultados, ao passo que Patel e Patel (2023) exploraram a aplicação de fibras de PET reciclado no comportamento de juntas viga-pilar. Por fim, Rodrigues e Durand (2023) apresentaram um modelo avançado baseado em elementos coesivos, voltado à compreensão dos mecanismos de fraturamento do concreto reforçado com fibras de aço. Assim, a seleção desses estudos deve-se ao fato de representarem diferentes abordagens e perspectivas complementares, fornecendo uma base teórica consistente para o desenvolvimento da presente pesquisa.

#### **2.4.2 Modelagem numérica da Mecânica da Fratura**

Nesta subseção selecionaram-se estudos que apresentam contribuições representativas, considerando diferentes abordagens de fissuração e dano, incluindo modelos discretos de fissuração, modelos de dano contínuo, e análises de refinamento de malha e comportamento pós-pico.

Para análises utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) existem duas abordagens principais para representar processos de fissuração no material. A primeira técnica, conhecida como representação de fissuras discretas, trata cada fissura individualmente como uma descontinuidade no material. Esta abordagem é altamente dependente da malha de elementos finitos, exigindo refinamento elevado da malha, o que resulta em elevado tempo de processamento e demanda por recursos computacionais. O segundo método é o modelo de dano plástico, que considera a danificação progressiva da região afetada. Nesse modelo, a resistência do material diminui gradativamente ao longo do carregamento até a completa perda da capacidade resistente. Ao contrário da representação de fissuras discretas, o modelo de dano plástico altera as propriedades do material, mantendo o concreto fissurado como um meio contínuo (Matos, 2021).

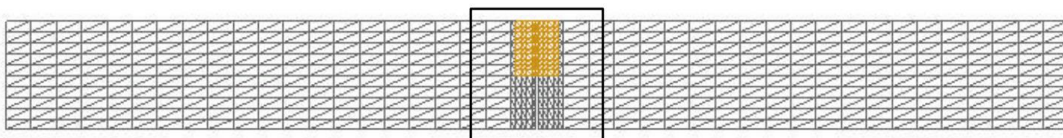
A aplicação de modelos fundamentados na Mecânica da Fratura, em conjunto com a crescente relevância dos elementos finitos na modelagem numérica, exige a consideração tanto da resistência à tração direta do concreto quanto da energia de

fratura como parâmetros essenciais. Para descrever a fissuração de forma eficaz, qualquer modelo analítico deve incorporar os variados mecanismos de tenacidade presentes na zona de processo e de travamento da fratura. A quantificação dessas contribuições para a tenacidade total do compósito é indispensável na formulação analítica, pois só assim é possível justificar adequadamente quaisquer simplificações são necessárias (Ekane, 1999).

O estudo de Souza (2001) concluiu que a escolha da malha de elementos finitos influencia a precisão dos resultados experimentais de propagação de fissuras em estruturas de concreto. Malhas muito refinadas ou pouco refinadas tendem a distorcer os resultados, afastando-se da realidade prática. A introdução do parâmetro  $G_f$  (Energia de Fraturamento) nas formulações de localização de deformações ajuda a reduzir essa dependência da malha, tornando menos crítica a escolha do tipo de malha adotada. No entanto, a determinação precisa do parâmetro continua sendo um desafio, destacando a necessidade de pesquisa adicional nesse aspecto para melhorar a acurácia das simulações numéricas em prever o comportamento de fratura do concreto.

Gonçalves (2003) desenvolveu um modelo constitutivo baseado na mecânica do dano contínuo para simular a degradação do concreto sob cargas cíclicas. A Figura 21 ilustra a malha de elementos finitos utilizada na discretização da viga, composta por 1110 elementos triangulares com três nós, incluindo um ponto de Gauss. Tal modelo foi capaz de reproduzir a redução da rigidez e o aumento da deformação conforme observado nos ensaios experimentais de Hordijk e Reinhardt (1992). Os resultados numéricos replicaram as três fases típicas do processo de fadiga: rápido aumento inicial na deformação até cerca de 10% do total de ciclos, seguido por incremento uniforme até aproximadamente 80% dos ciclos. E, por fim, outro rápido aumento na deformação até a ruptura. Devido à versatilidade do modelo, é possível reproduzir resultados quantitativos, como curvas S-N (ou curvas de Wöhler), por meio do ajuste apropriado dos parâmetros adimensionais, utilizando dados experimentais.

Figura 21 – Malha de elementos finitos da viga entalhada.



Fonte: Gonçalves, 2003.

Silva Neto (2015) empregou um modelo discreto de fissuração para representar o comportamento de vigas de concreto armado em flexão. A validação do modelo foi realizada comparando os resultados experimentais de diversos autores com os diagramas de carga aplicada *versus* deslocamento, demonstrando que o modelo é satisfatório para vigas subarmadas à flexão. Além disso, o modelo mostrou que a variação dos parâmetros da lei de aderência possui pouca influência nos resultados. Concluiu-se que o modelo discreto é eficaz na representação da fissuração do concreto armado, gerenciando de maneira adequada os nós e elementos de interface na zona da armadura e capturando detalhes do processo de fissuração, como a coalescência de fissuras menores em uma fissura maior.

Marconcin (2015) investigou a análise do dano de estruturas de concreto armado com suporte elástico. Inicialmente, uma viga biapoiada em concreto armado foi modelada numericamente e validada experimentalmente por meio de ensaios de flexão. O trabalho investigou a correlação entre dano e permeabilidade do concreto danificado. Foi observado que o posicionamento da armadura influencia o dano estrutural, sendo o modelo com armadura no meio da espessura da laje o mais crítico e o modelo com armaduras na face superior e inferior o da menos danificado. A identificação das áreas danificadas foi realizada computacionalmente usando o MEF com formulação baseada na mecânica do dano contínuo ao concreto, e estabeleceu-se uma relação entre o dano e a permeabilidade.

Ribeiro (2022) propôs uma metodologia avançada de modelagem por elementos finitos para materiais cimentícios reforçados com fibras, considerando mesoestrutural. O modelo divide o material em quatro fases distintas: agregado graúdo, argamassa, zona de transição interfacial (ZTI) e fibras. A argamassa e os agregados são simulados por elementos triangulares contínuos com comportamento linear-elástico, ao passo que as fibras são modeladas por elementos de treliça unidimensionais acoplados a elementos bidimensionais. Os resultados dos modelos apresentaram boa correlação com experimentos, especialmente no comportamento global dos compósitos, evidenciando a influência da distribuição dos agregados e das fibras na resposta mecânica pós-pico. A inclusão explícita da ZTI permitiu uma representação eficaz da propagação da fratura, desde microfissuras iniciais até macrofissuras, utilizando propriedades menos rígidas para simular a porosidade típica das interfaces entre agregado e matriz.

Cunha *et al.* (2023) estudaram diferentes exemplos experimentais sob a perspectiva da Mecânica da Fratura, utilizando modelos coesivos implementados no *software* ABAQUS. Características dos modelos foram analisadas, incluindo a influência da espessura, posição e quantidade de zonas coesivas. Os resultados indicaram que a variação dessas propriedades pode afetar significativamente os resultados numéricos, sendo essencial adotar espessuras de zonas coesivas compatíveis com as dimensões do protótipo e estimar com precisão a posição da propagação da fissura. Os modelos de fratura coesiva apresentaram resultados satisfatórios em termos de curvas força *versus* deslocamento e evolução das fissuras.

## **2.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS DE ANÁLISE**

### **2.5.1 Mecânica da fratura computacional**

Na atualidade, um aspecto fundamental na engenharia estrutural é a utilização de simulação computacional como uma ferramenta eficaz para prever numericamente o comportamento de estruturas submetidas a diferentes carregamentos. Esta abordagem permite uma análise detalhada do desempenho estrutural em condições diversas, possibilitando antecipar possíveis falhas e otimizar o projeto.

O progresso tecnológico desempenha papel crucial nesse cenário, dado que tem impulsionado o desenvolvimento de recursos computacionais mais avançados e completos, aumentando consideravelmente a capacidade de processamento e armazenamento de dados. Isso possibilita a realização de análises cada vez mais complexas do comportamento de estruturas, com modelos precisos.

Como resultado desse avanço, as modelagens tornaram-se mais realistas na representação do desempenho estrutural de materiais e componentes. Por meio dessas ferramentas, é possível analisar não apenas as tensões e deformações, mas também o processo de fraturamento e propagação de fissuras, fornecendo uma visão abrangente do desempenho da estrutura.

Além disso, o uso de simulação computacional oferece vantagens notáveis em termos de economia de tempo e recursos financeiros. Ao prever de antemão o comportamento estrutural, é possível identificar e corrigir potenciais problemas ainda na fase de projeto, evitando custos adicionais e atrasos durante a construção e operação da estrutura.

No contexto específico do concreto, a análise computacional desempenha papel crucial na otimização de estruturas de concreto, dada a complexidade desse material e suas diversas aplicações na construção civil. As simulações permitem estudar o comportamento do concreto sob diferentes condições de carga, levando em consideração fatores como resistência à compressão, tração, fluência e fissuração. Isso é de suma importância para garantir a durabilidade e segurança das estruturas de concreto, especialmente em projetos de grande escala, em que pequenas falhas podem resultar em consequências significativas. Portanto, o uso de simulação computacional no estudo do comportamento estrutural do concreto não apenas oferece conhecimentos valiosos para o projeto e construção de estruturas mais eficientes, mas também contribui para a sustentabilidade e longevidade das infraestruturas civis.

A NBR ISO 9001 (ABNT, 2015) estabelece a necessidade de identificar e definir o conhecimento requerido para a operação eficaz dos processos, de modo a assegurar a conformidade dos produtos. Tal disposição ressalta a importância da gestão do conhecimento, especialmente no contexto da execução de processos críticos. No caso específico da análise de estruturas com o auxílio de programas computacionais, a norma evidencia a exigência de que os operadores possuam conhecimento técnico adequado para utilizar os *softwares* de forma apropriada, bem como para interpretar com precisão os resultados obtidos por meio dessas ferramentas de análise.

A norma ISO/IEC 25000 (2005), também conhecida como SQuaRE (*Software Product Quality Requirements and Evaluation*), fornece diretrizes para avaliar a qualidade de produtos de *software*, incluindo aqueles utilizados na análise estrutural por elementos finitos. Ao adotar os critérios e modelos de qualidade definidos por essa norma, os engenheiros e pesquisadores podem avaliar a qualidade do *software* de análise estrutural, considerando aspectos como funcionalidade, desempenho, usabilidade e manutenibilidade. Dessa forma, a aplicação dos princípios da ISO/IEC 25000 (2005) na análise estrutural por elementos finitos contribui para o desenvolvimento de soluções de *software* mais confiáveis, precisas e eficazes para a engenharia estrutural.

Em suma, as normas referidas desempenham funções relevantes na garantia da qualidade e eficácia das operações relacionadas à verificação de estruturas utilizando programas computacionais.

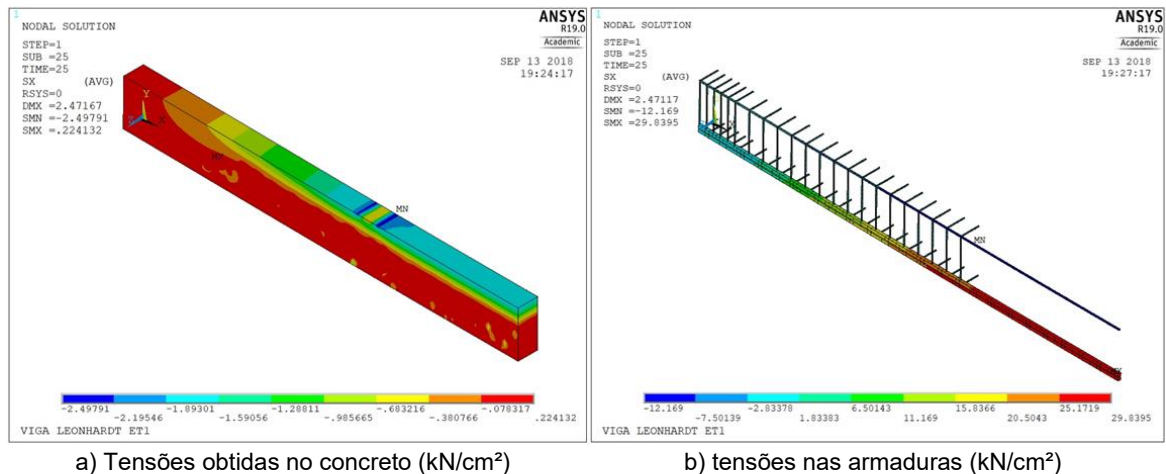
## 2.5.2 Simulação estrutural via ANSYS

O ANSYS é um programa computacional de projetos e análises de estruturas, reconhecido por sua capacidade de utilizar o Método dos Elementos Finitos (MEF). Este método é essencial para a simulação precisa do comportamento de peças estruturais, máquinas e componentes eletrônicos, permitindo que engenheiros, pesquisadores e profissionais avaliem tensões, deformações, fadiga e fratura antes mesmo da construção física dos projetos.

Devido à sua precisão e versatilidade, é considerado um dos melhores programas comerciais disponíveis no mercado para análises estruturais e simulações multifísicas. Ele se destaca por suas funcionalidades de integração com CAD (*Computer-Aided Design*) e suporte para computação paralela, o que permite realizar verificações paramétricas complexas de forma eficiente.

O programa segue um procedimento estruturado que compreende a escolha do tipo de elemento adequado para representar a estrutura, como viga, placa ou sólido; a definição das propriedades mecânicas do material; a especificação das dimensões e características geométricas da seção transversal; a geração da malha de elementos finitos para viabilizar a análise numérica; a aplicação das cargas externas conforme as condições reais de operação; a definição das restrições e apoios; a seleção do tipo de análise conforme os objetivos do estudo; e, por fim, a análise dos resultados obtidos, como exemplifica a Figura 22, permitindo avaliar o desempenho da estrutura.

Figura 22 – Viga de concreto armado no *software* ANSYS.



a) Tensões obtidas no concreto (kN/cm<sup>2</sup>)

b) tensões nas armaduras (kN/cm<sup>2</sup>)

Fonte: Hoffman, 2018.

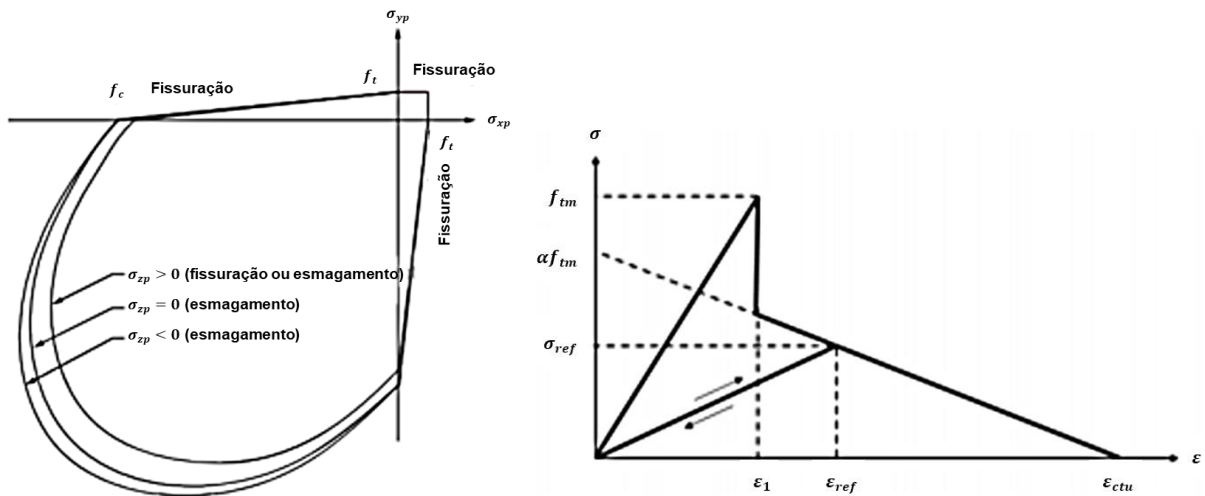
Além de seu uso extensivo na indústria, o ANSYS também é utilizado como ferramenta educacional em diversas instituições de ensino superior. Universidades e centros de pesquisa utilizam o programa para ensinar conceitos avançados de engenharia e simulação. As diferentes versões permitem a realização de simulações complexas, contribuindo para o avanço do conhecimento em áreas como engenharia civil, aeroespacial, automotiva, eletromagnética e fluidodinâmica. Ao atender ampla gama de setores da indústria e proporcionar uma plataforma de aprendizado robusta, o *software* solidifica sua posição como uma ferramenta útil tanto no âmbito profissional quanto no acadêmico.

O MEF é uma técnica de resolução de sistemas estruturais que envolve a discretização do domínio em um conjunto finito de elementos, cada um caracterizado por propriedades materiais e formas geométricas específicas. Um dos aspectos fundamentais desse método é a aplicação de funções de forma para aproximação dos deslocamentos, as quais são definidas sobre o domínio de cada elemento e expressas em função dos graus de liberdade nodais (Souza, 2006).

A Mecânica da Fratura aplicada ao concreto se baseia em princípios fundamentais, como a liberação de energia e a propagação de fissuras. O concreto, sendo um material heterogêneo e frágil, apresenta comportamento complexo quando submetido a tensões elevadas. As fibras, quando adicionadas ao concreto, atuam como reforços que impedem ou retardam a propagação de fissuras, melhorando a tenacidade à fratura do material. No ANSYS, essas características podem ser modeladas e analisadas utilizando critérios de fratura específicos e elementos finitos apropriados.

Os critérios de ruptura implementados no ANSYS baseiam-se no modelo avançado desenvolvido por Willam e Warnke, dependente de cinco parâmetros principais, permitindo a previsão da falha de materiais frágeis, como o concreto, tanto por tração quanto por compressão (Souza, 2001; Silva Júnior; Real, 2019), conforme ilustrado na Figura 23. Os parâmetros são:  $f_c$ , resistência à compressão, que define o limite de esmagamento do material;  $f_t$ , resistência à tração, que delimita o início da fissuração;  $\tau_c$ , tensão de cisalhamento crítica, responsável por controlar a propagação de fissuras inclinadas;  $\alpha$ , parâmetro de forma da superfície de ruptura, que ajusta a interação entre modos de tração e compressão; e  $\beta$ , parâmetro de intensidade, que influencia a progressividade da falha e a transição entre os modos de fratura.

Figura 23 – Modelo constitutivo para o concreto.



a) Superfície de falha de Willam-Warnke.

b) Curva tensão-deformação para o concreto tracionado

Fonte: Adaptado de Silva Júnior; Real, 2019.

Lam *et al.* (2020) investigaram o efeito do teor de fibras de aço em vigas de concreto por meio de simulações numéricas realizadas no *software* ANSYS, complementadas por ensaios experimentais. As análises permitiram avaliar a redução da formação e propagação de fissuras, além do comportamento do deslocamento sob diferentes teores de fibras. Os resultados indicaram que a modelagem por elementos finitos apresentou boa concordância com os dados experimentais, confirmando a confiabilidade para prever o desempenho estrutural das vigas. O estudo destacou ainda que a maior adição de fibras, de 8%, proporcionou melhorias significativas na resistência e na capacidade de retardar o surgimento das fissuras.

Xu *et al.* (2020) analisaram o desempenho à deformação de pilares de concreto armado reforçados com fibras híbridas, considerando diferentes proporções volumétricas de fibras de aço e de polipropileno. Foram projetados 21 pilares submetidos a ensaios sob carregamento cíclico reverso de baixa amplitude, a fim de investigar a relação carga-deformação. Os resultados mostraram que a inclusão de fibras de aço reduz a taxa de crescimento da deformação do aço nos pilares. Além disso, a combinação de fibras de aço e de polipropileno demonstrou melhor capacidade na dispersão das tensões internas do concreto, retardando a propagação de fissuras e melhorando o desempenho global à fissuração, em comparação com o uso exclusivo de fibras de aço. A simulação numérica conduzida no *software* ANSYS, sob as mesmas condições de ensaio, reproduziu com boa precisão a curva carga-

deformação das armaduras, confirmando a confiabilidade da modelagem para prever o comportamento estrutural sob ações cíclicas.

Yuvashri, Sharma e Devi (2021) investigaram o comportamento à flexão de vigas de concreto de alto desempenho reforçadas com fibras de poliolefina por meio de simulações numéricas no ambiente ANSYS Workbench. A geometria modelada correspondeu a vigas com seção transversal de 150 mm × 200 mm e comprimento de 1000 mm, incorporando dados experimentais das propriedades do concreto e do reforço. O modelo envolveu a criação da malha, definição dos vínculos e aplicação das propriedades mecânicas dos materiais. Os resultados de deflexão obtidos numericamente foram comparados com dados experimentais para diferentes configurações de reforço, demonstrando que o ANSYS é uma ferramenta capaz de prever o desempenho mecânico de vigas reforçadas com fibras poliméricas.

Hussain, Hamood e Al-Shaarbaf (2023) realizaram estudo aprofundado utilizando o *software* ANSYS para simular numericamente o comportamento ao cisalhamento de 91 vigas de concreto armado com fibras de aço, previamente analisadas experimentalmente em diversos estudos. O modelo de elementos finitos desenvolvido foi capaz de prever a capacidade resistente ao cisalhamento, considerando variáveis como razão vão útil-altura, resistência à compressão do concreto, teor de armadura longitudinal, fração volumétrica, esbeltez e tipo de fibra. Os resultados obtidos pelo ANSYS apresentaram alta correlação com os dados experimentais, superando em precisão diversas equações analíticas preexistentes. O fator  $\chi$  (relação entre os valores experimentais e os previstos) atingiu 97% para os resultados da simulação numérica, enquanto a melhor equação preditiva apresentou 91%. O estudo ressalta ainda que a utilização de simulações numéricas contribui para a redução de custos e falhas em projetos.

Xiao *et al.* (2025) utilizaram o *software* ANSYS Workbench para simular o comportamento mecânico de pavimentos drenantes porosos produzidos com concreto autoadensável, considerando cinco geometrias distintas de poros. As análises por elementos finitos permitiram identificar modos de falha característicos por compressão e tração, com boa correlação com os ensaios experimentais realizados. O estudo demonstrou que o ANSYS foi adequado na previsão das tensões e no mapeamento dos mecanismos de ruptura, evidenciando que a geometria dos poros influencia diretamente a resposta estrutural.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 GEOMETRIA E CARACTERÍSTICAS DOS CORPOS DE PROVA

Os parâmetros de fratura do concreto foram determinados a partir de ensaios realizados em vigas de concreto simples, conforme proposto pelas recomendações do comitê RILEM. Neste tópico apresentam-se dimensões e características dos corpos de prova utilizados nos ensaios experimentais e na modelagem numérica, de acordo com os Métodos A e B (itens 2.3.2 e 2.3.3), que seguem, respectivamente, as diretrizes do TC 50-FCM e do TC 89-FMT.

##### 3.1.1 Dimensões dos corpos de prova

As dimensões das vigas utilizadas estão apresentadas na Tabela 5, na qual são especificadas as características geométricas de cada corpo de prova, de acordo com os métodos adotados.

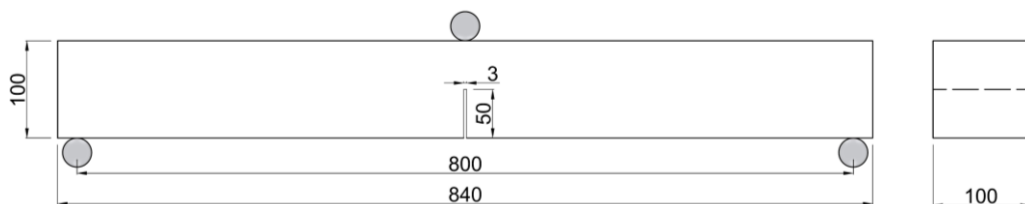
Tabela 5 – Dimensões das vigas.

Método	Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Vão livre (mm)
Método A	100	100	840	800
Método B	150	80	700	600

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

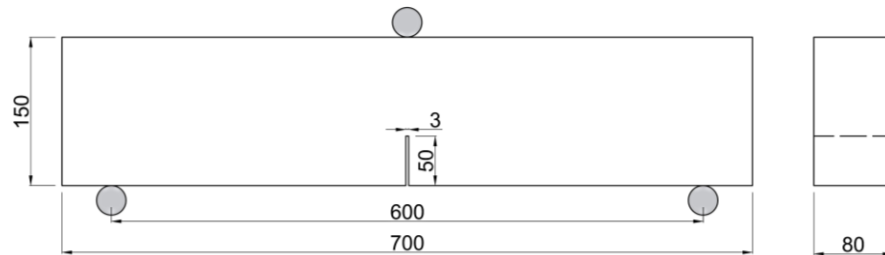
A Figura 24 apresenta a geometria das vigas do Método A, enquanto a Figura 25 corresponde ao Método B, ambas com indicações das dimensões (em milímetros) e configurações adotadas nos ensaios experimentais.

Figura 24 – Método A: dimensões da viga.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 25 – Método B: dimensões da viga.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para o Método A o entalhe deve ter altura correspondente à metade da altura da viga, com uma tolerância de  $\pm 5$  mm. Assim, a altura calculada foi de 50 mm, conforme a Equação 15.

$$a_0 = \frac{d}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ mm} \quad (15)$$

Também foi adotada uma altura de 50 mm para as vigas no Método B, uma vez que a razão inicial da profundidade do entalhe deve estar entre 1/4 e 1/3, conforme a Equação 16.

$$\frac{a_0}{d} = \frac{50}{150} = \frac{1}{3} \quad (16)$$

### 3.1.2 Identificação dos corpos de prova

A nomenclatura dos corpos de prova seguiu um padrão que permite a identificação do método de ensaio, da configuração e da presença de entalhe. Cada corpo de prova foi nomeado conforme a estrutura 'MX-T-N(e)', tal que:

- M representa o método de ensaio adotado (A para o TC 50-FCM e B para o TC 89-FMT);
- T indica o tipo do corpo de prova, sendo 'R' para referência (sem fibras), '0,5' para corpo de prova com 0,5% de fibra, '1' para 1% de fibra e '1,25' para 1,25% de fibra;
- N corresponde ao número do corpo de prova dentro de cada categoria;
- (e) indica a presença de entalhe, quando aplicável.

As porcentagens de fibras de PET adotadas foram definidas com base em critérios técnicos de desempenho, seguindo a mesma abordagem utilizada por Cereja (2025). Valores abaixo de 0,5% apresentam efeito limitado sobre o comportamento pós-fissuração, enquanto teores acima de 1,25% podem comprometer a trabalhabilidade e a homogeneidade da mistura.

### 3.1.3 Quantitativo dos corpos de prova

Para o Método A foram adotadas 3 vigas com entalhe para cada proporção de fibra (0%; 0,5%; 1% e 1,25%), além de 3 vigas sem entalhe. No Método B foram adotadas 4 vigas com entalhe para cada tipo e 3 vigas sem entalhe, em conformidade com a exigência da RILEM (TC 89-FMT), que estipula o mínimo de quatro vigas para cada tipo de material. No total, foram moldadas 52 vigas, sendo 24 para o Método A e 28 para o B. A distribuição das vigas está detalhada na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantitativo de vigas por método, porcentagem de fibra e presença de entalhe.

Método	Descrição	Quantidade total	Vigas com entalhe	Vigas sem entalhe
A	Referência	6	3	3
A	0,5% de fibra	6	3	3
A	1% de fibra	6	3	3
A	1,25% de fibra	6	3	3
B	Referência	7	4	3
B	0,5% de fibra	7	4	3
B	1% de fibra	7	4	3
B	1,25% de fibra	7	4	3

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A inclusão de vigas sem entalhe em ambos os métodos tem como objetivo servir de base para análise do comportamento mecânico do concreto convencional, enquanto as vigas entalhadas possibilitam a aplicação das metodologias específicas de determinação dos parâmetros de fratura.

## 3.2 MATERIAIS

Esta seção apresenta os materiais empregados na produção do concreto, incluindo cimento CPV ARI RS, agregado miúdo, agregado graúdo, água, superplastificante e fibras de PET. Para todos os componentes foi adotado um acréscimo de 15% sobre o quantitativo necessário, a fim de compensar possíveis perdas durante o processo de concretagem.

### 3.2.1 Cimento

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado o cimento Portland do tipo CP V-ARI RS, da empresa Mizu® (Uso Estrutural Super Forte), caracterizado por sua alta resistência inicial. A composição química e as propriedades físico-químicas do cimento CP V-ARI RS estão apresentadas no Anexo A.

Conforme apresentado na Tabela 7, a massa total de cimento utilizada nos Métodos A e B, considerando as vigas e os corpos de prova cilíndricos, totalizou 223,73 kg.

Tabela 7 – Cimento - CPV ARI RS.

Método	Referência de consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Massa - vigas (kg)	Massa - corpos de prova (kg)	Perda (%)	Massa total (kg)
A	410	82,66	7,73	15	103,94
B	410	96,43	7,73	15	119,78

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado consistiu em areia natural proveniente do Rio Paraíba do Sul, fornecida pela empresa Matericon, situada no município de Campos dos Goytacazes, RJ.

Conforme apresentado na Tabela 8, a referência de consumo adotada foi de 698 kg/m<sup>3</sup>, resultando em uma massa total de 380,88 kg de areia, considerando as quantidades utilizadas para as vigas e corpos de prova.

Tabela 8 – Agregado miúdo – areia.

Método	Referência de consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Massa - vigas (kg)	Massa - corpos de prova (kg)	Perda (%)	Massa total (kg)
A	698	140,72	13,16	15	176,95
B	698	164,17	13,16	15	203,93

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo reciclado utilizado neste estudo é oriundo de uma laje moldada no Laboratório de Engenharia Civil, com resistência característica à compressão de 20 MPa, sendo este o mesmo material empregado por Cereja (2025).

A massa total do agregado graúdo reciclado preparado foi de 535,31 kg, sendo 248,7 kg destinados ao Método A e 286,61 kg ao B, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 – Agregado graúdo reciclado.

Método	Referência de consumo (kg/m <sup>3</sup> )	Massa - vigas (kg)	Massa - corpos de prova (kg)	Perda (%)	Massa total (kg)
A	981	197,77	18,49	15	248,70
B	981	230,73	18,49	15	286,61

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

#### 3.2.3.1 Preparação do agregado graúdo reciclado

A fragmentação do concreto foi realizada em duas etapas: inicialmente, as peças de maior dimensão foram britadas com o uso do martelo elétrico. Posteriormente, os fragmentos menores foram reduzidos manualmente com o auxílio da marreta de ferro fundido, para a obtenção de material com granulometria adequada para posterior processamento no britador de mandíbulas.

Para a obtenção dos agregados graúdos reciclados, foi empregado um britador de mandíbulas da marca Fritsch®, cujo funcionamento se baseia na aplicação de alta pressão entre uma mandíbula fixa e outra móvel dentro de uma câmara fechada, promovendo a fragmentação do material. O ajuste da abertura entre as mandíbulas pode ser realizado externamente, permitindo o controle da granulometria

final. Após a trituração, a amostra fragmentada é direcionada para uma gaveta de coleta.

Na Figura 26 são apresentados os resíduos de concreto antes e após o processo de britagem. Inicialmente, o material é constituído por fragmentos de maior dimensão (Figura 26a). Após a passagem pelo britador de mandíbulas, observa-se a redução significativa do tamanho das partículas (Figura 26b), tornando o material adequado para a etapa de peneiramento.

Figura 26 – Agregado reciclado antes e depois do processamento no britador de mandíbulas.



a) Resíduo antes do processo de britagem.



b) Agregado reciclado após a britagem.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Após a etapa de britagem, foi realizado o peneiramento, com o objetivo de obter brita 0. A Figura 27 apresenta as peneiras granulométricas utilizadas, que possuem aberturas de 12,5 mm e 4,75 mm, com dimensões de 50 cm x 50 cm x 10 cm.

Figura 27 – Peneiras 12,5 mm e 4,75 mm utilizadas para obtenção de brita 0.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

As partículas retidas na peneira de 12,5 mm, apresentadas na Figura 28, foram submetidas a uma nova britagem em britador de mandíbula, seguida por um novo peneiramento.

Figura 28 – Material retido na peneira 12,5 mm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O material com dimensões entre 12,5 mm e 4,75 mm (Figura 29a) foi selecionado para a pesquisa. Já a fração mais fina (Figura 29b), composta por partículas menores que 4,75 mm e acumulada no fundo da peneira, foi descartada.

Figura 29 – Separação do agregado graúdo reciclado: a) material selecionado; b) fração descartada.



a) Resíduo utilizado na pesquisa.



b) Fração fina do agregado reciclado.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O peneiramento foi realizado com o auxílio de uma mesa vibratória da marca Pec Fômas®. A vibração induzida pelo equipamento facilitou a separação das partículas, promovendo a movimentação do quadro superior, apoiado por molas

helicoidais. Após a conclusão de todos os processos descritos, os materiais foram organizados conforme a betonagem correspondente.

### 3.2.4 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária Águas do Paraíba (Tabela 10), empresa responsável pelo abastecimento público na cidade de Campos dos Goytacazes, RJ.

A dosagem do aditivo superplastificante foi elevada nas betonadas 4, 5, 6 e 7, visando mitigar os efeitos da ausência de vibração mecânica, reduzindo a incorporação de ar aprisionado e garantindo uniformidade satisfatória da mistura. A elevação da relação água/cimento nos concretos das betonadas B4, B5 e B6 foi necessária para garantir consistência adequada da mistura, permitindo homogeneidade na distribuição das fibras e evitando segregação ou vazios.

Tabela 10 – Água.

Betonada	Descrição	Relação a/c	Referência de consumo (l/m <sup>3</sup> )	Massa - vigas (l)	Massa - corpos de prova (l)	Perda (%)	Massa total (l)
B1	MA-R	0,47	193,73	9,76	0,91	15	12,28
B2	MB-R	0,47	193,73	11,39	0,91	15	14,15
B3	MA-0,5	0,47	193,73	9,76	0,91	15	12,28
B4	MB-0,5	0,49	200,51	11,79	0,94	15	14,65
B5	MA-1	0,49	201,57	10,16	0,95	15	12,78
B6	MB-1	0,49	200,51	11,79	0,94	15	14,65
B7	MA-1,25	0,47	193,73	9,76	0,91	15	12,28
B8	MB-1,25	0,47	193,73	11,39	0,91	15	14,15

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.2.5 Aditivo superplastificante

Foi utilizado aditivo superplastificante Glenium® 51 de terceira geração, fabricado pela BASF S. A., para a produção dos concretos.

As propriedades técnicas do aditivo superplastificante, conforme especificadas pelo fabricante, encontram-se descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Características técnicas do aditivo superplastificante Glenium 51.

<b>Especificação</b>	<b>Valor</b>
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo
pH	5 – 7
Densidade	1,067 – 1,107 g/cm <sup>3</sup>
Teor de sólidos	28,5 – 31,5%
Viscosidade	< 150 cP (centipoise)
Base química	Éter policarboxílico
Solubilidade em água	Total
Conteúdo de cloretos	Isento de cloreto de cálcio

Fonte: Glenium 51, 2025.

Este aditivo, com base química de éter carboxílico alterado, atua dispersando o material cimentício, o que proporciona melhor homogeneização e redução na quantidade de água necessária.

Dessa forma, foi possível obter um concreto com boa trabalhabilidade sem comprometer o tempo de endurecimento. A Tabela 12 apresenta o quantitativo de aditivo utilizado em cada betonada.

Tabela 12 – Superplastificante.

<b>Betonada</b>	<b>Descrição</b>	<b>Referência de consumo (l/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa - vigas (l)</b>	<b>Massa - corpos de prova (l)</b>	<b>Perda (%)</b>	<b>Massa total (l)</b>
B1	A	2,134	0,11	0,010	15	0,14
B2	B	2,134	0,13	0,010	15	0,16
B3	A	2,134	0,11	0,010	15	0,14
B4	B	2,800	0,16	0,013	15	0,20
B5	A	2,801	0,14	0,013	15	0,18
B6	B	2,492	0,15	0,012	15	0,18
B7	A	2,435	0,12	0,011	15	0,15
B8	B	2,134	0,13	0,010	15	0,16

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.2.6 Fibras de PET

A metodologia adotada para a produção das fibras de PET seguiu os mesmos procedimentos descritos por Cereja (2025). Assim como na pesquisa de referência, as garrafas PET foram selecionadas da mesma marca, cortadas manualmente em tiras com dimensões semelhantes e incorporadas diretamente na mistura durante o preparo do concreto. Essa padronização permitiu manter consistência na distribuição das fibras e nas propriedades finais do material, além de possibilitar a análise comparativa dos efeitos da variação do volume de fibras no desempenho mecânico das vigas de concreto reciclado.

Após a higienização, as garrafas de PET foram cortadas em tiras com largura média de 2 mm ( $\pm 0,5$  mm) e comprimento de 50 mm. A definição desse comprimento está relacionada ao desempenho observado nos ensaios de arrancamento realizados por Cereja (2025). Nos testes, fibras com menores profundidades de embutimento, como 20 e 30 mm, apresentaram escorregamento na interface com a matriz, sem evidências de deformação plástica, o que caracteriza ancoragem deficiente. Em contrapartida, comprimentos de 40 mm já foram suficientes para induzir deformação plástica das fibras, indicando o limite mínimo de ancoragem. Assim, o comprimento de 50 mm foi adotado como medida de segurança, de modo a compensar a distribuição aleatória das fibras no concreto e potencializar a transferência de tensões entre a fibra e a matriz cimentícia.

O quantitativo de fibras utilizado em cada método, correspondente a 0,5%, 1% e 1,25% em relação ao volume do concreto, está descrito na Tabela 13.

Tabela 13 – Fibras de PET.

Método	Porcentagem de fibras (%)	Massa específica do PET ( $\text{kg/m}^3$ )	Massa - vigas (g)	Massa - corpos de prova (g)	Massa total (g)
A	0,50	352,00	102,01	9,54	111,55
A	1,00	352,00	204,02	19,08	223,09
A	1,25	352,00	255,02	23,84	278,87
B	0,50	352,00	119,01	9,54	128,55
B	1,00	352,00	238,02	19,08	257,10
B	1,25	352,00	297,53	23,84	321,37

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 3.2.6.1 Preparação das fibras de PET

As garrafas PET foram submetidas a um processo de lavagem e secagem para remoção de impurezas. A área útil, destacada na Figura 30, corresponde à região mais maleável do material, sendo selecionada para os procedimentos subsequentes. Essa região central da garrafa, livre de ondulações e variações de espessura, apresenta boa uniformidade, o que contribui para a obtenção de fibras com propriedades mecânicas mais uniformes.

Figura 30 – Área útil da garrafa PET.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O processo de fabricação das fibras de PET foi realizado com o auxílio de um desfiador, apresentado na Figura 31, configurado para produzir fibras com 2 mm de largura. As fibras foram cortadas manualmente em tiras de 50 mm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 31 – Desfiador de fibras de PET a partir de garrafas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Figura 32 – Fibras de PET após o processo de desfiação e corte.



a) Pesagem das fibras.      b) Medição da fibra.

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

### 3.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Nesta pesquisa adotou-se o método de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), seguindo a abordagem descrita na dissertação de Cereja (2025). A principal vantagem desse método é sua aplicabilidade prática, permitindo adaptações a diferentes condições de obra e tipos de concreto, incluindo concretos convencionais, bombeáveis e de alto desempenho.

O método ABCP para dosagem de concreto baseia-se em critérios de desempenho e otimização da composição dos materiais. Esse método considera as propriedades físicas e mecânicas dos constituintes do concreto, como cimento, agregados, aditivos e água, para determinar a melhor relação entre resistência, trabalhabilidade e durabilidade. A metodologia segue um processo iterativo de ajustes na composição, garantindo que o concreto atenda às especificações de projeto com o menor consumo de cimento possível.

Os traços utilizados para a produção dos concretos foram estabelecidos com base em critérios de desempenho e referências experimentais prévias. Especificamente, adotou-se como referência o estudo de Trindade (2022), conforme também aplicado por Cereja (2025), que determinou a composição em massa dos materiais por metro cúbico de concreto. Essa escolha assegura que os concretos produzidos apresentem propriedades adequadas de resistência e trabalhabilidade e durabilidade, permitindo comparabilidade com resultados experimentais previamente validados.

### 3.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.4.1 Fôrmas utilizadas na moldagem

Os seis conjuntos de fôrmas foram confeccionados em madeirite plastificado com espessuras de 13 mm e 19 mm, a partir de placas de 2,20 m x 1,10 m. Para fins de ilustração, no Apêndice A são apresentados exemplos de fôrmas utilizadas nos ensaios, correspondentes ao Método A e ao Método B.

Antes da concretagem, foi aplicado óleo lubrificante (Motor Moto 4T 20W-50) nas fôrmas, com o objetivo de facilitar o desmolde e reduzir a aderência entre o concreto e a superfície das fôrmas, conforme recomenda NBR 5738 (ABNT, 2015).

#### 3.4.2 Concretagem e cura dos corpos de prova

As betonagens foram realizadas no dia 13 de janeiro de 2025, no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ. A sequência das betonagens está descrita no Quadro 2.

Quadro 2 – Sequência das betonadas.

Número da betonada	Método	Descrição
1	Método A	Referência – 0% de fibra
2	Método B	Referência – 0% de fibra
3	Método A	0,5% de fibra
4	Método B	0,5% de fibra
5	Método A	1% de fibra
6	Método B	1% de fibra
7	Método A	1,25% de fibra
8	Método B	1,25% de fibra

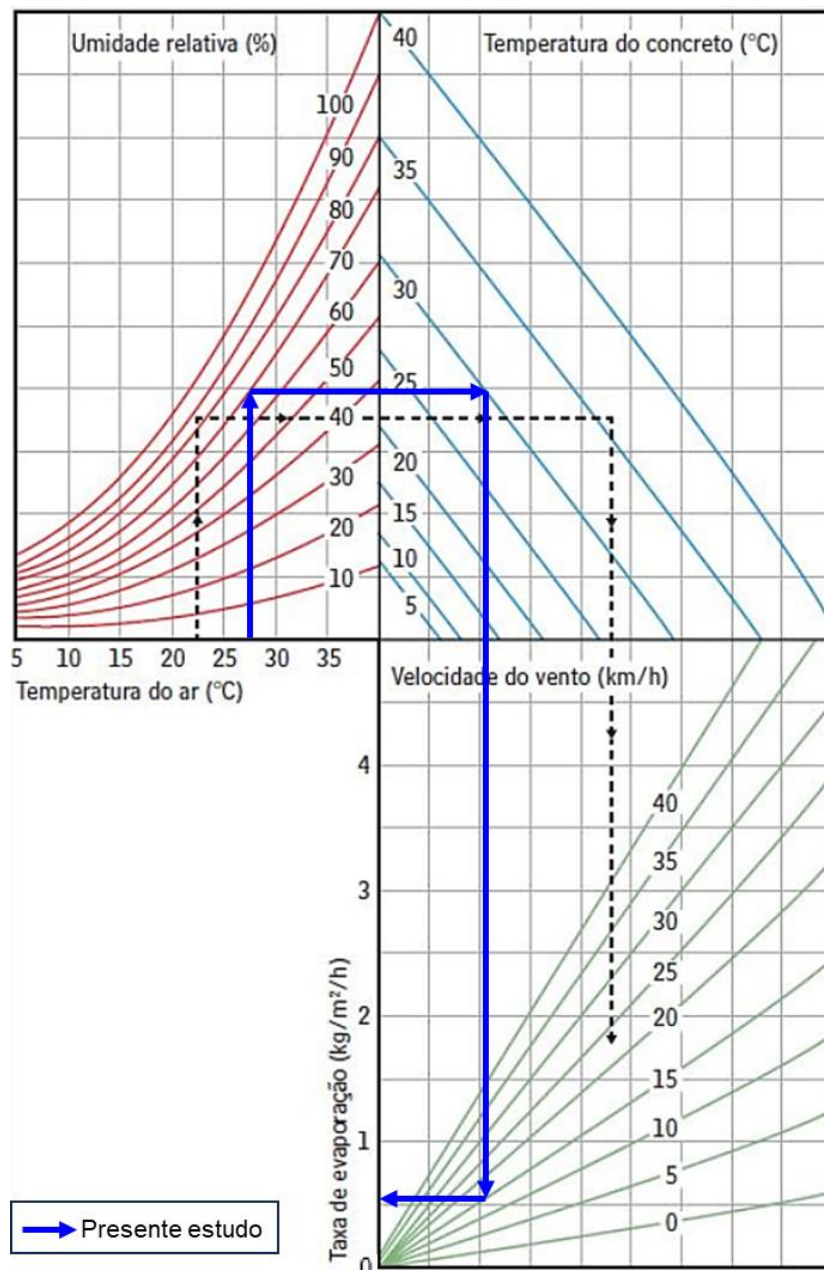
Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Durante o processo de concretagem, foram registradas as condições meteorológicas com o intuito de avaliar possíveis influências ambientais sobre o comportamento do concreto no estado fresco.

As temperaturas variaram entre 26 °C e 28 °C, apresentando cenário predominantemente nublado. A umidade relativa do ar se manteve entre 64% e 72%, indicando condição atmosférica úmida. A velocidade dos ventos variou entre 7 km/h e 11 km/h.

A taxa de evaporação estimada para as condições ambientais observadas foi de aproximadamente 0,6 kg/m<sup>2</sup>/h, conforme determinação gráfica da NBR 14931 (ABNT, 2023), representada na Figura 33. Informações sobre as condições climáticas registradas (B1, B2, B3, B5, B6 e B8) encontram-se no Apêndice B.

Figura 33 – Diagrama para obtenção de estimativa da taxa de evaporação.



Fonte: Adaptado de NBR 14931 (ABNT, 2023).

Essa estimativa foi obtida a partir da combinação de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade média do vento. De acordo com a referida norma, taxas de evaporação superiores a  $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  demandam atenção especial quanto à possibilidade de fissuração por retração plástica, devido à rápida perda de umidade superficial do concreto fresco. No caso em estudo, a taxa obtida é inferior a esse limite, indicando condição ambiental aceitável para a execução das betonagens.

A mistura dos materiais do concreto foi realizada em uma betoneira da marca CSM com capacidade de 400 litros. A Figura 34 apresenta o momento da adição das fibras e a homogeneização do concreto.

Figura 34 – Mistura do concreto realizada em betoneira.



a) Mistura dos constituintes do concreto.

b) Colocação das fibras (B5).

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A moldagem e a cura dos corpos de prova foram realizadas conforme os critérios estabelecidos na NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando moldes cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura (Figura 35).

Figura 35 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O procedimento de avaliação no estado fresco (Figura 36), por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), foi realizado com base na NBR 16889 (ABNT, 2020).

Figura 36 – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise dos resultados obtidos no ensaio de abatimento do tronco de cone (Tabela 14), revela variações na consistência dos concretos produzidos, com valores de abatimento compreendidos entre 145 mm e 230 mm.

Segundo a classificação estabelecida pela NBR 8953 (ABNT, 2015), a maioria das dosagens enquadra-se nas classes de consistência S160 ( $160 \text{ mm} \leq A < 220 \text{ mm}$ ) e S220 ( $A \geq 220 \text{ mm}$ ), com exceção da viga MA-0,5 (B3), pertencente à classe S100 ( $100 \text{ mm} \leq A < 160 \text{ mm}$ ). A fluidez observada, mesmo com teores crescentes de fibras de PET reciclado, sugere que a dosagem adotada foi adequada em manter a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 14 – Resultados do *Slump Test*.

Betonada	Identificação	Slump (mm)
B1	MA-R	180
B2	MB-R	200
B3	MA-0,5	145
B4	MB-0,5	195
B5	MA-1	220
B6	MB-1	230
B7	MA-1,25	200
B8	MB-1,25	190

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Figura 37 destaca a moldagem das vigas do grupo de referência (MA-R), sem adição de fibras, utilizadas para comparação com os demais grupos.

Figura 37 – Moldagem das vigas (MA-R).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Durante as primeiras 24 horas, as vigas permaneceram cobertas com uma manta úmida, a fim de evitar a evaporação excessiva de água, conforme mostra a Figura 38. Após um dia da concretagem (Figura 39), os corpos de provas foram desmoldados.

Figura 38 – Processo de cura inicial do concreto.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 39 – Vigas após 24h da concretagem.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Todas as peças foram identificadas após a desmoldagem e, em seguida, acondicionadas em caixa contendo solução saturada de hidróxido de cálcio, conforme Figura 40, a fim de garantir cura adequada e uniforme dos corpos de prova até o momento dos ensaios.

Figura 40 – Cura úmida dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.5 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE E INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.5.1 Preparação de superfície para a análise DIC

Neste trabalho foi empregada a tecnologia de Correlação de Imagem Digital (CID), ou *Digital Image Correlation* (DIC) em inglês, uma técnica óptica não destrutiva utilizada para medir deslocamentos e deformações em superfícies. Essa metodologia fundamenta-se na aplicação de um padrão estocástico de pontos de alto contraste sobre a superfície do corpo de prova e na comparação digital de imagens capturadas antes e após a solicitação mecânica. Para a preparação dos corpos de prova, iniciou-se com a aplicação de três demãos de tinta branca (Figura 41).

Figura 41 – Aplicação de tinta branca nas vigas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O *software* utilizado realiza a identificação de facetas na superfície dos corpos de prova. Essas facetas são regiões quadradas compostas por pixels claros e escuros, resultantes do padrão estocástico previamente aplicado, que permitem o rastreamento preciso dos deslocamentos. A partir da análise da deformação dessas facetas ao longo da aplicação de carga, o sistema é capaz de calcular os deslocamentos e deformações relativas.

Para a criação do padrão foi utilizada tinta preta sobre um fundo branco. A aplicação foi realizada por dois métodos: com spray (Figura 42a) e por meio de pulverização manual com pincel (Figura 42b), de modo a garantir a distribuição aleatória dos pontos contrastantes sobre a superfície do concreto.

Figura 42 – Preparação da superfície dos corpos de prova para aplicação da técnica CID.



a) Aplicação de tinta preta com spray.



b) Pulverização de tinta preta com pincel.



c) Corpos de prova cilíndricos após a finalização do processo de preparação superficial

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.5.2 Execução do entalhe

De acordo com as recomendações da RILEM TC 50-FMC (1985), o entalhe da viga pode ser moldado durante a concretagem, o que permite a confecção direta do entalhe no momento da cura inicial do concreto. Contudo, essa prática deve ser adotada apenas na ausência de equipamento adequado, como serra específica para corte.

A norma destaca que a opção preferencial é a confecção do entalhe por meio de serragem, realizada em condições úmidas, com antecedência mínima de um dia em relação à data do ensaio, a fim de minimizar danos ao concreto. Diante dessas diretrizes, optou-se pela execução do entalhe por meio de corte úmido (Figura 43), reduzindo a possibilidade de microfissuração indesejada.

Figura 43 – Processo de entalhe das vigas.



a) Corte úmido com disco diamantado.

b) Realização do entalhe.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Durante a execução do entalhe nas vigas de concreto, foram testados três discos de corte com diferentes diâmetros, a fim de verificar sua eficiência na obtenção de um entalhe com 50 mm de altura. Inicialmente, utilizou-se o disco de 110 mm (Figura 44a), acoplado a uma marquita que, apesar de adequado para cortes em materiais cerâmicos, apresentou limitação na profundidade máxima atingível, alcançando apenas 35 mm.

Figura 44 – Sequências de discos testados para realização dos entalhes.



a) Disco 110 mm

b) Disco 180 mm

c) Disco 230 mm

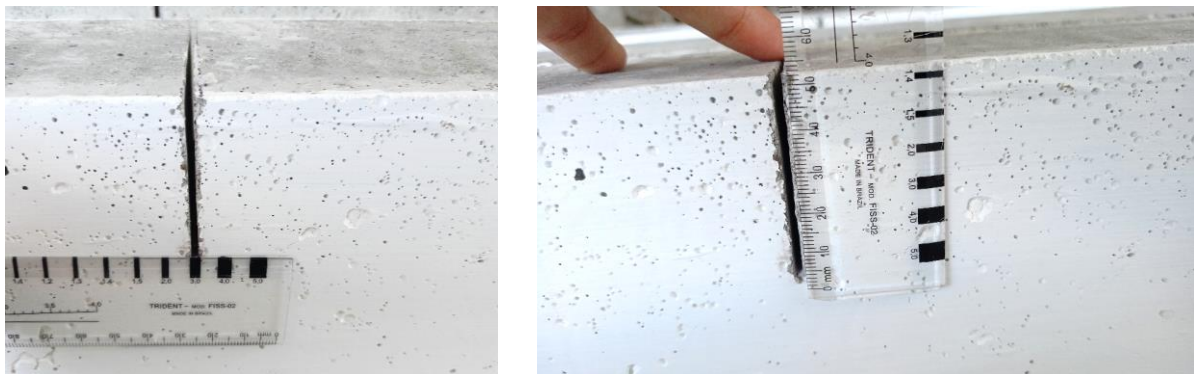
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Em seguida, optou-se pelo uso do disco de 180 mm (Figura 44b) em um equipamento de corte distinto, o que permitiu um avanço na profundidade do entalhe, atingindo aproximadamente 40 mm. No entanto, essa profundidade ainda era insuficiente para atender aos requisitos estabelecidos para o ensaio. A limitação decorreu da configuração do equipamento utilizado, que restringiu o avanço total do disco na peça.

Diante dessa dificuldade, foi necessária a utilização do disco de 230 mm (Figura 44c) que, por meio de adaptações no processo, possibilitou a obtenção da profundidade desejada de 50 mm, assegurando a precisão dimensional do entalhe conforme as recomendações da RILEM TC 50-FMC e TC 89-FMT. Embora o disco possua espessura nominal de 1,2 mm, o processo de corte resultou em entalhes com aproximadamente 3 mm de largura nas vigas (Figura 45).

Segundo Gretti (2006), a espessura do entalhe deve ser tão pequena quanto possível, não devendo exceder 0,5 vezes a dimensão máxima do agregado. Além disso, a RILEM TC 50-FMC (1985) estabelece que a espessura do entalhe na ponta deve ser inferior a 10 mm, assegurando condições adequadas para a propagação controlada da trinca durante o ensaio.

Figura 45 – Espessura e altura do entalhe.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.5.3 Instrumentação com *strain gages*

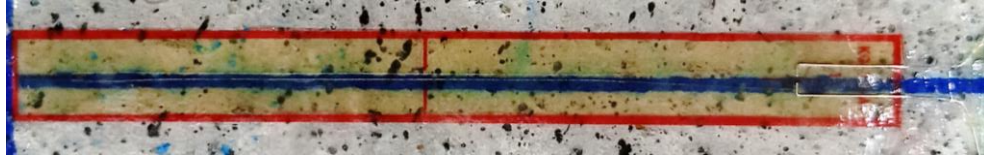
#### 3.5.3.1 Tipos de *strain gages* utilizados

Os extensômetros da linha KC, denominados nesta pesquisa como Tipo 1 (Figura 46), possuem comprimento de grade ampliado, sendo indicados para a medição média de deformações em materiais heterogêneos, como o concreto.

Para assegurar que as medições representassem adequadamente o comportamento do material, recomenda-se que o comprimento da grade seja superior a três vezes o maior diâmetro do agregado graúdo. No concreto reciclado utilizado neste estudo o maior diâmetro da brita foi de 12,5 mm, o que corresponde a um comprimento mínimo recomendado de 37,5 mm. Como os extensômetros

empregados apresentavam comprimento de grade superior a esse valor, considerou-se que os critérios de representatividade da deformação foram atendidos.

Figura 46 – *Strain gage* – Tipo 1 – KC-70-120-A1-11.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

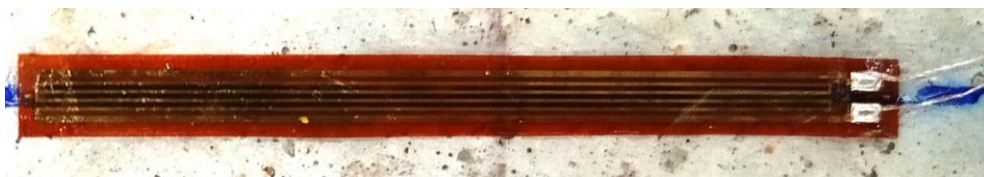
Os modelos BF120-100AA (Tipo 2) e BF120-50AA (Tipo 3) mostradas nas Figuras 47 e 48, respectivamente, foram utilizados para a medição de deformações em regiões específicas das vigas de concreto.

Figura 47 – *Strain gage* – Tipo 2 – BF120-100AA.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 48 – *Strain gage* – Tipo 3 – BF120-50AA.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O modelo BF120-100AA, com comprimento de grade de 100 mm, foi empregado em diferentes vigas devido à sua adequação para medições em materiais heterogêneos como o concreto.

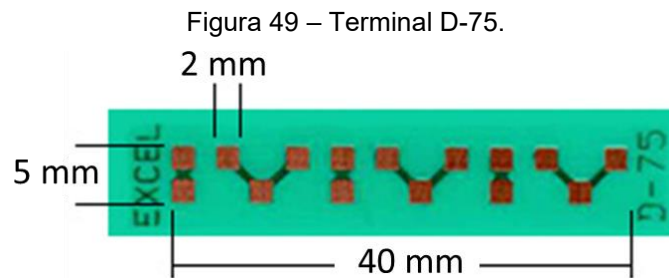
Já o modelo BF120-50AA, com comprimento de grade de 50 mm, foi utilizado apenas em uma viga, uma vez que o único exemplar restante foi danificado durante o processo de colagem. Ambos os modelos possuíam resistência nominal de 120  $\Omega$ , encapsulamento adequado e coeficiente de sensibilidade entre 2 e 2,2, sendo apropriados para medições em materiais cimentícios sob condições controladas.

Informações complementares sobre os extensômetros utilizados podem ser consultadas no Anexo B.

### 3.5.3.2 Terminais de ligação

Os terminais coláveis de ligação são utilizados para realizar a conexão entre os fios extremamente finos e sensíveis do extensômetro e os cabos mais resistentes que conduzem os sinais até os equipamentos de medição.

Foi empregada a configuração D (Figura 49), que possui um terminal do tipo "I" e outro do tipo "Y", permitindo dividir um dos condutores em duas conexões e, com isso, viabilizar a montagem do sistema com três fios.



Fonte: Adaptado de Excel, 2025.

### 3.5.3.3 Quantitativo de *strain gages*

Um total de 60 *strain gages* foi adquirido para esta etapa da pesquisa, possibilitando a instrumentação de 30 vigas, com dois sensores posicionados simetricamente em cada peça, localizados a 30 mm do centro da viga.

A seleção das vigas instrumentadas seguiu critérios de representatividade das diferentes proporções de fibra. O Quadro 3 apresenta as vigas instrumentadas para o Método A, enquanto o Quadro 4 descreve aquelas utilizadas no Método B. Esses dados foram fundamentais para a análise comparativa do desempenho mecânico entre os diferentes volumes de fibras.

Três tipos distintos de *strain gages* foram empregados no processo de instrumentação das vigas. A maioria dos sensores corresponde ao Tipo 1 (KC-70-120-A1-11), totalizando 46 unidades. Adicionalmente, foram utilizados 6 *strain gages* do Tipo 2 (BF120-100AA) e 1 do Tipo 3 (BF120-50AA).

Quadro 3 – Vigas do Método A que receberam *strain gages*.

Método	Identificação	Descrição
Método A	MA-R-1e MA-R-2e MA-R-4	2 vigas com entalhe 1 viga sem entalhe
	MA-0,5-1e MA-0,5-2e MA-0,5-4 MA-0,5-5	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe
	MA-1-2e MA-1-3e MA-1-4 MA-1-5	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe
	MA-1,25-1e MA-1,25-2e MA-1,25-4 MA-1,25-5	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Quadro 4 – Vigas do Método B que receberam *strain gages*.

Método	Identificação	Descrição
Método B	MB-R-1e MB-R-2e MB-R-5	2 vigas com entalhe 1 viga sem entalhe
	MB-0,5-1e MB-0,5-2e MB-0,5-5 MB-0,5-6	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe
	MB-1-1e MB-1-2e MB-1-5 MB-1-6	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe
	MB-1,25-1e MB-1,25-2e MB-1,25-5 MB-1,25-6	2 vigas com entalhe 2 vigas sem entalhe

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

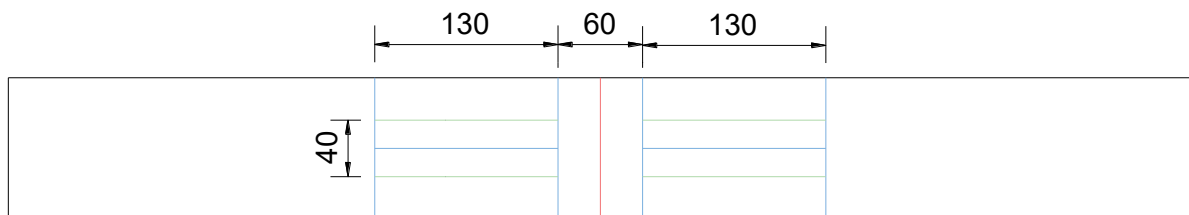
### 3.5.3.4 Procedimento de colagem e soldagem

Para a correta instalação dos extensômetros nas vigas, seguiu-se um procedimento de preparação da superfície. A preparação incluiu um processo de

lixamento progressivo, utilizando lixas de granulometria 120 e 220. Após o lixamento, as vigas foram lavadas e deixadas em repouso até sua completa secagem.

Foi traçada uma linha central ao longo do comprimento da viga, paralela à menor dimensão (80 mm ou 100 mm), priorizando a direção do entalhe quando presente. Em seguida, delimitou-se uma área de 130 mm x 40 mm (Figura 50), posicionada de forma a se aproximar ao máximo da linha central, sendo essa a região preparada para a fixação dos extensômetros.

Figura 50 – Marcação para colagem de *strain gage* (dimensões em mm).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

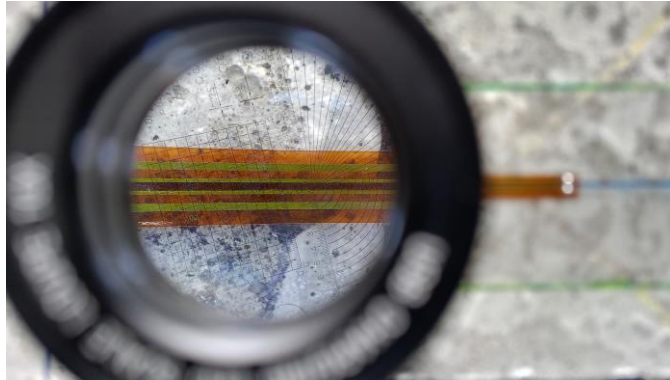
Aplicaram-se duas camadas do adesivo instantâneo (Tek Bond 793) na superfície previamente lixada e limpa da região de fixação dos extensômetros. Após a aplicação da primeira camada foi respeitado um período de 24 horas de secagem à temperatura ambiente.

Em seguida, foi aplicada a segunda camada, garantindo elevada ancoragem dos *strain gages* ao substrato de concreto, fator essencial para a precisão na medição das deformações durante os ensaios.

Posteriormente, a superfície foi lixada com lixa 220 para garantir boa uniformização da região de fixação dos extensômetros. Em seguida, a área foi limpa com algodão e álcool isopropílico.

Para assegurar o posicionamento correto dos extensômetros, utilizou-se fita adesiva até que estes estivessem devidamente posicionados com as marcas de referência. Para os *strain gages* de menor dimensão, foi empregada uma lupa de LED com ampliação de 10x, permitindo a verificação do alinhamento em relação à referência (Figura 51).

Figura 51 – Utilização de lupa para posicionamento de *strain gage*.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Após o alinhamento, a fita foi removida, e aplicou-se o acelerador para adesivos, garantindo fixação rápida do *strain gage* à superfície preparada.

Após a secagem, aplicou-se a cola no *strain gage* e no terminal, pressionando-os por aproximadamente 30 segundos para assegurar a fixação adequada (Figura 52).

Figura 52 – *Strain gage* após aplicação de cola.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Borrachas escolares foram colocadas sobre os terminais e extensômetros (Figura 53), com a adição de um peso, para garantir aderência uniforme durante o processo de secagem. Após 24 horas, a fita adesiva foi removida cuidadosamente, aplicando-se um “esforço cisalhante”, para evitar danos aos extensômetros e assegurar suas integridades durante os ensaios.

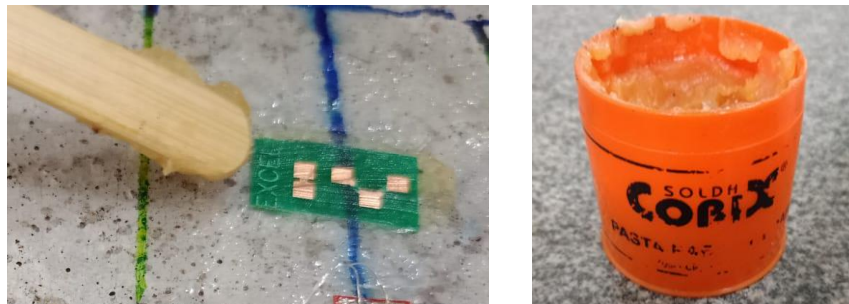
Figura 53 – Processo para secagem dos extensômetros e terminais.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Antes de se realizar a soldagem dos fios, aplicou-se uma pasta (Figura 54), a qual atua como fluxo de soldagem, removendo óxidos e impurezas da superfície, facilitando a aderência do estanho e garantindo uma conexão elétrica durável.

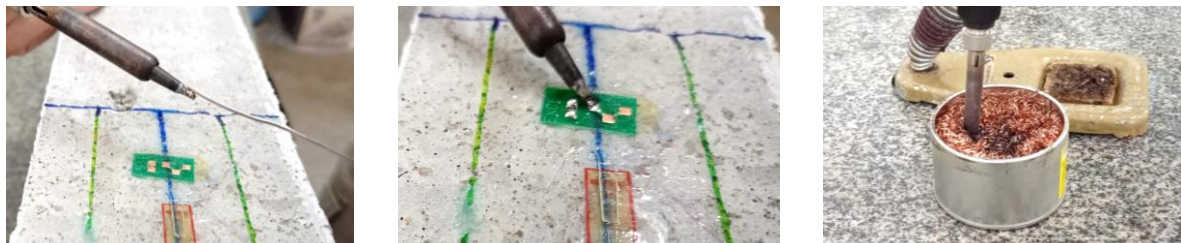
Figura 54 – Aplicação de pasta para solda.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Na Figura 55 observa-se o processo de fixação dos fios de um extensômetro ao terminal por meio de soldagem.

Figura 55 – Procedimento de soldagem dos fios nos terminais dos extensômetros.



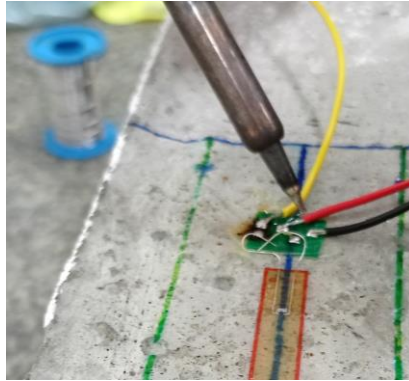
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Inicialmente, aplicou-se solda de estanho para estabelecer a conexão elétrica. O ferro de solda foi utilizado para promover a fusão do estanho, garantindo a

aderência dos fios condutores ao terminal. Para assegurar a qualidade da soldagem, a ponta do ferro de solda foi limpa com uma esponja metálica de fio de cobre.

O mesmo procedimento foi adotado para a conexão dos fios (Figura 56). Para cada *strain gage*, foram utilizados três fios condutores — amarelo, preto e vermelho —, com comprimento de 1 metro cada, totalizando 180 m de fio de 0,32 mm.

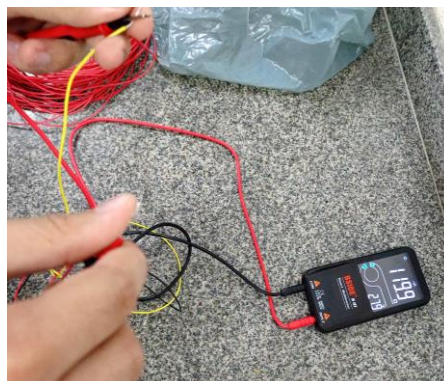
Figura 56 – Soldagem dos fios ao terminal.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A verificação da resistência elétrica dos extensômetros foi realizada por meio de um multímetro digital, conforme Figura 57. Os fios condutores (amarelo, preto e vermelho) foram conectados ao dispositivo de medição, possibilitando a avaliação da continuidade elétrica e da resistência dos *strain gages*.

Figura 57 – Conferência da resistência de *strain gage*.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Após a conclusão dos processos descritos, os extensômetros e seus respectivos terminais foram recobertos com filme de PVC, conforme Figura 58, com o objetivo de proteger a área instrumentada até a realização dos ensaios.

Figura 58 – Filme de PVC para proteger extensômetros e terminais.



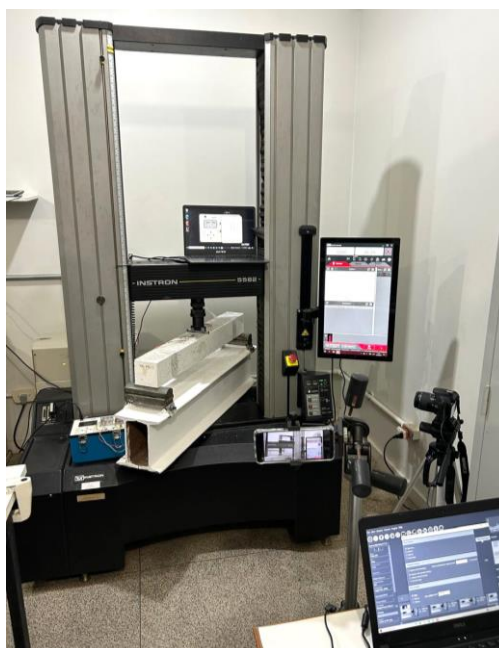
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

## 3.6 ENSAIOS

### 3.6.1 Ensaio de flexão a três pontos

O ensaio de flexão a três pontos foi conduzido utilizando uma Máquina Universal de Ensaio Instron 5582 (Figura 59), com capacidade de carga de 100 kN, localizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Figura 59 – Máquina universal de ensaios Instron 5582.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Devido às dimensões das vigas, que impossibilitavam sua acomodação direta na máquina, foi necessária uma adaptação. Para isso, utilizou-se uma viga metálica como base, sobre a qual foram fixados os apoios de primeiro e segundo gêneros, por meio de cantoneiras e gesso. A Figura 60 apresenta a configuração dos apoios utilizados nas vigas ensaiadas conforme o Método B.

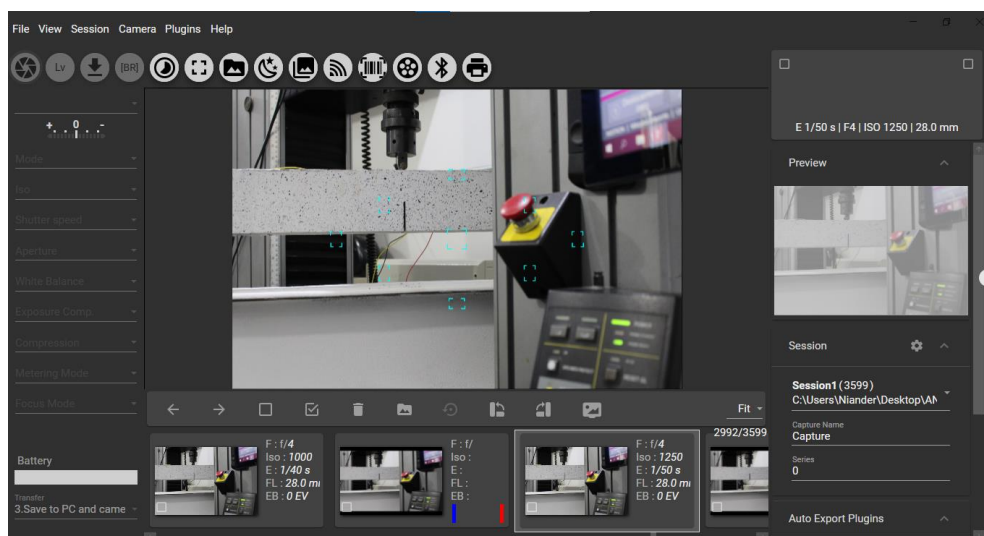
Figura 60 – Apoios para as vigas do Método B.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Por causa da indisponibilidade do instrumento *clip gauge*, conforme recomendado pela RILEM para a medição da abertura da boca da trinca (CMOD), optou-se pela utilização da técnica DIC. As fotografias utilizadas para a aplicação da técnica de Correlação de Imagem Digital foram capturadas com o auxílio do programa computacional digiCamControl®, de forma independente da aquisição dos demais dados experimentais. A interface do *software* é apresentada na Figura 61.

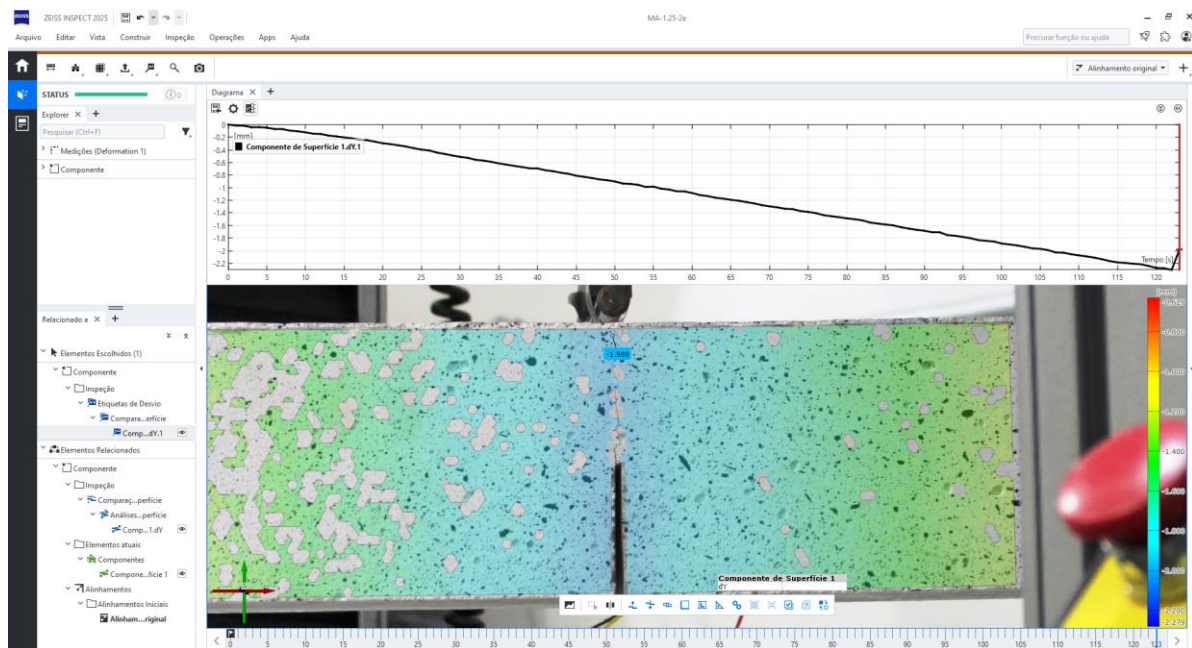
Figura 61 – Interface do *software* DigiCamControl® na captura de imagens para DIC.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise dos campos de deslocamento obtidos por meio da técnica de DIC foi realizada com o *software* Zeiss Inspect. A interface da plataforma, mostrada na Figura 62, permite a importação de sequências de imagens capturadas durante os ensaios, bem como a definição de regiões de interesse, parâmetros de correlação e interpretação gráfica dos resultados obtidos, como mapas de deslocamento e deformação.

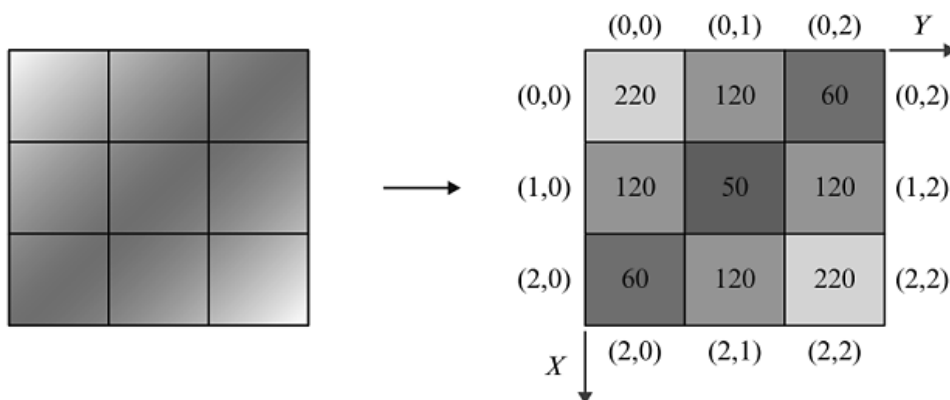
Figura 62 – Interface do *software* Zeiss Inspect (viga MA-1,25-2e).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O método de Correlação Digital de Imagens baseia-se na análise de imagens digitais, que devem ser previamente discretizadas em seus elementos unitários — os pixels (Figura 63) —, para que possam ser processadas pelo algoritmo. Cada pixel é definido por uma posição espacial  $(x, y)$  e um valor de intensidade  $f(x, y)$ , de modo que a imagem é tratada como uma função bidimensional. A essência do método consiste em extrair, da imagem de referência, uma matriz de intensidades correspondente a um bloco de  $N \times N$  pixels e localizar esse mesmo padrão de intensidades na imagem subsequente, a fim de determinar os deslocamentos ocorridos entre as capturas (Beleza, 2017).

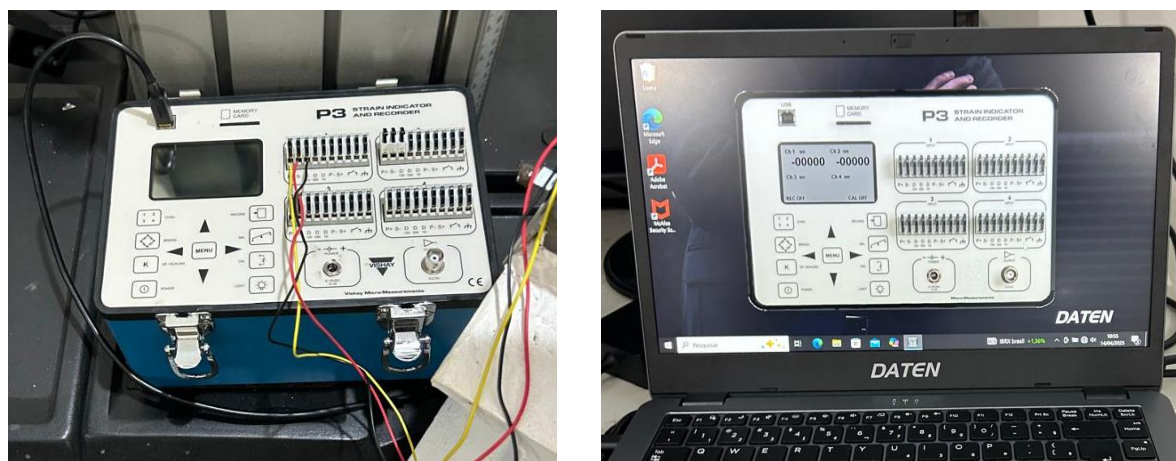
Figura 63 – Exemplo de discretização das posições e das intensidades dos pixels.



Fonte: Adaptado de Sutton, 2008.

Para a aquisição das deformações durante os ensaios com os *strain gages* foi utilizado um indicador e um registrador de deformações modelo P3 *Strain Indicator and Recorder* (Figura 64). O equipamento é utilizado para a leitura e o registro de deformações em ensaios experimentais com extensômetros elétricos. A interface com o computador, realizada via conexão USB, permite a visualização em tempo real, armazenamento e exportação dos dados obtidos.

Figura 64 – Indicador e registrador de deformações.



a) Equipamento P3

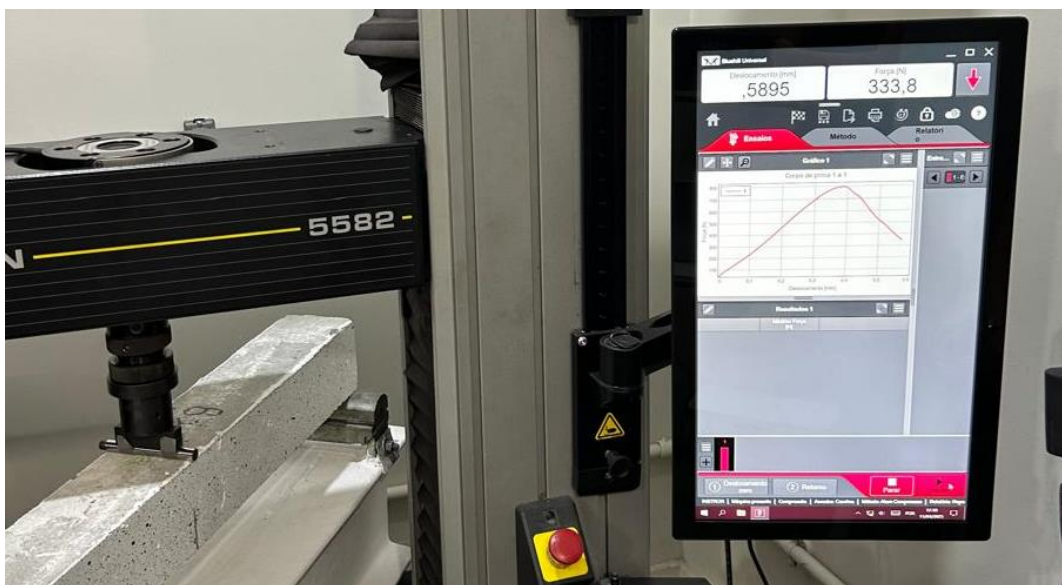
b) Interface do P3 conectada ao notebook

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A tela apresentada na Figura 65 corresponde à interface do *software* de controle Bluehill®, utilizado na operação da máquina Instron durante os ensaios de flexão a três pontos. Essa interface exibe parâmetros para a análise do comportamento dos corpos de prova, como o deslocamento (em milímetros) e a força

aplicada (em Newtons). Adicionalmente, o gráfico força *versus* deslocamento é gerado simultaneamente, o que permite a visualização da curva de carregamento e a identificação de eventos, como a carga máxima e a ruptura da viga.

Figura 65 – Interface do *software* Bluehill® utilizado nos ensaios de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

### 3.6.2 Análise numérica

A modelagem numérica foi realizada por meio do *software* ANSYS 2024, com o objetivo de analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto submetidas ao ensaio de flexão a três pontos, simulando a propagação de trincas e avaliando o desempenho do material reforçado com fibras.

A simulação foi configurada para reproduzir as condições experimentais, incluindo geometria da viga, apoios, aplicação de carga e propriedades dos materiais. Após a execução da simulação, foi realizado o pós-processamento dos resultados numéricos. A análise possibilitou avaliar a eficácia da incorporação de fibras de PET na matriz de concreto, especialmente no que se refere à melhoria da resistência à fratura e ao aumento da capacidade de dissipação de energia.

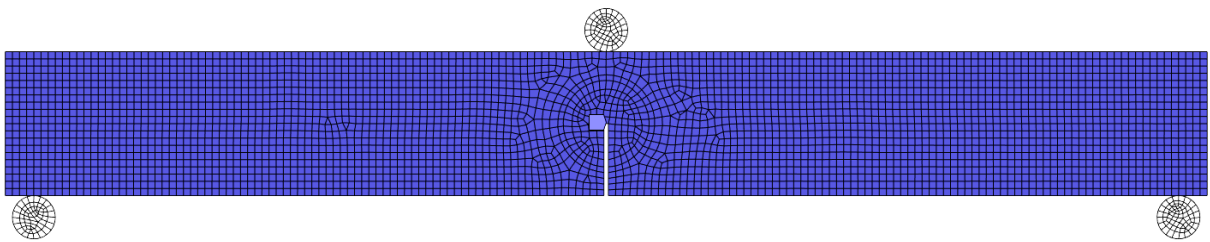
Foi adotado o contato do tipo *Bonded* (ligado) para todas as interfaces entre os corpos sólidos envolvidos na simulação. Essa definição implica que não há separação ou deslizamento relativo entre os corpos conectados. A mesma

configuração foi aplicada tanto para as geometrias do Método A quanto do B, garantindo consistência nos critérios de interação entre as partes dos modelos.

Para a discretização do modelo geométrico foi adotado o método de malha *Hex Dominant*, o qual prioriza a geração de elementos hexaédricos, sendo possível complementar a malha com elementos prismáticos e tetraédricos nas regiões de maior complexidade geométrica. Essa abordagem visa otimizar a qualidade da malha, oferecendo melhor precisão numérica e eficiência computacional em comparação com malhas totalmente tetraédricas.

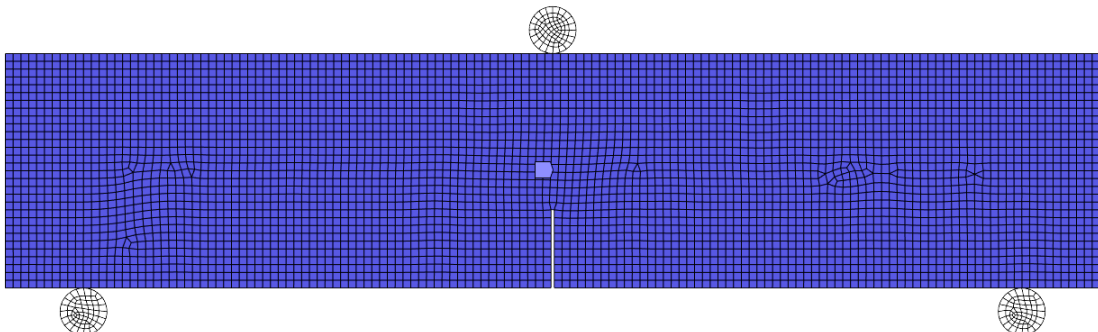
Foi selecionado um elemento de ordem quadrática, o que significa que cada elemento possui nós intermediários além dos vértices. As faces livres foram configuradas para conter elementos quadrangulares e triangulares (*Quad/Tri*), permitindo flexibilidade na adaptação da malha às superfícies complexas da geometria. A Figura 66 ilustra a malha gerada para o modelo do Método A, enquanto a Figura 67 representa a malha correspondente ao modelo do Método B.

Figura 66 – Malha *Hex Dominant* da viga do Método A.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 67 – Malha *Hex Dominant* da viga do Método B.

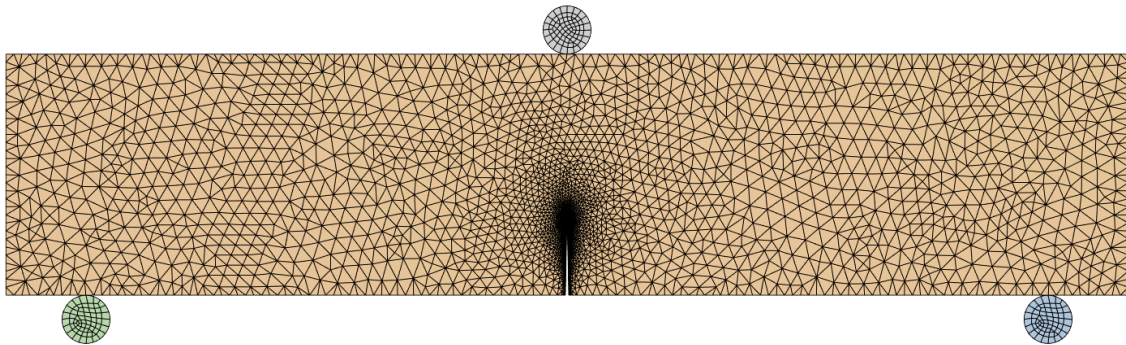


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para a análise de  $CTOD_C$ , que mede o deslocamento na ponta da trinca, a viga foi modelada utilizando malha hexaédrica de segunda ordem (Figura 67). Para a

análise de  $K_{Ic}$  foi utilizada malha tetraédrica de segunda ordem (Figura 68). No Quadro 5 é apresentada comparação entre os dois tipos de malha utilizados — Hex Dominant e Tetrahedrons —, apontando as principais diferenças quanto à aplicabilidade, precisão e adaptação à geometria.

Figura 68 – Malha *Tetrahedrons* da viga do Método B.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Quadro 5 – Diferença entre a malha *Hex Dominant* e *Tetrahedrons*.

Característica	Hex Dominant	Tetrahedrons + Patch Conforming
Tipo de elemento preferido	Hexaédricos (mais precisos)	Tetraédricos (mais flexíveis)
Geometrias ideais	Simple	Complexas
Precisão	Alta (com menor número de elementos)	Boa, mas depende da qualidade dos tetraedros
Algoritmo	Hex Dominant	Patch Conforming
Ordem do elemento	Quadrática	Quadrática

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As representações no ANSYS incluíram os roletes de aço que simulam as condições de apoio e aplicação da carga, sendo fundamentais para a definição das condições de contorno e das dimensões dos modelos numéricos. Informações complementares sobre a modelagem e os parâmetros adotados nas simulações encontram-se no Apêndice H.

As forças aplicadas nos modelos numéricos foram definidas com base na média das forças máximas obtidas nos ensaios experimentais correspondentes, conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados de entrada para forças aplicadas utilizando ANSYS.

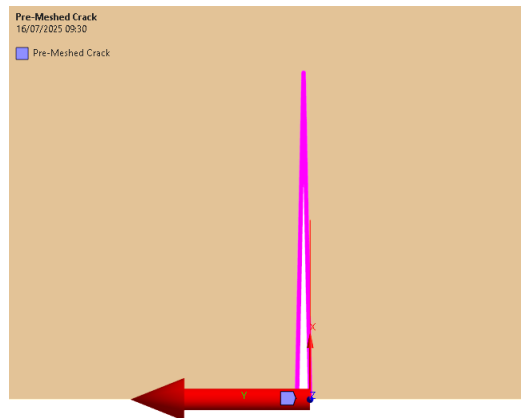
Identificação	Carga máxima (N)
MA-R	809,47
MA-0,5	1171,65
MA-1	847,51
MA-1,25	934,12
MB-R	4033,18
MB-0,5	3688,13
MB-1	3838,41
MB-1,25	3726,92

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Utilizando os recursos disponíveis no ANSYS, foi implementada uma trinca pré-malhada (*pre-meshed crack*) diretamente na geometria da viga (Figura 69). Essa metodologia permite a introdução da descontinuidade ainda na fase de pré-processamento, o que viabiliza a análise do início da propagação da trinca com maior fidelidade.

A técnica é reconhecida em análises baseadas na Mecânica da Fratura Linear Elástica (LEFM), pela sua precisão na representação do campo de tensões ao redor da ponta da trinca. A trinca foi posicionada na borda da viga, cuja geometria apresenta uma configuração aguda (com raio de curvatura reduzido), o que favorece a concentração de tensões e o início da fratura.

Figura 69 – Trinca pré-malhada da viga do Método B.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Para o controle do carregamento durante a simulação foi adotado 5 *substeps* por etapa de análise. Essa subdivisão incremental permite que a aplicação da carga ocorra de forma gradual.

### 3.6.2.1 Dados de entrada da modelagem no ANSYS

A modelagem, realizada no *software* ANSYS Workbench 2024, foi conduzida com base na teoria da elasticidade isotrópica, que considera o material homogêneo e com propriedades mecânicas idênticas em todas as direções. Foram definidos os parâmetros de entrada conforme os resultados dos ensaios experimentais, possibilitando representação adequada do comportamento mecânico dos materiais simulados (Tabela 16).

Tabela 16 – Dados de entrada para modelo de elasticidade isotrópica no ANSYS.

Identificação	Módulo de Young - E (GPa)	Coefficiente de Poisson - $\nu$	Módulo de Bulk - K (GPa)	Módulo de cisalhamento - G (GPa)
MA-R e MB-R	17,65	0,2184	10,448	7,243
MA-0,5 e MB-0,5	17,75	0,2134	10,324	7,314
MA-1 e MB-1	18,13	0,2090	10,384	7,498
MA-1,25 e MB-1,25	17,65	0,2197	10,495	7,235

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Valores mais elevados de módulo de Young indicam materiais mais rígidos e, conseqüentemente, menor deformação sob determinada carga. Neste trabalho, os valores de módulo de Young utilizados na modelagem foram retirados do estudo de Cereja (2023), a partir dos ensaios experimentais realizados com composições semelhantes de concreto utilizado neste estudo.

Materiais com maior coeficiente de Poisson tendem a apresentar maior variação dimensional lateral sob carregamento e o aumento da resistência do concreto está à diminuição do coeficiente de Poisson.

A determinação direta do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do concreto requer ensaios instrumentados de compressão uniaxial com medição simultânea das deformações axial e transversal (ASTM C469, 2014). No entanto, diante da ausência desses dados experimentais, publicações técnicas adotam estimativas empíricas ou

valores típicos para concretos. Neste trabalho, propõe-se a Equação 17 como formulação empírica para a estimativa do coeficiente de Poisson do concreto.

$$\nu = 0,13 + 1,3 \left( \frac{f_t}{f_c} \right) \quad (17)$$

sendo,

$f_t$  – resistência última à tração;

$f_c$  – resistência última à compressão.

O módulo de Bulk, também denominado módulo de incompressibilidade ou módulo volumétrico, refere-se à resistência do material à variação de volume quando submetido a um estado de tensão hidrostática. Um valor elevado desse parâmetro indica baixa compressibilidade, ou seja, o material apresenta pouca variação volumétrica mesmo sob pressões significativas. A relação entre o módulo de Bulk ( $K$ ), o módulo de Young e o coeficiente de Poisson para materiais isotrópicos é dada pela Equação 18 (Dong *et al.*, 2021).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (18)$$

O módulo de cisalhamento (ou módulo de rigidez) caracteriza a resposta do material à aplicação de tensões tangenciais, sendo diretamente relacionado à resistência à deformação angular (cisalhamento). Esse parâmetro é especialmente relevante em análises onde ocorrem deslocamentos relativos entre planos internos do material. Valores mais altos indicam maior resistência ao cisalhamento e menor deformação associada. A relação entre o módulo de cisalhamento ( $G$ ), o módulo de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) para materiais isotrópicos é dada pela Equação 19 (Hibbeler, 2010).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (19)$$

Os valores de resistência última à compressão e à tração utilizados como dados de entrada na simulação (Tabela 17) foram obtidos com base nos resultados experimentais de Cereja (2025).

Tabela 17 – Dados de entrada para propriedades de densidade, resistência à tração e à compressão no ANSYS.

Identificação	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
MA-R e MB-R	2134,62	46,89	3,19
MA-0,5 e MB-0,5	2126,37	39,26	2,52
MA-1 e MB-1	2125,46	44,76	2,72
MA-1,25 e MB-1,25	2101,65	38,11	2,63

Fonte: Adaptado de Cereja, 2025.

Os valores médios de densidade observados para as vigas indicam tendência de redução progressiva da densidade do concreto com o aumento do teor de fibras de PET reciclado. À medida que se incorporam 0,5%, 1% e 1,25% de fibras de PET em volume, as densidades médias diminuem, respectivamente. Essa redução da densidade pode ser atribuída à baixa massa específica do PET, inferior à dos agregados utilizados no concreto, além do possível aumento da porosidade do compósito decorrente da presença das fibras.

A inclusão das fibras pode afetar negativamente a compacidade da mistura e aumentar a presença de vazios durante o processo de mistura, resultando em menor densidade aparente. Estudos apontam que essa redução é esperada quando se utilizam materiais reciclados de baixa densidade ou fibras poliméricas dispersas, com densidades médias variando entre 2000 e 2300 kg/m<sup>3</sup>, a depender da proporção e do tipo de aditivos e agregados empregados (Silva; Brito e Dhir, 2016; Park e Kim, 2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no programa experimental e na modelagem computacional. Os dados foram organizados de forma a permitir a comparação entre as diferentes condições avaliadas, com ênfase na influência da adição de fibras de PET no comportamento à fratura do concreto.

### 4.1 MÉTODO A

#### 4.1.1 Método A – com entalhe

Este tópico apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios destinados à determinação da energia de fratura ( $G_F$ ) dos concretos, conforme preconiza o Método A da norma TC 50-FM (1985). A partir desses parâmetros experimentais, a energia de fratura foi calculada segundo a Equação 6 da referida norma. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 18, os quais fundamentam a avaliação comparativa entre as diferentes composições com fibras de PET. Essa análise permite compreender o comportamento mecânico frente ao processo de fratura.

Tabela 18 – Energia de fraturamento das vigas (Método A).

Identificação	Área do gráfico (N·m)	Massa (kg)	Flecha final - deslocamento (mm)	Área de ligação (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (N)	Energia de fratura absorvida (N·m)	Energia de fratura (N/m)
MA-R-1e	0,547	17,00	1,02	5100	1158,44	0,72	140,44
MA-R-2e	0,256	17,05	1,37	5000	472,58	0,49	97,08
MA-R-3e	0,180	16,57	0,47	5400	797,40	0,26	47,62
MA-0,5-1e	0,531	17,14	1,46	5300	1132,82	0,78	146,55
MA-0,5-2e	0,491	17,48	1,38	5100	1162,08	0,73	142,75
MA-0,5-3e	0,551	18,05	1,16	5300	1220,06	0,76	142,54
MA-1-2e	0,507	16,95	1,72	5300	801,83	0,79	149,75
MA-1-3e	0,423	16,00	0,81	5000	893,19	0,55	110,07
MA-1,25-1e	0,395	17,14	1,89	4900	748,51	0,71	145,38
MA-1,25-2e	0,513	17,00	1,67	5200	1000,97	0,79	152,22
MA-1,25-3e	0,509	17,76	1,50	5200	1052,88	0,77	148,06

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Tabela 19 apresenta as médias dos resultados obtidos, demonstrando como o aumento do teor de fibras influencia na dissipação de energia e na resistência à propagação de fissuras.

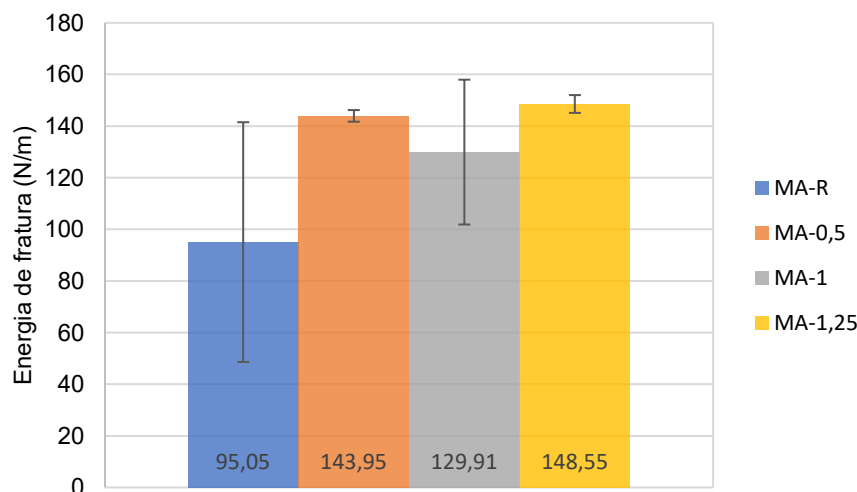
Tabela 19 – Energia de fraturamento média das vigas (Método A).

Identificação	Área do gráfico (N·m)	Massa (kg)	Flecha final - deslocamento (mm)	Área de ligação (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (N)	Energia de fratura absorvida (N·m)	Energia de fratura (N/m)
MA-R	0,33	16,87	0,95	5166,67	809,47	0,49	95,05
MA-0,5	0,52	17,56	1,33	5233,33	1171,65	0,75	143,95
MA-1	0,46	16,48	1,27	5150,00	847,51	0,67	129,91
MA-1,25	0,47	17,30	1,68	5100,00	934,12	0,76	148,55

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise de variância (ANOVA) de fator único foi empregada para avaliar possíveis diferenças entre os grupos quanto à energia de fratura, adotando-se nível de significância de  $\alpha = 0,05$  (5%). Embora as médias apresentem variações visíveis, os resultados não forneceram respaldo estatístico para rejeitar a hipótese de igualdade entre os grupos. Um dos principais fatores que contribuiu para esse resultado foi a alta variabilidade observada no grupo MA-R, evidenciada pela barra de erro longa na Figura 70.

Figura 70 – Energia de fratura média com erro padrão das vigas do Método A (com entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Estudos envolvendo fibras de PET em concretos demonstraram que, mesmo em baixos teores (0,1–0,3%), há incremento na tenacidade e na capacidade de absorção de energia (Pelisser *et al.*, 2012). Os resultados obtidos neste trabalho estão em consonância com essas análises. A energia de fratura ( $G_f$ ) dos modelos com adição de fibras de PET apresentou aumento em comparação ao concreto de referência.

Sikarskas *et al.* (2021), utilizando o método da RILEM TC 50-FMC, observaram que a introdução de 1,5% de fibras de PVA elevou a energia de fratura de  $83,6 \text{ J/m}^2$  para  $307,5 \text{ J/m}^2$ . No presente estudo com o uso de fibras recicladas de PET em teores de até 1,25% em volume, obteve-se aumento de 56%, com valores subindo de  $95,05 \text{ N/m}$  (sem fibra) para  $148,55 \text{ N/m}$ , destacando o ganho na tenacidade e capacidade de dissipação de energia.

Ao se comparar os dados de energia de fratura com as velocidades de ensaio utilizadas (Tabela 20), observa-se que as vigas submetidas a velocidades mais elevadas ( $4,80 \text{ mm/min}$ ), geralmente, apresentaram menores tempos até a carga máxima, como esperado, e resultados menos consistentes em termos de flecha final e energia de fratura. A viga MA-R-3e, por exemplo, ensaiada a  $4,80 \text{ mm/min}$ , apresentou a menor flecha final ( $0,47 \text{ mm}$ ) e a menor energia de fratura ( $47,62 \text{ N/m}$ ) de todo o conjunto.

Por outro lado, as vigas ensaiadas em velocidades moderadas, como  $0,60 \text{ mm/min}$ , tenderam a apresentar valores elevados e consistentes de energia de fratura e flecha final. As vigas MA-0,5-2e e MA-1,25-2e, ambas ensaiadas a  $0,60 \text{ mm/min}$ , apresentaram energia de fratura de  $142,75 \text{ N/m}$  e  $152,22 \text{ N/m}$ , respectivamente, com flechas finais acima de  $1,3 \text{ mm}$ . Além disso, a energia de fratura absorvida foi também elevada ( $0,73 \text{ N}\cdot\text{m}$  e  $0,79 \text{ N}\cdot\text{m}$ ).

A viga MA-1,25-3e, ensaiada sob menor velocidade ( $0,48 \text{ mm/min}$ ), apresentou o maior tempo até a carga máxima ( $107,60 \text{ s}$ ) e resultados elevados de energia de fratura ( $148,06 \text{ N/m}$ ) e de energia absorvida ( $0,77 \text{ N}\cdot\text{m}$ ), além de flecha final de  $1,5 \text{ mm}$ , o que reforça a hipótese de que velocidades menores podem favorecer um comportamento mais dúctil e melhor absorção de energia.

Tabela 20 – Velocidade de ensaio e tempo até a carga máxima das vigas (Método A).

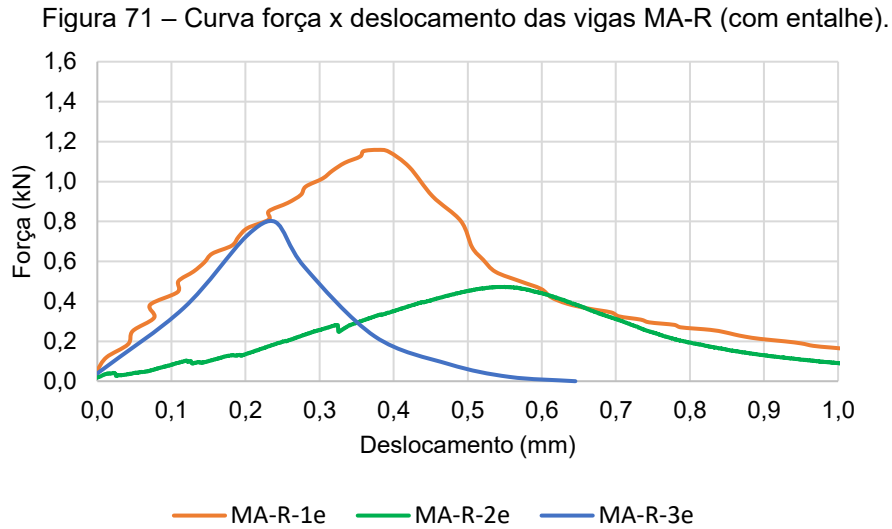
Identificação	Tempo da carga máxima (s)	Velocidade de ensaio (mm/min)
MA-R-1e	48,18	0,60
MA-R-2e	54,06	0,60
MA-R-3e	4,84	4,80
MA-0,5-1e	65,56	1,00
MA-0,5-2e	61,74	0,60
MA-0,5-3e	11,54	4,80
MA-1-2e	9,70	4,80
MA-1-3e	16,98	2,00
MA-1,25-1e	23,88	1,00
MA-1,25-2e	41,66	0,60
MA-1,25-3e	107,60	0,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Embora os dados não permitam afirmar uma correlação estatística direta entre velocidade de ensaio e energia de fratura em razão da amostragem limitada e da influência de outros fatores (como heterogeneidade do material), é possível sugerir uma tendência preliminar: velocidades de ensaio mais baixas favorecem a dissipação de energia, por permitirem que os mecanismos de redistribuição de tensões e atuação das fibras ocorram de forma mais gradual. Resultados semelhantes foram observados por Zhao *et al.* (2023) ao identificarem que a propagação da fissura principal foi impactada pela taxa de carregamento, sendo que taxas mais elevadas induziram deflexão, ramificação da fissura e transformação da zona de processo de fratura em zona de fissura macroscópica, elevando, assim, a energia de fratura na interface.

Complementarmente, Zhang *et al.* (2017) demonstraram que a energia de fratura e a resistência à flexão aumentam com o crescimento da taxa de carga, sendo essa tendência moderada em baixas taxas e acentuada em altas taxas. Para o teor de fibras de aço de 0,51%, os fatores de aumento dinâmico da resistência à flexão e da energia de fratura foram de aproximadamente 6 e 3, respectivamente; para 1,23% de fibra, esses fatores foram de cerca de 4 e 2. Isso sugere que teores mais elevados de fibras tornam o material menos sensível à variação da taxa de carregamento.

A Figura 71 apresenta os gráficos força *versus* deslocamento das três vigas do grupo de referência (MA-R). Observa-se variabilidade entre as curvas, tanto em termos de carga máxima quanto de comportamento pós-pico.



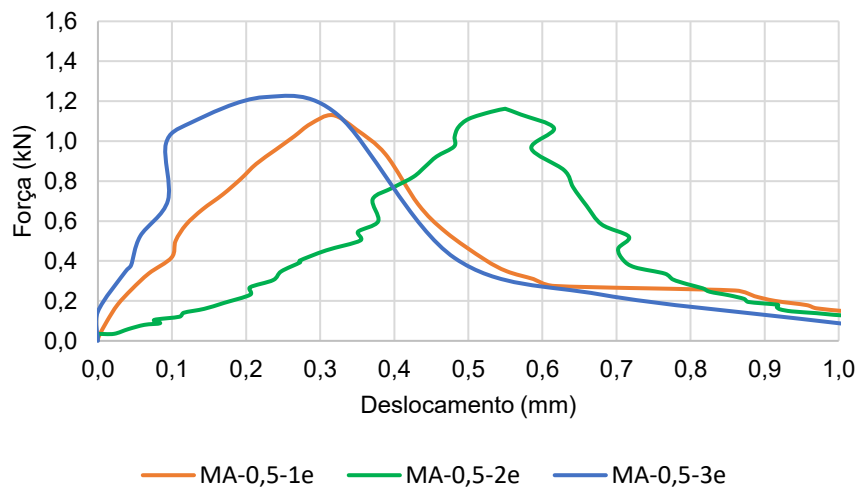
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A viga MA-R-1e atingiu a maior carga máxima e apresentou comportamento mais dúctil, com queda gradual da carga após o pico, exibindo uma fase pós-pico prolongada, indicando uma maior tenacidade e capacidade de dissipação de energia. Em contrapartida, a viga MA-R-3e, apesar de apresentar carga máxima intermediária, teve decaimento abrupto da força após o pico, com a curva se encerrando com um deslocamento menor, o que sugere comportamento mais frágil e menor energia de fratura. A viga MA-R-2e, por sua vez, atingiu a menor carga máxima entre os concretos avaliados. No entanto, sua curva pós-pico apresentou um alongamento, com deslocamento mais elevado, o que indica maior dissipação de energia ao longo do processo de fratura. Esse comportamento está associado à presença de uma trinca pré-existente antes do carregamento.

É importante considerar que parte dessa variabilidade está relacionada à utilização de agregados reciclados na composição do concreto. De acordo com Cereja (2025), a presença de argamassa residual nos agregados reciclados contribui para o aumento da porosidade e redução da densidade dos grãos, fatores que prejudicam a aderência com a matriz cimentícia e comprometem a integridade da zona de transição interfacial.

A Figura 72 apresenta as curvas força *versus* deslocamento para as três vigas do grupo MA-0,5. Nota-se que todas as vigas apresentam comportamento mais tenaz em comparação ao grupo de referência (MA-R), com maiores valores de carga máxima e maior área sob as curvas, indicando maior absorção de energia. A viga MA-0,5-3e destacou-se por alcançar a maior carga máxima e comportamento pós-pico estável.

Figura 72 – Curva força x deslocamento das vigas MA-0,5 (com entalhe).

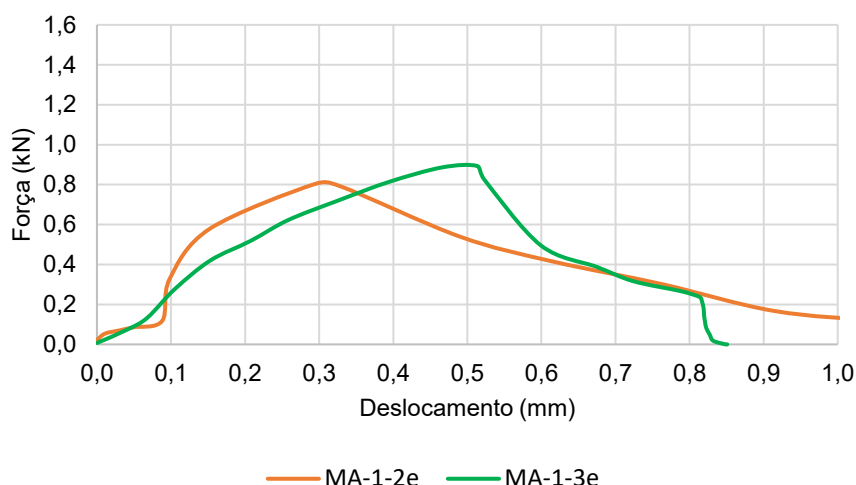


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A viga MA-0,5-2e, apesar de apresentar pico de força levemente inferior, teve resposta mais dúctil, com várias oscilações no regime pós-pico, associadas à ação de ponte das fibras durante a propagação da trinca. Já a viga MA-0,5-1e apresentou desempenho intermediário, com curva compatível com um material mais resistente e menos frágil. De maneira geral, os resultados indicam que a adição de 0,5% de fibras de PET contribuiu para aumentar a resistência à tração e, principalmente, a capacidade de absorção de energia e o controle de fissuração do concreto.

A Figura 73 apresenta as curvas força *versus* deslocamento das vigas do grupo MA-1. Observa-se que as duas vigas exibem comportamento com regiões de carga estabilizada extensa e maiores amplitudes de deslocamento, indicando ductilidade acentuada em comparação ao concreto sem fibras.

Figura 73 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1 (com entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A viga MA-1-3e alcançou a carga máxima, seguida por um trecho pós-pico com quedas graduais de força e oscilações que demonstraram a ação das fibras no controle da abertura e propagação das fissuras.

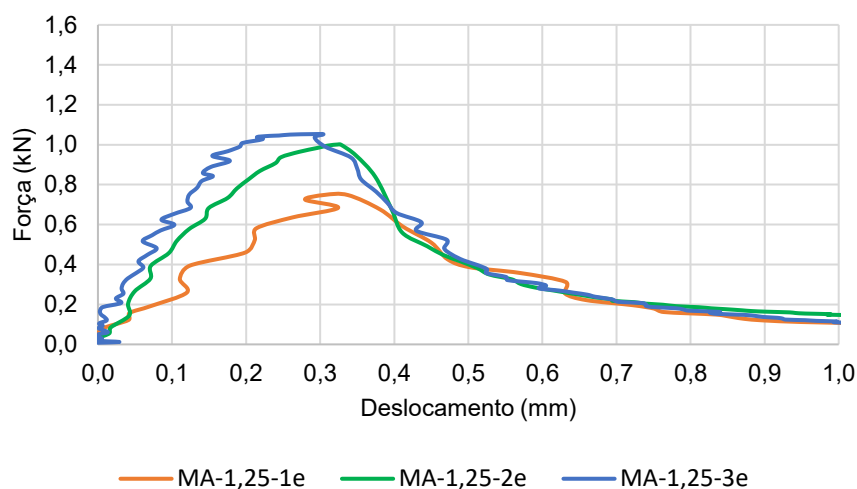
A viga MA-1-2e, por sua vez, apresentou capacidade de deformação considerável. Apesar de os valores de carga máxima serem inferiores aos observados no grupo com 0,5% de fibras, a área sob as curvas indica boa capacidade de absorção de energia. Esses resultados sugerem que o aumento do teor de fibras para 1% favoreceu o comportamento dúctil e contribuiu para maior tenacidade do referido concreto.

No grupo com 1% de fibras de PET, as curvas mantêm perfil dúctil, com maiores deslocamentos e resistência residual, embora a carga máxima não tenha aumentado em relação a do grupo com 0,5%.

A viga MA-1-1e rompeu durante o armazenamento, antes da realização do ensaio. Esse rompimento ocorreu devido a retração do concreto, resultando na propagação da fissura e consequente ruptura.

A Figura 74 apresenta os gráficos força *versus* deslocamento das vigas do grupo MA-1,25. Observa-se que as vigas apresentaram curvas semelhantes entre si, o que indica boa repetibilidade nos ensaios e homogeneidade da mistura.

Figura 74 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1,25 (com entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Outro aspecto relevante é a extensão dos trechos pós-pico, que sinalizam a contribuição das fibras na contenção da abertura da fissura e no prolongamento da resistência residual.

As oscilações presentes nas curvas, principalmente nas vigas MA-1,25-2e e MA-1,25-3e, indicam a atuação das fibras como mecanismos de ponte, resistindo à propagação da trinca e promovendo dissipação de energia ao longo do deslocamento. A viga MA-1,25-1e apresentou comportamento semelhante, porém com carga máxima inferior, relacionado a pequenas variações locais na distribuição das fibras.

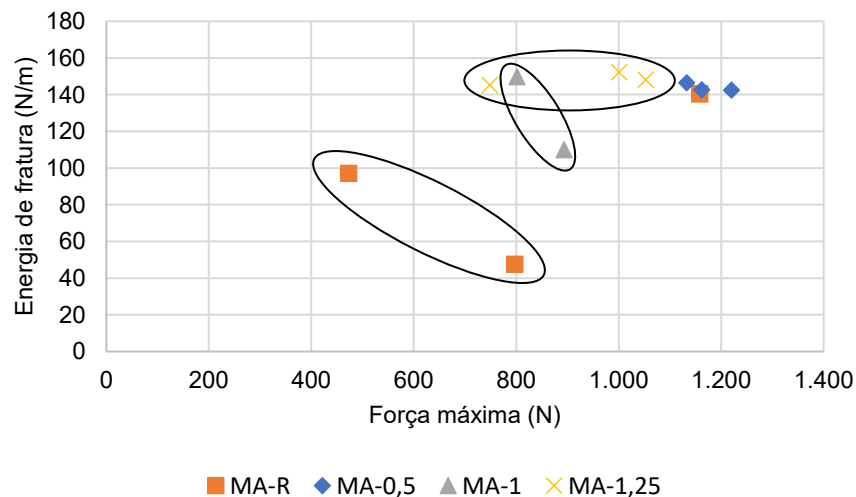
A análise comparativa entre os quatro gráficos — correspondentes aos grupos MA-R, MA-0,5, MA-1 e MA-1,25 —, revelou o impacto positivo da adição de fibras de PET no comportamento mecânico do concreto submetido a esforços de tração por flexão. O grupo MA-R apresentou comportamento típico de material frágil, com carga máxima baixa e quedas abruptas após o pico de força. As curvas desse grupo exibiram pouca ductilidade, com baixo deslocamento até a ruptura e área sob a curva reduzida, refletindo baixa capacidade de absorção de energia.

O grupo MA-1,25 apresentou desempenho superior aos grupos com menores teores de fibra, tanto em termos de resistência quanto de tenacidade, confirmando que a elevação do teor de fibras para 1,25% contribuiu para o ganho de ductilidade e de capacidade de absorção de energia do concreto. As curvas das vigas desse grupo foram mais uniformes, com cargas máximas elevadas, comportamento pós-pico estável e boa dissipação de energia. A ductilidade pode ser observada pelos grandes deslocamentos e pela resistência residual mantida ao longo do ensaio.

A flecha final, medida no ponto de aplicação da carga em relação ao apoio no momento da ruptura, apresentou correlação direta com a energia de fratura. Vigas com maiores valores de flecha final apresentaram maior energia absorvida. Outro aspecto observado foi o aumento do tempo necessário para atingir a carga máxima nos ensaios com maiores teores de fibras, especialmente no concreto com 1,25% de fibras, que apresentou valores superiores a 100 segundos em alguns ensaios. Esse comportamento indica resposta mais e dúctil à sollicitação mecânica, retardando o colapso estrutural.

A Figura 75 apresenta o gráfico de dispersão da energia de fratura em função da força máxima aplicada para os diferentes concretos com fibras recicladas de PET. Observa-se tendência de que as vigas que atingiram maiores forças máximas também apresentam maiores valores de energia de fratura, indicando correlação diretamente proporcional entre resistência e tenacidade à fratura. Esse comportamento está em consonância com os resultados de Sorelli, Meda e Meda (2008), que obtiveram relação semelhante em vigas reforçadas com fibras de aço.

Figura 75 – Energia de fratura x força máxima para as vigas do Método A (com entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

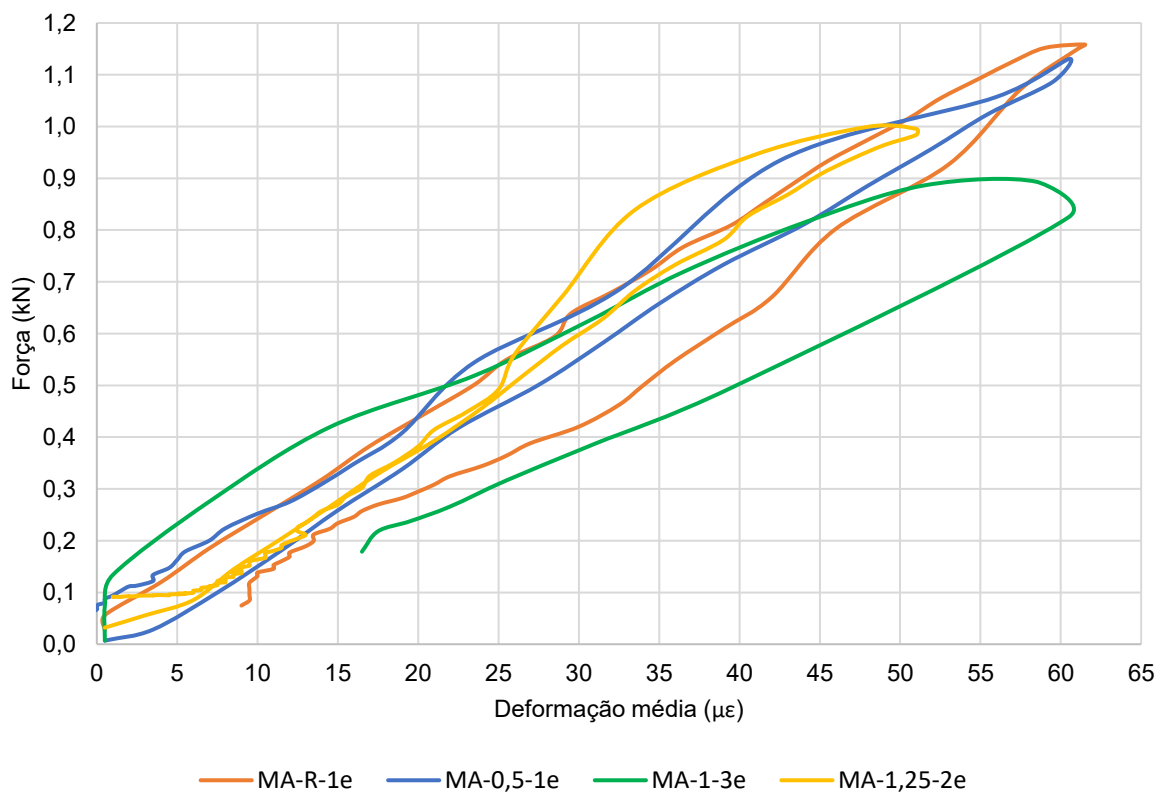
A presença de entalhe nas vigas induz concentração de tensões, que serve como iniciador controlado de fissura. A capacidade de registrar o comportamento do material para além da carga máxima, englobando a fase de plástica, auxilia na compreensão da capacidade de dissipação de energia das composições estudadas.

Os gráficos individuais correspondentes aos ensaios de flexão a três pontos, com destaque para a identificação da força máxima atingida por cada viga, encontram-se no Apêndice D (força *versus* deslocamento do Método A). Já as imagens das superfícies de fratura das vigas após a ruptura podem ser visualizadas no Apêndice C.

A histerese no concreto se manifesta pela formação de laços no diagrama tensão-deformação, decorrentes da não coincidência entre os ramos de descarregamento e recarregamento. Quando o material é submetido a ciclos de compressão, observa-se um comportamento não-linear caracterizado por esses laços, os quais refletem a dissipação de energia e a evolução de danos internos (Araújo, 2003).

A viga de referência apresentou comportamento linear até a proximidade do limite de resistência, com crescimento proporcional entre força e deformação (Figura 76).

Figura 76 – Curva força x deformação das vigas MA (com entalhe e com *strain gage*).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os fenômenos de histerese podem ser observados tanto nos diagramas força  $\times$  deformação quanto tensão  $\times$  deformação. Esse comportamento histerético corrobora o que foi descrito por Matos (2021) ao abordar o modelo de dano plástico. A dissipação de energia e a evolução dos danos internos observadas nos ensaios do presente estudo estão de acordo com a premissa de que o concreto sofre degradação progressiva de suas propriedades mecânicas ao longo do carregamento cíclico.

Observou-se que a incorporação de 0,5% de fibras de PET não alterou o padrão de comportamento em relação à viga de referência. As curvas das amostras MA-0,5-1e e MA-0,5-2e apresentaram-se praticamente sobrepostas, o que indica que, para esse teor de adição, o compósito manteve rigidez e capacidade de absorção de energia semelhantes às do concreto sem fibras.

Para a viga com 1% de fibras, a redução na carga máxima foi identificada em comparação à referência, devido a alteração na rigidez global do compósito por conta do maior volume de fibras. No entanto, é neste volume que a ductilidade e a capacidade de absorção de energia se manifestam de forma mais proeminente. Os laços de histerese para esta composição tendem a ser mais largos, indicando maior dissipação de energia devido a mecanismos como *pull-out* das fibras, fornecendo resistência residual ao compósito.

Na viga MA-1,25-2e a dissipação de energia foi menos expressiva quando comparada, por exemplo, à viga MA-1-3e, que apresentou histerese mais acentuada.

A análise dos gráficos força  $\times$  deformação permite concluir que a incorporação de fibras de PET reciclado, nas proporções avaliadas, não compromete o comportamento elástico das vigas MA, mantendo a linearidade típica de materiais frágeis. O aumento do teor de fibras pode promover mais deformação máxima, demonstrando ganho de ductilidade. Portanto, a utilização de fibras de PET reciclado mostra-se promissora para aumentar a ductilidade do compósito, especialmente em teores de 1%, desde que seja assegurada a adequada dispersão das fibras na matriz.

#### 4.1.1.1 Método A – modelagem

Foi adotada a parametrização da força máxima com base nos valores obtidos nos ensaios experimentais. A aplicação da carga foi configurada de forma incremental, por meio de 10 passos progressivos, permitindo acompanhar a evolução do

deslocamento e das tensões até atingir a força máxima de cada viga, conforme os valores apresentados na Tabela 21.

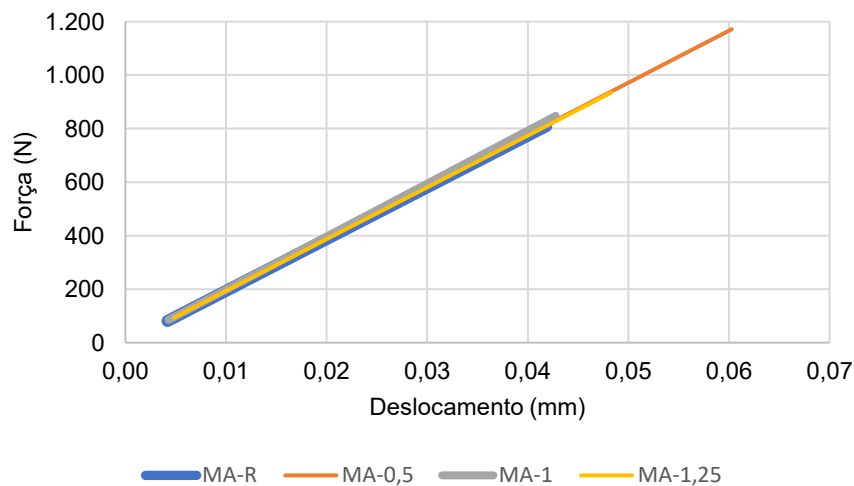
Tabela 21 – Forças aplicadas por incremento de deslocamento nos modelos numéricos do Método A.

Ponto de projeto	MA-R (N)	MA-0,5 (N)	MA-1 (N)	MA-1,25 (N)
DP0	-809,47	-1171,65	-847,51	-934,12
DP1	-728,53	-1054,49	-762,76	-840,71
DP2	-647,58	-937,32	-678,01	-747,30
DP3	-566,63	-820,16	-593,26	-653,88
DP4	-485,68	-702,99	-508,51	-560,47
DP5	-404,74	-585,83	-423,76	-467,06
DP6	-323,79	-468,66	-339,00	-373,65
DP7	-242,84	-351,50	-254,25	-280,24
DP8	-161,89	-234,33	-169,50	-186,82
DP9	-80,95	-117,17	-84,75	-93,41

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As curvas de deslocamento em função da força cresceram linearmente até o limite de carga aplicado, com sobreposição entre os traços das quatro configurações analisadas (Figura 77). Esse resultado indica que a adição de fibras de PET, nas porcentagens avaliadas, não compromete a rigidez inicial do concreto e tampouco altera seu comportamento antes do início da fissuração.

Figura 77 – Curva força x deslocamento das vigas MA (com entalhe) – ANSYS.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

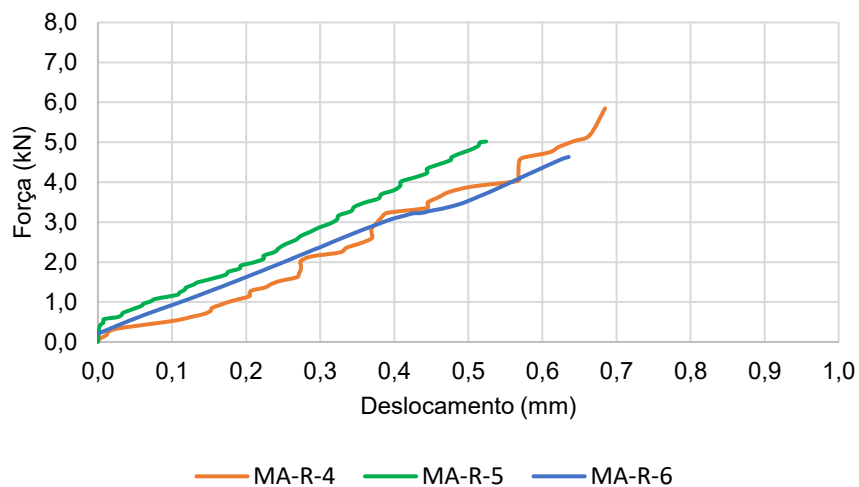
A viga MA-0,5, por exemplo, apresentou o maior deslocamento final, associado à maior carga experimental aplicada, enquanto os demais modelos atingiram seus deslocamentos proporcionais às respectivas cargas experimentais. Ainda assim, a trajetória linear foi mantida em todos os casos, reafirmando a natureza elástica do modelo adotado.

Importante destacar que, embora os modelos com fibras não tenham apresentado variação considerável na rigidez inicial, a contribuição das fibras tende a ser mais expressiva após o início da fissuração, especialmente em termos de controle da propagação da trinca e aumento da tenacidade. Tais efeitos não são capturados por análises lineares, sendo necessária a adoção de modelos com comportamento não linear, com leis constitutivas que representem o dano ou a coesão do material. Assim, os resultados representam uma estimativa simplificada do comportamento estrutural, devendo ser complementados por modelos mais avançados.

#### 4.1.2 Método A – sem entalhe

As curvas força *versus* deslocamento das vigas MA-R (Figura 78) demonstram comportamento típico de fratura frágil para concretos convencionais. As três vigas apresentaram trajetórias quase lineares até a carga máxima, com deslocamentos inferiores a 0,75 mm, indicando uma resposta predominantemente elástica até a ruptura.

Figura 78 – Curva força x deslocamento das vigas MA-R (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O intervalo de tempo de 107 a 117 segundos até a carga máxima (Tabela 22) revela pouca diferença na estabilidade do avanço da fissura, cujas médias estão apresentadas na Tabela 23.

Tabela 22 – Carga máxima das vigas do Método A (sem entalhe).

Identificação	Carga máxima (N)	Tempo da carga máxima (s)	Velocidade de ensaio (mm/min)
MA-R-4	5848,81	107,28	0,60
MA-R-5	5019,84	117,24	0,48
MA-R-6	4634,28	113,48	0,48
MA-0,5-4	5443,77	141,56	0,60
MA-0,5-6	4931,77	121,62	0,48
MA-1-4	812,65	61,66	1,00
MA-1-5	4355,96	126,92	0,60
MA-1-6	4612,01	109,16	0,48
MA-1,25-4	4316,41	104,32	0,60
MA-1,25-5	4487,76	123,82	0,60
MA-1,25-6	3849,51	114,76	0,48

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Tabela 23 – Média da carga máxima das vigas do Método A (sem entalhe).

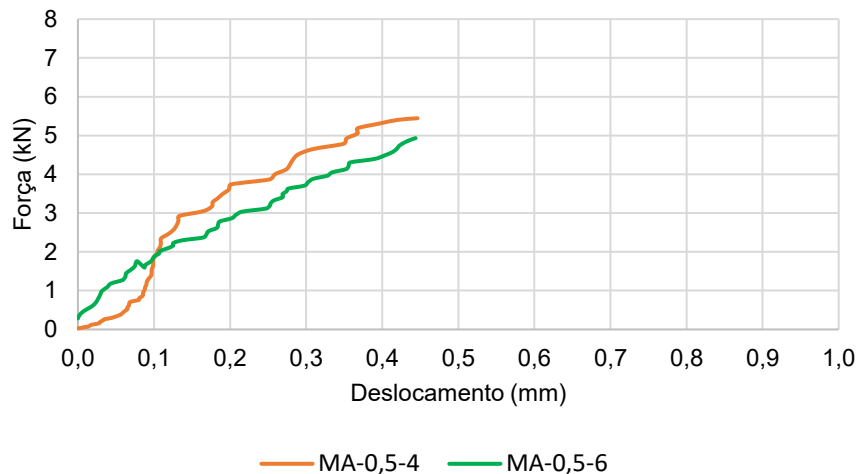
Identificação	Carga máxima (N)	Tempo da carga máxima (s)	Velocidade de ensaio (mm/min)
MA-R	5167,64	112,67	0,52
MA-0,5	5187,77	131,59	0,54
MA-1	3260,21	99,25	0,69
MA-1,25	4217,89	114,30	0,56

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Na Figura 79 observa-se que as vigas do grupo MA-0,5 apresentaram comportamento mecânico inferior ao do grupo de referência em termos de deslocamento até a carga máxima. Esse comportamento sugere que a introdução de fibras em proporção reduzida não foi suficiente para gerar um mecanismo capaz de dissipar energia e retardar a propagação das fissuras.

Além disso, a maior rigidez observada está relacionada a uma distribuição heterogênea das fibras ou à formação de zonas de concentração de tensão que anteciparam a falha. Esses resultados indicam que, nesse teor, as fibras podem não ter contribuído positivamente para o aumento da tenacidade, tendo atuado como descontinuidades internas no material.

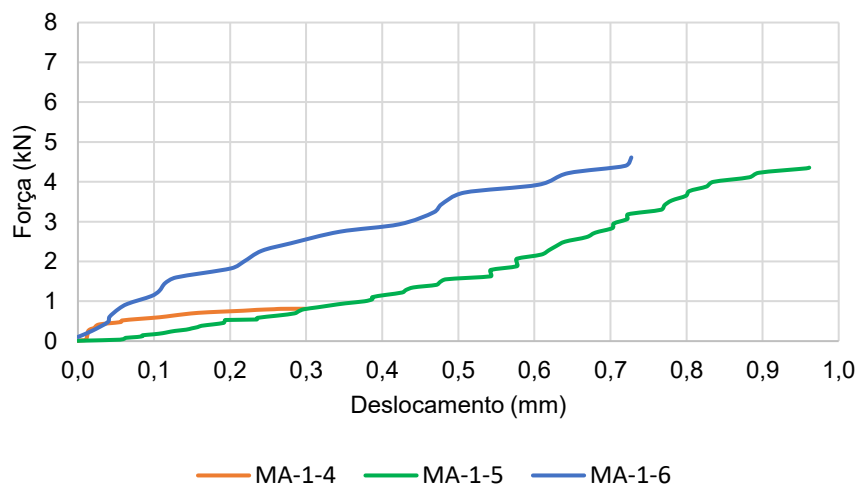
Figura 79 – Curva força x deslocamento das vigas MA-0,5 (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Figura 80, relativa às vigas MA-1, revela comportamento mais disperso em comparação às outras séries, sendo que o desempenho inferior da viga MA-1-4 está relacionado a falha prematura causada por distribuição irregular das fibras ou descontinuidades internas no concreto.

Figura 80 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1 (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

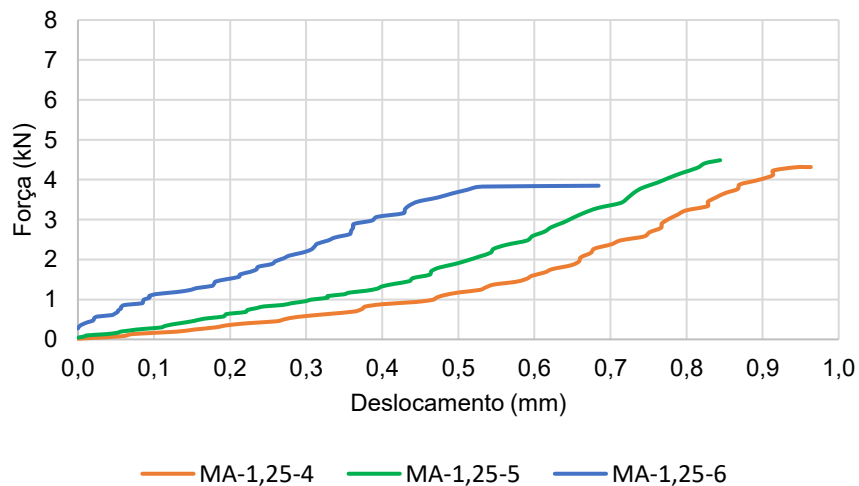
Essa hipótese é sustentada por Bolander, Choi e Duddukuri (2008), que destacam que a má dispersão das fibras em compósitos cimentícios pode comprometer a resistência à fratura, favorecendo a formação de zonas frágeis e iniciando o processo de falha prematura.

Em contraste, a viga MA-1-6 destacou-se por atingir a maior carga máxima da série, além de apresentar deslocamento superior às demais, ultrapassando 0,9 mm. Essa maior deformação antes da ruptura sugere capacidade aumentada de absorção de energia e melhor resistência à propagação da trinca.

Na Figura 81, correspondente às vigas MA-1,25 nota-se um padrão de desempenho mais estável, com cargas máximas próximas entre as vigas e deslocamentos de até 0,9 mm.

A viga MA-1,25-6 destaca-se com curva ascendente contínua até aproximadamente 4,3 kN, com leve inflexão após o pico. O formato das curvas desse grupo sugere maior capacidade de absorção de energia antes da fratura.

Figura 81 – Curva força x deslocamento das vigas MA-1,25 (sem entalhe).



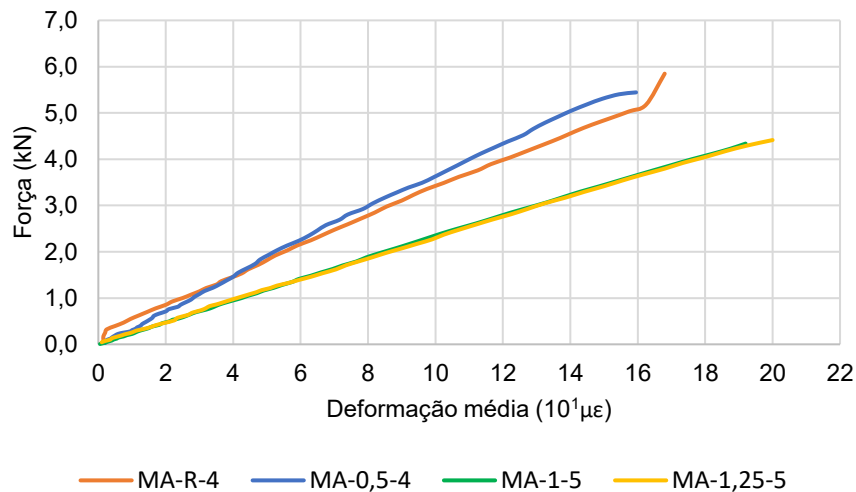
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise conjunta das curvas força-deslocamento e da carga máxima para as vigas MA sem entalhe revela tendências importantes sobre a influência da adição de PET. Enquanto a concentração de 0,5% de PET mantém a resistência máxima, concentrações mais elevadas (1% e 1,25%) tendem a reduzir a carga máxima. Contudo, essa redução na resistência de pico é acompanhada por um significativo aumento na capacidade de deformação e tenacidade do material, especialmente nas vigas com 1,25% de PET.

A análise dos resultados dos ensaios das vigas em função da deformação medida por *strain gages* até a carga máxima oferece visão do comportamento estrutural destes elementos. Inicialmente, todos os corpos de prova exibem comportamento linear elástico sob cargas menores (Figura 82).

A viga de referência (MA-R-4) apresentou a maior capacidade de carga máxima. No entanto, essa resistência superior é acompanhada por uma capacidade de deformação mais limitada antes de alcançar o pico de carregamento. Embora possa haver leve redução na carga máxima, a viga com 0,5% de fibra mantém a deformabilidade da referência. A adição neste percentual específico resultou em redução na resistência máxima sem compensação clara em termos de aumento da deformabilidade.

Figura 82 – Curva força x deformação das vigas MA (sem entalhe e com *strain gage*).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

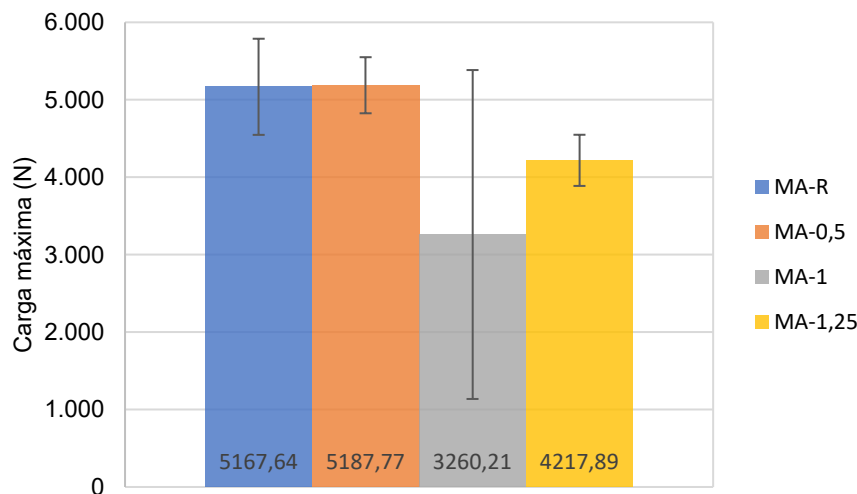
A introdução de frações volumétricas de fibras mais elevadas, como 1%, revelou acentuada diminuição na carga máxima em relação à viga de referência. No entanto, este decréscimo foi compensado pelo aumento na capacidade de deformação da viga. Essa maior deformabilidade, indicativo de ductilidade aprimorada (grandes deformações plásticas antes da ruptura), é desejável em engenharia, pois permite que a estrutura absorva mais energia e exiba sinais claros de sobrecarga antes de uma falha abrupta.

Ao se analisar as vigas com o maior volume de fibras, 1,25%, percebe-se que a carga máxima se manteve em patamares próximos aos das vigas com 1% de fibra.

Enquanto a ausência de fibras pode maximizar a capacidade portante, a incorporação de volumes específicos, particularmente 1% e 1,25%, demonstra conferir à viga uma capacidade de deformação superior.

A análise de variância foi realizada para comparar a carga máxima suportada pelos diferentes grupos de vigas. Embora as médias apresentem diferenças visuais — com destaque para a redução no grupo MA-1 —, o teste não identificou variação suficiente entre os grupos para rejeitar a hipótese de igualdade das médias. Tal resultado está relacionado à elevada dispersão interna observada, sobretudo nos grupos MA-1 e MA-R, cujas variâncias foram altas. A sobreposição das barras de erro nos gráficos reforça esse comportamento (Figura 83), evidenciando que a amplitude dos dados dentro dos grupos compromete a detecção de contrastes mais nítidos entre eles. Além disso, a limitação no número de amostras no grupo MA-0,5 pode ter comprometido as análises. Diante disso, não há fundamento estatístico para aplicar o teste de Tukey, uma vez que a ANOVA não indicou diferença global entre os grupos.

Figura 83 – Carga média máxima média com erro padrão das vigas do Método A (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

## 4.2 MÉTODO B

### 4.2.1 Método B – com entalhe

O presente tópico contempla os resultados dos ensaios executados com vigas entalhadas, os quais consistem na obtenção experimental da curva força *versus*

deslocamento de abertura da boca da trinca. A partir dos dados registrados nos ensaios, os parâmetros de fratura foram calculados utilizando Equações de 8 a 15 propostas pela norma técnica, possibilitando análise da resposta do concreto à fratura.

Os resultados são apresentados na Tabela 24 e permitem a comparação entre as vigas de concreto com e sem adição de fibras de PET. Tais parâmetros permitem a quantificação da resistência à propagação instável de trincas em função do conteúdo volumétrico de fibras incorporadas à matriz cimentícia. As curvas força *versus* abertura da ponta da trinca (CMOD), que fundamentam essas análises, estão disponíveis no Apêndice E. A maioria dos corpos de prova foi submetida a uma velocidade de 0,19 mm/min. No entanto, as vigas MB-R-1e e MB-R-3e foram ensaiadas com velocidade superior, de 0,20 mm/min. Essas duas vigas, juntamente com a MB-R-6, foram as primeiras a serem testadas, com o objetivo de avaliar a taxa de carregamento mais adequada a ser empregada nos ensaios subsequentes.

Tabela 24 – Fator de intensidade de tensão e deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca das vigas do Método B.

Identificação	Massa (kg)	Módulo de elasticidade (MPa)	Carga máxima (N)	$C_i$ (mm/N)	$C_u$ (mm/N)	$K_{Ic}^s$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	CTOD <sub>c</sub> (mm)
MB-R-1e	17,75	68041,26	3643,76	0,00000261	0,00000341	1,22	0,0050
MB-R-2e	17,75	83680,52	3720,47	0,00000212	0,00000282	1,27	0,0043
MB-R-3e	18,20	66604,39	4300,22	0,00000267	0,00000365	1,50	0,0067
MB-R-4e	18,20	74295,04	4468,25	0,00000239	0,00000322	1,54	0,0060
MB-0,5-1e	17,70	69002,64	3499,75	0,00000249	0,00000394	1,40	0,0069
MB-0,5-2e	17,80	77013,54	3897,54	0,00000223	0,00000362	1,60	0,0072
MB-0,5-3e	17,10	67328,83	3780,08	0,00000246	0,00000393	1,48	0,0075
MB-0,5-4e	17,10	81266,05	3575,16	0,00000211	0,00000303	1,29	0,0050
MB-1-1e	17,85	68132,79	3395,21	0,00000252	0,00000367	1,24	0,0058
MB-1-2e	18,65	72017,80	4011,05	0,00000238	0,00000397	1,69	0,0083
MB-1-3e	18,65	66239,87	4337,55	0,00000278	0,00000450	1,86	0,0099
MB-1-4e	18,00	72232,48	3609,81	0,00000246	0,00000412	1,57	0,0077
MB-1,25-1e	17,45	63497,21	3613,53	0,00000280	0,00000428	1,42	0,0075
MB-1,25-2e	16,75	59899,71	3229,78	0,00000297	0,00000508	1,45	0,0087
MB-1,25-3e	17,95	61851,69	3864,43	0,00000297	0,00000476	1,63	0,0092
MB-1,25-4e	18,05	57400,12	4199,93	0,00000299	0,00000529	1,91	0,0121

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O protocolo experimental compreendeu três etapas principais: (i) carregamento até cerca de 95% da carga máxima; (ii) recarregamento até aproximadamente 1000 N; e (iii) recarregamento até a ruptura. Em alguns casos, no entanto, a ruptura do corpo de prova ocorreu durante a segunda etapa.

Para a definição do ponto de interrupção da aplicação da carga, correspondente a 95% da carga máxima na primeira etapa, foi ensaiada uma viga sem entalhe de cada tipo (R, 0,5%, 1% e 1,25%) a fim de determinar a carga de ruptura de cada composição. Com base nos resultados obtidos nesses ensaios preliminares, foi adotado que a carga de ruptura das vigas entalhadas corresponde, aproximadamente, a um terço da carga de ruptura das vigas sem entalhe.

O fator de intensidade de tensão crítico, parâmetro da mecânica da fratura linear elástica, reflete a resistência do material à propagação instável de uma trinca. Analisando a Tabela 25 observa-se que o grupo MB-R apresentou a menor média de  $K_{Ic}$ , sendo DP correspondente ao desvio-padrão. Em contrapartida, os grupos com adição de PET exibiram valores médios superiores.

Esta tendência de aumento de  $K_{Ic}$  com a adição de fibras de PET demonstra que as fibras contribuem para aumentar a tenacidade à fratura do concreto, tornando-o mais resistente ao crescimento inicial e instável de trincas. O grupo MB-1,25, com 1,25% de PET, apresentou o maior  $K_{Ic}$  médio, sugerindo que existe uma porcentagem ótima de fibra para maximizar este parâmetro. A dispersão dos resultados é um pouco maior nos grupos com fibra, inerente à distribuição aleatória das fibras na matriz.

Tabela 25 – Média e desvio-padrão amostral dos parâmetros das vigas do Método B.

Identificação	Módulo de elasticidade (GPa) (média ± DP)	Carga máxima (N) (média ± DP)	$K_{Ic}$ (MPa/m <sup>1/2</sup> ) (média ± DP)	CTOD <sub>c</sub> (mm) (média ± DP)
MB-R	73,16 ± 7,77	4033,18 ± 412,32	1,38 ± 0,16	0,0055 ± 0,0011
MB-0,5	73,65 ± 6,60	3688,13 ± 183,08	1,44 ± 0,13	0,0067 ± 0,0012
MB-1	69,66 ± 2,96	3838,41 ± 419,38	1,59 ± 0,26	0,0079 ± 0,0017
MB-1,25	60,66 ± 2,63	3726,97 ± 409,33	1,60 ± 0,23	0,0094 ± 0,0019

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise estatística não forneceu suporte consistente de que a incorporação de fibras tenha exercido impacto quantitativamente detectável sobre os valores de  $K_{Ic}$ . As tendências ascendentes observadas em alguns grupos sugerem efeito positivo da adição de fibras.

A análise de variância revelou diferença estatisticamente detectável entre as médias de  $CTOD_c$  dos grupos. Este resultado permitiu rejeitar a hipótese de que todas as médias eram equivalentes, indicando que a adição de fibra provocou alteração no comportamento das vigas. Para identificar quais grupos diferiam, o teste de Tukey foi aplicado. Esta análise demonstrou que a única comparação que atingiu significância estatística entre as vigas foi com a maior concentração de fibras testada (1,25%) e as vigas de referência. Isso indica que a adição dessa concentração específica de fibra resultou em um valor de  $CTOD_c$  realmente superior ao do material sem reforço.

O deslocamento crítico de abertura na ponta da trinca é um parâmetro que quantifica a capacidade de deformação localizada na ponta da trinca antes da falha crítica. Conforme Tabela 25 e análise de variância, há clara e progressiva tendência de aumento dos valores médios à medida que a porcentagem de PET aumenta. Este é um resultado relevante, pois o  $CTOD_c$  é indicador da capacidade do material de absorver energia e de exibir comportamento mais tenaz no modo de fratura. O seu aumento está relacionado à capacidade das fibras de PET de "costurar" as trincas, interligar as superfícies fissuradas e resistir à abertura, o que resulta em maior deformação antes da falha completa.

No presente estudo, a adição de fibras de PET reciclado ao concreto resultou em aumento nos parâmetros de fratura. Resultados semelhantes foram observados por Liang *et al.* (2021), que estudaram concretos reforçados com diferentes tipos de fibras sintéticas e relataram aumento progressivo de  $K_{Ic}$  e  $CTOD_c$  com o incremento da fração volumétrica de fibras. Eles atribuíram esse comportamento à capacidade das fibras em restringir a abertura de trincas e dissipar energia durante o processo de fraturamento, mecanismo também identificado nos compósitos com PET no presente estudo.

A análise do módulo de elasticidade das vigas de concreto, utilizando ANOVA, revelou diferenças entre os grupos, indicando que a incorporação de fibras alterou a rigidez do material, considerando-se nível de significância de  $\alpha = 0,05$  (5%). O teste de Tukey confirmou que as vigas com 0,5% de fibras apresentaram módulo de

elasticidade maior em comparação com o grupo com 1,25% de fibras, que exibiu o menor valor médio.

Os módulos de elasticidade dos grupos MB-R e MB-0,5 apresentaram os maiores valores médios, com o grupo contendo 0,5% de fibras de PET superando o grupo de referência. No entanto, à medida que a proporção de fibras aumentou para 1% e 1,25%, observou-se redução progressiva no módulo de elasticidade. Essa tendência foi atribuída ao fato de que o módulo de elasticidade das fibras de PET é inferior ao da matriz cimentícia, o que reduz a rigidez global da viga quando essas fibras passam a ocupar um volume maior no interior do material. Além disso, a baixa aderência entre as fibras de PET e a matriz de cimento compromete a eficiência na transferência de tensões, contribuindo para a perda de rigidez com o aumento do teor de fibras. Esse comportamento pode ser interpretado pela regra das misturas, segundo a qual o módulo de elasticidade efetivo de um compósito resulta da combinação ponderada das propriedades elásticas dos constituintes, de forma que a incorporação de fibras menos rígidas tende a reduzir o valor global.

De acordo com Irwan *et al.* (2013), a incorporação de 1% de fibras de PET reciclado ao concreto pode afetar suas propriedades mecânicas, promovendo ganhos de tenacidade. No entanto, eles também indicam que o aumento no teor de fibras pode resultar em maior porosidade e, conseqüentemente, em redução da resistência mecânica global do material. Esse comportamento foi consistente com os resultados obtidos no presente trabalho, em que as vigas de referência apresentaram a maior carga máxima média entre as vigas ensaiadas. No entanto, observou-se contribuição das fibras na fase pós-pico do comportamento mecânico, com melhoria na tenacidade e na capacidade de absorção de energia após o início da fissuração, o que reforça o papel das fibras como elemento de controle de fissuração e dissipação de energia.

Essa observação é corroborada pelo estudo de Carrillo, Ramirez e Lizarazo-Marriaga (2019), que, ao analisarem concretos reforçados com fibras, constataram por meio de ensaios de pulso ultrassônico que o módulo de elasticidade tende a diminuir com o aumento da quantidade de fibras. Eles enfatizam que a presença de fibras afeta diretamente a propagação das ondas ultrassônicas e, conseqüentemente, a rigidez do material, indicando que a adição de fibras, apesar de melhorar algumas propriedades, pode comprometer o módulo de elasticidade ou a rigidez do compósito.

Para o parâmetro, a ANOVA identificou diferenças estatística entre os grupos, considerando nível de significância de  $\alpha = 0,05$  (5%). O teste de Tukey revelou que o

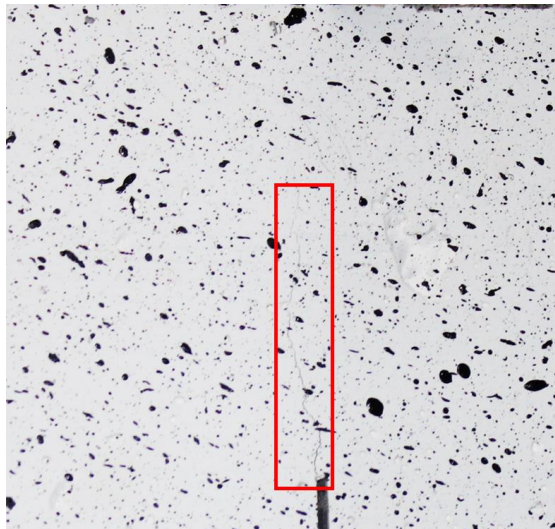
concreto com 1,25% de fibra apresentou valor de  $C_i$  superior em relação aos demais. Esse aumento está associado a menor rigidez inicial na região da trinca, indicando maior abertura para uma mesma carga inicial, que mostra que esse teor de fibra pode comprometer a resistência inicial do material.

De forma análoga, os resultados do parâmetro  $C_u$  demonstraram diferenças entre os grupos, conforme indicado pela ANOVA. O teste de Tukey mostrou que o grupo com 1,25% de fibra apresentou valor de  $C_u$  maior que os grupos MB-R e MB-0,5. Esse parâmetro está relacionado ao inverso da rigidez, que indica maior deformabilidade do material na fase pós-fissuração.

De forma análoga, os resultados do parâmetro  $C_u$  demonstraram diferenças entre os grupos, conforme indicado pela ANOVA. O teste de Tukey mostrou que o grupo com 1,25% de fibra apresentou valor de  $C_u$  maior que os grupos MB-R e MB-0,5. Além disso, o grupo MB-1 também apresentou valores médios superiores aos grupos de referência e de 0,5. Esse parâmetro está relacionado ao inverso da rigidez, que indica maior deformabilidade do material na fase pós-fissuração.

A viga MB-R-4e apresentou comportamento de fratura frágil, mostrado na Figura 84, que registra o estado da viga aos 3 minutos e 34 segundos após o início do terceiro ciclo de carregamento.

Figura 84 – Viga MB-R-4e após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As vigas de concreto de referência exibiram comportamento característico de materiais frágeis, com elevada rigidez inicial, refletindo menor capacidade de

dissipação de energia após a instabilização da trinca. O valor de  $CMOD_c$  demonstrou que, na ausência de mecanismos de reforço adicionais, a resistência do concreto à fratura é limitada à coesão da matriz cimentícia. Esse comportamento demonstra que o fator de intensidade de tensão crítico e o deslocamento crítico de abertura da ponta da trinca são influenciados principalmente pela capacidade da matriz em resistir ao crescimento da trinca antes do colapso.

A análise reforça a limitação do concreto convencional, desprovido de reforço por fibras, em manter a transferência de tensões entre as faces da trinca à medida que a abertura progride. A ausência de mecanismos de ponte resulta em um colapso da seção e em fratura de natureza eminentemente frágil, com baixa capacidade de dissipação de energia no regime pós-pico, conforme descrito por Naaman e Reinhardt (2012), que destacam a importância do reforço por fibras na transição do comportamento frágil para um modo de falha mais tenaz e progressivo em materiais cimentícios.

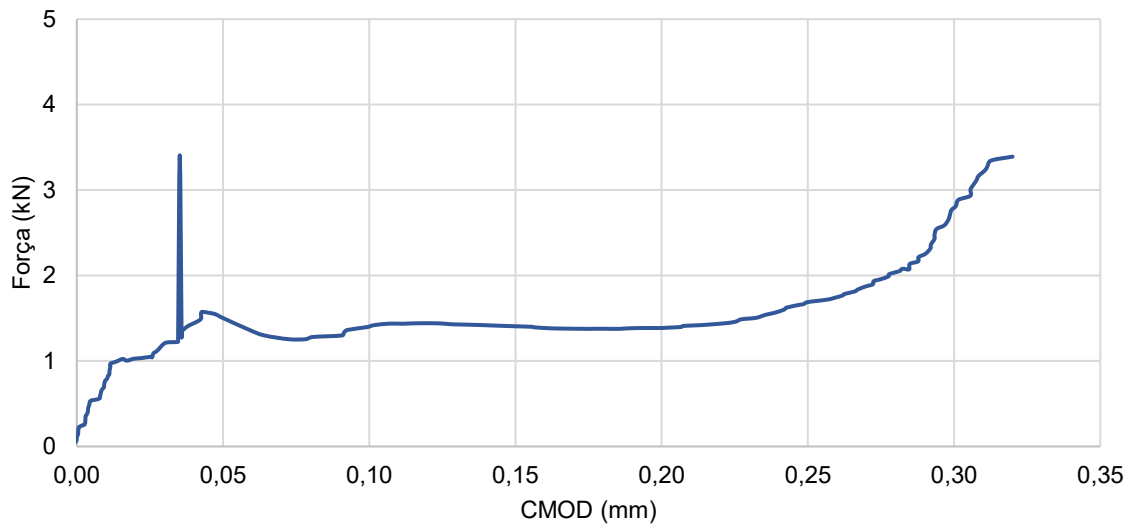
A ocorrência de ruptura transgranular foi identificada nos ensaios, caracterizada pela propagação da fissura através da massa do agregado. Esse mecanismo de falha está associado ao fato de que a resistência do agregado é inferior ao  $f_{ck}$  do concreto, fazendo com que esses grãos se configurassem como zonas preferenciais para o avanço da fratura.

A incorporação de 0,5% de fibras de PET promoveu aumento nos valores de  $CTOD_c$ , sinalizando maior capacidade de dissipação energética. Essa tendência foi mais acentuada na série com 1% de fibras. Ainda que as cargas máximas não tenham superado os valores do grupo de referência, a presença de fibras permitiu maior controle da propagação da trinca. Isso está relacionado à ação de travamento das fibras, que retarda a instabilidade do processo de fratura e contribui para o aumento do deslocamento crítico.

A Figura 85, correspondente à curva 1 da viga MB-0,5-2e, apresentou comportamento não convencional, marcado por queda inicial de força, seguida de estabilização e posterior retomada do carregamento. Esse efeito pode estar relacionado à presença de microfissuras ou a algum defeito localizado próximo à região de aplicação da carga, gerando instabilidade momentânea sem comprometer a integridade da viga. A inclusão de fibras de PET favoreceu o retardamento da propagação da trinca e a redistribuição das tensões, o que permitiu a recuperação parcial da resistência. Segundo Naaman (2003), em concretos reforçados com fibras,

a interação fibra-matriz pode ocasionar variações locais de rigidez que se manifestam como oscilações na curva força × deslocamento, representando mecanismos de adaptação do material à fissuração. Esse comportamento demonstra que, mesmo em baixos teores, as fibras influenciam a resposta inicial, contribuindo para maior dissipação de energia nos estágios iniciais de carregamento.

Figura 85 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-2e.

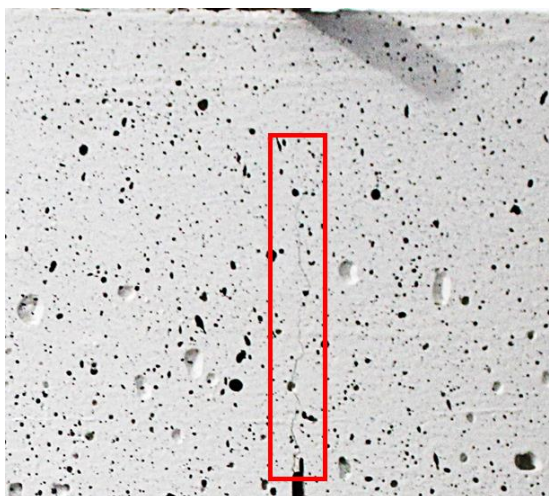


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Figura 86 apresenta a viga MB-0,5-4e em registro fotográfico realizado aos 3 minutos e 18 segundos após o início do terceiro ciclo de carregamento. Nesse momento, o gráfico Força × CMOD indica que a viga já havia ultrapassado os dois primeiros ciclos de fissuração (curvas 1 e 2), encontrando-se na fase plástica (pós-pico) progressiva da curva 3 (Figura 87).

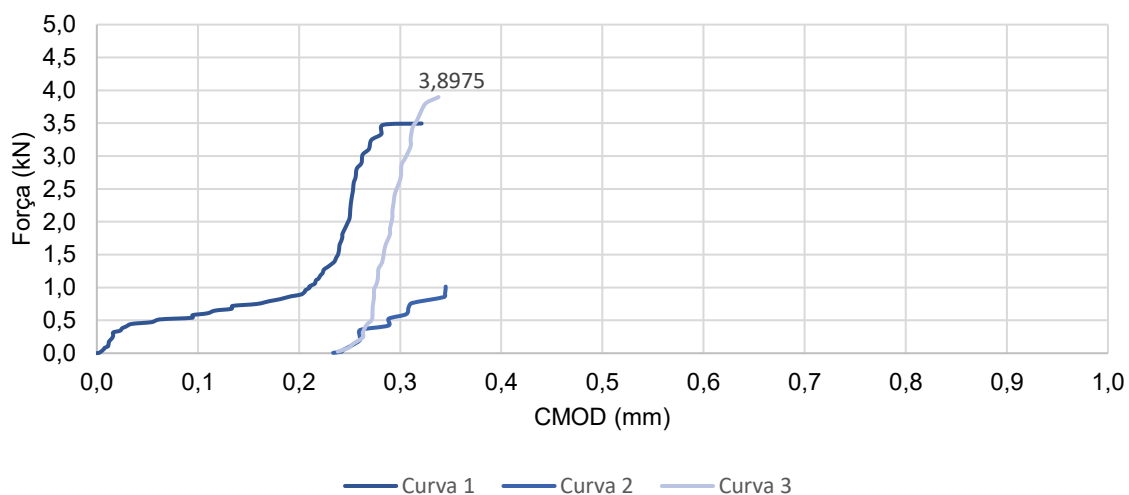
Apesar do estágio avançado de carregamento e da esperada propagação da fissura, observou-se que a abertura permaneceu estreita, sem sinais de colapso abrupto da seção. Tal comportamento destaca a ação das fibras de PET no mecanismo de ponteamto da trinca, limitando sua abertura e promovendo a dissipação de energia.

Figura 86 – Viga MB-0,5-4e após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Figura 87 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-4e.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Com o aumento do teor de fibras para 1,0%, as curvas força *versus* CMOD mostraram maior suavidade no comportamento próximo ao pico, além de maiores deslocamentos antes da ruptura.

Conforme ilustrado na Figura 88, a viga MB-1-1e, aos 8 minutos e 24 segundos do início do segundo ciclo de carregamento, revelou uma progressão da fissura principal, caracterizando o avanço do processo de fraturamento na região entalhada.

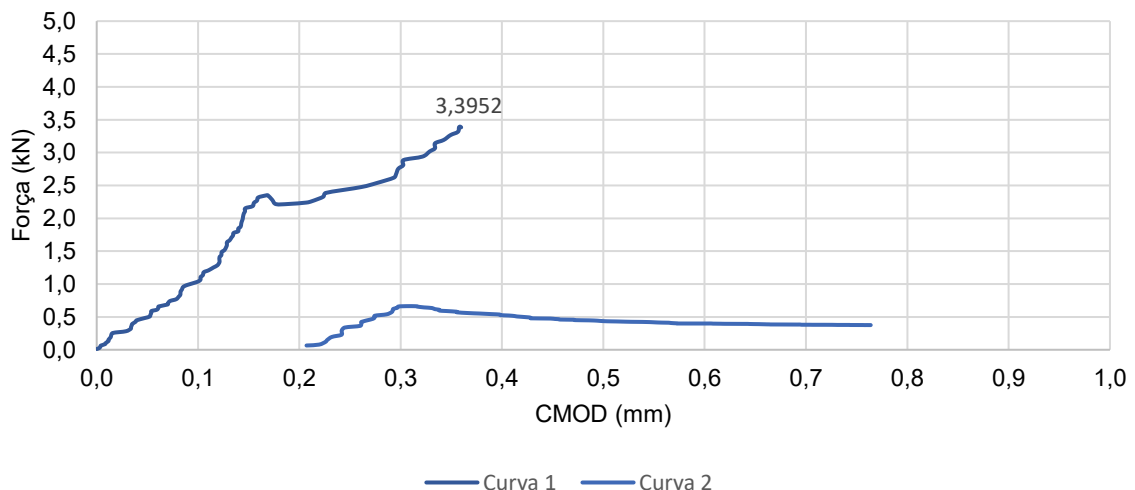
Figura 88 – Viga MB-1-1e após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Esta fissura (Figura 88), originada no entalhe central, propagou-se de maneira vertical ao longo do plano de sollicitação, mantendo-se visivelmente aberta, mas sem colapso total da seção. Tal morfologia de fratura corrobora o padrão observado no gráfico Força × CMOD da viga (Figura 89), onde a segunda curva de carregamento demonstra a sustentação da capacidade de carga residual e propagação de fissura mais controlada após o pico inicial.

Figura 89 – Curva força x CMOD da viga MB-1-1e.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

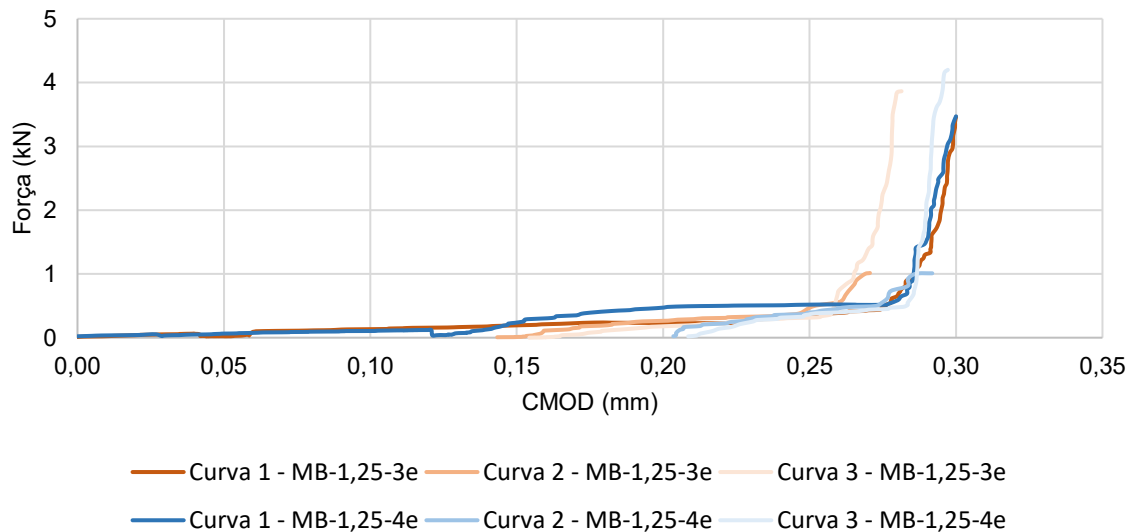
As vigas do grupo MB-1 revelaram comportamento intermediário entre a fratura frágil, observada no concreto de referência, e a resposta tenaz observada nas

vigas com 1,25% de fibras. As curvas deste grupo apresentaram alongamento mais acentuado antes da ruptura. Embora as cargas máximas não tenham superado as do grupo de 0,5%, o ganho em tenacidade e dissipação de energia foi perceptível, o que se refletiu diretamente nos valores de  $CTOD_C$  obtidos.

As vigas com 1,25% de fibras apresentaram comportamento mais disperso. Algumas curvas indicaram aumento da ductilidade, enquanto outras expressaram variações de carga, associado à distribuição heterogênea das fibras ou à formação de aglomerados que comprometem a continuidade da matriz.

As vigas MB-1,25-3e e MB-1,25-4e (Figura 90) mostram curvas com grande semelhança entre os três estágios de carga, indicando consistência da estrutura até a ruptura final. Embora sejam curvas de carregamento, o formato delas revela uma resposta gradativa à tração por flexão, com capacidade de suportar deslocamentos sem perda imediata da integridade estrutural.

Figura 90 – Curva força x CMOD das vigas MB-1,25-3e e MB-1,25-4e.

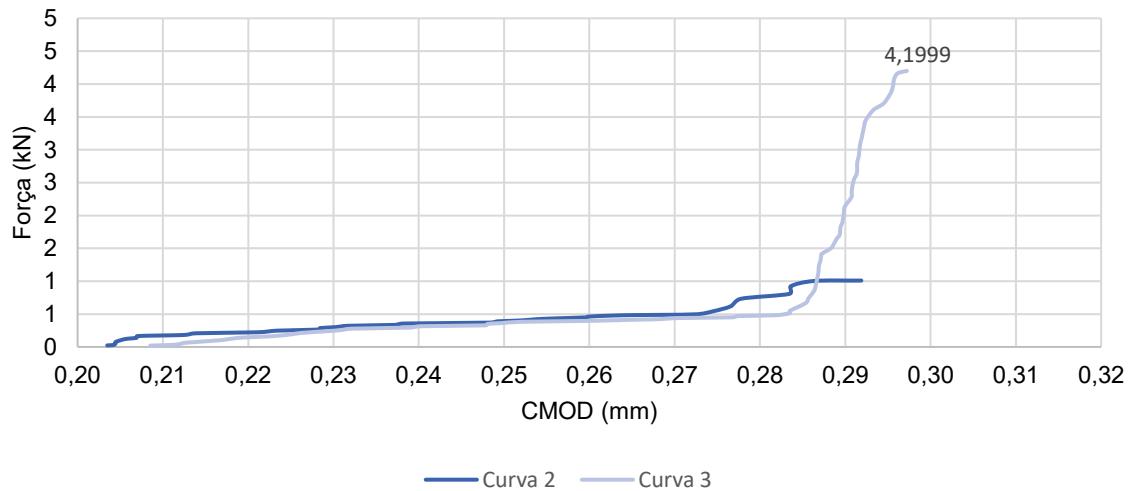


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A força máxima não aumentou em relação aos grupos anteriores, mas o prolongamento das curvas até valores elevados de CMOD demonstra o papel das fibras na contenção da trinca e na dissipação de energia. De acordo com os princípios da Mecânica da Fratura, esses resultados sugerem elevada resistência à propagação instável de fissuras, confirmando a eficiência do reforço com 1,25% de PET no aumento da tenacidade do concreto.

A Figura 91 apresenta o gráfico força *versus* deslocamento da ponta da trinca (CMOD) da viga MB-1,25-4e. Observa-se comportamento notável nas curvas de recarga: a curva 2 (segundo carregamento) evolui praticamente de forma coincidente com a curva 3 (terceiro carregamento). Essa resposta indica a preservação parcial da rigidez do material mesmo após o primeiro ciclo, sugerindo a ocorrência de comportamento quase elástico entre as recargas.

Figura 91 – Curva força x CMOD das vigas MB-1,25-4e.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

De acordo com Bentur e Mindess (2006), compósitos cimentícios com fibras podem apresentar formação sucessiva de fissuras e efeito de ponte nas trincas, nos quais as fibras restringem a abertura das fissuras e mantêm a transferência de tensões, permitindo que o material suporte novas aplicações de carga. No caso da viga em questão, a presença de fibras de PET promoveu o controle da fissuração, resultando em resposta resistente e estável ao longo dos carregamentos.

A Figura 92, que apresenta a viga MB-1,25-2e após o ensaio de flexão a três pontos, permite a identificação da fissura resultante da propagação da trinca a partir do entalhe central. Observa-se que a fissura principal se desenvolveu verticalmente ao longo do plano de carregamento, mantendo certa coesão mesmo após o pico de carga, o que está de acordo com o comportamento registrado nas curvas força x CMOD dessa viga. Essa fotografia foi registrada após 15 minutos e 54 segundos de aplicação de força, durante a segunda curva de carregamento. Esse padrão de fratura, com trinca visível e parcialmente aberta, é característico de materiais que apresentam

resposta pseudo-dúctil (que podem se deformar plasticamente de forma extensa antes de romper), sugerindo que as fibras de PET com 1,25% em volume atuaram de maneira satisfatória na contenção da propagação instável da fissura.

Figura 92 – Viga MB-1,25-2e após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

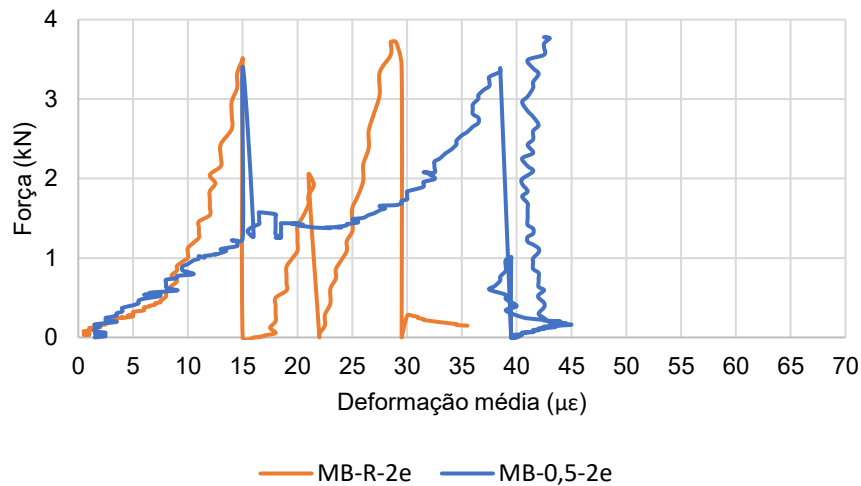
Os resultados obtidos com o Método B demonstraram que a adição de fibras de PET reciclado ao concreto altera o seu comportamento à fratura. Observou-se aumento progressivo dos parâmetros  $K_{Ic}$  e  $CTOD_C$  com o incremento do teor de fibras, com destaque para as vigas com 1%, que apresentaram desempenho superior em termos de tenacidade e ductilidade.

Observou-se que, com o aumento do volume de fibras incorporadas ao concreto, houve tendência ao aumento da abertura da fissura principal originada a partir do entalhe. Essa relação pôde ser verificada tanto por meio da análise visual das vigas após os ensaios quanto pelos valores obtidos do deslocamento de abertura na ponta da trinca (CTOD), que aumentaram progressivamente com a adição de fibras. Esse comportamento indica que as fibras de PET contribuíram para a tenacidade do material, permitindo maior deformação antes da ocorrência da carga máxima. Em outras palavras, o concreto reforçado com fibras apresentou maior capacidade de acomodar a abertura da trinca sem colapso imediato, mostrando melhor resistência ao avanço da fissura inicial e retardando o processo de fratura, em comparação ao concreto convencional.

Em síntese, o Método B mostrou-se eficaz na identificação dos efeitos da adição de fibras na resistência à fratura do concreto, permitindo a quantificação de parâmetros para o dimensionamento de estruturas sujeitas à fissuração.

A análise do comportamento mecânico das vigas, baseada em diagramas força  $\times$  deformação, demonstrou os efeitos da adição de fibras de PET reciclado sob diferentes condições de carregamento. A introdução de 0,5% promoveu alterações, com início de não linearidade e maior capacidade de deformação, resultado da atuação das fibras na contenção de microfissuras e na dissipação inicial de energia (Figura 93).

Figura 93 – Curva força  $\times$  deformação das vigas MB-R-2e e MB-0,5-2e (com entalhe e com *strain gage*).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Com teores de 1% e 1,25% os benefícios foram ainda mais satisfatórias. As vigas exibiram curvas com maior deformabilidade antes do pico de carga e comportamento pós-pico mais gradual. A presença de ciclos amplos e deformações residuais elevadas evidencia a atuação das fibras, que permitiram às vigas manter capacidade de carga mesmo após a fissuração.

#### 4.2.1.1 Método B – modelagem

A partir dos resultados obtidos, por meio da modelagem numérica do Método B (Tabela 26), observou-se que a viga de referência apresentou o maior valor de  $K_{Ic}$ ,

seguido pelo modelo MB-1. Entretanto, os modelos com fibras de PET apresentaram desempenho semelhante entre si, com variações discretas nos valores de  $K_{Ic}$ .

Tabela 26 – Resultados da modelagem do Método B.

Identificação	CTOD <sub>c</sub> (mm)	Máxima tensão equivalente (MPa)	$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )
MB-R	0,00094	24,758	0,314
MB-0,5	0,00086	22,677	0,287
MB-1	0,00088	23,652	0,299
MB-1,25	0,00087	22,870	0,290

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Os valores de CTOD<sub>c</sub> obtidos para os modelos reforçados com fibras apresentaram variações mínimas entre si, indicando que, sob a ótica da modelagem linear elástica com propriedades modificadas, as fibras de PET não resultaram em incremento significativo da tenacidade no estágio inicial de propagação da trinca. Essa limitação está associada ao fato de que as fibras não foram modeladas explicitamente, o que restringe a capacidade da simulação de representar os mecanismos locais de reforço. A baixa dispersão dos valores obtidos indica que, no contexto da modelagem linear elástica, a resposta à fratura permanece concentrada na região caracterizada por comportamento frágil. Nesse regime inicial de propagação da trinca, a influência das fibras de PET não pôde ser representada explicitamente, limitando a capacidade da simulação de capturar mecanismos locais de reforço, como ponteamto de fissuras ou microfissuração.

De modo geral, a inclusão das fibras de PET recicladas aos concretos — representada numericamente por meio da alteração das propriedades do material —, promoveu variações discretas nos parâmetros de fratura, especialmente no fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{Ic}$ ) e na tensão máxima equivalente. Embora essas alterações não evidenciem ganho expressivo em termos de resistência à fratura no regime linear, podem indicar a tendência de estabilização do comportamento estrutural nas fases subsequentes à fissuração.

Tais observações reforçam a limitação da abordagem linear elástica na avaliação do desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras, especialmente no que se refere à capacidade de redistribuição de tensões e dissipação de energia após o início da trinca, fenômenos que não são contemplados

pela mecânica da fratura linear elástica (Bazant e Planas, 1998; Li, 1992). Dessa forma, torna-se imprescindível a realização de análises complementares utilizando modelos não lineares com leis constitutivas que incorporem mecanismos de dano, além da confrontação com os dados experimentais, de modo a permitir uma caracterização mais abrangente e realista do comportamento à fratura dos compósitos analisados.

#### 4.2.2 Método B – sem entalhe

A Tabela 27 apresenta os valores de carga máxima e os respectivos tempos de ocorrência de cada viga submetida ao ensaio de flexão a três pontos. Observa-se que as vigas do grupo de referência apresentaram, em média, maiores valores de carga máxima do que aquelas reforçadas com de fibras de PET reciclado.

Tabela 27 – Carga máxima das vigas do Método B (sem entalhe).

Identificação	Carga máxima (N)	Tempo da carga máxima (s)	Velocidade de ensaio (mm/min)
MB-R-5	11402,13	564,82	0,190
MB-R-6	12535,04	944,82	0,147
MB-R-7	13337,43	621,70	0,190
MB-0,5-5	10272,57	891,62	0,190
MB-0,5-6	11070,21	579,46	0,190
MB-0,5-7	10980,96	632,32	0,190
MB-1-5	11529,37	591,98	0,190
MB-1-6	10605,73	751,54	0,190
MB-1-7	11314,57	647,98	0,190
MB-1,25-5	12532,30	618,56	0,190
MB-1,25-6	11381,25	1275,22	0,190
MB-1,25-7	11333,95	777,66	0,190

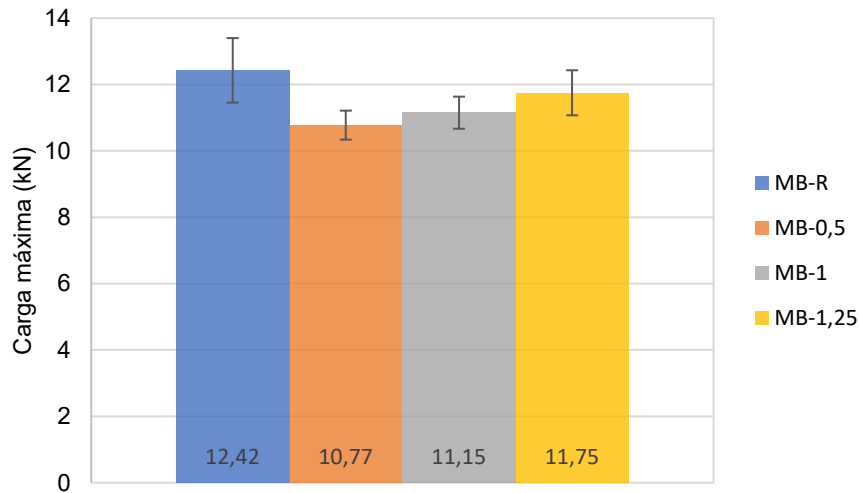
Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

No que se refere ao tempo até o pico de carga, verificou-se variabilidade entre as vigas de um mesmo grupo, a qual pode ser atribuída à natureza estocástica da distribuição das fibras no interior da matriz cimentícia e à consequente influência desta na iniciação e evolução das fissuras.

A viga MB-1,25-6 apresentou o maior tempo até a carga máxima, possivelmente devido ao efeito de ponteamto das fibras. Em teores iguais ou superiores a 1%, a incorporação de fibras contribuiu para uma resposta mais estável até a ruptura, com maior capacidade de dissipação de energia.

A análise estatística da carga máxima não demonstrou efeito expressivo da adição de fibras de PET nas proporções investigadas para os grupos MB. As tendências observadas nos valores médios, apesar de indicarem variações numéricas entre os grupos (Figura 94), não foram estatisticamente comprovados como distintos.

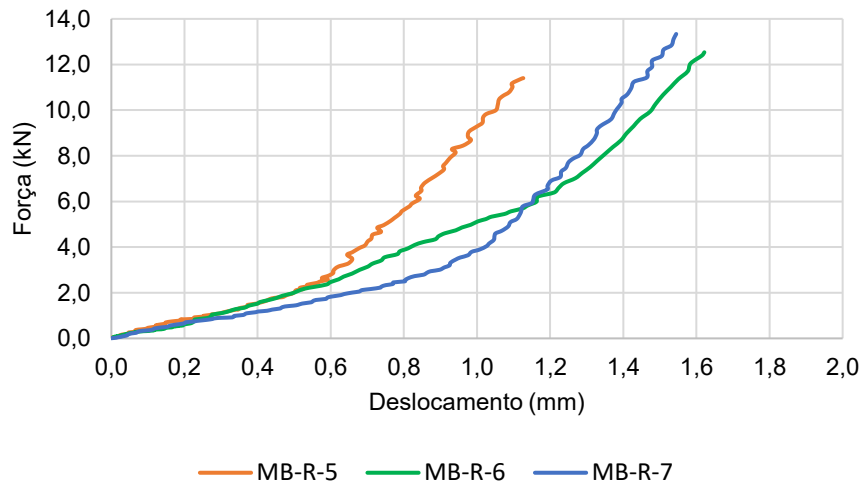
Figura 94 – Carga máxima média com erro padrão das vigas do Método B (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As curvas do grupo MB-R (Figura 95) indicam um comportamento predominantemente frágil, com subida linear acentuada até a carga máxima e uma interrupção abrupta no gráfico. A ausência de fibras resulta em um comportamento típico do concreto convencional, sem mecanismos adicionais de redistribuição de tensões após o início da trinca. Todos os gráficos de força *versus* deslocamento do Método B, com a indicação da carga máxima para cada viga, estão apresentados no Apêndice F.

Figura 95 – Curva força x deslocamento das vigas MB-R (sem entalhe).

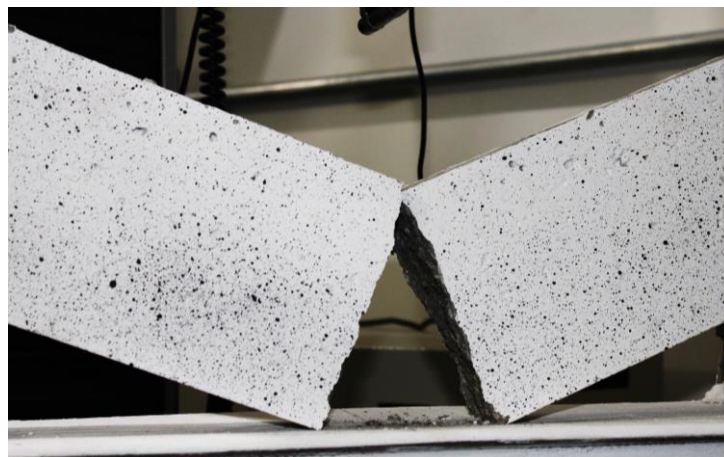


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A pequena dispersão entre as curvas de MB-R-5, MB-R-6 e MB-R-7 sugere boa repetibilidade do ensaio para concreto convencional, ainda que as diferenças de inclinação entre elas possam estar relacionadas a pequenas variações de compactação ou microdefeitos internos. A inexistência de patamares indica que a matriz não foi capaz de redistribuir tensões após o início da fissuração, resultando em colapso localizado sem absorção considerável de energia.

A viga MB-R-5, bem como as demais vigas do grupo de referência, apresentou ruptura abrupta durante o ensaio de flexão a três pontos, observada na Figura 96 pela ruptura completa e separação das 2 metades da viga.

Figura 96 – Viga MB-R-5 após ensaio de flexão.

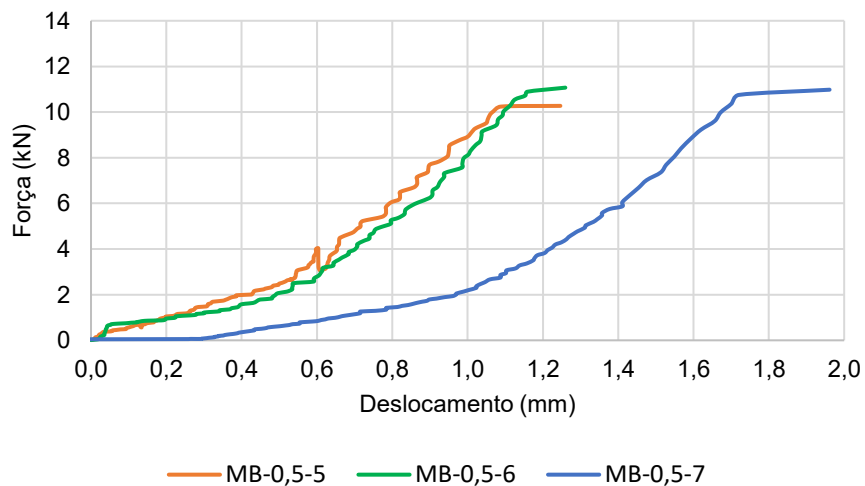


Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A superfície de ruptura é bem definida, compatível com o plano de máxima tensão de tração no terço médio da viga, característico de falhas frágeis como os materiais cimentícios. A ausência de coalescência de trincas antes da ruptura sugere que a matriz do material de referência, desprovida de reforço de PET, não possui mecanismos para dissipar a energia de deformação de forma gradual, resultando em falha abrupta quando a tensão máxima é atingida.

As curvas do grupo MB-0,5 (Figura 97) mostram redução na carga máxima em comparação ao grupo MB-R, mas revelam leve melhora na tenacidade, especialmente na viga MB-0,5-7, que apresenta um crescimento mais progressivo e prolongado da curva até o pico, atingindo o maior deslocamento entre todas as vigas. Esta variação sugere que a adição de 0,5% de PET teve impacto neutro a negativo na capacidade de carga máxima do material devido à natureza da interação interfacial entre a matriz e as fibras de PET.

Figura 97 – Curva força x deslocamento das vigas MB-0,5 (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As curvas do grupo MB-0,5 revelaram comportamento de transição entre o regime frágil do concreto convencional e início de resposta pseudo-dúctil. Embora as vigas MB-0,5-5 e MB-0,5-6 apresentem trajetória relativamente semelhante à do grupo MB-R, observa-se a ocorrência de pequenas flutuações na curva e leve arredondamento próximo ao pico de carga relacionado ao início de um mecanismo de microponteamto pelas fibras. A curva MB-0,5-7 se destacou por seu formato mais alongado, com baixa inclinação inicial, mas sustentando a aplicação de força por maior

deslocamento, indicando resposta mais progressiva à fissuração e efeito mais claro das fibras no controle do avanço da trinca.

A Figura 98 da viga MB-0,5-5 mostra a formação de uma fissura vertical dominante iniciada na região inferior da viga. Ao contrário das vigas de referência, a ruptura completa em duas partes distintas não ocorreu após atingir a carga máxima. No entanto, a viga manteve sua integridade estrutural, mesmo com a fissura aparente. As fibras de PET, ainda que em baixa concentração, atuaram como pontes na fissura, dificultando sua propagação total e conferindo ao material capacidade "pós-pico" ou de absorção de energia após a formação da primeira trinca. Este comportamento é indicativo de aumento na tenacidade do material em comparação com a viga de referência.

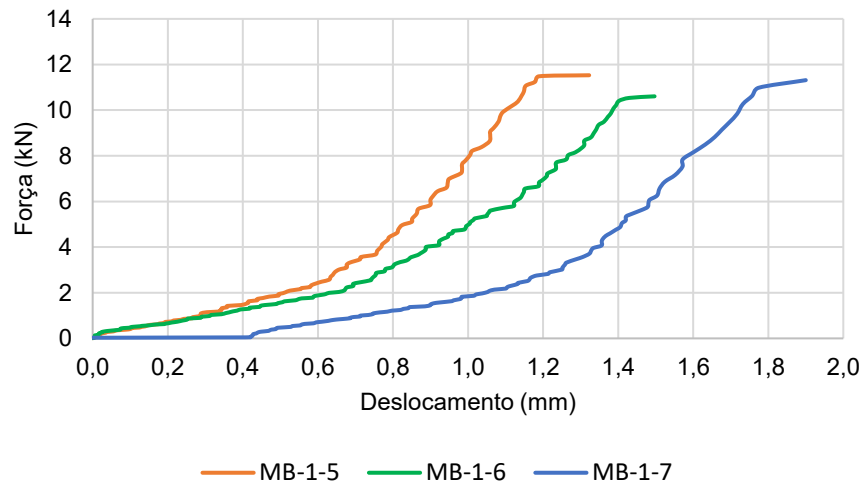
Figura 98 – Viga MB-0,5-5 após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

No grupo MB-1 (Figura 99) observou-se recuperação na capacidade de carga máxima em comparação com o grupo MB-0,5, aproximando-se novamente dos valores obtidos para as vigas de referência. Essa tendência sugere que, para uma concentração de 1% de PET, a interação entre as partículas de PET e a matriz foi mais benéfica na distribuição de tensões, ou que os defeitos introduzidos pela adição do PET foram compensados pelo efeito de reforço.

Figura 99 – Curva força x deslocamento das vigas MB-1 (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As vigas MB-1-5 e MB-1-7 demonstraram trajetória mais estável até a carga máxima, especialmente a MB-1-7, com resposta progressiva mesmo após pequenas quedas locais da força. Isso indica que o acréscimo de fibras melhorou a capacidade de redistribuição de tensões internas e retardou a instabilidade da trinca.

As curvas demonstraram evolução na resposta mecânica das vigas, especialmente no comportamento pré-pico. Observa-se um trecho inicial menos inclinado, refletindo maior deformabilidade da matriz reforçada, seguido de uma transição suave até a carga máxima. As curvas apresentam oscilações mais marcantes, indicando sucessivos eventos de microfissuração e redistribuição de carga, o que é típico de compósitos com reforço descontínuo.

A Figura 100 mostra a viga MB-1-5 após o ensaio de flexão. Similarmente à viga MB-0,5-5, esta viga exibe uma fissura principal que se desenvolveu verticalmente, mas a viga não se partiu completamente. A fissura relativamente estreita indica que as fibras de PET estão atuando no controle da abertura da trinca. A presença do reforço de 1% de PET demonstrou ter contribuído para um modo de falha mais controlado, em que a energia é dissipada pela deformação e eventual fratura ou arrancamento das fibras. Este comportamento é desejável em aplicações estruturais, pois permite aviso prévio de falha e evita rupturas súbitas. A imagem sugere que o aumento da concentração de PET para 1% aprimorou a capacidade do material de manter a coesão, mesmo após a formação da fissura principal.

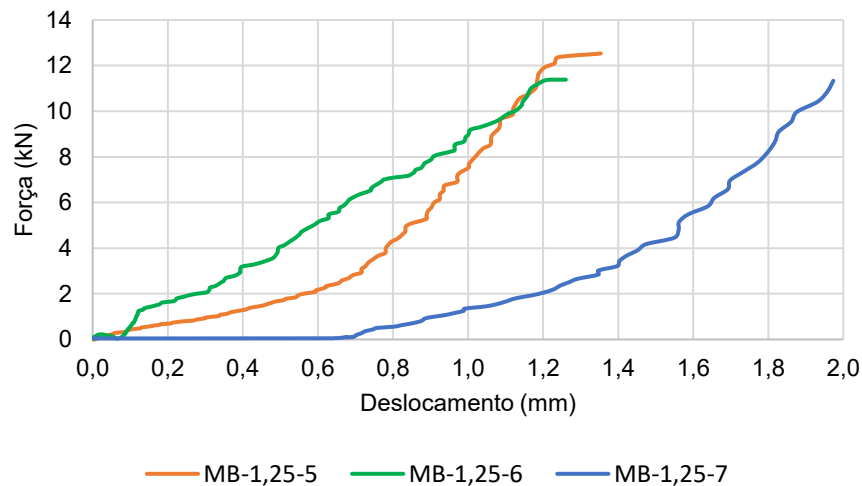
Figura 100 – Viga MB-1-5 após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

O grupo MB-1,25 (Figura 101), com a maior concentração de PET, exibiu cargas máximas que se equiparam ou, em alguns casos, superam as do grupo de referência, indicando potencial de reforço para esta concentração.

Figura 101 – Curva força x deslocamento das vigas MB-1,25 (sem entalhe).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A viga MB-1,25-5 apresentou elevada carga máxima, indicando interação PET-matriz potencializada na proporção de 1,25%. Já a viga MB-1,25-6 destacou-se pelo maior tempo até a carga máxima (1275,22 s), evidenciando maior capacidade de deformação plástica e tenacidade. A Figura 102 mostra a MB-1,25-5 após o ensaio, onde se observa a fissura principal sem separação completa, com padrão de falha distinto em relação às demais vigas com fibras de PET.

Figura 102 – Viga MB-1,25-5 após ensaio de flexão.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

Enquanto as vigas MB-0,5-5 e MB-1-5 apresentaram fissuras predominantemente verticais, indicativas de falha por tração direta na região de máxima flexão, a viga MB-1,25-5 exibiu fissura principal com inclinação mais acentuada.

Considerando as análises das vigas com diferentes teores de PET, ficou clara a complexidade da interação entre o reforço polimérico e a matriz do material. Observou-se que a adição de PET pode influenciar a carga máxima suportada, o tempo até a ruptura e, notavelmente, o padrão de falha, transitando de fratura frágil e completa no material de referência para comportamento mais tenaz com a presença das fibras, que controlam a propagação das fissuras e mantêm a integridade estrutural da viga mesmo após o pico de carga.

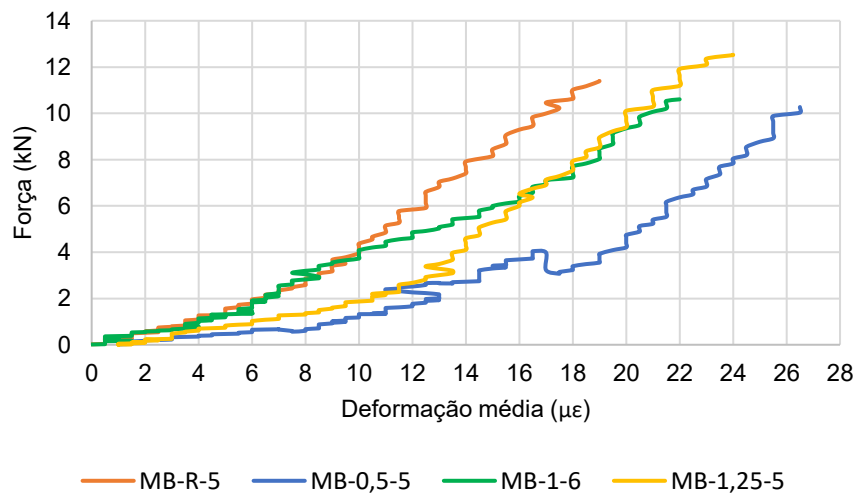
A particularidade da inclinação da fissura na viga com 1,25% de PET, em contraste com as fissuras predominantemente verticais observadas nas demais, sugere alteração nos mecanismos de dissipação de energia e na forma como as tensões são suportadas. Tal comportamento está associado à maior quantidade de fibras atuando no interior da matriz, como destacado por Shafei *et al.* (2021), que apontaram que o aumento do teor de fibras em concretos reforçados tende a melhorar as propriedades mecânicas pós-pico — incluindo tenacidade, ductilidade e resistência residual —, devido à maior capacidade de ponteamto das fissuras e à redistribuição das tensões.

As curvas força  $\times$  deformação obtidas até o limite da carga máxima para as vigas sem entalhe revelaram a influência da adição de fibras de PET reciclado no

comportamento estrutural do concreto submetido à flexão. A viga de referência apresentou comportamento linear com rigidez constante até a ruptura. Estas vigas exibiram resposta que se manteve predominantemente linear-elástica até um ponto próximo à carga máxima, caracterizando a ausência de fase plástica expressiva antes da falha.

Com a inclusão das fibras, foi possível observar aumento na inclinação das curvas e extensão no intervalo de deformações (Figura 103), indicando maior rigidez e capacidade de absorção de energia até o pico de carga. As composições com fibras mostraram variações entre as amostras, mas, de modo geral, apresentaram desempenho superior à viga de referência, tanto em termos de resistência quanto de tenacidade. A presença das fibras contribuiu para retardar a formação de microfissuras e aumentar a capacidade de redistribuição de tensões internas antes da falha. Os gráficos correspondentes a essas análises encontram-se no Apêndice G.

Figura 103 – Curva força x deformação das vigas MA (sem entalhe e com *strain gage*).



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

As vigas com 1% e 1,25% de fibras apresentaram boa rigidez combinada a uma capacidade de deformação satisfatória antes da ruptura. Como os dados foram registrados apenas até a carga máxima, não foi possível avaliar a resistência residual ou o comportamento pós-fissuração. Ainda assim, os resultados demonstraram que a adição de fibras melhorou a rigidez e a tenacidade do material até o ponto de ruptura, sendo os teores de 1% e 1,25% os que apresentaram desempenho mais satisfatório nessa fase do ensaio.

As vigas com 1% de fibras de PET reciclado demonstraram melhora mais pronunciada e consistente nas propriedades mecânicas. A resposta foi caracterizada por boa manutenção da rigidez inicial, mas com transição para a fase não linear, que é mais controlada e estável em comparação com os teores menores de fibras. A deformação tornou-se mais distribuída ao longo do carregamento, o que é indicativo de que as fibras estão efetivamente ativando mecanismos de tenacificação, como o *pull-out* (arrancamento) das fibras da matriz e o atrito interfacial. Este papel ativo das fibras na contenção das fissuras e na promoção da coesão do compósito resultou em uma capacidade de deformação visivelmente aumentada antes do pico de carga e, em muitos casos, com melhoria na tenacidade pós-pico (embora esta seja mais claramente observada em ensaios que registraram a fase pós-pico). A homogeneidade notada entre as curvas das amostras com 1% de fibras ressalta a boa dispersão das fibras e a repetibilidade do processo de fabricação, conferindo confiança aos resultados experimentais.

As vigas com 1,25% de fibras apresentaram comportamento semelhante ao das vigas com 1%, com rigidez e resistência elevadas. No entanto, a diferença em relação à dosagem de 1% não foi expressiva.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

- A adição de fibras de PET reciclado influencia significativamente o comportamento à fratura de vigas de concreto, promovendo transição de frágil para pseudo-dúctil.
- Método A:
  - concretos com 1% e 1,25% de fibras apresentaram melhorias na resistência à fratura, deformabilidade e absorção de energia;
  - fibras atuaram como ponteamto nas fissuras, permitindo maiores deslocamentos e oscilações pós-pico;
  - velocidades de carga mais baixas favoreceram comportamento dúctil e dissipação gradual de energia;
  - concreto de referência (sem fibras) manteve comportamento frágil, com ruptura abrupta e deslocamentos reduzidos.
- Método B:
  - a adição de fibras aumentou o fator de intensidade de tensão crítico ( $K_{Ic}$ ) e o deslocamento crítico da ponta da trinca ( $CTOD_C$ );
  - maior estabilidade e progressividade foram observadas em vigas com 1% e 1,25% de PET, mesmo que a carga máxima não tenha aumentado;
  - amostras reforçadas mantiveram integridade estrutural após fissuração.
- As fibras de PET exercem maior efeito pós-fissuração, controlando a propagação de trincas e aumentando a tenacidade do material, enquanto a resistência inicial (carga máxima) não é significativamente alterada.

- Ensaio cíclicos mostraram que as fibras permitiram repetição de trajetórias de carga, indicando maior capacidade de recuperação e controle da fissuração.
- Observou-se redução progressiva do módulo de elasticidade com o aumento do teor de fibras, devido à menor rigidez do PET em relação à matriz cimentícia.
- Análise comparativa entre Métodos A e B:
  - método A fornece estimativa global da dissipação de energia;
  - método B apresenta maior sensibilidade à propagação de fissuras, sendo mais eficaz para avaliar  $K_{Ic}$  e  $CTOD_c$ ;
  - a combinação de ambos os métodos amplia a compreensão do comportamento fraturante do concreto reforçado;
  - o reforço com 1,25% de PET alterou também a trajetória e mecanismo de propagação das trincas, mostrando interação complexa entre fibras e matriz;
  - não foi possível correlacionar plenamente resultados experimentais com modelagem numérica linear, indicando necessidade de análises mais sofisticadas para simular o comportamento real;
  - os resultados confirmam o potencial do PET reciclado como material alternativo para o aumento da tenacidade e controle de fissuração em estruturas de concreto.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar dos avanços obtidos na compreensão do comportamento do concreto reforçado com fibras recicladas de PET, diversas questões ainda permanecem em aberto, oferecendo oportunidades para pesquisas complementares que possam ampliar o conhecimento e a aplicação prática dessa tecnologia.

Assim, algumas sugestões para trabalhos futuros, que visam aprofundar e expandir os resultados obtidos neste estudo são:

- avaliar o comportamento do concreto com fibras de PET submetido a diferentes tipos de carregamento, como compressão cíclica, fadiga e impacto;
- desenvolver modelos numéricos mais avançados que integrem a interação micromecânica entre as fibras de PET e a matriz cimentícia;
- estudar a durabilidade do concreto reforçado com fibras de PET em ambientes agressivos, incluindo exposição a agentes químicos e variações térmicas;
- analisar o efeito da combinação de fibras de PET com outros tipos de fibras para otimizar o desempenho estrutural e a tenacidade;
- avaliar a influência da distribuição e orientação das fibras no comportamento à fratura;
- investigar a reciclagem e reutilização das fibras de PET provenientes de resíduos pós-uso em novas dosagens de concreto;
- estudar o impacto da incorporação de fibras de PET na trabalhabilidade, tempo de cura e propriedades físicas do concreto;
- aplicar técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para prever o comportamento mecânico e a propagação de trincas em concretos reforçados com fibras recicladas;
- investigar a influência do uso combinado de agregado graúdo reciclado e fibras de PET no desempenho mecânico e à fratura do concreto, avaliando possíveis interferências entre os materiais;

- avaliar o efeito da qualidade e tipo do agregado graúdo reciclado na interação com as fibras de PET, e seu impacto na durabilidade e resistência estrutural do concreto;
- utilizar análise não linear para a modelagem numérica dos concretos presentes neste estudo.

## REFERÊNCIAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16889**: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 9001**: Sistemas de gestão da qualidade — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM C469/C469M-14**: Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics**: Fundamentals and applications. 4rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

ARANA, J. L.; GONZÁLEZ, J. **Mecánica de fractura**. Bilbao: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002.

ARAÚJO, F. A. de. **Contribuição ao emprego da mecânica do dano para a análise do comportamento dinâmico não-linear de vigas em concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

- ARAÚJO, L. S.; SILVA, V. S. da; LEITE, J. S.; TAPAJÓS, L. S.; LEITE, J. S. Experimental analysis of the use of PET fiber (Polyethylene Terephthalate) in conventional structural concrete. **Brazilian Journal of Development**, p. 2976-2997, 2022.
- ASDOLLAH-TABAR, M.; HEIDARI-RARANI, M.; ALIHA, M. R. M. The effect of recycled PET bottles on the fracture toughness of polymer concrete. **Composites Communications**, 25, 2021.
- ASSAAD, J. J.; KHALIL, M.; KHATIB, J. Alternatives to enhance the structural performance of PET-modified reinforced concrete beams, 9, n. 37, 2022.
- BARROS, J. A. O.; FIGUEIRAS, J. A. Model for the analysis of steel fibre reinforced concrete slabs on grade. **Computers and Structures**, 79, p. 97-106, 2001.
- BAŽANT, Z. P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, 110(4), p. 518-535, 1984.
- BAŽANT, Z. P.; KAZEMI, M. T. Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete, 44(2), p. 111-131, 1990.
- BAŽANT, Z. P.; PFEIFFER, P. A. Determination of Fracture Energy from Size Effect and Brittleness Number. **Materials**, 84, p. 463-480, 1987.
- BAŽANT, Z. P.; PLANAS, J. **Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials**. Boca Raton: CRC press, 1988.
- BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2. ed. **Boca Raton**: CRC Press, 2006.
- BOLANDER, J. E.; CHOI, S.; DUDDUKURI, S. R. Fracture of fiber-reinforced cement composites: effects of fiber dispersion. **International Journal of Fracture**, Dordrecht, v. 154, p. 73–86, 2008.
- BROZENICK, N. J. **Modern Plastics Encyclopedia**. New York: McGraw-Hill, 1986–1987.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- CARRILLO, J.; RAMIREZ, J.; LIZARAZO-MARRIAGA, J. Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities. **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 23, p. 18–26, 2019.

CEREJA, K. D. D. S. F. **Comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de polietileno tereftalato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PPGEC, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2025.

CHOI, Y. W.; MOON, D. J.; CHUNG, J. S.; CHO, S. K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, 35, p. 776-781, 2005.

CONCRETO TECNOLOGIA SikaFiber®. Osasco: Sika, 2015.

CUNHA, R. N. da.; FERNANDES, C. N. de A.; BARROS, K. R. A. de G.; SANTANA, N. N. J. O.; PASTOR, T. A.; SOUZA, K. T. L. M. de.; AMORIM, D. L. N. de F. Aplicação de fratura coesiva para análise de estruturas de concreto. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional**, XL, p. 699-707, 2023.

DI LORENZO, M. L. Crystallization of Poly(ethylene terephthalate): A Review. **Polymers**, v. 16, n. 14, p. 1975, 2024.

DONG, Q.; LI, X.; JIA, Y.; SUN, J. A numerical simulation of blasting stress wave propagation in a jointed rock mass under initial stresses. **Applied Sciences**, v. 11, n. 17, p. 7873, 2021.

DURAI SWAMY, S.; NEELAMEGAM, P.; VISHNUPRIYAN, M.; ALANEME, G. U. Impact of plastic waste fiber and treated construction demolition waste on the durability and sustainability of concrete. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 27221, 2024.

EKANE, E. B. **Estudo de fissuração em concreto armado com fibras e armadura convencional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

ELFGREN, L.; SHAH, S. P. (Eds.). **Analysis of concrete structures by fracture mechanics**: Proceedings of a RILEM Workshop. Abisko: Chapman and Hall, 1989.

EXCEL SENSOR. Acessórios para extensômetros coláveis de resistência elétrica. Disponível em: <https://excelsensor.com.br/extensometros-colaveis-de-resistencia-eletrica/acessorios/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

FERREIRA, L. E. T. **Elementos de mecânica da fratura aplicada à engenharia estrutural**: aspectos analíticos, computacionais e experimentais. 2. ed. Lavras: UFLA, 2019.

FERREIRA, L. E. T.; HANAI, J. B. D. Mecânica da fratura e fraturamento do concreto. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, v. 1. Cap. 9, p. 260-301, 2017.

FOTI, D. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. **Composite Structures**, Bari, p. 396-404, 2013.

FRATERNALI, F.; CIANCIA, V.; CHECHILE, R.; RIZZANO, G.; FEO, L.; INCARNATO, L. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. **Composite Structures**, Fisciano, p. 2368-2374, 2011.

FRIGIONE, M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1101–1106, 2010.

FRITSCH GmbH. Britador de mandíbulas. **DirectIndustry**, 2025. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/fritsch-gmbh-milling-and-sizing/product-15376-350476.html>. Acesso em: 17 mar. 2025.

FUSCO, P. B.; ONISH, M. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto**. São Paulo: Cengage, 2017.

GUETTI, P. C. **Métodos experimentais para determinação de propriedades do concreto baseados na mecânica da fratura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

GETTU, R.; BAŽANT, Z. P.; KARR, M. E. Fracture properties and brittleness of high-strength concrete, 87(6), p. 608-618, 1990.

GONÇALVES, R. **Análise de propagação de fissuras por fadiga em concreto pelo MEF mediante a mecânica do dano contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

GRIFFITH, A. A. **The phenomena of rupture and flow in solids**. London: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, p. 163-197, 1920.

HALL, I. H. **Structure of Crystalline Polymers**. Barking, U.K.: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.

HAMA, S. M. Behavior of concrete incorporating waste plastic as fine aggregate subjected to compression, impact load and bond resistance. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 26, n. 8, p. 3372–3386, 2020.

HAN, X.; ZHAO, Q.; HE, X.; JIA, B.; XIAO, Y.; SI, R.; LI, Q.; HU, X. Fracture prediction in recycled aggregate concrete using experience-based machine learning with a defective database. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 139, p. 104975, 2025.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HILLERBORG, A. **Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation**: Report to RILEM TC50-FMC. Lund: Division of Building Materials, LTH, Lund University, v. 3015, 1983.

HILLERBORG, A.; MODÉER, M.; PETERSSON, P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. **Cement and concrete research**, 6, p. 773–782, 1976.

HOFFMAN, I. S. Análise de viga de concreto armado através do método dos elementos finitos. **LinkedIn**, 18 setembro 2018. Disponível em: <https://acesse.one/tVj4a>. Acesso em: 1 junho 2024.

HUSSAIN, Laith N.; HAMOOD, Mohammed J.; AL-SHAARBAF, Ehsan A. A finite element approach to evaluate and predict the shear capacity of steel fiber-reinforced concrete beams. **Engineering, Technology and Applied Science Research**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 11497–11504, 2023.

IROH, Jude O. Poly(ethylene terephthalate). In: BRANDRUP, J.; IMMERGUT, E. H.; GRULKE, E. A. (eds.). **Polymer Handbook**. 4. ed. New York: Wiley-Interscience, p. 558-559, 1999.

IRWAN, J. M.; ASYRAF, R.; OTHMAN, N.; KHALID, F. S. The mechanical properties of concrete containing polyethylene terephthalate (PET) bottle waste as aggregate. **Advanced Materials Research**, v. 795, p. 347–351, 2013.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO/IEC 25000: Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)**. Geneva: ISO, 2005.

JACQUISS, D. B. G.; BORMAN, W. F. H.; CAMPBELL, R. W. In: GRAYSON, M. (ed.). **Encyclopedia of Chemical Technology**. New York: John Wiley and Sons, v. 18, 1982.

JENQ, Y. S.; SHAH, S. P.; A Two Parameter Fracture Model for Concrete. **Journal of Engineering Mechanics**, 111, n. 4, p. 1227-1241, 1985.

JUÁREZ, C. A.; MENDOZA-RANGEL, J. M.; GONZÁLEZ, J. R.; RODRÍGUEZ, J. A.; VALDEZ, P. Mechanical behavior of sustainable building materials using PET waste and industrial by-products. **Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia**, San Nicolás de los Garza, p. 247-256, 2015.

KANNINEN, M. F.; POPELAR, C. H. **Advanced fracture mechanics**. New York: Oxford University Press, 1985.

KARIHALOO, B. L. **Fracture mechanics and structural concrete**. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.

LAM, T. Q. K.; DO, T. M. D.; DO, T. M. D.; NGO, V. T.; HUYNH, T. P. Numerical simulation and experiment on steel fiber concrete beams. **Journal of Physics: Conference Series**, Moscow, v. 1425, n. 1, p. 012007, 2020.

LEMAITRE, J. **A course on damage mechanics**. Berlin: Springer-Verlag, 1996.

LIANG, N.; REN, L.; TIAN, S.; LI, B.; YANG, Z.; WU, H.; LI, L.; WANG, X. Study on the fracture toughness of polypropylene–basalt fiber-reinforced concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, [S.l.], v. 15, n. 35, 2021.

LI, T.; XIAO, J. Discrete element simulation analysis of biaxial mechanical properties of concrete with large-size recycled aggregate. **Sustainability** (Switzerland), [S.l.], v. 13, n. 13, p. 7498, 2021.

LI, Victor C. Postcrack Scaling Relations for Fiber Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 4, n. 1, p. 41–57, 1992.

LI, Z.; LI, L.; CHENG, S. Evaluation of modulus of elasticity of concrete containing both natural and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 447, p. 141591, 2024.

LOPES JÚNIOR, C. M. **Modelagem numérica do crescimento de fraturas através do método dos elementos de contorno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

M. JANSSEN, J. Z.; WANHILL, R. J. H. **Fracture mechanics: an engineering primer**. 2nd ed. [Delft]: TU Delft OPEN, 2006.

MARCOMINI, J. B. SMM0330 - Princípios de análise de falhas em componentes. **USP**, 2020. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/acessar/>. Acesso em: 14 maio 2024.

MARCONCIN, L. D. R. **Uma abordagem numérico-experimental para análise de dano em lajes de barragens de enrocamento com face de concreto**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MARK, H. F.; BIKALES, N.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G.; KROSWITZ, J. I. (eds.). **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. New York: John Wiley and Sons, v. 12, 1985.

MATOS, C. C. D. **Análise numérica de vigas em concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

MEDDAH, M. S. Recycled aggregates in concrete production: Engineering properties and environmental impact. **MATEC Web of Conferences**, v. 101, p. 05021, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 3rd ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2016.

MOHAMMED, A. A.; MOHAMMED, I. I. Effect of fiber parameters on the strength properties of concrete reinforced with PET waste fibers. **Iran J Sci Technol Trans Civ Eng**, 45, p. 1493–1509, 2021.

NAAMAN, A. E. Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 241–252, 2003.

NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications. *In: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 (HPFRCC6)*. **Dordrecht**: Springer, 2012.

NEUPANE, B.; SAHANI, K.; KHADKA, S. S. Experimental Testing and Numerical Simulation of Recycled Concrete Aggregate in a Concrete Mix. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 19, n. 1, p. 5, 2025.

PALYS, C. H.; PHILLIPS, P. J. J. **Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.**, v. 18, p. 829, 1980.

PARIZOTTO, L. **Concreto armado**. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

PARK, Jun Kil; KIM, Min Ook. Mechanical properties of cement-based materials with recycled plastic: a review. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 21, p. 1–29, 2020.

PATEL, N. M.; PATEL, M. N. Finite element analysis of M40 PET fiber concrete. **Journal of Harbin Engineering University**, Vadodara, 44, n. 5, p. 444-457, 2023.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 294–309, 2017.

PELISSER, F.; MONTEDO, O. R. K.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. **Materials Research**, v. 15, n. 4, p. 679–686, 2012.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 5, p. 281–289, 2004.

QUINTA, N. R. A. **Determinação do factor de intensidade de tensão a partir de medições fotoelásticas afastadas da extremidade da fenda**. [Porto]: Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto, 1994.

RIBEIRO, L. F. D. S. **Modelagem mesoescala do dano e fratura em concreto reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pontifeca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J. A. Influência da forma e do processo de obtenção do entalhe na carga máxima e na energia de fratura de argamassas utilizando o método da cunha para propagação estável de trinca. **Cerâmica 55**, p. 181-189, 2009.

RILEM. Draft Recommendation 89-FMC: Determination of the fracture parameters ( $K_{Ic}$  and  $CTOD_c$ ) of plain concrete using three-point bend test. **Materials and Structures**, 23, p. 457-460, 1990.

RILEM. Draft Recommendation 89-FMC: Size-effect methods for determining fracture energy and process zone size of concrete. **Materials and Structures**, 23, p. 461-465, 1990.

RILEM. Draft Recommendation 50-FMT: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams. **Materials and Structures**, 18, p. 285-290, 1985.

RILEM. TC 162-TDF: Test and methods for steel fibre reinforced concrete. **Materials and Structures**, 36, p. 560-567, 2003.

RODRIGUES, N. C. S.; CARVALHO, M. M. B.; BALBINO, A. V. M.; VASCONCELOS, A. L. R. Fibra de PET na produção de concretos. **Especial ABM Week 2017**, v. 15, n. 3, p. 207-211, 2018.

RODRIGUES, T. L. F.; DURAND, R. Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete using cohesive elements. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, 8, n. 69, 2023.

ROKNUZZAMAN, M.; RAHMAN, M. M.; ISLAM, M. M. Performance and usability assessment of recycled aggregate extracted from demolished concrete subjected to multiple recycling. **Journal of Rehabilitation in Civil Engineering**, v. 13, n. 4, p. 161-176, 2025.

RUBIN, I. I. (ed.). **Handbook of Plastics Materials and Technology**. New York: John Wiley and Sons, 1990.

SAIKIA, N.; DE BRITO, J. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. **Construction and Building Materials**, 52 p. 236-244, 2014.

SANT'ANA, M. V. P. **Modelo numérico para concreto reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2005.

SCHETTINO, R. M. **Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno**. Dissertação (Mestrado em Materiais), UniFOA, Volta Redonda, 2015.

SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials**. New York: Wiley, 1995.

SHAFEI, B.; KAZEMIAN, M.; DOPKO, M.; NAJIMI, M. State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. **Materials** (Basel), v. 14, n. 2, p. 409, 2021.

- SIKARSKAS, D.; ANTONOVIČ, V.; MALAIŠKIENĖ, J.; BORIS, R.; STONYS, R.; ŠAHMENKO, G. Modification of the Structure and Properties of Lightweight Cement Composite with PVA Fibers. **Materials** (Basel), v. 14, n. 20, p. 5983, 2021.
- SILVA JÚNIOR, F. E. S. D.; REAL, M. D. V. Modelagem do descolamento de contato para vigas de concreto reforçadas com PRFC. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, 11, p. 246-257, 2019.
- SILVA NETO, C. P. **Modelagem da fratura do concreto armado por meio de interfaces coesivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.
- SILVA, A. M. da; BRITO, J. de; VEIGA, Rosário. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 226–236, 2014.
- SILVA, L. A.; OLIVEIRA, J. P. S.; ECHTERNACHT, H. F. S.; PEREIRA, A. M.; CORREIA, J. C. G. Modelagem computacional na engenharia de processos atual: do micro ao macro, modernidade e interdisciplinaridade. In: WENDEQ. **Anais [...]**, 2022.
- SILVA, L. S.; MOUTA, J. R.; COSTA, M. C. B.; GOMES, L. G. Análise da influência da profundidade do entalhe na estabilidade da propagação da trinca em concreto. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, Belém, v. 4, n. 6, 2018.
- SILVA, R. V.; BRITO de, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201–217, 2014.
- SORELLI, L.; MEDA, A.; MEDA, P. Influence of fiber length and content on flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 170-180, 2008.
- SORIANO, H. L. **Introdução à dinâmica das estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- SOUZA, M. B. S. **Modelagem numérica de vigas de concreto reforçada com fibras de aço**. Goiânia: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2006.
- SOUZA, R. A. **Análise de fraturamento em estruturas de concreto utilizando programas de análise estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- SPERLING, L. H. **Introduction to Physical Polymer Science**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- SURAWEEERA, S. M. D. V.; DE SILVA, S. Effect of recycled Polyethylene Terephthalate (PET) fibres on fresh and hardened properties of concrete: a review. **International Journal of Sustainable Engineering**, 16, p. 269-284, 2023.

SUTTON, M. A. Digital image correlation for shape and deformation measurements. In: SHARPE, W. N. (ed.). **Springer handbook of experimental solid mechanics**. Boston: Springer, cap. 5, p. 565–600, 2008.

TADOKORO, H. **Structure of Crystalline Polymers**. New York: Wiley-Intersciences, 1979.

TRINDADE, J. C. **Comportamento à força cortante de vigas de concreto com agregados graúdos reciclados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

WISWAMITRA, K. A.; DEWI, S. M.; CHOIRON, M. A.; WIBOWO, A. Heat resistance of lightweight concrete with plastic aggregate from PET (polyethylene terephthalate)-mineral filler. **AIMS Materials Science**, 8, 2021.

XIAO, Qidan; CAI, Lianting; LIU, Yi; ZHANG, Mengli; HU, Xiumin. Impact of pore geometry on mechanical properties and anti-clogging efficiency in porous drainage pavement structures. **Case Studies in Construction Materials**, [S.l.], v. 23, p. e04929, 2025.

XU, R.; BAI, J.; ZHAO, Y.; XU, N. Deformation performance analysis of hybrid fiber concrete columns under low reversed cyclic loading. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, [S.l.], v. 39, n. 11, p. 3503–3509, 2020.

YANG, G.; WU, J.; YE, Q. Study on short term stiffness of reinforced concrete beams with recycled coarse aggregates. **Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal**, v. 43, n. 2, p. 55–63, 2010.

YIN, S.; TULADHAR, R.; COLLISTER, T.; COMBE, M.; SIVAKUGAN, N.; DENG, Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, pt. 1, p. 1069–1077, 2015.

YUVASHRI, B.; SHARMA, A. Sattainathan; DEVI, K. Suganya. Study on flexural behaviour of high-performance concrete beam strengthened with polyolefin fibres. **Journal of Physics: Conference Series**, Kancheepuram, v. 2040, n. 1, p. 012028, 2021.

ZHANG, X.; RUIZ, G.; TARIFA, M.; CENDÓN, D.; GÁLVEZ, F.; ALHAZMI, W. H. Dynamic Fracture Behavior of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concretes (SFRSCCs). **Materials** (Basel), v. 10, n. 11, p. 1270, 2017.

ZHAO, H.; XIE, Y.; LONG, G.; ZHU, S.; YANG, K.; TANG, Z.; UMAR, H. A.; WU, Z. The effects of loading rates on the fracture characteristics at the bonding interface between steam concrete and self-compacting concrete using three-point bending test. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 125, 2023.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais**. Santa Catarina: CERMAT, v. 1. Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

HORDIJK, D. A.; REINHARDT, H. W. Numerical and experimental investigation into the fatigue behavior of plain concrete. **Experimental Mechanics**, 33, 1993, p. 278-285.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5rd ed. Pearson Education Limited, 2011.

SORIANO, H. L.; LIMA, S. S. **Análise de estruturas – volume 1**: método das forças e método dos deslocamentos. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, v. 1, 2004.

## APÊNDICE A – DESENHO DAS FÔRMAS

- Dimensões em centímetros.
- Altura das fôrmas:

MA – 10 cm;

MB – 15 cm.

Figura A.1 – Fôrma 1.

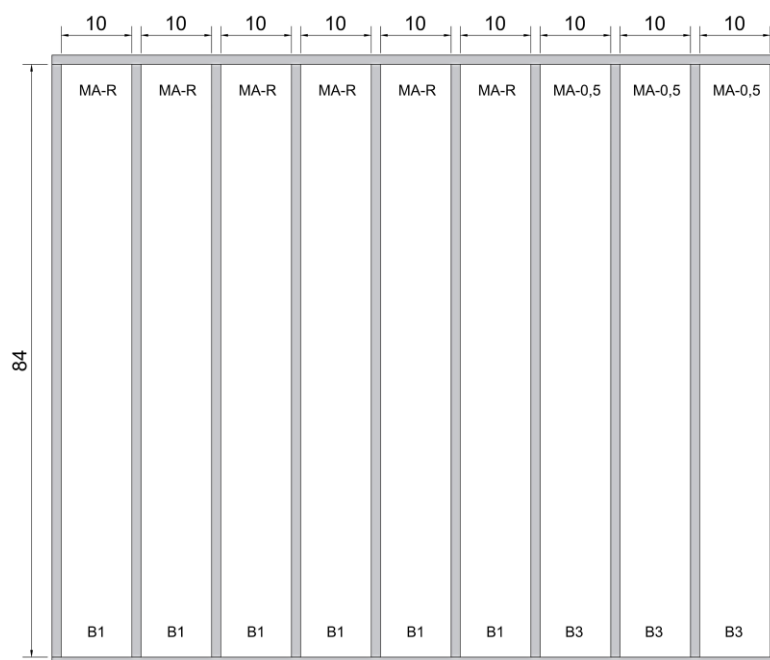
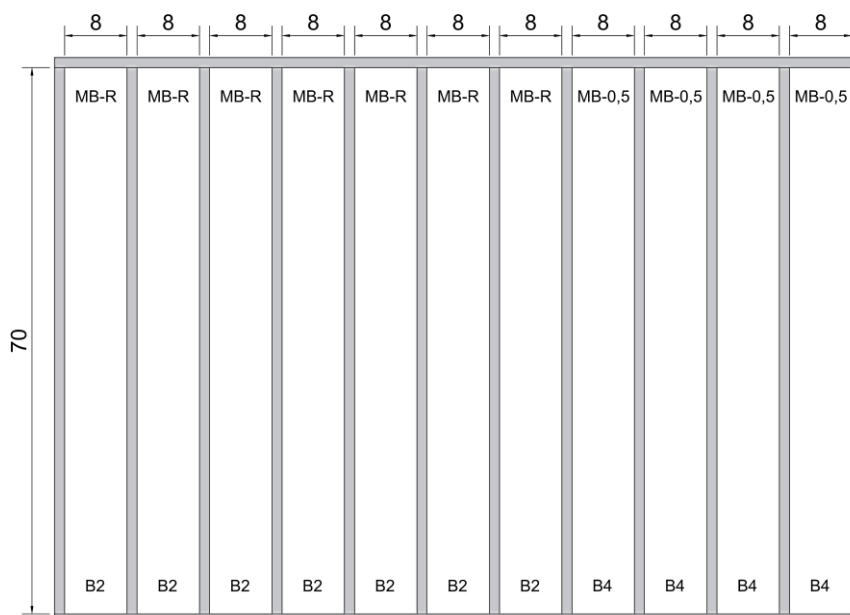


Figura A.2 – Fôrma 2.



## APÊNDICE B – INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS DURANTE AS BETONADAS (B1, B2, B3, B5, B6 E B8)

Figura B.1 – Informações meteorológicas.



## APÊNDICE C – SUPERFÍCIES DAS VIGAS APÓS RUPTURA

Figura C.1 – MA-R-1e e MA-R-2e.

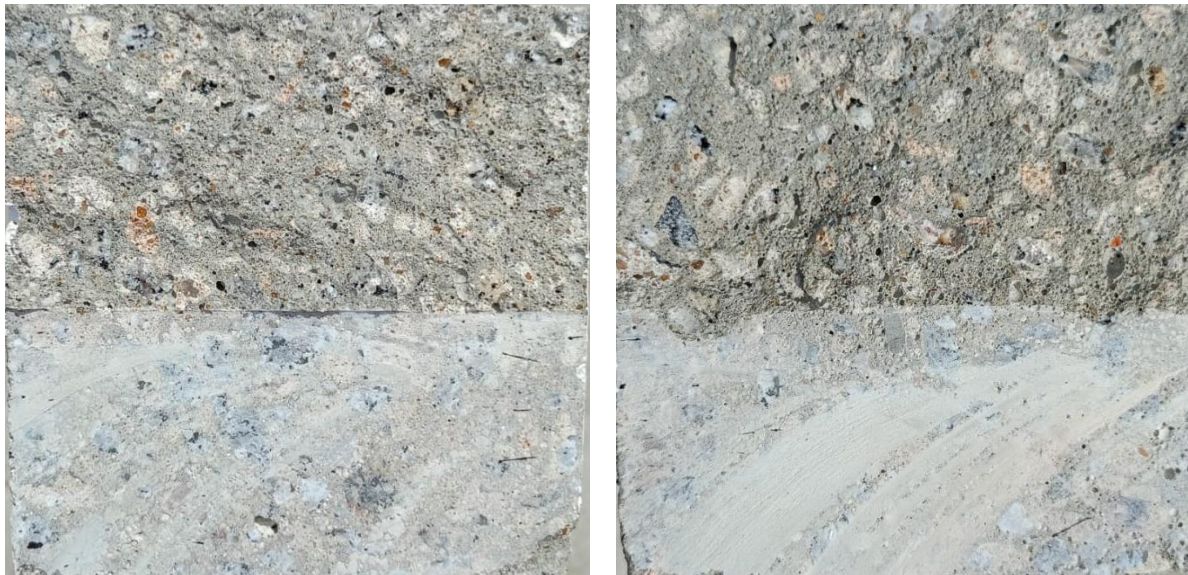


Figura C.2 – MA-R-3e e MA-R-4.

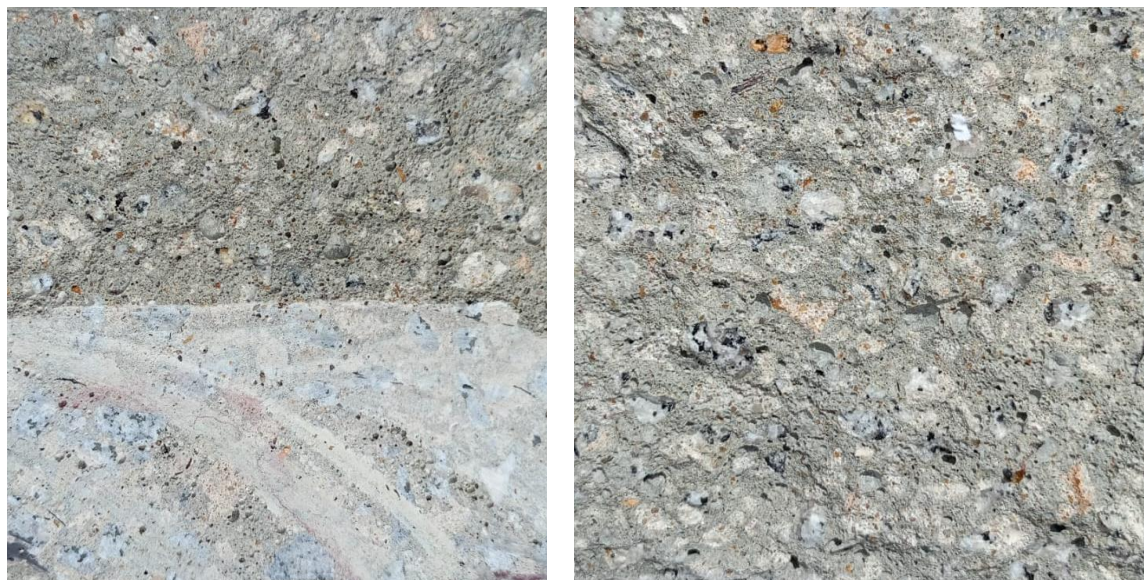


Figura C.3 – MA-0,5-1e e MA-0,5-2e.

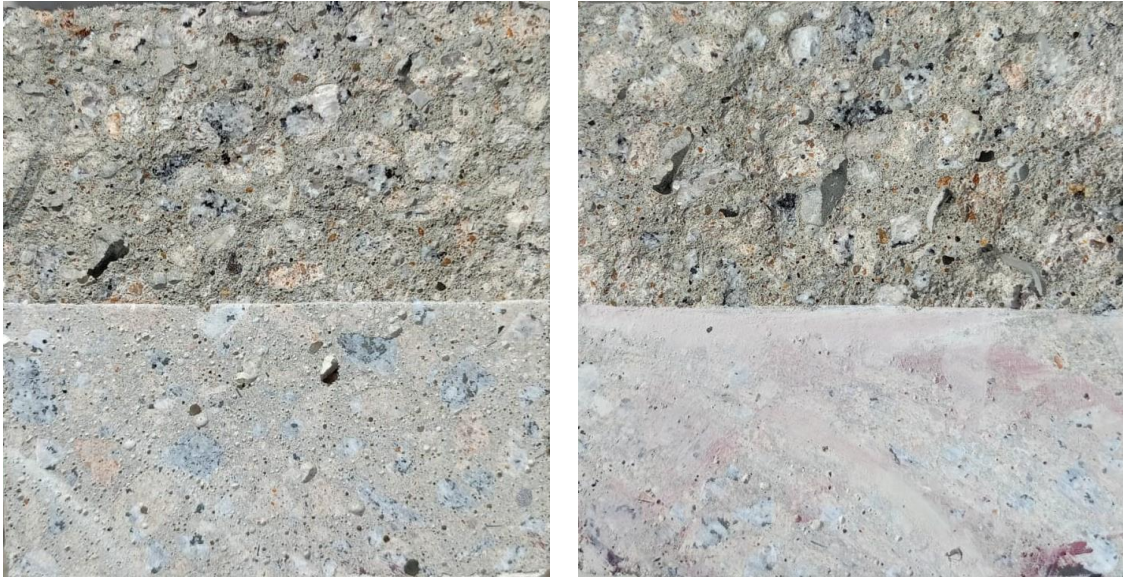


Figura C.4 – MA-0,5-3e.



Figura C.5 – MA-1-1e e MA-1-2e.

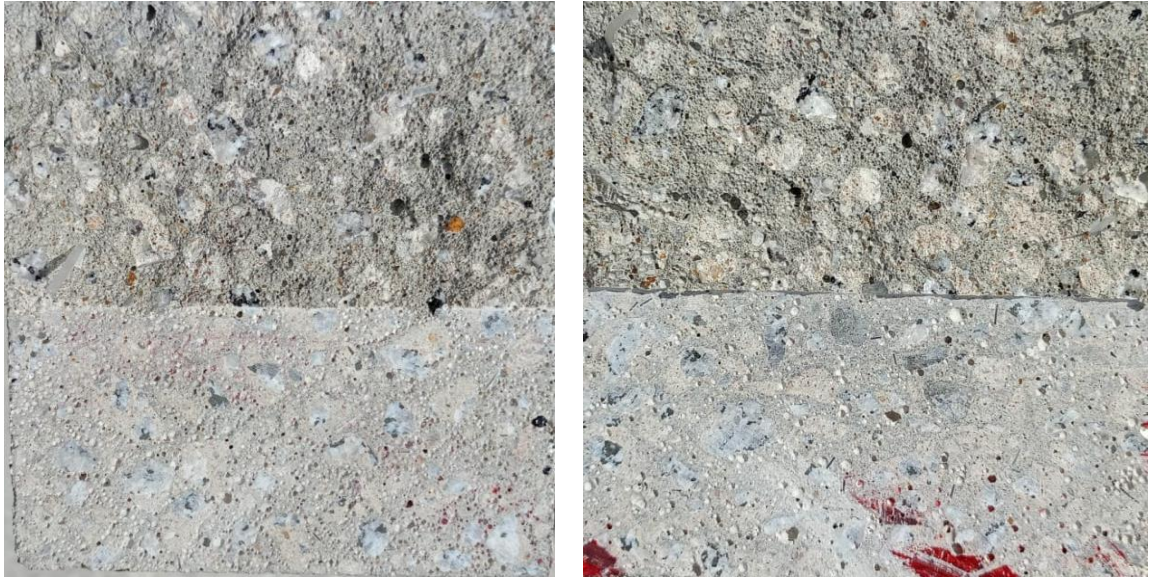


Figura C.6 – MA-1,25-1e e MA-1,25-2e.

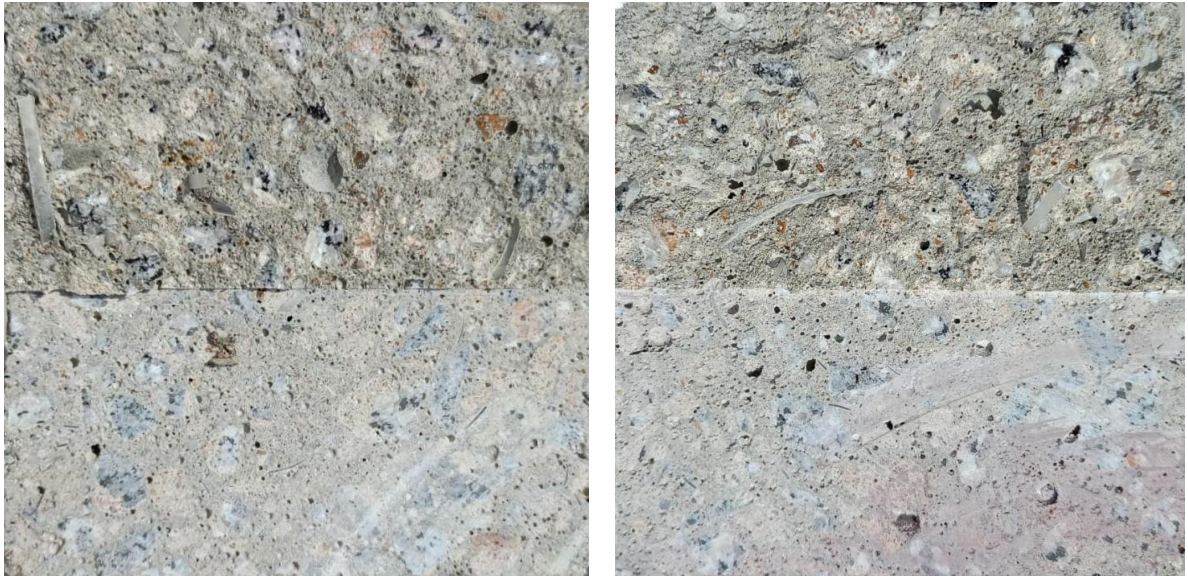


Figura C.7 – MA-1,25-3e.



Figura C.8 – MB-R-3e e MB-0,5-4e.

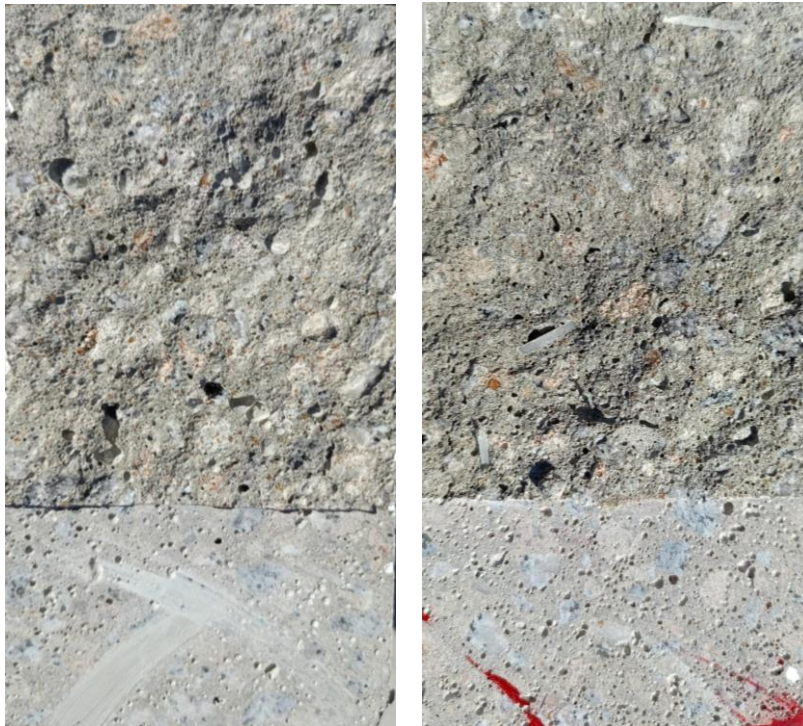
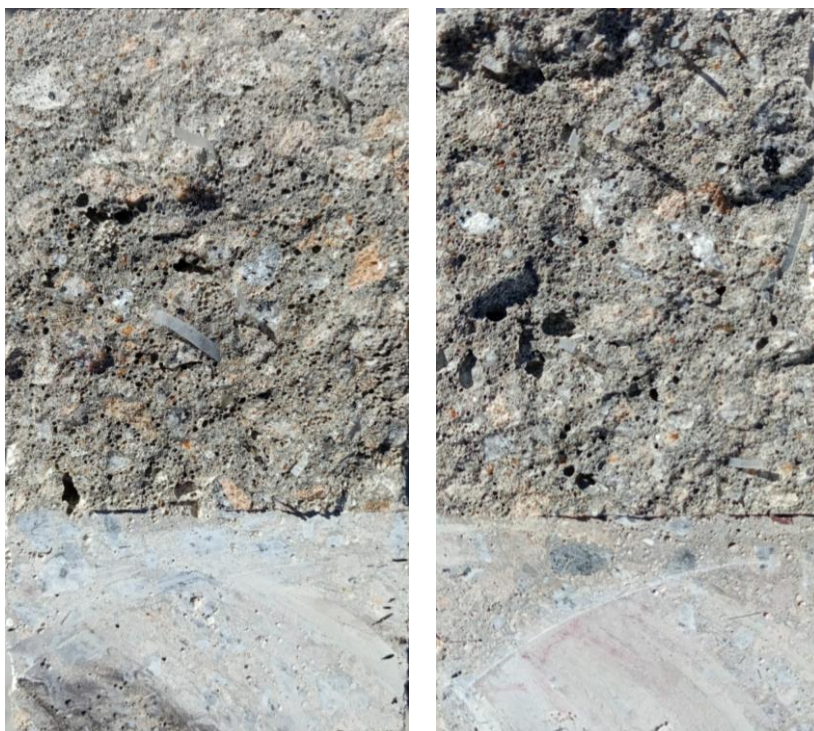


Figura C.9 – MB-1-2e e MB-1,25-4e.



## APÊNDICE D – GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* DESLOCAMENTO DO MÉTODO A

Figura D.1 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-1e.

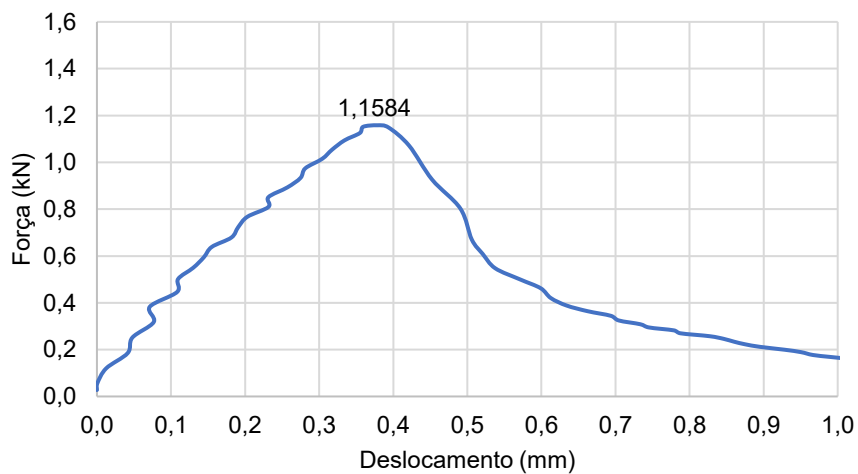


Figura D.2 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-2e.

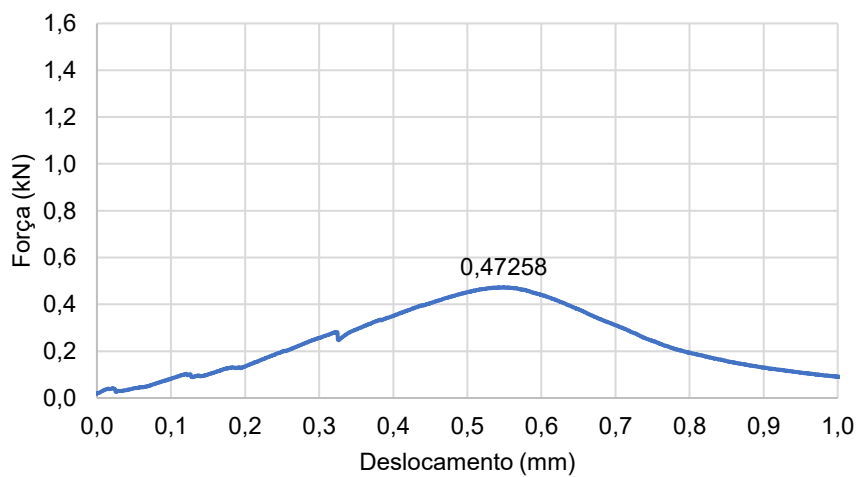


Figura D.3 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-3e.

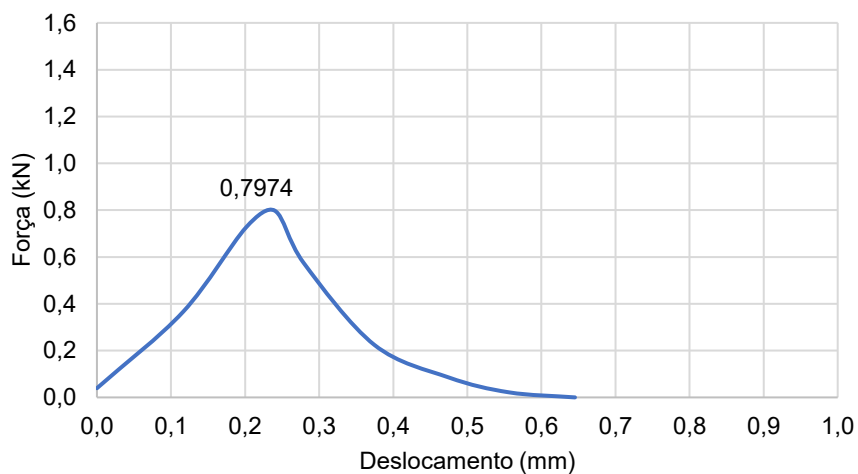


Figura D.4 – Curva força x deslocamento da viga MA-0,5-1e.

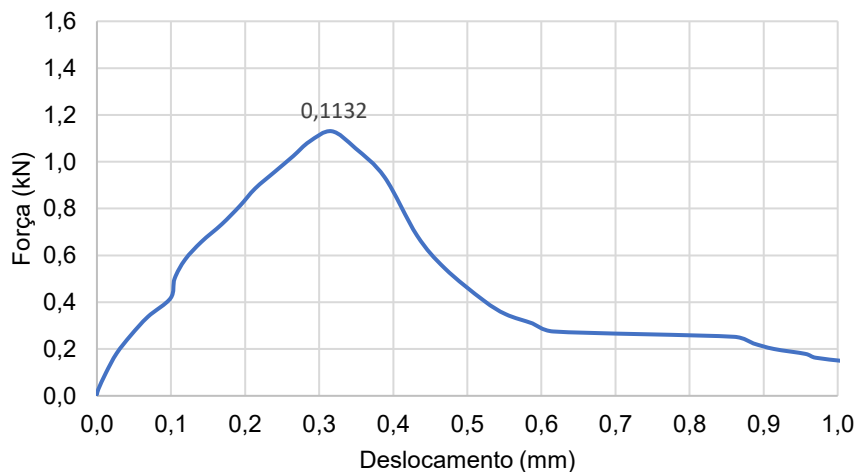


Figura D.5 – Curva força x deslocamento da viga MA-0,5-2e.

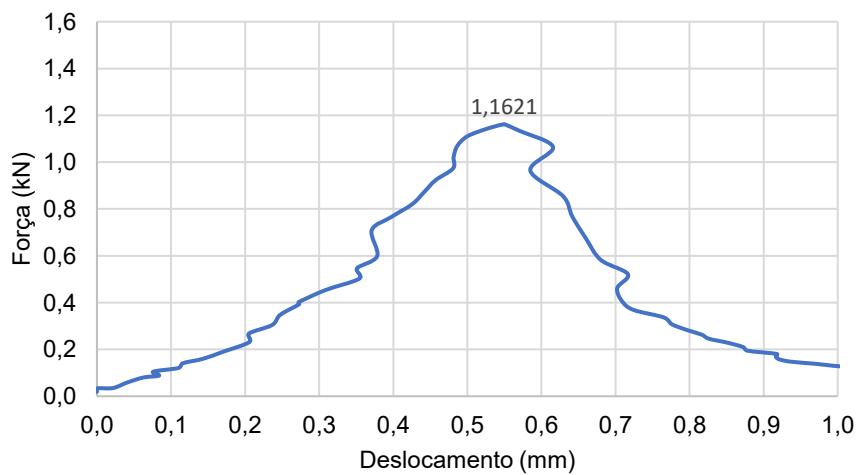


Figura D.6 – Curva força x deslocamento da viga MA-0,5-3e.

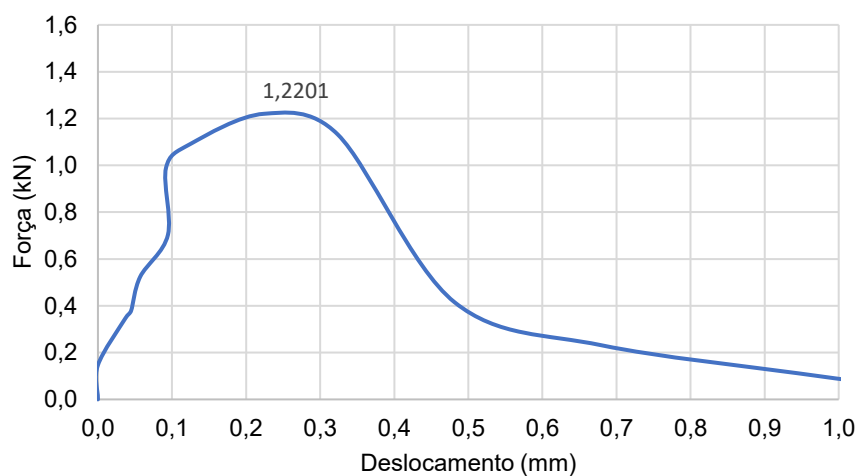


Figura D.7 – Curva força x deslocamento da viga MA-1-2e.

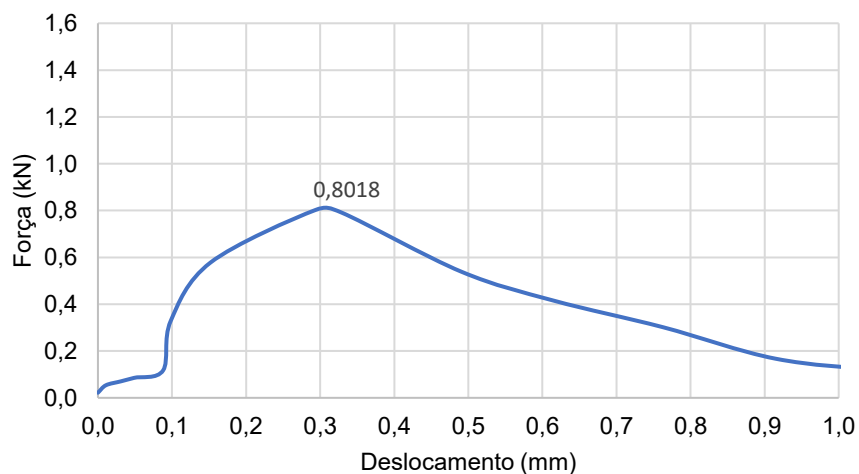


Figura D.8 – Curva força x deslocamento da viga MA-1-3e.

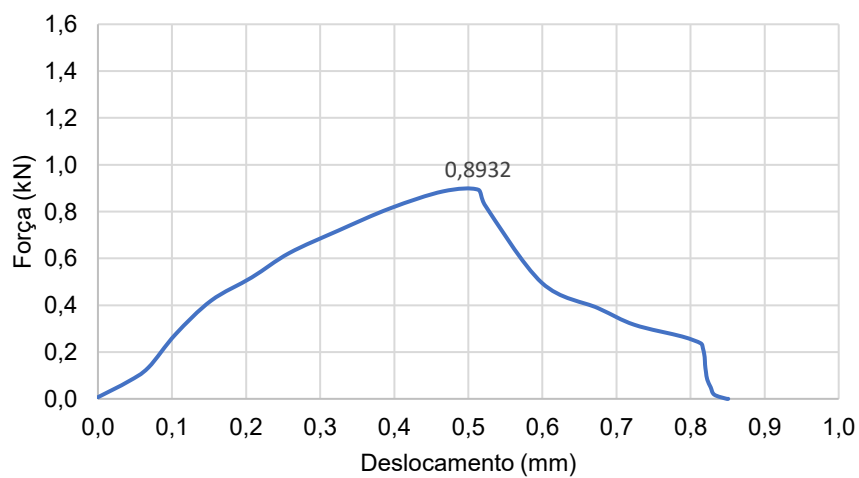


Figura D.9 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-1e.

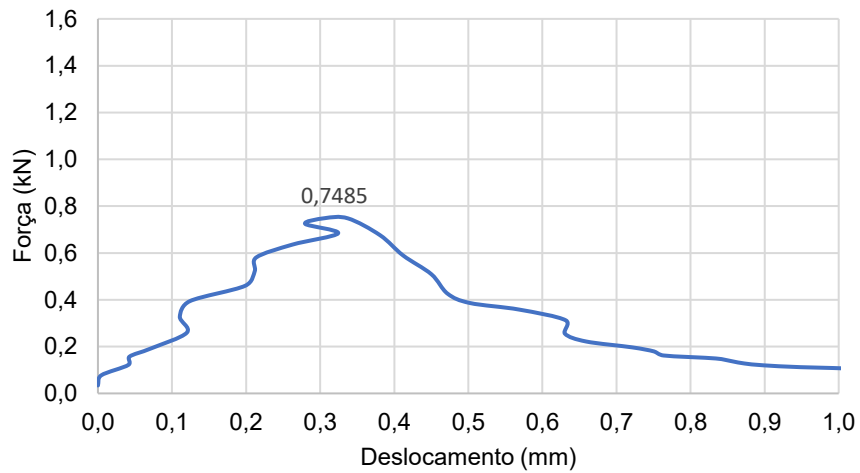


Figura D.10 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-2e.

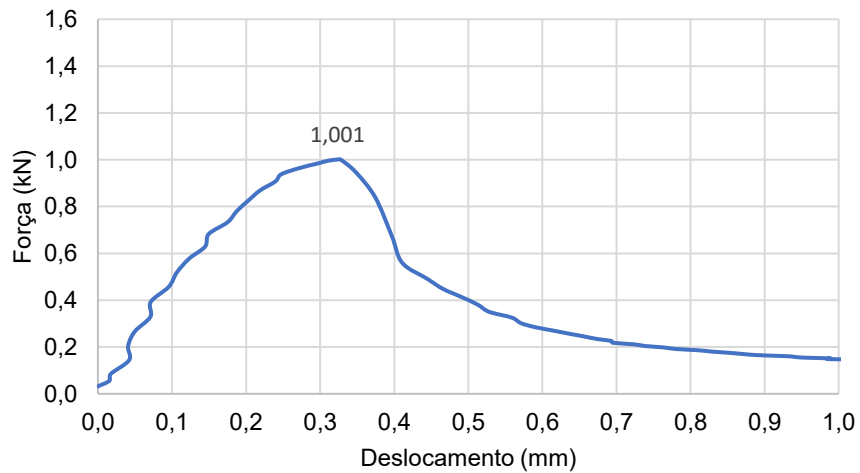


Figura D.11 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-3e.

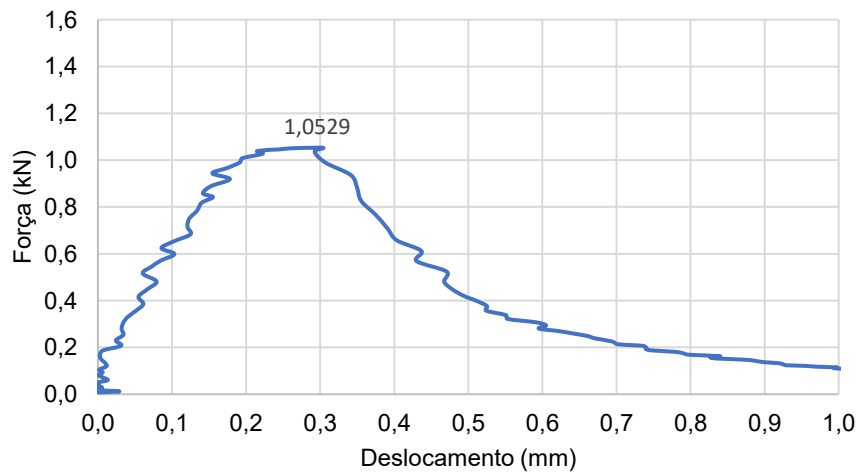


Figura D.12 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-4.

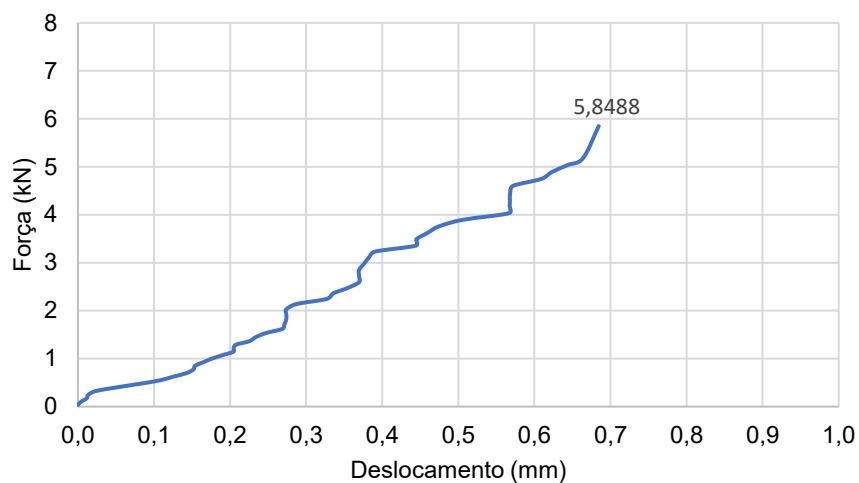


Figura D.13 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-5.

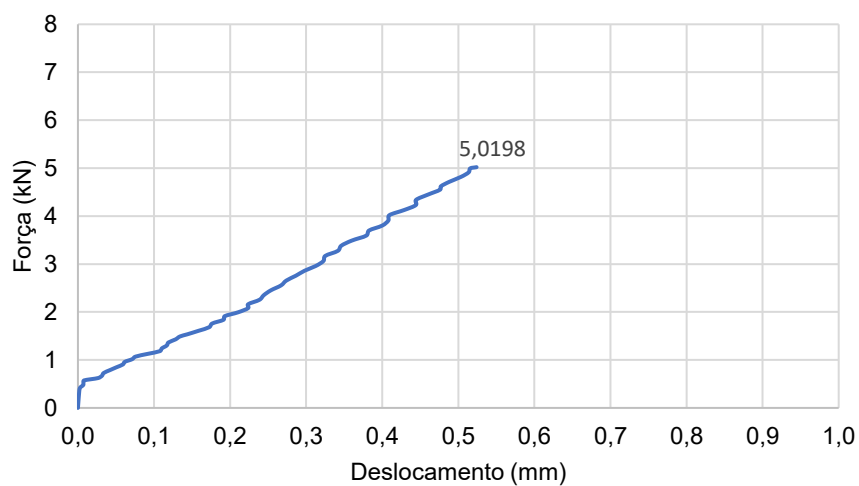


Figura D.14 – Curva força x deslocamento da viga MA-R-6.

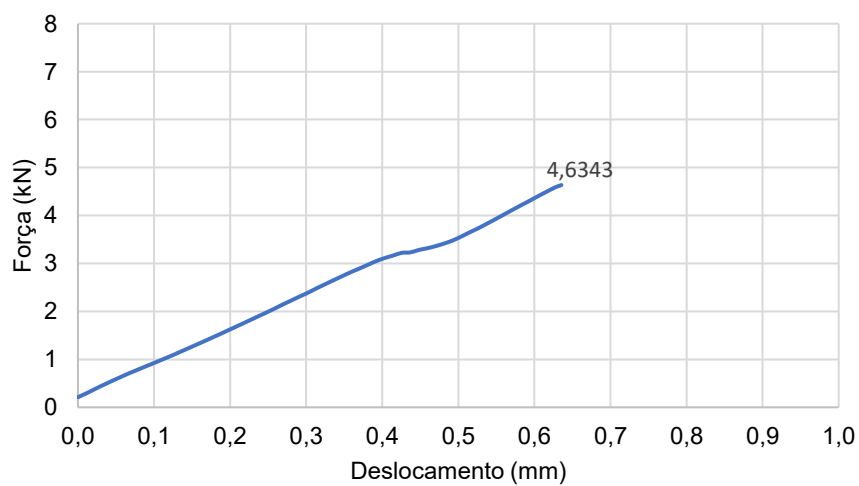


Figura D.15 – Curva força x deslocamento da viga MA-0,5-4.

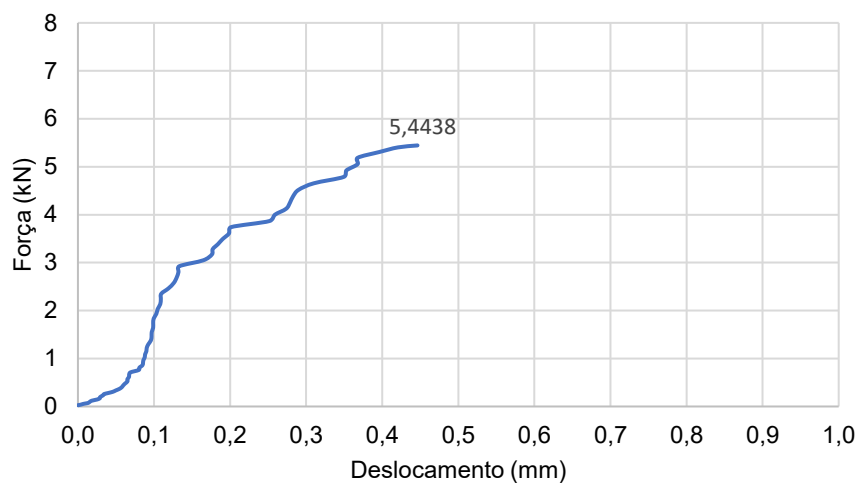


Figura D.16 – Curva força x deslocamento da viga MA-0,5-6.

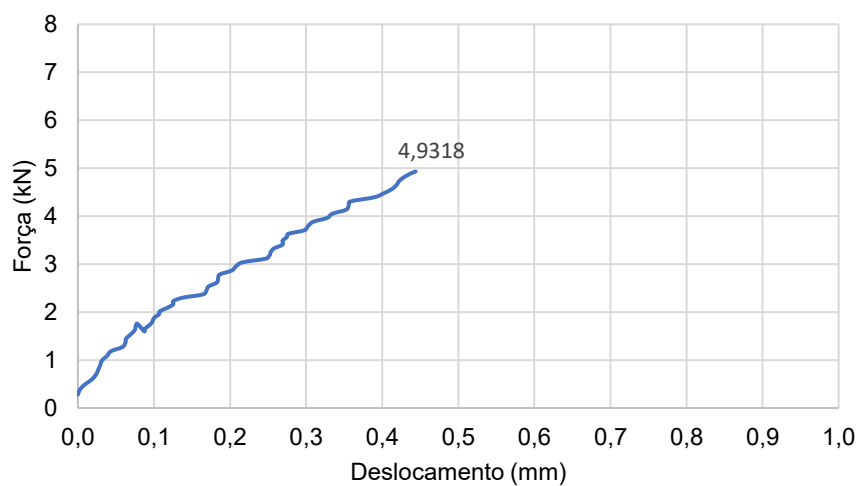


Figura D.17 – Curva força x deslocamento da viga MA-1-4.

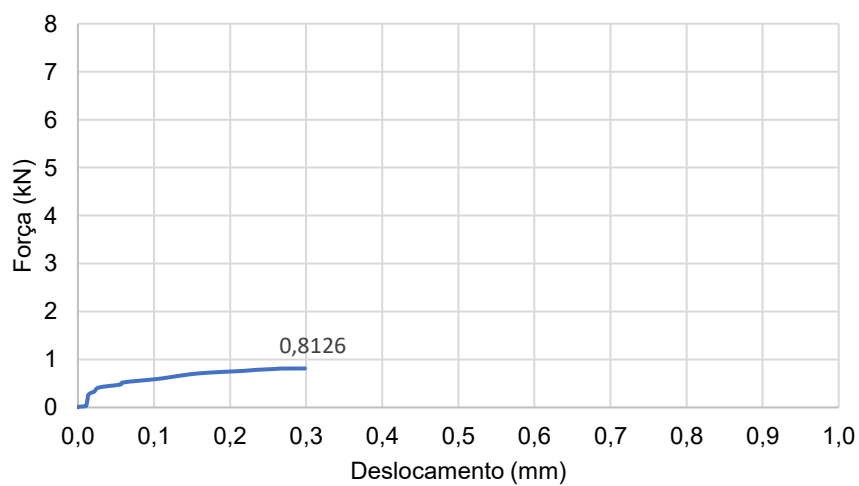


Figura D.18 – Curva força x deslocamento da viga MA-1-5.

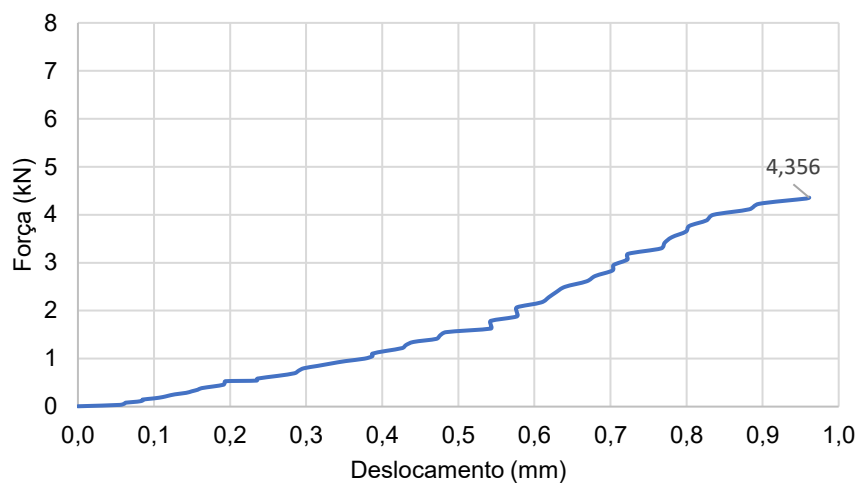


Figura D.19 – Curva força x deslocamento da viga MA-1-6.

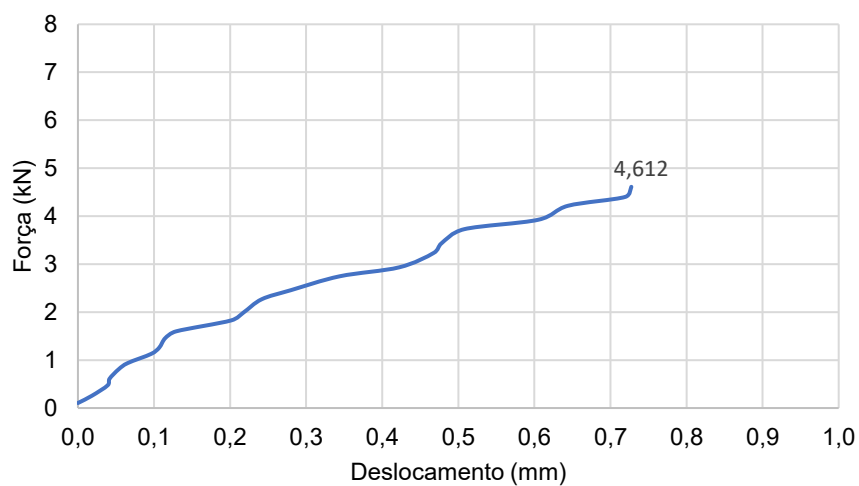


Figura D.20 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-4.

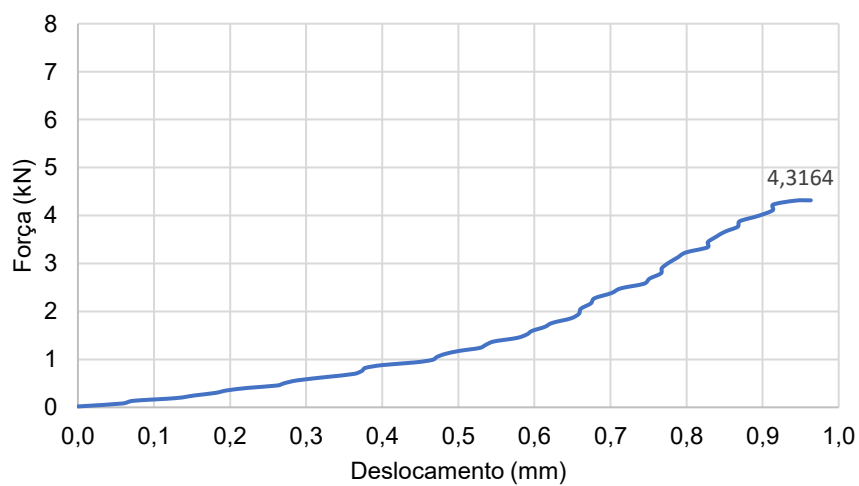


Figura D.21 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-5.

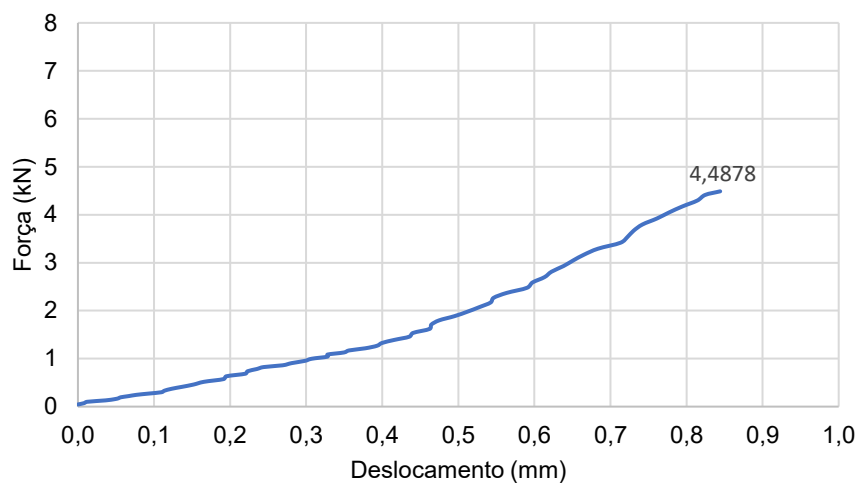
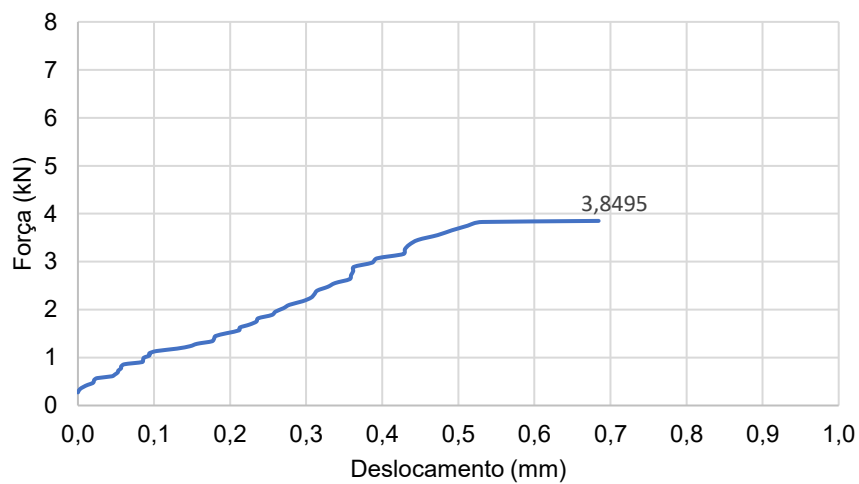


Figura D.22 – Curva força x deslocamento da viga MA-1,25-6.



## APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA VERSUS CMOD DO MÉTODO B

Figura E.1 – Curva força x CMOD da viga MB-R-1e.

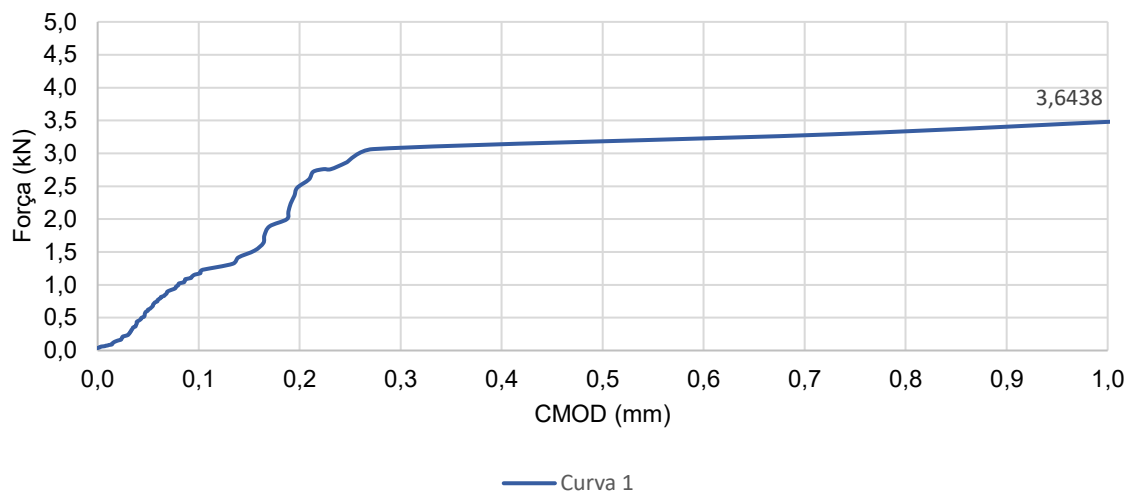


Figura E.2 – Curva força x CMOD da viga MB-R-2e.

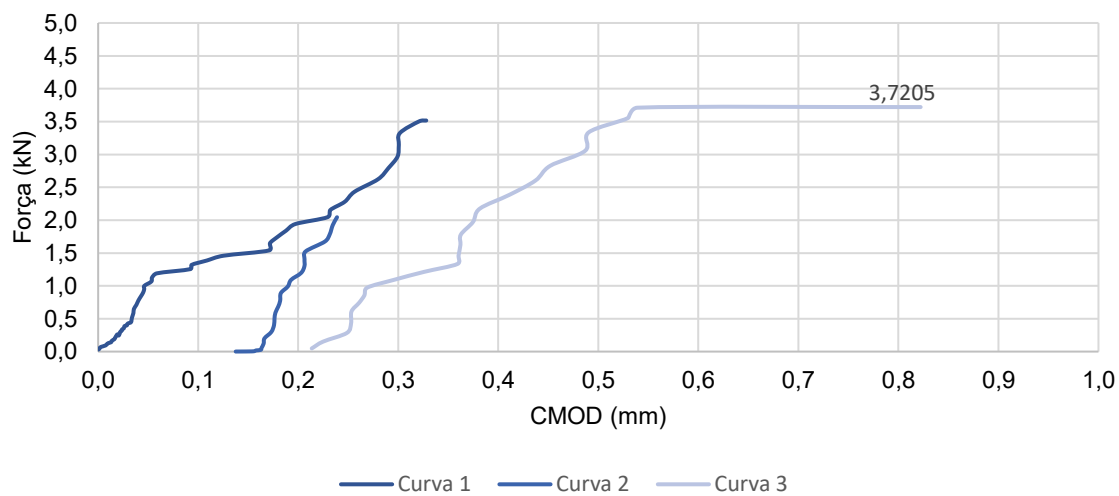


Figura E.3 – Curva força x CMOD da viga MB-R-3e.

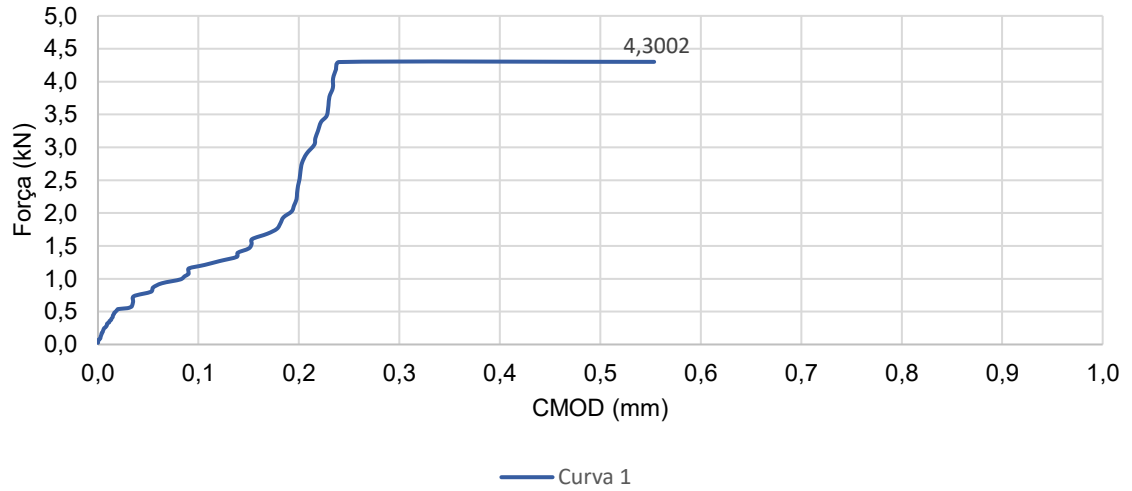


Figura E.4 – Curva força x CMOD da viga MB-R-4e.

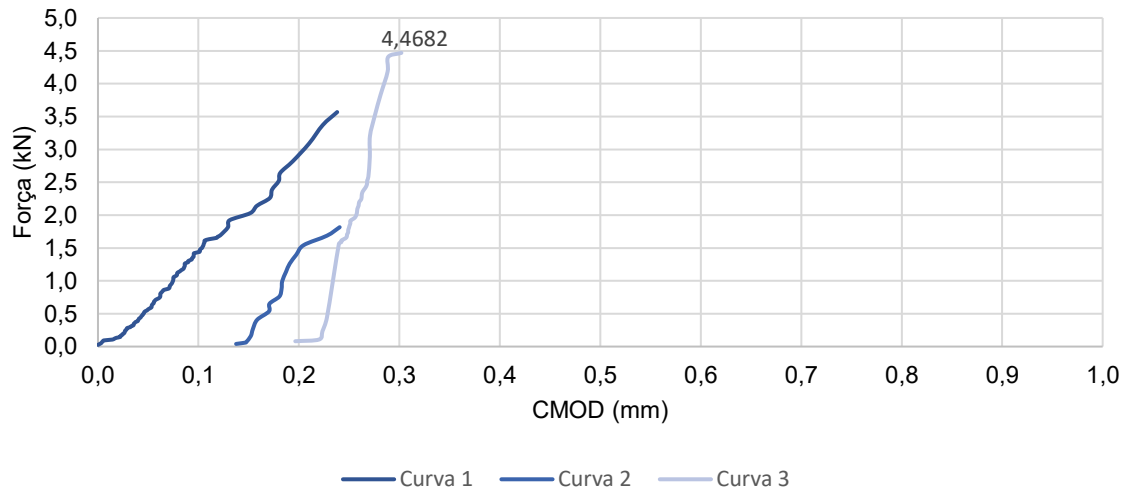


Figura E.5 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-1e.

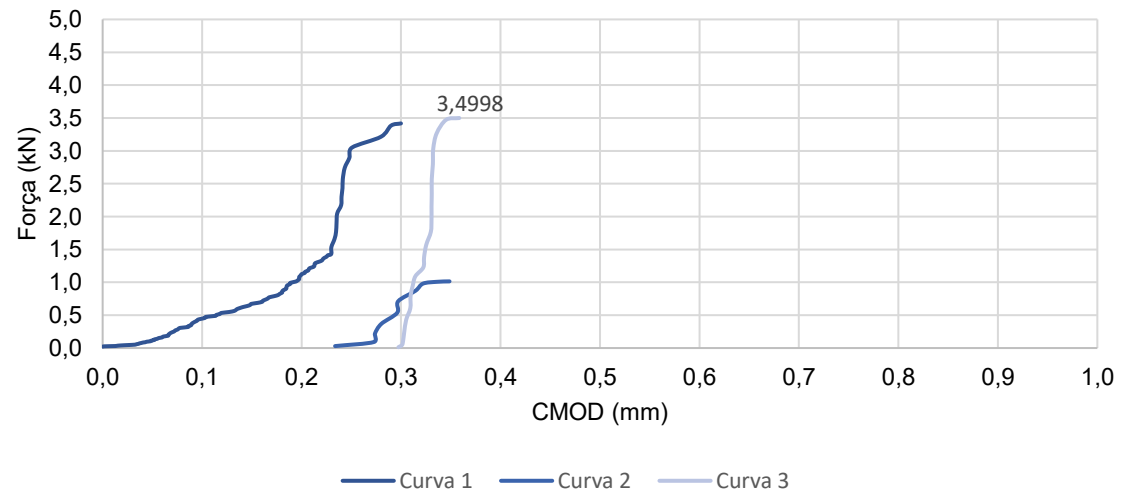


Figura E.6 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-2e.

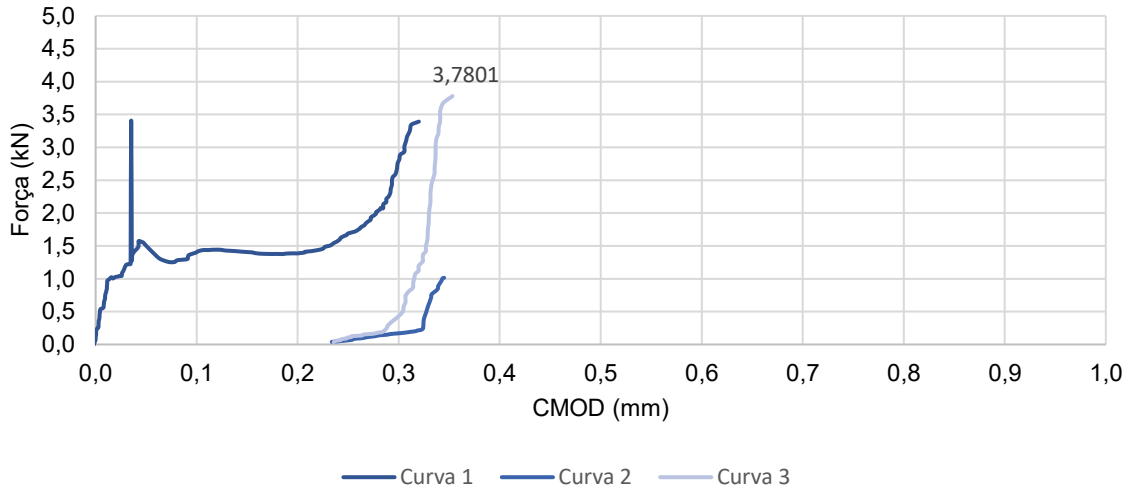


Figura E.7 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-3e.

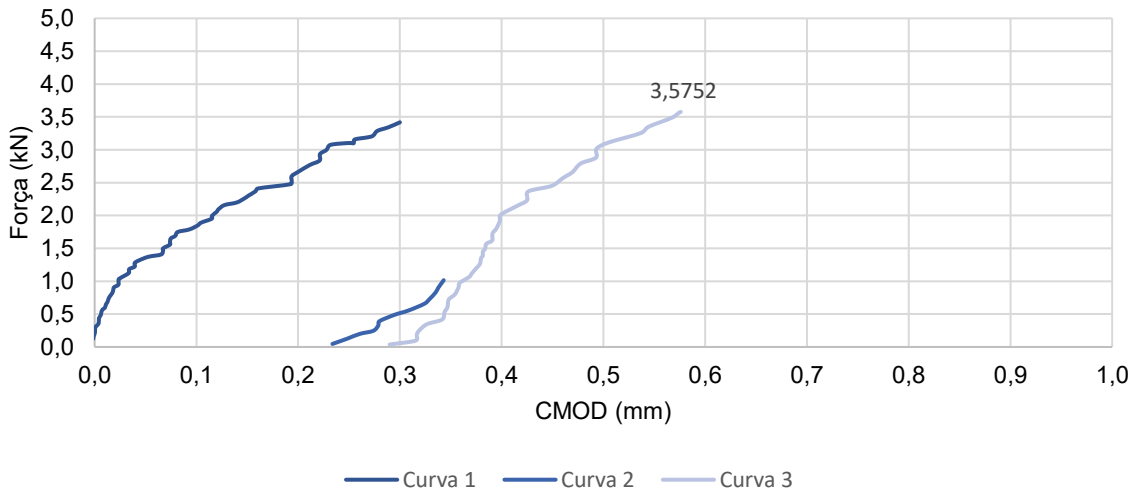


Figura E.8 – Curva força x CMOD da viga MB-0,5-4e.

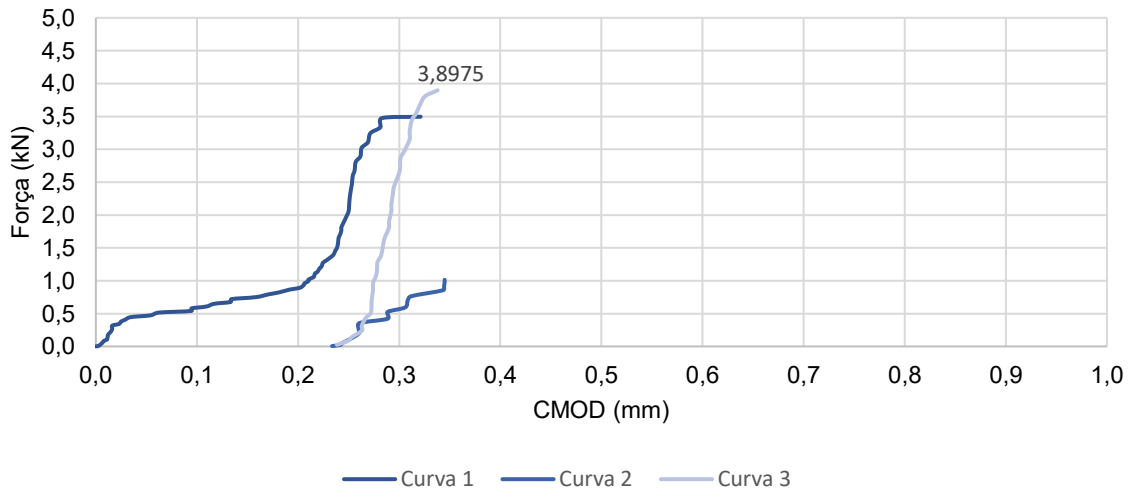


Figura E.9 – Curva força x CMOD da viga MB-1-1e.

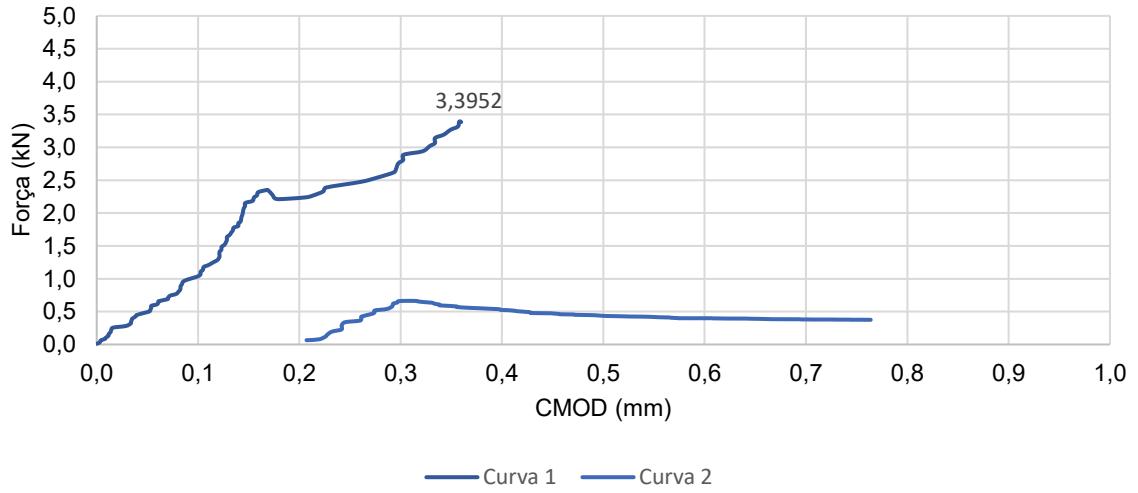


Figura E.10 – Curva força x CMOD da viga MB-1-2e.

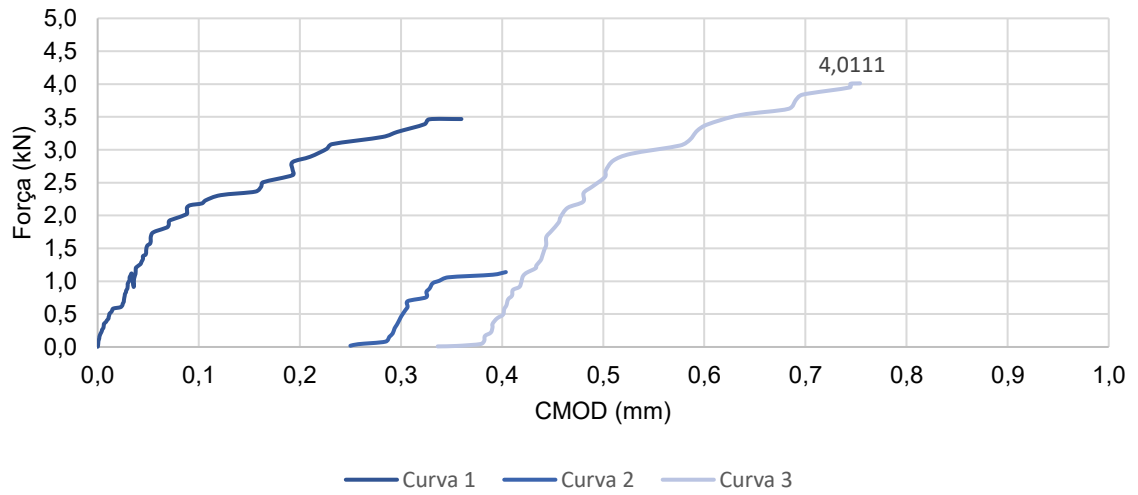


Figura E.11 – Curva força x CMOD da viga MB-1-3e.

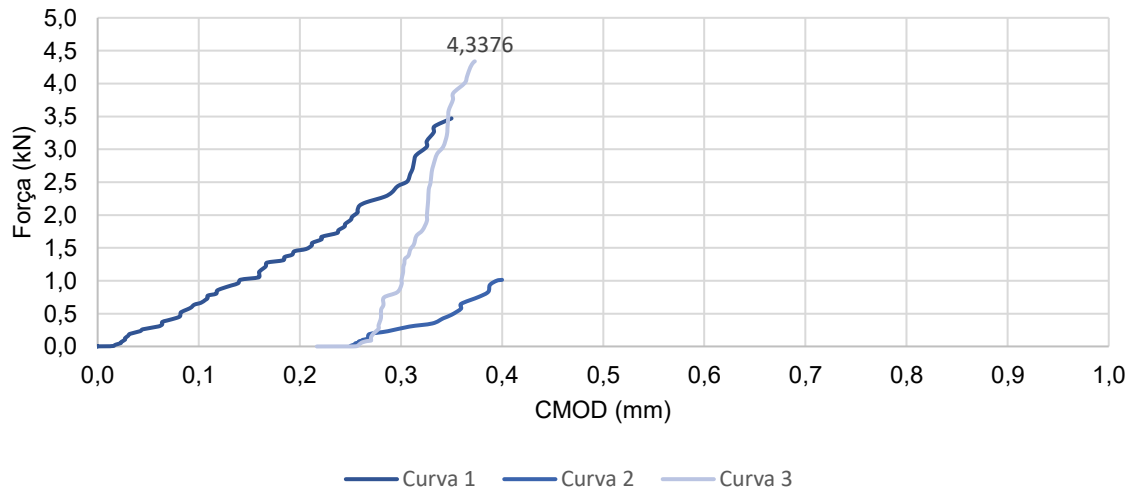


Figura E.12 – Curva força x CMOD da viga MB-1-4e.

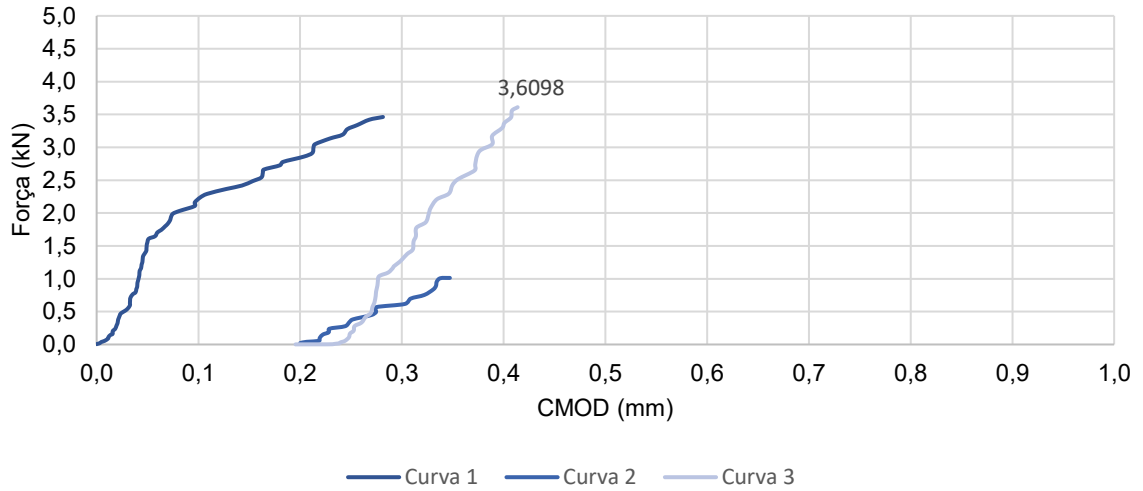


Figura E.13 – Curva força x CMOD da viga MB-1,25-1e.

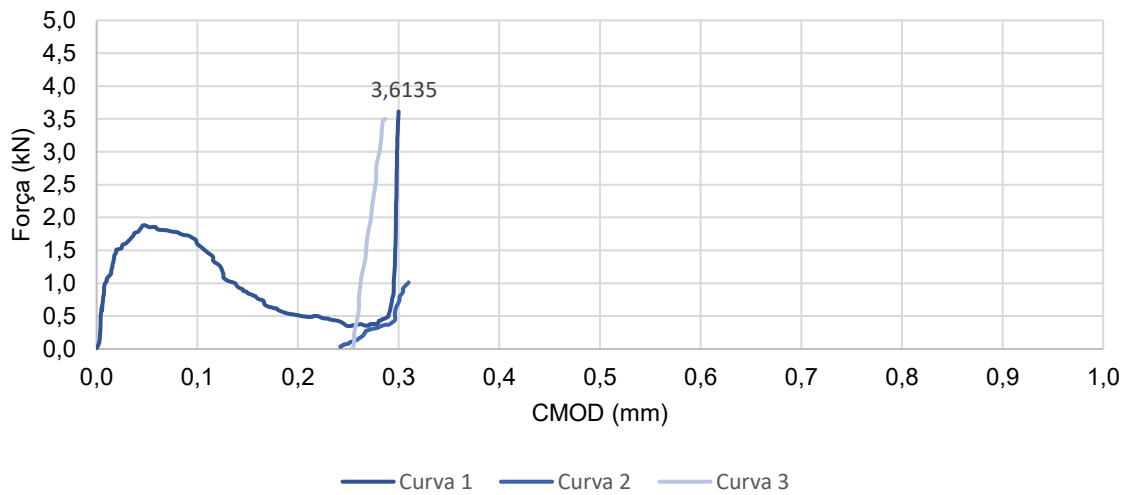


Figura E.14 – Curva força x CMOD da viga MB-1,25-2e.

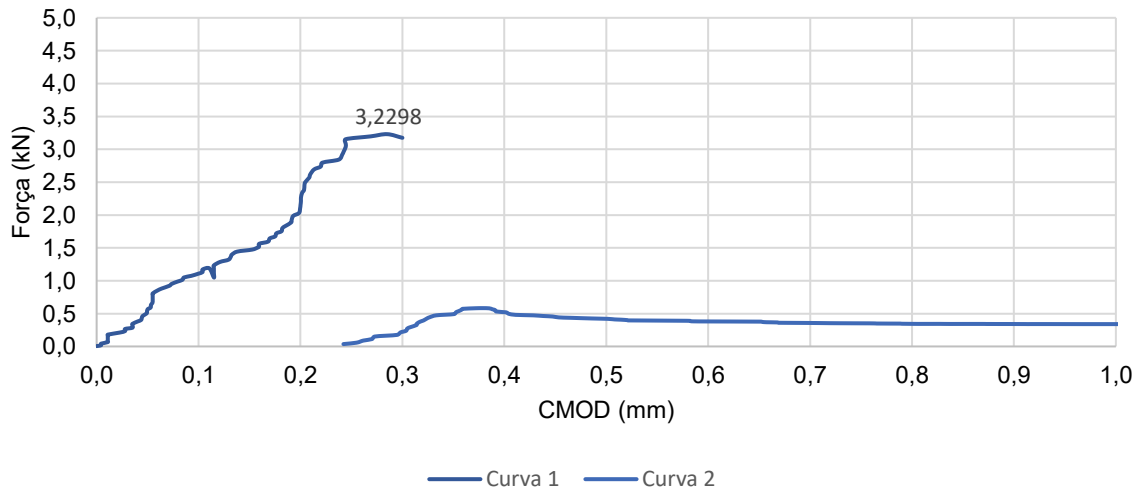


Figura E.15 – Curva força x CMOD da viga MB-1,25-3e.

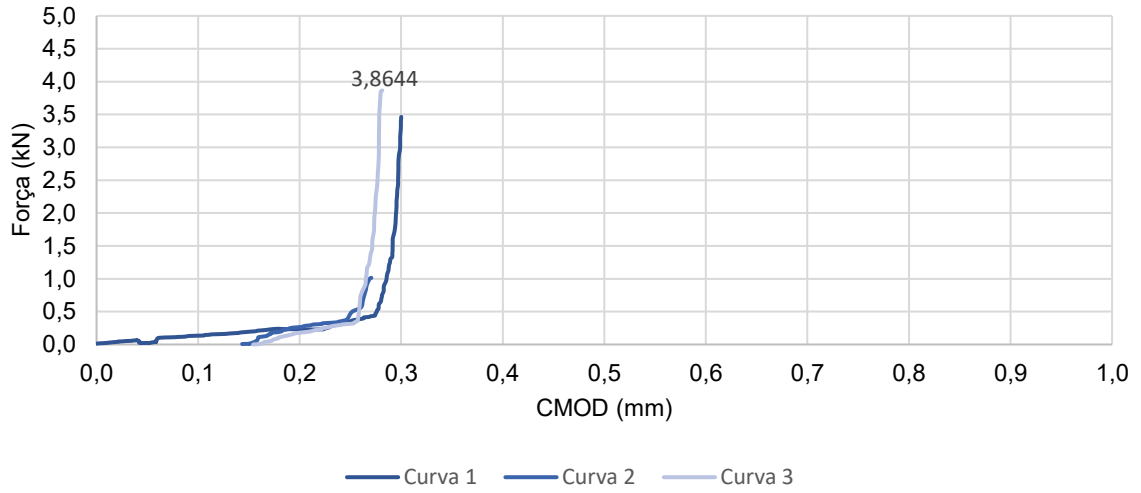
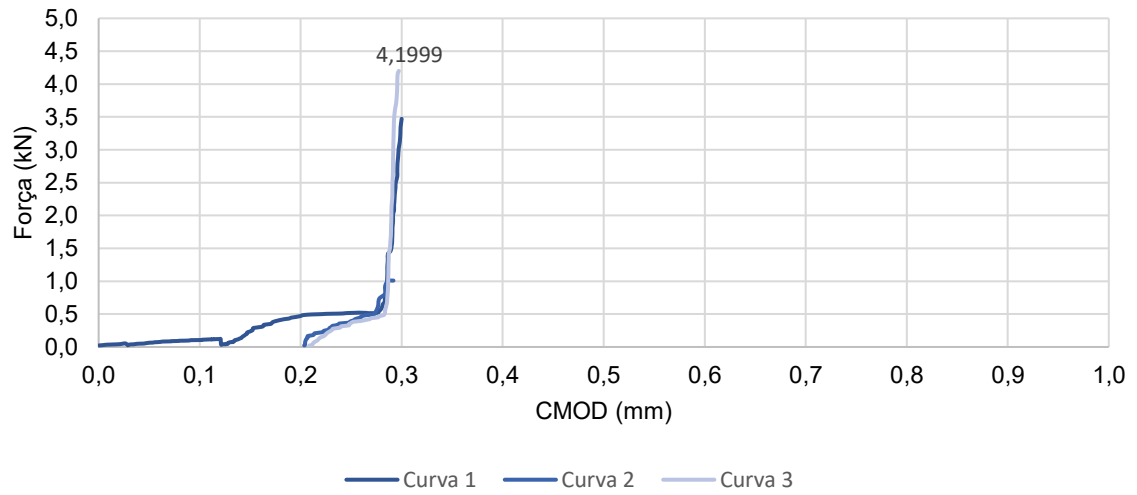


Figura E.16 – Curva força x CMOD da viga MB-1,25-4e.



## APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA VERSUS DESLOCAMENTO DO MÉTODO B

Figura F.1 – Curva força x deslocamento da viga MB-R-5.

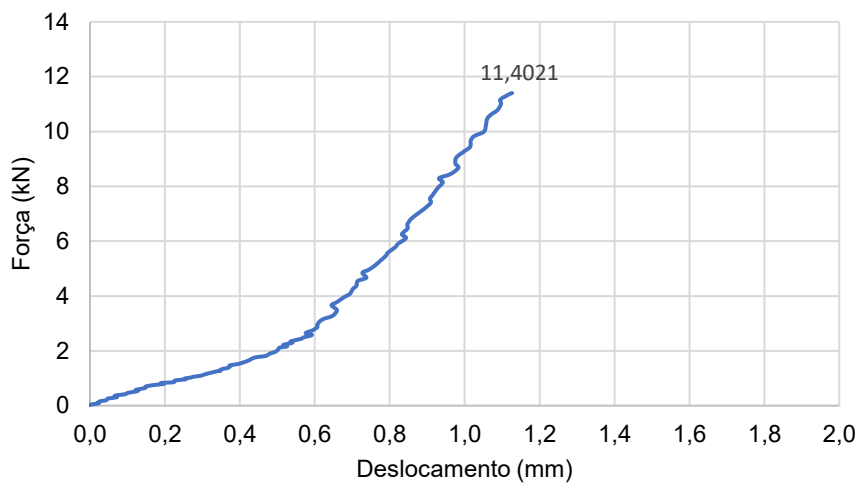


Figura F.2 – Curva força x deslocamento da viga MB-R-6.

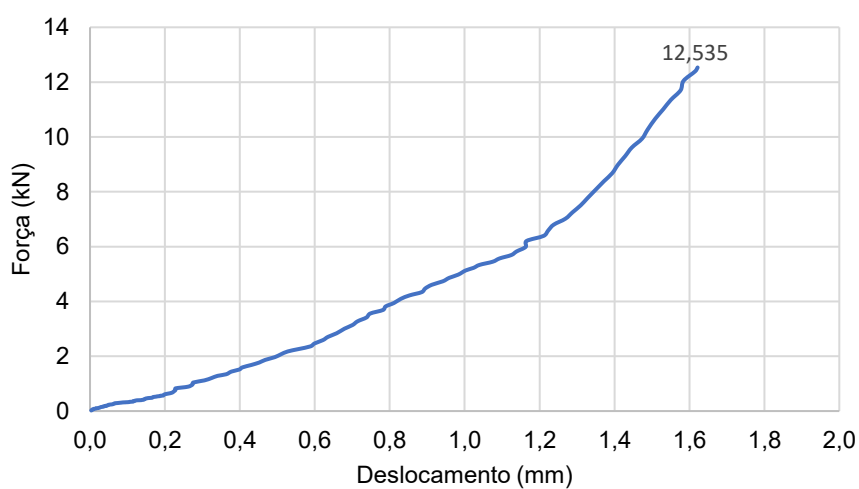


Figura F.3 – Curva força x deslocamento da viga MB-R-7.

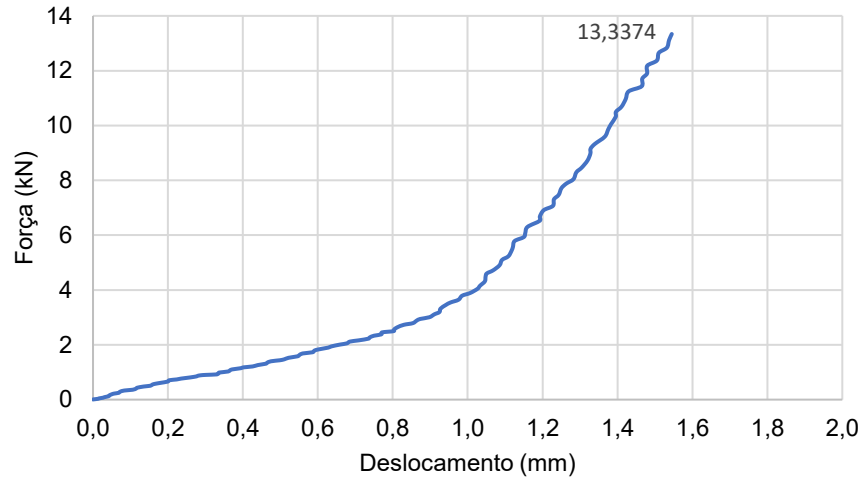


Figura F.4 – Curva força x deslocamento da viga MB-0,5-5.

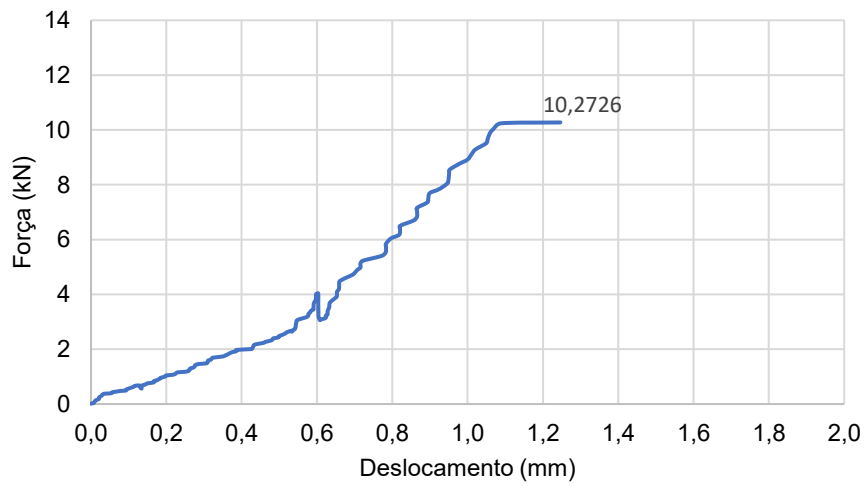


Figura F.5 – Curva força x deslocamento da viga MB-0,5-6.

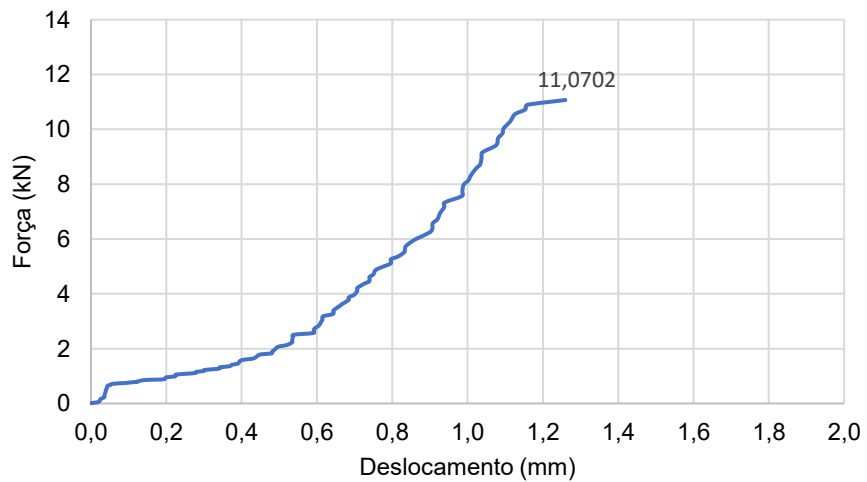


Figura F.6 – Curva força x deslocamento da viga MB-0,5-7.

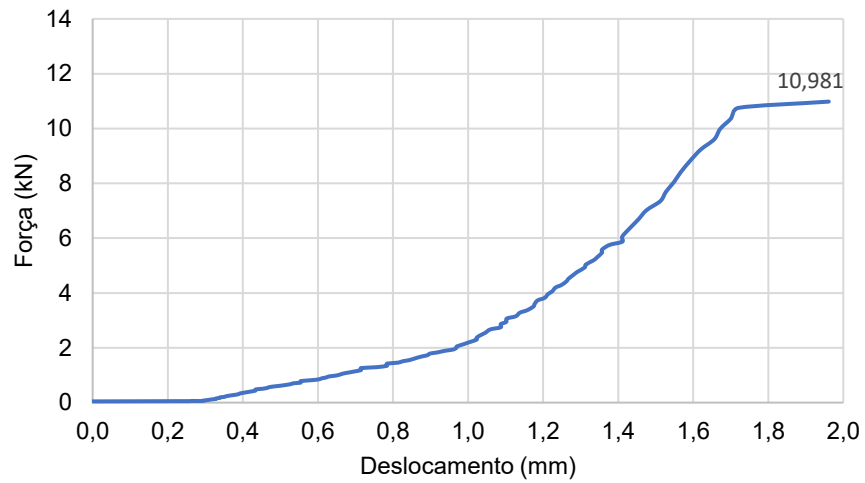


Figura F.7 – Curva força x deslocamento da viga MB-1-5.

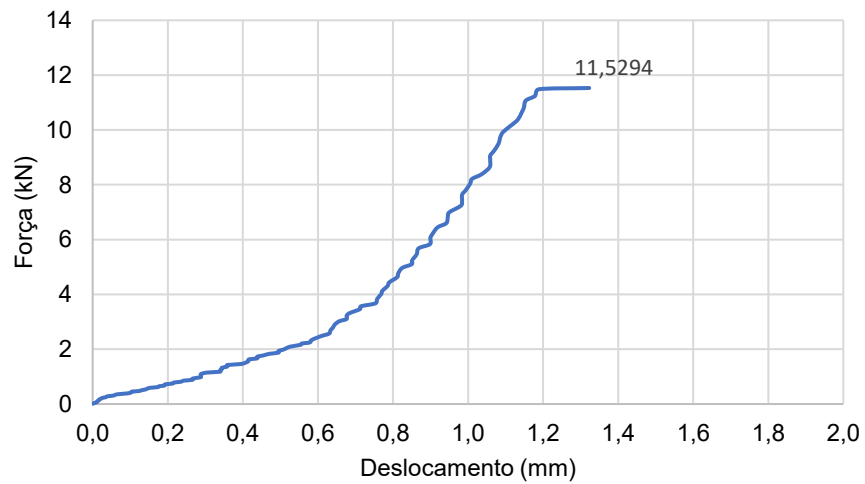


Figura F.8 – Curva força x deslocamento da viga MB-1-6.

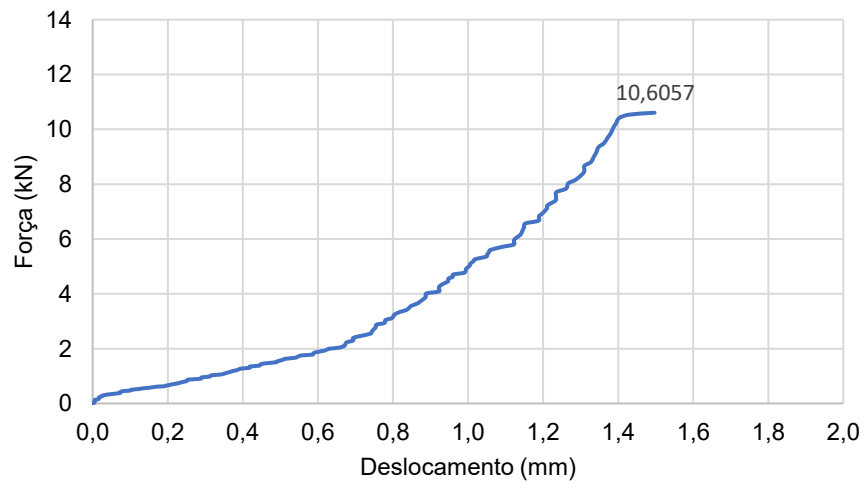


Figura F.9 – Curva força x deslocamento da viga MB-1-7.

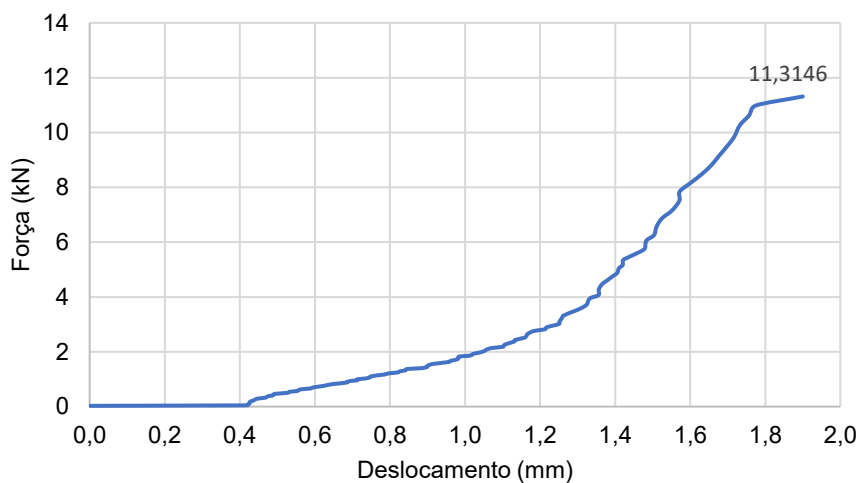


Figura F.10 – Curva força x deslocamento da viga MB-1,25-5.

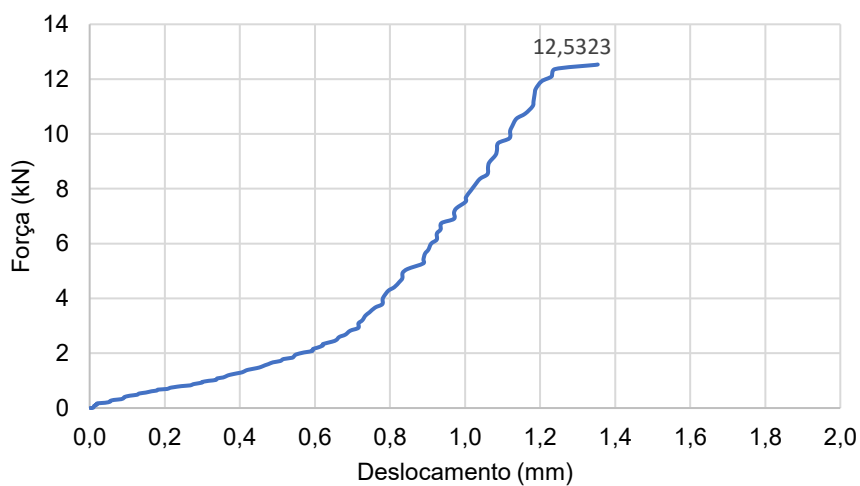


Figura F.11 – Curva força x deslocamento da viga MB-1,25-6.

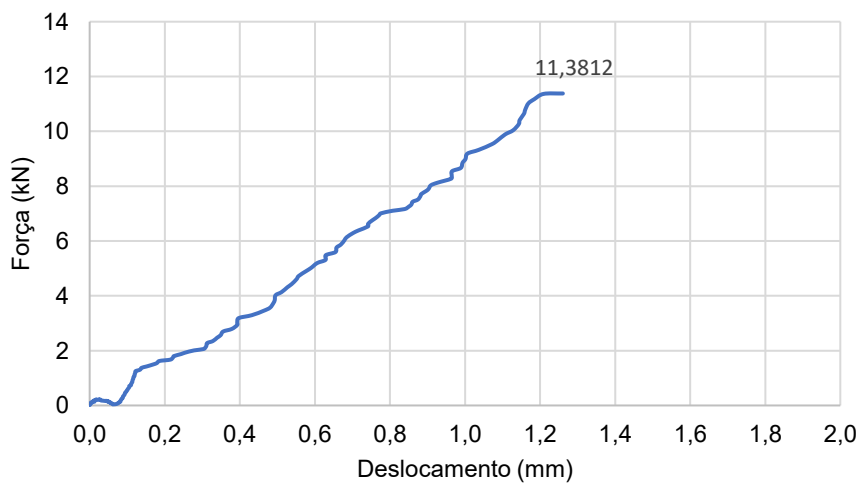
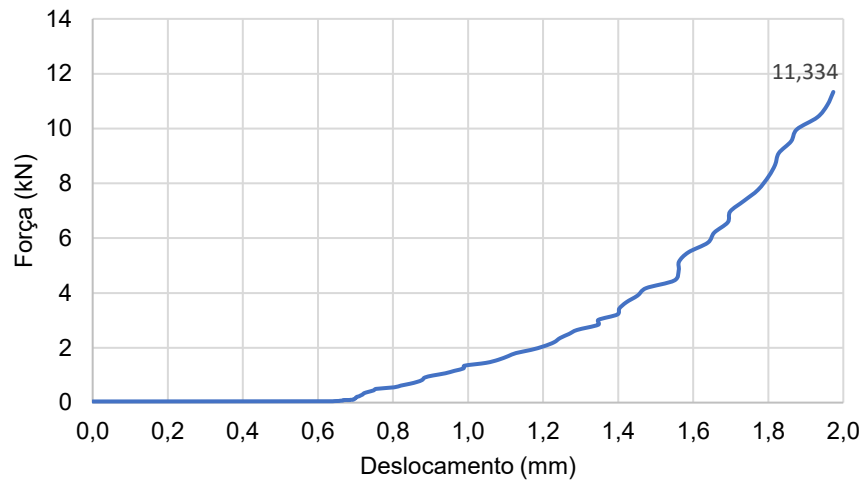


Figura F.12 – Curva força x deslocamento da viga MB-1,25-7.



## APÊNDICE G – GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* DEFORMAÇÃO DOS MÉTODOS A E B

Figura G.1 – Curva força x deformação da viga MA-R-4.

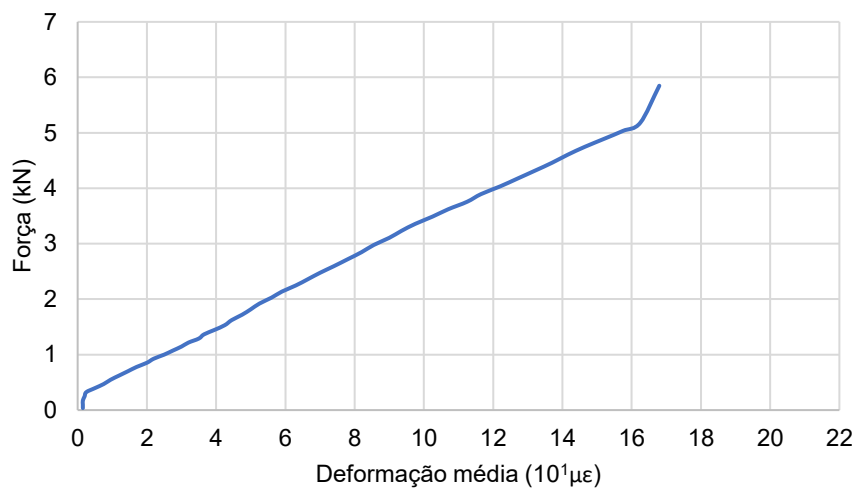


Figura G.2 – Curva força x deformação da viga MA-0,5-4.

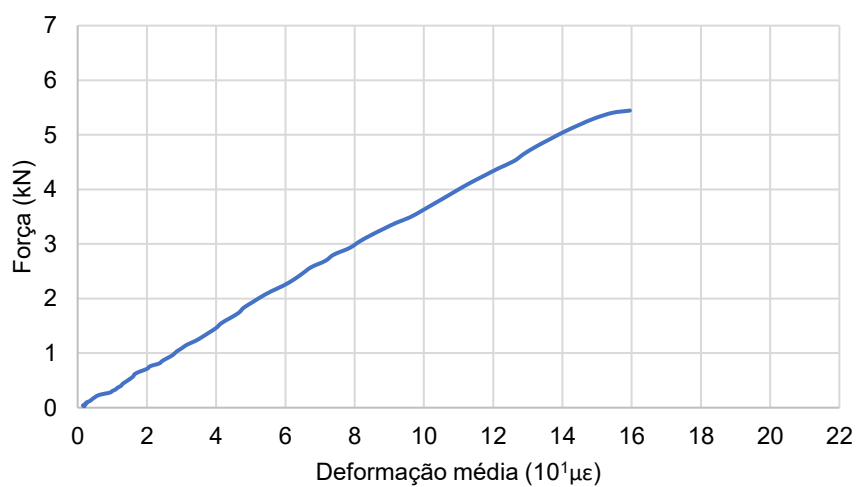


Figura G.3 – Curva força x deformação da viga MA-1-4 e MA-1-5.

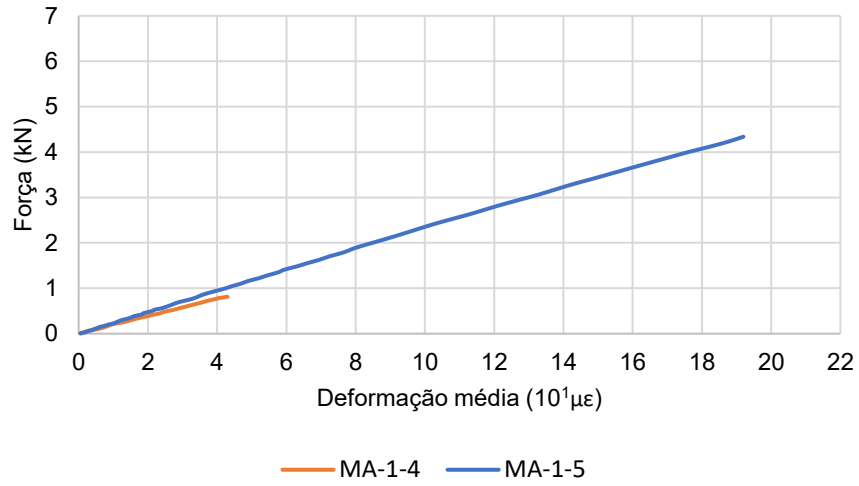


Figura G.4 – Curva força x deformação da viga MA-1,25-4 e MA-1,25-5.

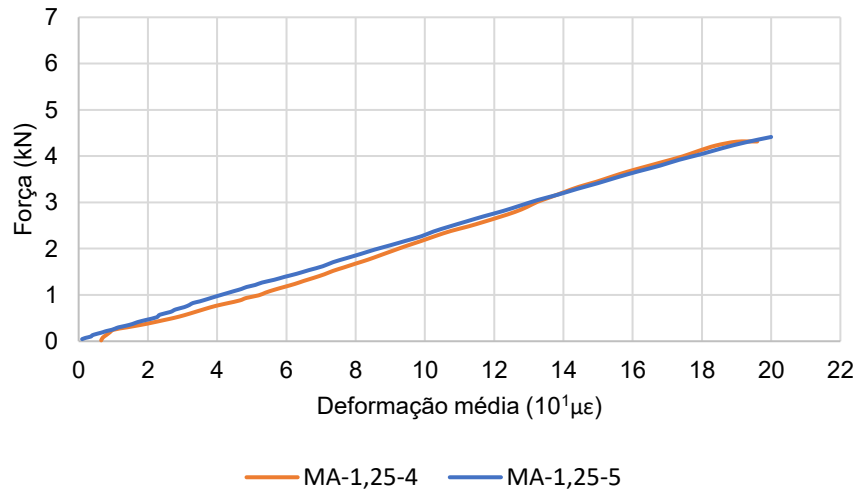


Figura G.5 – Curva força x deformação da viga MA-R-1e e MA-R-2e.

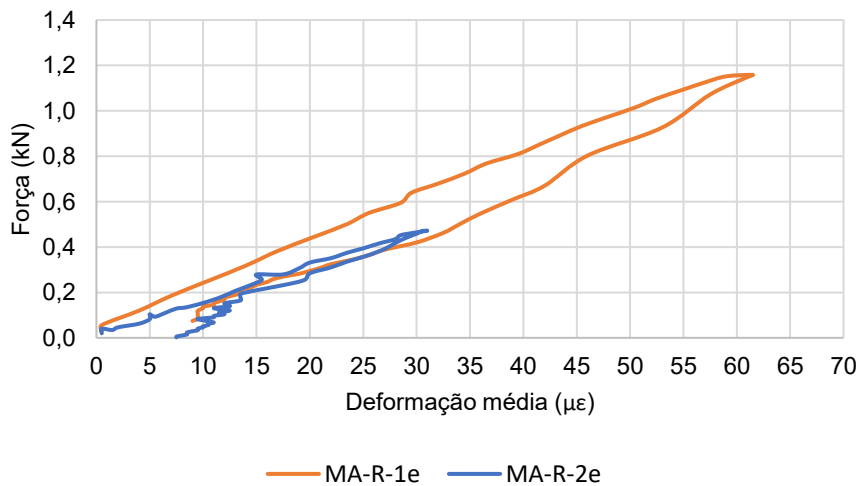


Figura G.6 – Curva força x deformação da viga MA-0,5-1e e MA-0,5-2e.

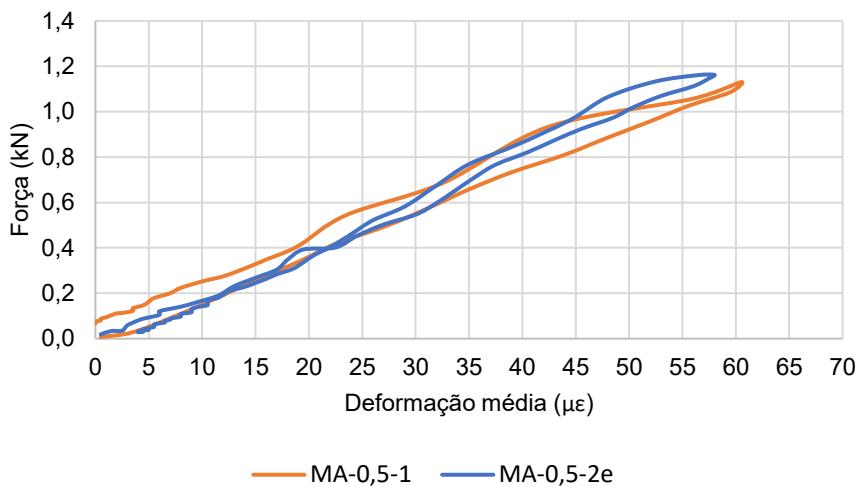


Figura G.7 – Curva força x deformação da viga MA-1-2e e MA-1-3e.

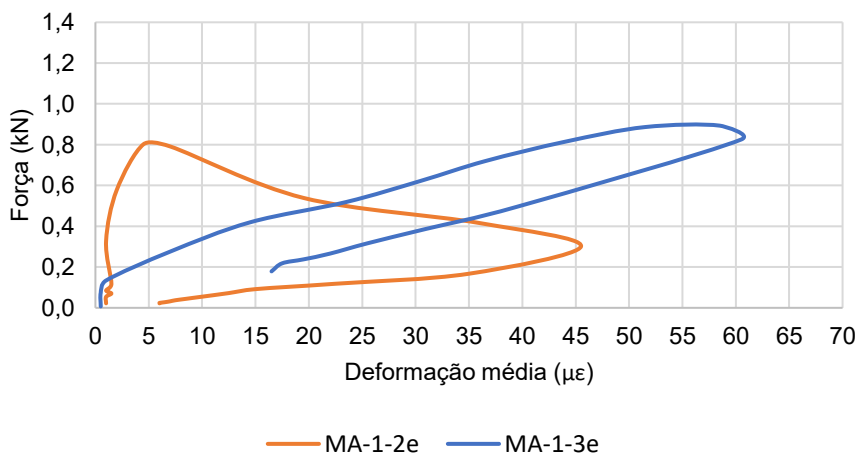


Figura G.8 – Curva força x deformação da viga MA-1,25-1e e MA-1,25-2e.

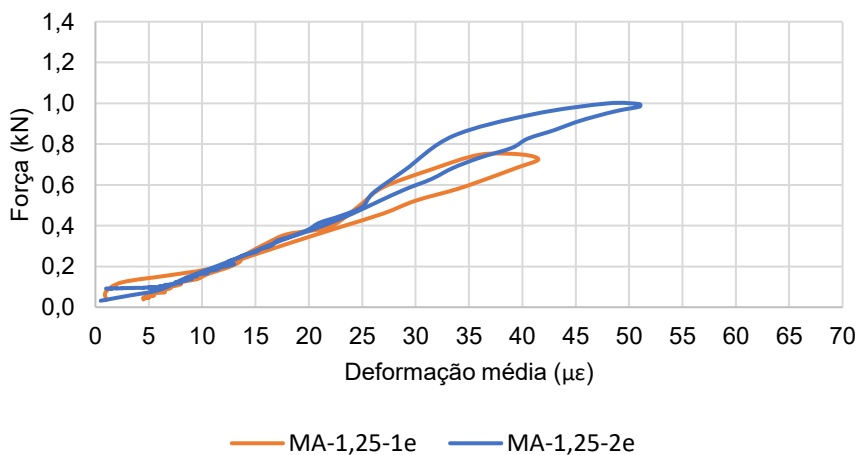


Figura G.9 – Curva força x deformação da viga MB-R-5.

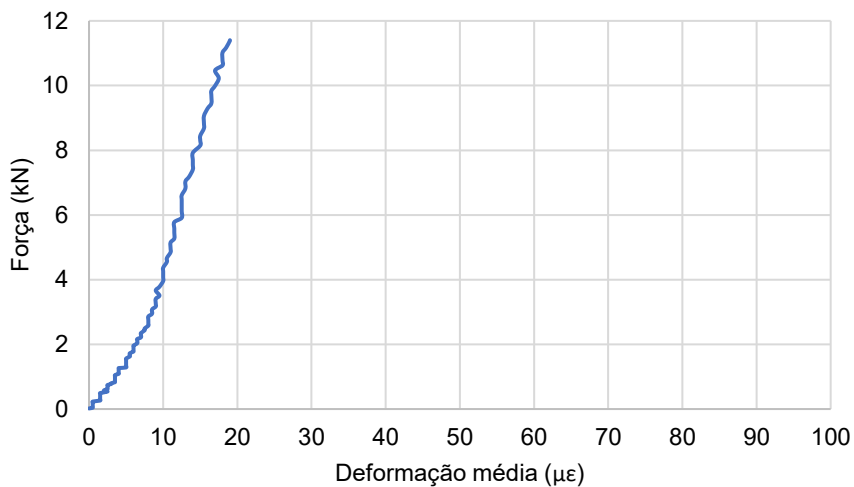


Figura G.10 – Curva força x deformação da viga MB-0,5-5 e MB-0,5-6.

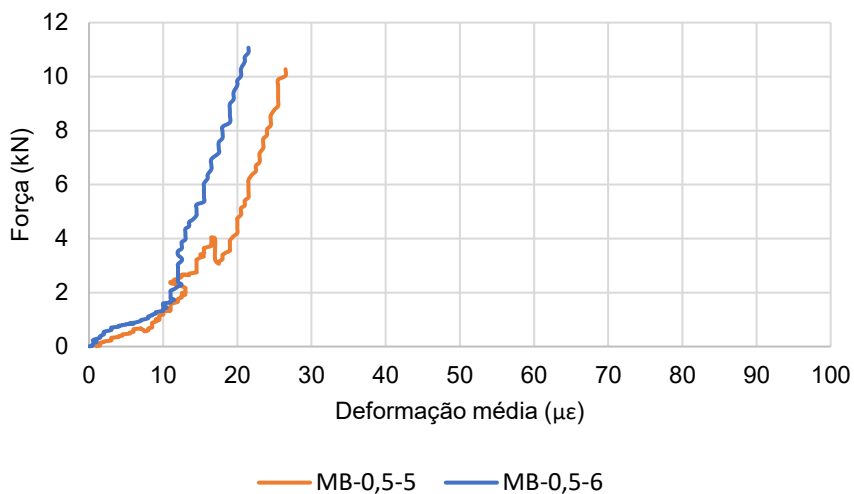


Figura G.11 – Curva força x deformação da viga MB-1-5 e MB-1-6.

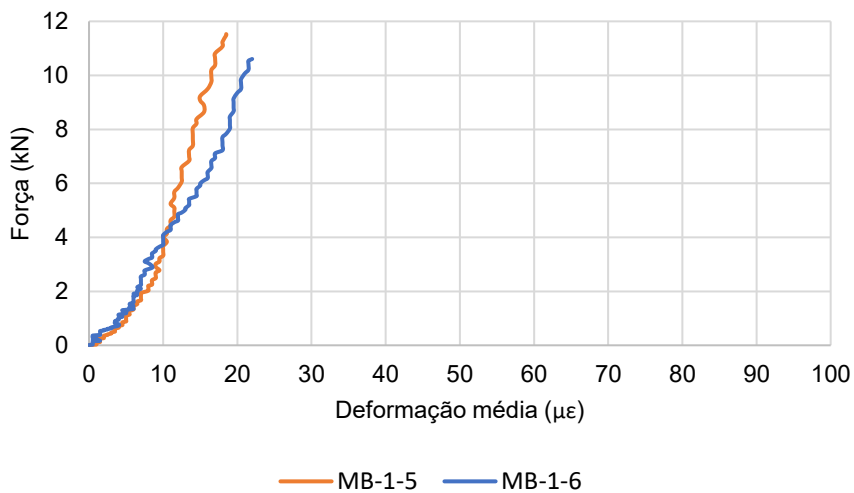


Figura G.12 – Curva força x deformação da viga MB-1,25-5 e MB-1,25-6.

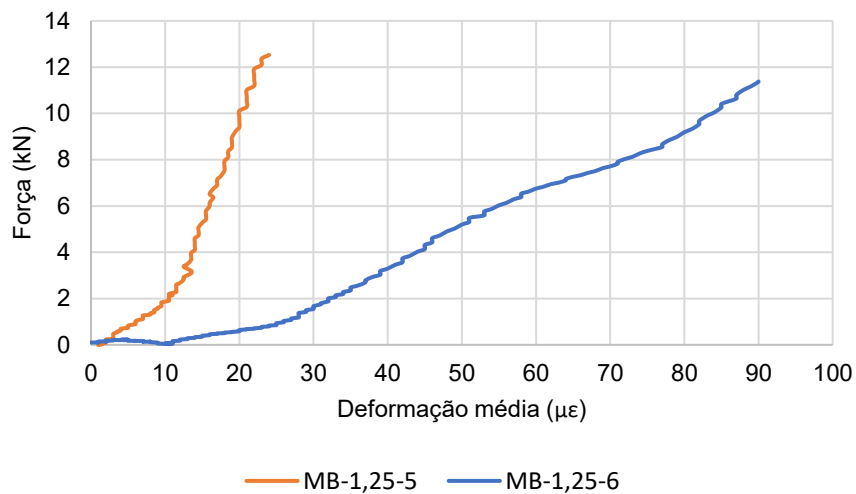


Figura G.13 – Curva força x deformação da viga MB-R-1e.

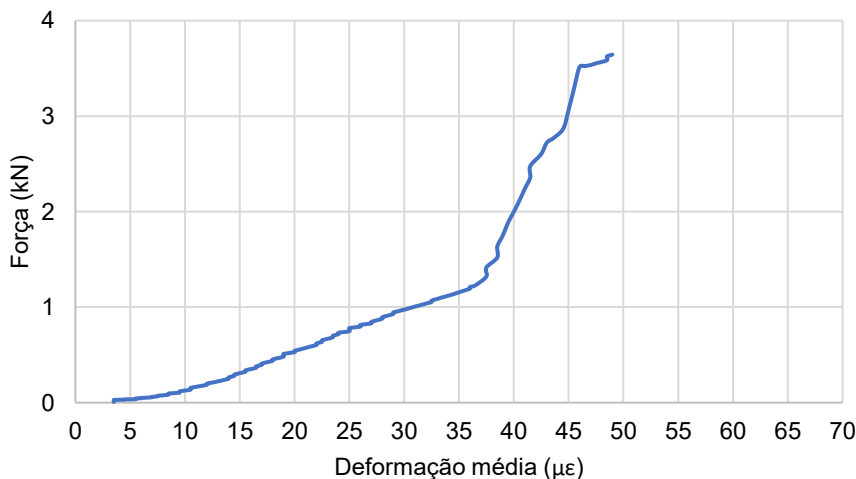


Figura G.14 – Curva força x deformação da viga MB-R-2e.

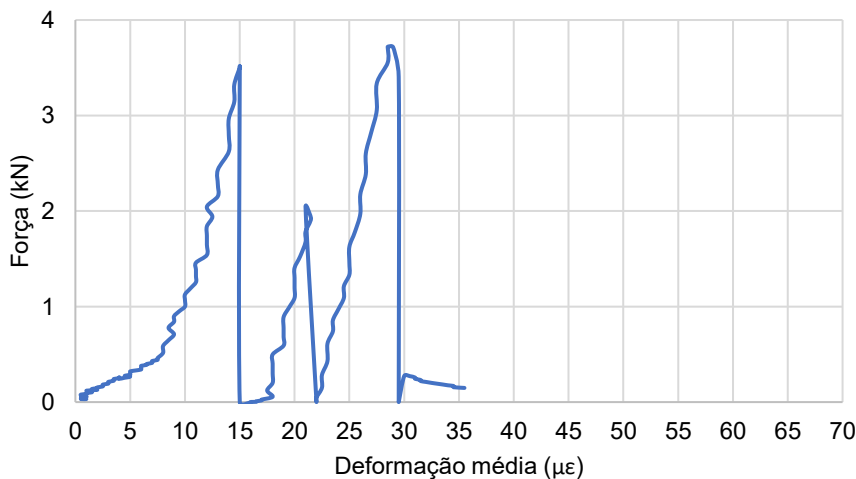


Figura G.15 – Curva força x deformação da viga MB-0,5-1e.

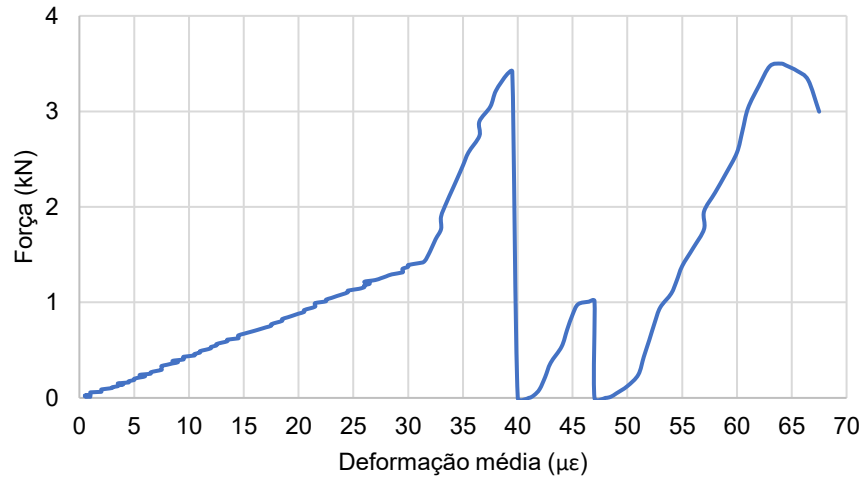


Figura G.16 – Curva força x deformação da viga MB-0,5-2e.

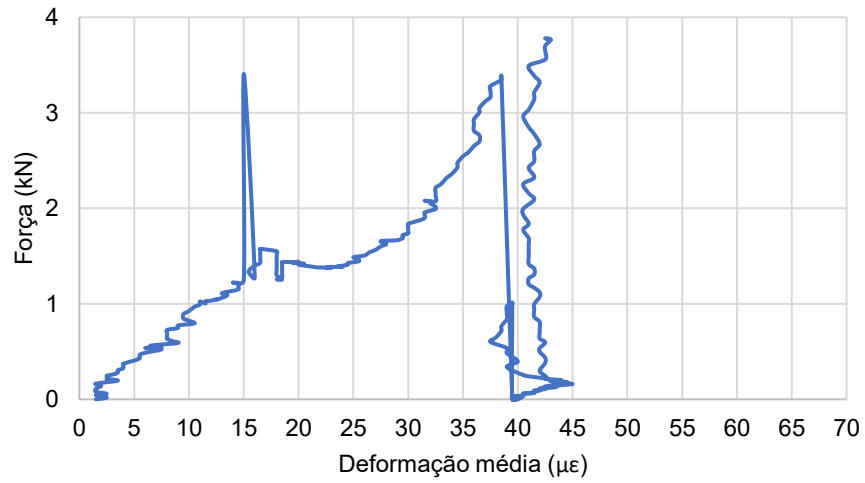


Figura G.17 – Curva força x deformação da viga MB-1-1e.

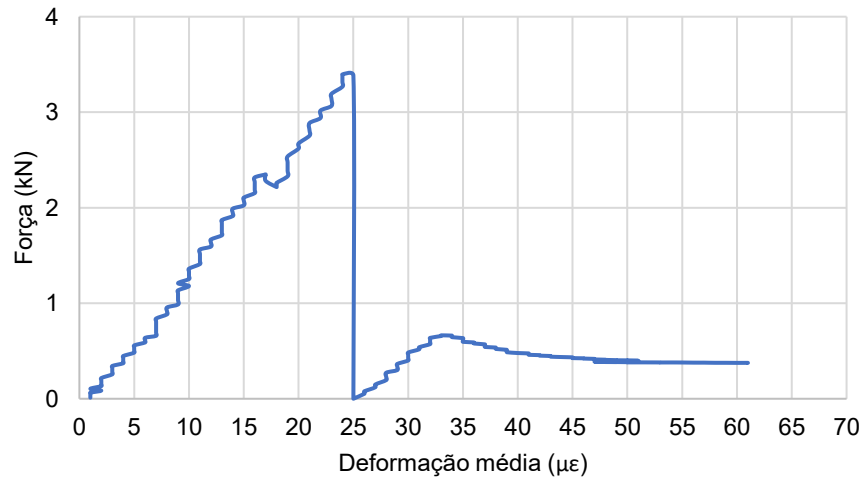


Figura G.18 – Curva força x deformação da viga MB-1-2e.

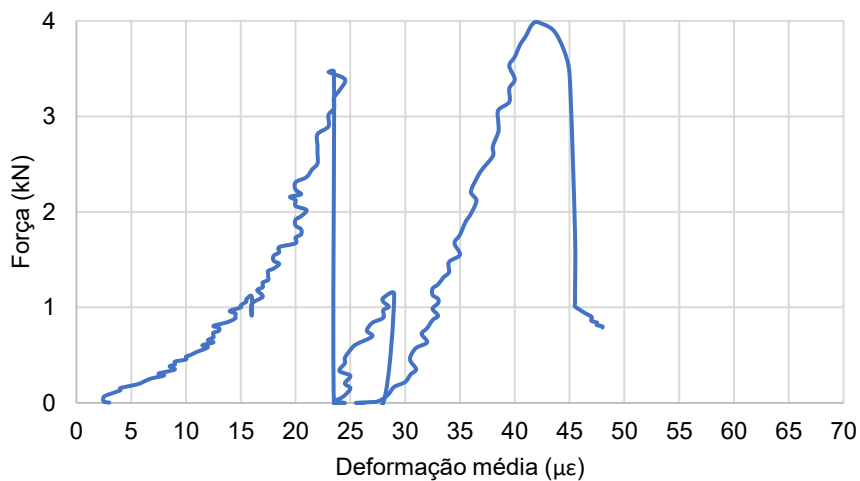


Figura G.19 – Curva força x deformação da viga MB-1,25-1e.

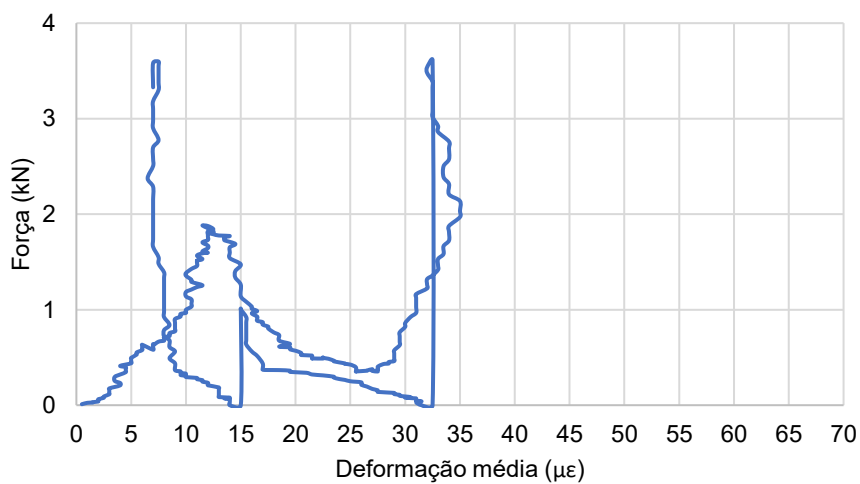
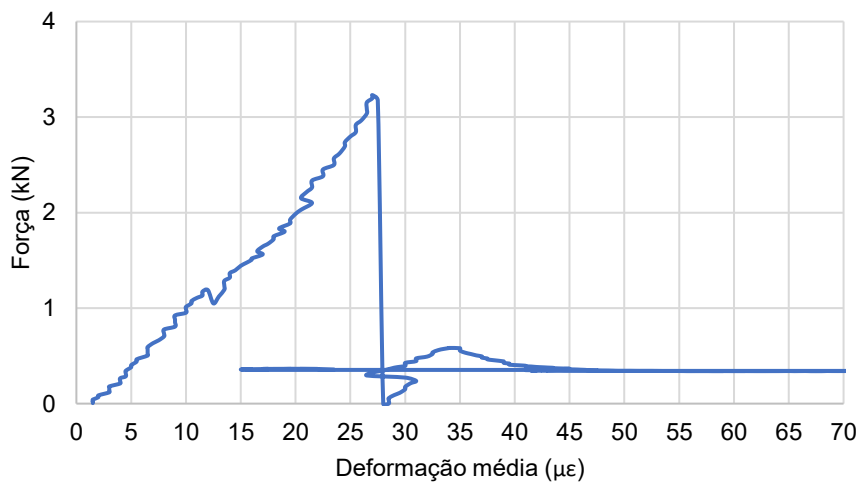


Figura G.20 – Curva força x deformação da viga MB-1,25-2e.



## APÊNDICE H – PARÂMETROS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NO ANSYS

Tabela H.1 – Características do material dos roletes – aço (biblioteca do ANSYS).

<b>Structural Steel</b>	
Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1	
Density	7850,0 kg/m <sup>3</sup>
<b>Structural</b> <span style="float: right;">▼</span>	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+11 Pa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+11 Pa
Shear Modulus	7,6923e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 Pa
Compressive Yield Strength	2,5e+08 Pa
Strain-Life Parameters	
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	4,6e+08 Pa
Tensile Yield Strength	2,5e+08 Pa
<b>Thermal</b> <span style="float: right;">▼</span>	
Isotropic Thermal Conductivity	60,500 W/m·°C
Specific Heat Constant Pressure	434,00 J/kg·°C
<b>Electric</b> <span style="float: right;">▼</span>	
Isotropic Resistivity	1,7e-07 ohm·m
<b>Magnetic</b> <span style="float: right;">▼</span>	
Isotropic Relative Permeability	10000

Figura H.1 – Deformação total da viga MA-R.

Unidade: m

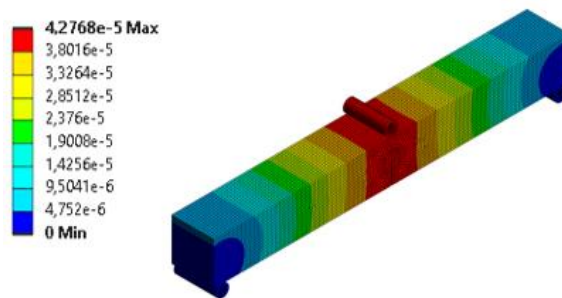


Figura H.2 – Deformação total da viga MA-0,5.

Unidade: m

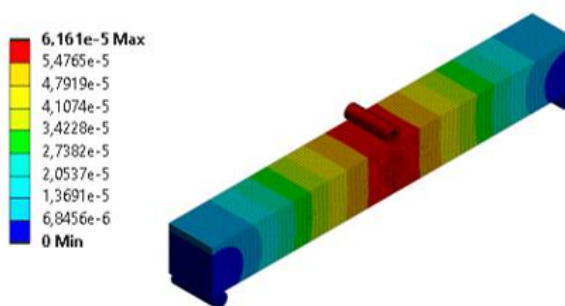


Figura H.3 – Deformação total da viga MA-1.

Unidade: m

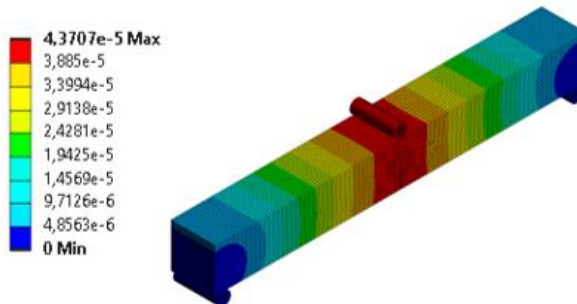
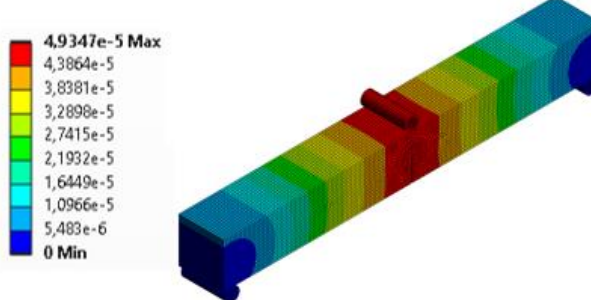


Figura H.4 – Deformação total da viga MA-1,25.

Unidade: m



## ANEXO A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO CIMENTO CPV ARI RS

Quadro A.1 – Composição química do cimento CPV ARI RS (Mizu) – dados do fabricante.

Componente	Faixa de concentração (%)
Silicato tricálcico	20 – 70
Silicato dicálcico	10 – 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 – 15
Aluminato tricálcico	1 – 15
Sulfato de cálcio	2 – 10
Carbonato de cálcio	2 – 10
Óxido de magnésio	0 – 8
Óxido de cálcio	0 – 2

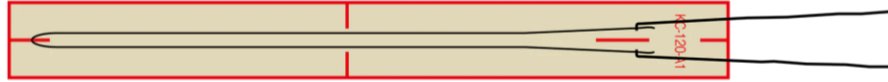
Quadro A.2 – Propriedades físicas e químicas do cimento CPV ARI RS (Mizu) – dados do fabricante.

Propriedade	Valor / Faixa
Estado físico	Sólido, cinza, sem cheiro
pH em solução aquosa	$11 \leq \text{pH} \leq 14$
Massa específica absoluta (25 °C)	$2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2 \text{ g/cm}^3$
Massa específica aparente (25 °C)	$0,88 - 0,93 \text{ g/cm}^3$
Pressão de vapor	Não aplicável
Solubilidade em água (25 °C)	Até 1,6 g/L
Limite de explosividade (% vol. no ar)	Nenhum
Resíduo em peneira 325 Mesh	$< 1,0\%$

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES DOS *STRAIN GAGES*

Quadro B.1 – Tipos de *strain gage*.

Identificação	Tipo de <i>strain gage</i>	Resistência do extensômetro ( $\Omega$ )
MA-R-1e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MA-R-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MA-R-4	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MA-0,5-1e	Tipo 3: BF120-50AA	120,0 $\pm$ 1,0
MA-0,5-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MA-0,5-4	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-0,5-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1-3e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1-4	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1,25-1e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1,25-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1,25-4	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MA-1,25-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,0 $\pm$ 0,4
MB-R-1e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MB-R-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MB-R-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MB-0,5-1e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,2 $\pm$ 0,2
MB-0,5-2e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,2 $\pm$ 0,2
MB-0,5-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,2 $\pm$ 0,2
MB-0,5-6	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,2 $\pm$ 0,2
MB-1-1e	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	120,2 $\pm$ 0,2
MB-1-2e	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0
MB-1-5	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0
MB-1-6	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0
MB-1,25-1e	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0
MB-1,25-2e	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0
MB-1,25-5	Tipo 1: KC-70-120-A1-11	119,8 $\pm$ 0,2
MB-1,25-6	Tipo 2: BF120-100AA	120,0 $\pm$ 1,0

**TIPO 1: KC-70-120-A1-11**Figura B.1 – *Strain gage* KC-70-120-A1-11.

- Empresa: Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd;
- Fator de calibração (24 °C, 50% UR):  $2,10 \pm 1,0\%$ ;
- Resistência do extensômetro (24 °C, 50% UR):  $120,2 \pm 0,2 \Omega$ ;
- Expansão térmica adotável: 10,8 ppm/°C;
- Número do lote: Y7038;
- Remessas: 344A e 348A;
- Coeficiente de temperatura do fator de calibração: + 0,015%/°C;
- Cimento adesivo aplicável: CC-35, PC-12B;
- Materiais – Elemento Resistivo: Fio de liga CuNi (cobre-níquel);
- Materiais – Base: Base de papel + fenol-epóxi;
- Quantidade: 46.

Quadro B.2 – Dimensões: KC-70-120-A1-11.

Dimensões (mm)			
Grade (elemento de medição da deformação)		Base material (suporte)	
Comprimento	Largura	Comprimento	Largura
67	0,6	80	8

**TIPO 2: BF120-100AA**Figura B.2 – *Strain gage* BF120-100AA.

- Empresa: Shenzhen Sensor And Control Company Limited;
- Fator de calibração: 2,00%;
- Resistência do extensômetro: 120  $\Omega$ ;
- Tolerância média de resistência:  $\leq \pm 0,1\%$ ;
- Sensibilidade típica: 2,00 ~ 2,20;
- Dispersão do coeficiente de sensibilidade:  $\leq \pm 0,1\%$ ;
- Limite de deformação: 2%;
- Vida útil à fadiga:  $10^7$  ciclos;
- Faixa de temperatura de operação: -30 °C a +80 °C;
- Materiais – Elemento Resistivo: liga cobre-níquel;
- Materiais – Base: Fenólico;
- Quantidade: 6.

Quadro B.3 – Dimensões: BF120-100AA.

Dimensões (mm)	
Base material (suporte)	
Comprimento	Largura
140	5

**TIPO 3: BF120-50AA**Figura B.2 – *Strain gage* BF120-50AA.

- Empresa: Shenzhen Sensor And Control Company Limited;
- Fator de calibração: 2,00%;
- Resistência do extensômetro: 120  $\Omega$ ;
- Tolerância média de resistência:  $\leq \pm 0,1\%$ ;
- Sensibilidade típica: 2,00 ~ 2,20;
- Dispersão do coeficiente de sensibilidade:  $\leq \pm 0,1\%$ ;
- Limite de deformação: 2%;
- Vida útil à fadiga:  $10^7$  ciclos;
- Faixa de temperatura de operação: -30 °C a +80 °C;
- Materiais – Elemento Resistivo: liga cobre-níquel;
- Materiais – Base: Fenólico;
- Quantidade: 1.

Quadro B.4 – Dimensões: BF120-50AA.

Dimensões (mm)	
Base material (suporte)	
Comprimento	Largura
55	7,5