

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO- UENF

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL - ESTRUTURAS

KEIZE DELVALLE DOS SANTOS FERRAZ CEREJA

COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO
TEREFTALATO

Campos dos Goytacazes

Maio / 2025

KEIZE DELVALLE DOS SANTOS FERRAZ CEREJA

COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO
TEREFTALATO

Dissertação de mestrado apresentado ao
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil à Universidade Estadual
do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
Campos dos Goytacazes. Como requisito
parcial para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Estrutura.

Orientador: Sergio Luis González Garcia

Campos dos Goytacazes
Maio, 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

C414 Cereja, Keize Delvalle dos Santos Ferraz.

Comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de polietileno tereftalato / Keize Delvalle dos Santos Ferraz Cereja. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

151 f. : il.
Bibliografia: 128 - 134.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2025.
Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. Concreto armado. 2. Agregado reciclado. 3. Fibras de PET. 4. Cisalhamento. 5. Correlação de imagem digital. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

KEIZE DELVALLE DOS SANTOS FERRAZ CEREJA

COMPORTAMENTO AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO COM AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO
TEREFTALATO

Dissertação de mestrado
apresentado ao PPGEC – Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil à Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
Campos dos Goytacazes. Como
requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
de Estrutura.

Comissão examinadora:



Documento assinado digitalmente
JULIANA CORREA TRINDADE LEITE
Data: 15/08/2025 18:24:51-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Juliana Corrêa Trindade Leite D.Sc – UFRJ



Documento assinado digitalmente
NIANDER AGUIAR CERQUEIRA
Data: 11/08/2025 11:36:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Niander Aguiar Cerqueira D.Sc. – LECIV/UENF



Documento assinado digitalmente
RANCES CASTILLO LARA
Data: 11/08/2025 15:32:50-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Rancés Castillo Lara D.Sc. – LECIV/UENF



Documento assinado digitalmente
SERGIO LUIS GONZALEZ GARCIA
Data: 11/08/2025 11:29:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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

Campos dos Goytacazes, 23 de maio de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado e guiado em cada passo desta jornada. Sua presença me fortaleceu nos momentos de dúvida, me acalmou nas tempestades e me deu coragem para seguir adiante, mesmo quando os desafios pareciam grandes demais. Sem a fé e a confiança em seus propósitos, nada disso teria sido possível.

À minha família, que sempre foi minha base e meu refúgio, deixo minha gratidão mais profunda. Aos meus pais, Allan e Cristina que me ensinaram o valor da educação e do esforço com seus exemplos de vida. Em especial, à minha querida mãe, que sempre acreditou em mim com um amor incondicional e que, mesmo não estando mais presente fisicamente, permanece viva em meu coração. Sua memória foi uma das maiores motivações para eu chegar até aqui.

Ao meu amado esposo Rafael, agradeço por todo o apoio, paciência e companheirismo. Sua presença firme ao meu lado foi essencial para que eu não desistisse nos momentos mais difíceis. Obrigada por caminhar comigo com tanto amor, incentivo e compreensão. À minha filha Kethlim, razão do meu sorriso diário, agradeço por me encher de amor e por me inspirar a ser forte.

Ao meu irmão Keothne, agradeço por tanto amor, carinho, pelas palavras de apoio e por estar presente ao meu lado, e ao meu irmão Matheus, que torceram e acreditaram em mim nesta trajetória.

E, com muito amor, agradeço à minha querida vizinha Marlet, pelo carinho, pelas orações. Sua presença afetuosa sempre foi um alento para o meu coração.

Ao meu orientador Sergio Luis, registro minha sincera gratidão por sua dedicação, confiança e por acreditar no meu potencial, mesmo quando eu mesma duvidava. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, por todo o suporte acadêmico e humano ao longo dessa jornada.

Aos colegas que estiveram comigo durante essa trajetória acadêmica, muito obrigada por cada conversa, troca de experiência, apoio mútuo e parceria. A convivência com vocês tornou essa caminhada mais leve e significativa.

Aos professores e técnicos dos laboratórios LECIV e LAMAV, deixo meu reconhecimento pelo empenho, paciência e colaboração durante os ensaios e as etapas práticas deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade, o meu mais sincero e eterno agradecimento.

RESUMO

Esta dissertação investigou o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado produzidas com substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto (ARC), reforçadas com diferentes teores de adição de fibras de polietileno tereftalato (PET) no concreto: 0,5%, 1,0% e 1,25%. O estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da adição de fibras poliméricas recicladas no desempenho estrutural das vigas, com ênfase na resistência ao cisalhamento, na ductilidade e na evolução da fissuração. Para isso, foram realizados ensaios mecânicos de flexão em três pontos em escala real, com monitoramento da fissuração por meio da técnica de correlação de imagem digital (CID), além da caracterização física e mecânica dos materiais utilizados. Os resultados demonstraram que a viga produzida apenas com agregado reciclado (CAR 0%), sem adição de fibras, apresentou o melhor desempenho em termos de resistência ao cisalhamento, superando inclusive a viga de referência com agregado natural (NAT 0%). Esse comportamento foi atribuído ao controle tecnológico adotado e à qualidade do agregado reciclado (AR) utilizado. Em relação ao controle da fissuração, as vigas com adição de fibras de PET especialmente a dosagem de 1,0% apresentaram os melhores resultados no controle da abertura da fissura diagonal crítica, na limitação do deslizamento relativo entre as faces da fissura e no aumento da resistência residual. A dosagem de 1,25% também mostrou desempenho positivo, mas com maior variabilidade, enquanto a dosagem de 0,5% teve desempenho inferior, possivelmente devido à má dispersão das fibras na matriz. Conclui-se que a utilização combinada de ARC e fibras de PET reciclado representam uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a produção de concretos estruturais, promovendo o reaproveitamento de resíduos sólidos e contribuindo para o aumento da durabilidade, ductilidade e resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

Palavras-chave: Concreto armado; Agregado reciclado; Fibras de PET; Cisalhamento; Correlação de imagem digital; Sustentabilidade.

ABSTRACT

This dissertation investigated the shear behavior of reinforced concrete beams produced with the complete replacement of natural coarse aggregate by recycled concrete aggregate (RCA), reinforced with different contents of polyethylene terephthalate (PET) fibers: 0.5%, 1.0%, and 1.25%. The aim of the study was to evaluate the effects of adding recycled polymer fibers on the structural performance of the beams, with emphasis on shear strength, ductility, and crack development. To this end, full-scale three-point bending tests were conducted, with crack monitoring performed using the Digital Image Correlation (DIC) technique, in addition to the physical and mechanical characterization of the materials used. The results showed that the beam produced with only recycled aggregate (RCA 0%), without fiber addition, exhibited the best performance in terms of shear strength, even surpassing the reference beam made with natural aggregate (NAT 0%). This behavior was attributed to the quality of the recycled aggregate and the strict quality control adopted. Regarding crack control, the beams with PET fiber addition particularly the 1.0% dosage presented the best results in limiting the opening of the critical diagonal crack, reducing relative displacement between crack faces, and increasing residual strength. The 1.25% dosage also showed positive performance but with greater variability, while the 0.5% dosage performed less effectively, possibly due to poor fiber dispersion in the matrix. It is concluded that the combined use of RCA and recycled PET fibers represents a technically feasible and environmentally sustainable alternative for the production of structural concrete, promoting solid waste reuse and contributing to increased durability, ductility, and shear strength of reinforced concrete beams.

Keywords: Reinforced concrete; Recycled aggregate; PET fibers; Shear strength; Digital image correlation; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução de fissuras em diferentes tipos de concreto.....	10
Figura 2: Gráfico percentual de material reciclado pós consumo	14
Figura 3: Gráfico Censo da Reciclagem do PET no Brasil	15
Figura 4: Fissuração em concreto reforçado com fibras (a) concreto sem fibras e (b) concreto com fibras.....	16
Figura 5: Efeito de costura da fibra no concreto	16
Figura 6: Redistribuição de fissuras (a) esforço de retração e surgimento de fissuras e (b) adição de fibras e mudança no padrão de fissuração	17
Figura 7: Desempenho da matriz do concreto (a) concreto simples e (b) concreto com fibras	18
Figura 8: Resistência mecânica do concreto (a) concreto simples e (b) concreto com fibras	18
Figura 9: Comportamento do concreto e situação de incêndio (a) concreto simples e (b) concreto com fibras.....	19
Figura 10: Padrões de ruptura das vigas com armadura de cisalhamento (a) concreto sem adição de fibras e (b) concreto com adição de fibras. ..	20
Figura 11: Padrões de ruptura das vigas sem armadura de cisalhamento (a) concreto sem adição de fibras e (b) concreto com adição de fibras. ..	20
Figura 12: Forças internas de uma viga sem estribos depois do surgimento da fissura diagonal crítica.....	23
Figura 13: Fluxograma da metodologia.....	37
Figura 14: Confecção de fibra de PET (a) garrafa higienizada, (b) confecção das fibras e (c) dimensão da fibra.	41
Figura 15: Microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, LAMAV.....	41
Figura 16: Processo de aplicação da metalização nas amostras	42
Figura 17: (a) Ensaio de tração e (b) Rompimento da fibra	42
Figura 18: Materiais utilizados na montagem do ensaio PULL-OUT (a) cimento, (b) água, (c) Metacaulin, (d) fibra PET, (e) areia e (f) superplastificante.	44
Figura 19: Esquema de ensaio de PULL-OUT.....	45

Figura 20: Preparo do método (a) furo para acoplar parafuso no cap, (b) Corte tubo pvc no tamanho determinado, (c) colagem do tubo no cap, (d) fixação da fibra na matriz e (e) secagem da matriz.	45
Figura 21: Ensaio PULL-OUT (a), escorregamento da fibra (b)	46
Figura 22: MEV na fibra de PET sem tratamento mecânico, a) ampliação de 18X e b) ampliação de 150X.	46
Figura 23: Etapas da concretagem da laje para produção dos AR (a) mistura, (b) transporte, (c) lançamento, (d) adensamento e (e) cura.....	48
Figura 24: Laje e corpos de prova para confecção e caracteriação do AR.....	49
Figura 25: Ensaio de abatimento de cone (a) adensamento, (b) preenchimento, .	49
Figura 26: Extração dos corpos de prova de reteste (a) processo de extração e (b) corpo de prova extraído.	50
Figura 27: Fragmentação do concreto para produção de agregado reciclado	50
Figura 28: Processo de produção do agregado graúdo reciclado (a) fragmentação do resíduo e (b) armazenamento.....	51
Figura 29: Processo de britagem (a) britador de mandíbula e (b) redução das dimensões.....	52
Figura 30: Ensaio granulométrico	53
Figura 31: Ensaio massa específica real (a) Mensuração do cesto vazio, (b) agregado reciclado SSS e (c) Mensuração do cesto cheio.....	53
Figura 32: Ensaio de massa unitária (a) recipiente de volume padrão e	54
Figura 33: Ensaio de absorção de água (a) agregado imerso em água, (b) agregado com SSS e (c) mensuração para diferença de massa	55
Figura 34: Ensaio de abrasão Los Angeles, (a) Máquina de abrasão Los Angeles, (b) Massa seca antes do Ensaio, (c) Massa retida após o ensaio	55
Figura 35: Ensaio ataque químico, a) antes do ataque; b) após 24h.....	56
Figura 36: Amostras antes (a) e Depois do ensaio (b).....	56
Figura 37: Detalhamento das vigas e armadura (Dimensões em cm)	58
Figura 38: Montagem das formas para molde das vigas	59
Figura 39: Etapas do processo de montagem da armadura: (a) corte das barras de aço; (b) moldagem dos estribos; (c) montagem da armadura.....	60
Figura 40: Ensaio de tração direta das barras de aço: (a) máquina universal de ensaio SHIMADZU®; (b) execução do ensaio de tração direta; (c) preparação do corpo de prova para colagem do strain gauge.....	61

Figura 41: Processo de produção dos concretos para as vigas	64
Figura 42: Procedimento antes da concretagem	65
Figura 43: Etapas do processo de concretagem das vigas: (a) lançamento do concreto nos moldes; (b) adensamento do concreto com vibrador de imersão; (c) cura inicial com manta úmida por 24 horas.....	65
Figura 44: Etapas do preparo e cura dos corpos de prova: (a) Desmolda das vigas; (b) identificados das vigas; (c) cura úmida em tanque com água saturada com cal.	66
Figura 45: Execução do ensaio VeBe (a) Ensaio montado em mesa vibratória, (b) abatimento de cone, (c) Sedimentação do cone, (d) preparo para vibração, (e) vibração até preencher os vazios, (f) resultado do ensaio	68
Figura 46: Caracterização do concreto no estado fresco: (a) ensaio de abatimento de cone, (b) ensaio de consistência VeBe.....	68
Figura 47: Cura úmida dos corpos-de-prova (a) imersão em água; (b) secagem após 28 dias.....	69
Figura 48: Tratamento dos corpos de prova para ensaio: (a) retificação dos corpos de prova; (b) aplicação da pintura de base branca; (c) aplicação dos pontos pretos; (d) início da aplicação da carga.....	71
Figura 49: Tratamento dos dados através do GOM.....	71
Figura 50: Deformação sofrida no momento antes da ruptura	72
Figura 51: Ensaio de resistência à compressão: (a) registro por fotogrametria; (b) momento da ruptura.....	72
Figura 52: Ensaio de resistência com compressão diametral: (a) preparo dos corpos-de-prova; (b) execução do ensaio; (b) após ruptura.....	73
Figura 53: Esquema de ensaio a flexão de três pontos das vigas (dimensões em cm).	74
Figura 54: Pintura realizada nas vigas no vão de cisalhamento (dimensões em cm)	75
Figura 55: Vigas após tratamento na superfície de pintura	76
Figura 56: Realização do ensaio de flexão da viga de referencia NAT 0%.....	77
Figura 57: Execução do ensaio no momento pós fissuração	77
Figura 58: Granulometria do agregado miúdo	79
Figura 59: Curva granulométrica dos agregados graúdos	79

Figura 60: Curva tensão versus deformação aço CA-50, 16mm.....	85
Figura 61: Curva tensão versus deformação aço CA-60, 5mm.....	85
Figura 62: Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 20 e 30 mm	88
Figura 63: Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 40 e 50 mm.	88
Figura 64: MEV após o ensaio: (a)- FE ampliação de 20X e (b)- FE ampliação de 100X	89
Figura 65: MEV após o ensaio: (a)- FD ampliação de 20X, (b)- FD zona de atrito matriz/ fibra ampliação de 1000X, (c)- FD parte ancorada ampliação de 1000X e (d)- FD fibra após deformação ampliação de 1000X.....	90
Figura 66: MEV após o ensaio: (a)- matriz ampliação de 17X e (b) matriz ampliação de 100X	90
Figura 67: Resultados dos ensaios de compressão dos concretos produzidos	95
Figura 68: Gráfico comparativo do ensaio de resistência a tração por compressão diametral	96
Figura 69: Gráfico de tensão última normalizada das vigas com fibra versus NAT0%.....	102
Figura 70: Gráfico de tensão de fissuração das vigas com fibra versus NAT 0%102	
Figura 71: Gráfico de tensão de última das vigas com fibra versus CAR 0% ...	104
Figura 72: Gráfico de tensão de fissuração das vigas x CAR 0%	104
Figura 73: Comparação de todas as vigas analisadas, entre as curvas carga versus deformação das armaduras	106
Figura 74: Comparação das vigas com adição de fibra com a referência NAT 0%, entre as curvas carga versus deformação das armaduras.....	106
Figura 75: Comparação das vigas com adição de fibra com a referência CAR 0%, entre as curvas carga versus deformação das armaduras.....	106
Figura 76: Deslocamento vertical no meio do vão das vigas ensaiadas.....	108
Figura 77: Comparativo do deslocamento vertical entre a viga de referência NAT 0% e as vigas com fibra.	109
Figura 78: Comparativo do deslocamento vertical entre a viga de referência CAR 0% e as vigas com fibra.	109
Figura 79: Formato simplificado da fissura diagonal crítica das vigas	114

Figura 80: Tratamento da Fissura diagonal principal de cisalhamento da viga CF 1% no software Gom Correlate® dividida em trechos e marcação dos pares de pontos no para análise da abertura de fissuras e deslizamento.	115
Figura 81: Abertura de fissura média viga NAT 0%.....	116
Figura 82: Abertura de fissura média viga CAR 0%.....	116
Figura 83: Abertura de fissura média CF 0,5%.....	117
Figura 84: Abertura de fissura média CF 1%.....	117
Figura 85: Abertura de fissura média CF 1,25%.....	118
Figura 86: Deslizamento médio viga NAT 0%	118
Figura 87: Deslizamento médio viga CAR 0%	119
Figura 88: Deslizamento médio viga CF 0,5%	119
Figura 89: Deslizamento médio viga CF 1%	120
Figura 90: Deslizamento médio viga CF 1,25%	120
Figura 91: Campos de deformações V_{cr} e V_u das vigas analisadas.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo do comportamento ao cisalhamento de vigas preparadas com AR.....	29
Tabela 2: Resumo do comportamento ao cisalhamento de vigas reforçadas com fibra de PET	32
Tabela 3: Nomenclatura das vigas de acordo com proporção de adição de fibras e substituição dos agregados nos concretos.....	36
Tabela 4: Materiais usados na pesquisa.....	38
Tabela 5: Dosagem da matriz	44
Tabela 6: Dosagem do concreto para produção de agregado reciclado	48
Tabela 7: Dosagem do concreto das vigas	63
Tabela 8: Resultados do ensaio de massa específica real.....	80
Tabela 9: Resultados do ensaio de massa específica dos agregados graúdos	81
Tabela 10: Resultado do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos.	82
Tabela 11: Desgaste por abrasão dos agregados graúdos reciclados de concreto.	83
Tabela 12: Resultado do ensaio de ataque químico.....	83
Tabela 13: Propriedades mecânicas das armaduras.....	84
Tabela 14: Resultados dos ensaios à tração das fibras.	86
Tabela 15: Resultados dos ensaios de PULL-OUT e seus parâmetros estatísticos	86
Tabela 16: Abatimento de cone	91
Tabela 17: Resultado ensaio VeBe, para os concretos com fibra.....	92
Tabela 18: Tabela de parâmetros comparativos para VeBe	92
Tabela 19: Tabela de resistência a compressão média dos concretos	94
Tabela 20: Tabela de resistência compressão por tração diametral.....	96
Tabela 21: Modulo de elasticidade.....	97
Tabela 22: Resultados principais dos ensaios nas vigas.....	99
Tabela 23: Deformação específica do concreto comprimido nas condições de fissuração e carga última.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland.
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Empresas de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AN	Agregado natural
AR	Agregado reciclado
ARC	Agregado reciclado de concreto
CAR	Concreto com agregado reciclado
CID	Correlação de imagem digital
CP	Corpos de Prova
CPII 32	Cimento Portland
CPV-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CRF	Concretos reforçados com fibras
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados da UENF
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil da UENF
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NAC	Natural Aggregate Concrete
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno tereftalato
RAC	Recycled Aggregate Concrete
RCD	Resíduo de construção e demolição
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
VAR	Viga com agregado graúdo reciclado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVOS.....	3
1.1.1.	Objetivos específicos.....	3
1.2.	JUSTIFICATIVA	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1.	IMPACTOS GERADO PELA CONSTRUÇÃO CIVIL NO MEIO AMBIENTE	5
2.2.	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	6
2.3.	AGREGADO GRAÚDO RECICLADO.....	7
2.3.1.	Concreto com agregado graúdo reciclado.....	11
2.4.	RESÍDUOS DE PET	12
2.5.	POLIETILENO TEREFTALATO.....	13
2.6.	EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET AO CONCRETO.....	15
2.6.1.	Resistência à força cortante de vigas de concreto armado	21
2.7.	MECANISMOS QUE CONTRIBUEM PARA A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	23
2.7.1.	Interação Mecânica entre Agregados nas Fissuras	23
2.7.2.	Ação transversal das barras longitudinais (efeito de pino)	24
2.7.3.	Contribuição do concreto na Resistência Residual à Tração	25
2.7.4.	Transferência de Esforço em Zonas de Concreto Comprimido.....	25
2.7.5.	Influência da Armadura Transversal na Resistência ao Cisalhamento	25
2.8.	COMPORTAMENTO À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO	26
2.9.	COMPORTAMENTO À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM CONCRETO ENRIQUECIDO FIBRAS DE PET.....	30
2.10.	DESEMPENHO MECÂNICO DE VIGAS COM AGREGADO RECICLADO E A CONTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS DE PET NO REFORÇO DO CONCRETO	33
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2.	MATERIAIS	37
3.2.1.	Aditivo	39
3.2.2.	Armaduras	39

3.3.	MÉTODOS	39
3.3.1.	Correlação de imagem digital.....	39
3.3.2.	Confecção das fibras de PET	40
3.3.3.	Caracterização das fibras de PET.....	41
3.3.3.1.	Microscopia eletrônica de varredura	41
3.3.3.2.	Caracterização dimensional.....	42
3.3.3.3.	Ensaio de tração.....	42
3.3.3.4.	Ensaio de PULL-OUT	43
3.3.3.5.	Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras de PULL-OUT	46
3.3.4.	Produção do agregado reciclado de concreto.....	47
3.3.4.1.	Produção do concreto para confecção do agregado reciclado.....	47
3.3.4.2.	Confecção dos agregados reciclados de concreto.....	50
3.3.4.3.	Britagem e peneiramento.....	51
3.3.5.	Caracterização do agregado graúdo	52
3.3.5.1.	Ensaio granulométrico	52
3.3.5.2.	Massa específica real	53
3.3.5.3.	Massa unitária.....	54
3.3.5.4.	Absorção de água.....	54
3.3.5.5.	Abrasão Los Angeles.....	55
3.3.5.6.	Determinação de argamassa residual (Ataque químico)	56
3.3.6.	Detalhe das vigas.....	57
3.3.7.	Montagem das Formas.....	59
3.3.8.	Armadura	59
3.3.8.1.	Barras de aço	60
3.4.	AVALIAÇÃO INDIRETA DA DEFORMAÇÃO DA ARMADURA LONGITUDINAL POR CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS.....	61
3.5.	DOSAGEM, PREPARO E MOLDAGEM DOS CONCRETOS	62
3.5.1.	Moldagem das vigas	64
3.5.2.	Produção dos corpos de prova.....	66
3.5.3.	Propriedade dos concretos em estado fresco.....	66
3.5.4.	Propriedade dos concretos no estado endurecido.....	69
3.5.5.	Caracterização mecânica	69
3.5.5.1.	Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento	69
3.5.5.2.	Ensaio de resistência a compressão	72
3.5.5.3.	Ensaio de resistência a tração por compressão diametral.....	73
3.5.6.	Ensaio em vigas	74

3.5.6.1.	Ensaio a flexão de três pontos	74
4.	RESULTADOS E DISCURSÕES.....	78
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	78
4.1.1.	Ensaio granulométrico dos agregados	78
4.1.2.	Massa específica real	80
4.1.3.	Massa unitária	81
4.1.4.	Absorção de água.....	81
4.1.5.	Ensaio de abrasão Los Angeles	82
4.1.6.	Ensaio de ataque químico	83
4.1.7.	Ensaio de caracterização do aço.....	84
4.1.8.	Caracterização das fibras	85
4.1.8.1.	Ensaio de tração na fibra de PET.....	85
4.1.8.2.	Ensaio PULL-OUT das fibras	86
4.2.	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO.....	91
4.3.	PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	93
4.3.1.	Resistencia a compressão	93
4.3.2.	Resistencia a tração por compressão diametral.....	95
4.3.3.	Modulo de elasticidade.....	96
4.4.	RESULTADO DOS ENSAIOS DAS VIGAS	98
4.4.1.	Comparação entre as vigas com fibra de PET e as vigas de referência (NAT 0% e CAR 0%)	100
4.4.1.1.	Resistência à força cortante	100
4.4.2.	Deformações específicas das armaduras longitudinais	105
4.4.3.	Análise do deslocamento vertical no meio do vão.....	108
4.4.4.	Deformação específicas do concreto na seção no meio do vão	111
4.4.5.	Análise de abertura de fissura e deslizamento nas vigas ensaiadas	113
4.4.6.	Resultado da superfície de ruptura.....	123
5.	CONCLUSÕES	126
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	127
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a construção civil é um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento econômico na sociedade. No entanto, seu crescimento contínuo tem gerado grandes impactos ambientais e um aumento expressivo no consumo de recursos naturais (Jorge et al., 2021). Além da preocupação com questões ambientais decorrentes da utilização destes meios naturais, há também o aumento do volume de resíduos sólidos descartados de maneira inadequada no meio ambiente, em especial os denominados resíduos de construção e demolição (RCD).

Na conferência das nações unidas sobre o meio ambiente e desenvolvimento, realizados no Brasil em 1992, foram gerados documentos referentes a estabelecimentos da conferência, que serviram de base para fundamentar o crescimento econômico e traçar limites ecológicos, a AGENDA 21 foi criada para abordar as ações de níveis de desenvolvimento que inclui a construção civil (Novaes, 2001). Já em 2002 surgiu o desafio da construção sustentável em desenvolver diretrizes e planos de ação.

A construção sustentável é um desafio que, por intermédio de pesquisas, tem ganhado soluções cada vez mais inovadoras com práticas sustentáveis e econômicas. Esse cenário preocupante tem impulsionado o aumento de pesquisas voltadas à preservação do meio ambiente, através de buscas e análises de estudos que otimizam a reciclagem, reduzindo a quantidade de resíduos despejados em aterros sanitários que poluem o nosso sistema.

Visando encontrar meios para reduzir o progressivo volume de lixo que não é reciclado, o presente estudo tem o objetivo de elucidar a importância da utilização de material reciclado incorporado na construção civil. Foram utilizados dois materiais reciclados na constituição do concreto: o agregado graúdo reciclado de resíduo de concreto e o Polietileno Tereftalato (PET).

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o propósito de atribuir uma função útil a materiais recicláveis, cuja geração tem aumentado significativamente. Esse é o caso tanto dos resíduos de concreto provenientes da construção civil quanto dos resíduos plásticos oriundos, principalmente, da indústria alimentícia, como embalagens, garrafas para bebidas e recipientes para alimentos sólidos. O elevado volume de produção desses materiais torna

preocupante a projeção de geração de resíduos, uma vez que sua decomposição pode levar, no mínimo, 100 anos podendo alcançar até 600 anos, a depender das condições ambientais (ABIPET, 2020). Os RCD, que, por sua grande quantidade e baixo reaproveitamento, têm motivado a busca por alternativas viáveis de reutilização, especialmente na construção civil de modo que reduza seu descarte no meio ambiente.

A ausência de diretrizes normativas específicas e a compreensão ainda limitada do comportamento do concreto com agregados reciclados têm motivado diversas pesquisas na área (Rahal; Alrefaei, 2018; Tam; Soomro; Evangelista, 2018). Essa preocupação é mais evidente em situações em que os mecanismos resistentes dependem fortemente da qualidade dos agregados graúdos e da zona de transição interfacial, como ocorre na resistência ao cisalhamento. Devido à presença de argamassa residual aderida ao agregado original, os agregados reciclados apresentam interfaces mais frágeis, favorecendo a propagação de fissuras através dos grãos, o que resulta em superfícies de ruptura mais lisas e menor engrenamento (Fonteboa, Abella, 2007; Xiao; Xie; Yang, 2012). Essa redução no engrenamento pode comprometer a resistência residual ao cisalhamento, associada por vários autores à ductilidade do elemento (Garcia, 2002; Johnson; Ramirez, 1989; Ozcebe; Ersoy; Tankut, 1999). Além disso, a menor qualidade dos agregados reciclados tende a gerar concretos com propriedades mecânicas inferiores às do concreto convencional (Hansen, 1992; Leite, 2001; Xiao; Xie; Yang, 2012). Nesse contexto, a adição de fibras ao concreto surge como uma alternativa promissora, atuando no controle e na contenção da propagação de fissuras e contribuindo para a melhoria da resistência à tração e da durabilidade sob esforços repetidos, como a fadiga (Angulo; Figueiredo, 2011).

As fibras sintéticas têm sido amplamente empregadas na matriz do concreto com o objetivo de aprimorar seu desempenho mecânico, contribuindo para o aumento das resistências à tração, flexão, impacto, fadiga, além da melhoria da tenacidade e da ductilidade (Hamada et al., 2023).

Pesquisas buscam métodos para o reaproveitamento do PET, de maneira sustentável; a reciclagem deste material que possui alta resistência e pode levar até centenas de anos para se degradar no meio ambiente, tem se mostrado muito produtiva, com uma diversidade de aplicações (Oliveira; Moura; Franco, 2019).

A solução abordada neste estudo, visou a mitigar danos causados ao meio ambiente, através da substituição de parte do agregado graúdo do concreto por agregado graúdo reciclado e adição de partículas de polietileno tereftalato como fibras. Este método reduz o volume de agregado retirado das pedreiras, diminuindo a degradação do meio ambiente e a reciclagem desses materiais que são descartados em grande volume de modo inadequado. Nesse sentido uma solução apropriada para parte dos rejeitos que não são reciclados é sua incorporação no concreto, transformando o lixo em matéria prima, tornando a construção mais limpa e um processo mais sustentável (Costa et al., 2017).

1.1. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado, produzidas com agregado graúdo reciclado de concreto e o concreto reforçadas com fibras de PET, avaliando a influência da adição das fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto, com ênfase na resistência ao cisalhamento e na ductilidade estrutural.

1.1.1. Objetivos específicos

- Produzir Agregado graúdo reciclado;
- Produzir as fibras de PET;
- Determinar o percentual de adição das fibras de PET;
- Caracterizar os materiais;
- Realizar ensaio PULL-OUT para determinação do tamanho de ancoragem efetivo das fibras de PET;
- Executar a montagem das formas e armaduras das vigas;
- Confeccionar as vigas de concreto com e sem adição de fibras de PET;
- Realizar os ensaios mecânicos nas vigas, com foco na resistência ao cisalhamento;
- Investigar o comportamento e a evolução da fissura diagonal crítica nas vigas submetidas à carga;

1.2. JUSTIFICATIVA

Estudos prévios têm demonstrado que a substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado de resíduos de construção e demolição pode ocasionar uma redução na resistência ao cisalhamento de elementos estruturais. Em contrapartida, pesquisas recentes indicam que a incorporação de fibras de PET ao concreto pode melhorar o desempenho mecânico da matriz, atuando como reforço complementar. Essa adição contribui para o aumento da tenacidade, controle da fissuração e melhoria da ductilidade das estruturas submetidas a esforços cortantes, configurando-se como uma alternativa promissora, melhorando o comportamento no momento pós fissuração e aumentando a resistência ao cisalhamento. Dessa forma, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de avaliar o potencial dessa combinação, promovendo o reaproveitamento de resíduos e redução no consumo de recursos naturais. Assim a proposta oferece uma solução sustentável, econômica e ambientalmente responsável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. IMPACTOS GERADO PELA CONSTRUÇÃO CIVIL NO MEIO AMBIENTE

Atualmente o setor construtivo é um valioso aliado para o desenvolvimento econômico e social de um país. A sua incessante evolução movimenta o comércio de materiais e imobiliário, incluindo a geração de empregos, o que garante a expansão socioeconômica causada pelo setor da construção civil (Rosse Caldas; Toledo Filho, 2021).

Todo crescimento econômico gera impactos positivos e negativos, sendo a construção civil um grande consumidor de recursos naturais e gerador de resíduos, o que afeta diretamente o meio ambiente, não somente pelo consumo, mas também pela emissão de resíduos. Esta é uma demanda que só aumenta com o crescente desenvolvimento populacional e urbano. Estes aspectos motivam a preocupação com o meio ambiente, fazendo-se necessário investimentos em sustentabilidade, cada vez mais presentes na construção civil a fim de reduzir danos ao meio ambiente (Lianne; Santos, 2018). Em média 60% dos resíduos sólidos são produzidos pela construção civil, um número significativamente grande (Camilo et al., 2022). O descarte inadequado desses materiais causa sérios problemas ao meio ambiente, em especial pela poluição gerada. Problemas com saneamento, poluição ambiental e visual afetam diretamente as cidades pelo volume produzido. Infelizmente esta não é a única preocupação, o lançamento de outros resíduos, que também não são reciclados, causam um impacto preocupante ao meio ambiente, a falta de fiscalização dos órgãos competentes e a ineficácia de políticas públicas que estabelecem o destino destes resíduos e a falta de comprometimento na gestão destes materiais pelos seus produtores (Jorge et al., 2021).

Em países em desenvolvimento como o Brasil, a expansão do setor construtivo tem um crescimento constante. Com o aumento do consumo de recursos naturais, visando reduzir impactos causados pelo crescente consumo, a construção civil vem incorporando materiais reciclados nos mais diversificados pontos da construção (Paula; Schiller; Paliga, 2022). Para materiais de construção não renováveis, como os agregados naturais a taxa de esgotamento não deve exceder a taxa de desenvolvimento de alternativas renováveis. Além disso, no que

diz respeito à poluição, a taxa de produção de resíduos não deve exceder a capacidade ambiental de absorver esses resíduos (Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023).

2.2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A crescente produção de resíduos provenientes da construção civil, tornou-se uma séria preocupação para a indústria da construção civil devido ao esgotamento de recursos naturais e a poluição ambiental, neste contexto, a conscientização com questões ambientais conduz o setor a buscar soluções sustentáveis. A reciclagem de RCD surgiu como uma resposta eficaz, ao transformar os resíduos que seriam descartados em matéria prima reaproveitável. A reciclagem se mostra como uma prática promissora, com a capacidade de reduzir o volume de rejeitos depositado em aterros, reduzindo assim o consumo de recursos naturais e, com a possibilidade de diminuir custos (Trindade, 2022, Kabirifar et al., 2020).

Outro benefício importante é a redução dos custos associados ao gerenciamento de resíduos. A reciclagem pode ser uma alternativa mais econômica do que o descarte tradicional em aterros sanitários, ao mesmo tempo em que fomenta a criação empregos na indústria da reciclagem impulsiona o desenvolvimento econômico local (Camilo et al., 2022).

A reutilização de RCD não apenas ajuda a minimizar o alto consumo dos recursos naturais e o impacto que isso causa ao meio ambiente, mas, também uma estratégia socialmente econômica em benefício da sociedade. Ao adotar tais práticas a indústria construtora contribui para o bem-estar social e preservação do planeta promovendo assim um futuro mais sustentável (Camilo et al., 2022, Kabirifar et al., 2020, Coelho; De Brito, 2011).

O uso de RCD está em amplo destaque em pesquisas mundiais, relacionado com as adversidades ambientais e socioeconômicas advindas do setor construtivo, a indústria da construção civil está em grande déficit de soluções que reduzam esses impasses causados (Kabirifar et al., 2020).

Diversos países, principalmente na Europa, têm demonstrado que é possível reduzir significativamente o volume de resíduos destinados a aterros sanitários por meio da ampliação do uso de agregados reciclados. A Holanda, por exemplo, reutiliza cerca de 92% de seus resíduos da construção civil, seguida pela Bélgica (89%), Dinamarca (81%) e Reino Unido (52%)(Coelho; De Brito, 2011).

Diante desse cenário, cresce a mobilização global para reduzir a emissão de RCD no meio ambiente e, conseqüentemente, seus impactos negativos (Kabirifar et al., 2020).

No entanto, no Brasil, este cenário é preocupante. Estima-se que sejam geradas, anualmente, cerca de 100 milhões de toneladas de RCD, sendo a região Sudeste a maior responsável, com 44,5% desse total. Contudo, apenas 16,1% desse montante foi reciclado entre os anos de 2019 e 2020. Embora ainda distantes dos índices de países mais desenvolvidos, esses números são semelhantes aos observados em Portugal e na Espanha (Oliveira; Santana, 2022).

Em Portugal, por exemplo, 76% dos resíduos da construção ainda são destinados a aterros sanitários, enquanto apenas 11% são reutilizados, 9% reciclados e 4% incinerados resultando em uma taxa média de reaproveitamento de apenas 20% (Paulino et al., 2023).

2.3. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021), os agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD) são classificados segundo sua composição predominante, podendo ser divididos em diferentes tipos, tais como: agregado reciclado de concreto, agregado reciclado cerâmico (proveniente de tijolos, blocos, telhas, etc.), agregado reciclado misto (composto por frações de concreto, argamassa, cerâmica e outros materiais), entre outros. Essa classificação é importante porque cada tipo de agregado apresenta propriedades distintas, que impactam diretamente o desempenho do concreto produzido com esses materiais. O agregado reciclado de concreto (ARC), por exemplo, caracteriza-se por ser predominantemente constituído de fragmentos de concreto endurecido, com menor presença de impurezas, o que o torna mais adequado para aplicações que exigem maior controle sobre as propriedades mecânicas do concreto. A seleção adequada do tipo de agregado reciclado é essencial para garantir o desempenho esperado da mistura, seja ela destinada a fins estruturais ou não estruturais.

O agregado reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição, corresponde a materiais previamente utilizados em edificações, como alvenaria, aço, concreto, madeira, entre outros. Especificamente, quando se trata do agregado reciclado de concreto, utiliza-se o concreto, obtido por meio da

reciclagem de elementos estruturais demolidos ou peças pré-moldadas descartadas. Esse processo consiste na britagem do concreto, envolvendo etapas de quebra, remoção de impurezas e trituração do material. O produto resultante, após triagem e classificação, é empregado como agregado reciclado (AR), podendo substituir parcial ou totalmente o agregado natural (AN) em novas aplicações na construção civil (Trindade, 2022; Sagheer, Tabsh e Yehia, 2023; Coelho e De Brito, 2011). O concreto produzido com agregado reciclado de concreto é internacionalmente conhecido pela sigla RAC (Recycled Aggregate Concrete).

Nos Emirados Árabes Unidos, o uso do agregado reciclado é comum em aplicações não estruturais, como base para estradas, estacionamentos e calçadas. No entanto, mais recentemente, o AR tem sido empregado como substituto parcial de até 20% do agregado graúdo natural em misturas de concreto destinadas à construção de edifícios e pontes (Sagheer, Tabsh e Yehia, 2023).

De acordo com Paulino et al., (2023) pesquisas indicam que é crescente o aumento na demanda por agregados naturais, o que tem impulsionado o interesse pela reutilização de RCD. Países como Dinamarca, Alemanha, Holanda e Suíça apresentam taxas de reaproveitamento de RCD entre 50% e 95%, predominantemente para fins não estruturais, como aterros e pavimentações. Diante disso, têm sido realizados investimentos em estudos que buscam viabilizar o uso estrutural desses materiais. Por outro lado, em países como Itália e Espanha, o percentual de reciclagem de RCD ainda é inferior a 10% (Paulino et al., 2023).

A produção de AR e o reaproveitamento destes materiais pelo setor de pavimentação, assim como a produção de novos concretos são os principais destinos de utilização destes agregados (Rahal; Alrefaei, 2018, Rahal; Elsayed, 2021). A utilização do AR em concretos estruturais ainda é limitada pela falta de normas que regulamentem a utilização deste material para esta finalidade. Este quadro se repete em diversos países. A falta de informações gera insegurança entre os profissionais, limitando a utilização do agregado reciclado. Além disso, a ausência de normas e diretrizes específicas sobre as propriedades mecânicas e estruturais do AR, tanto a curto quanto a longo prazo, dificulta sua aplicação em estruturas.

Este quadro gera uma incessante preocupação quando o concreto é submetido a tensões que podem gerar falhas e rupturas, em especial quando a

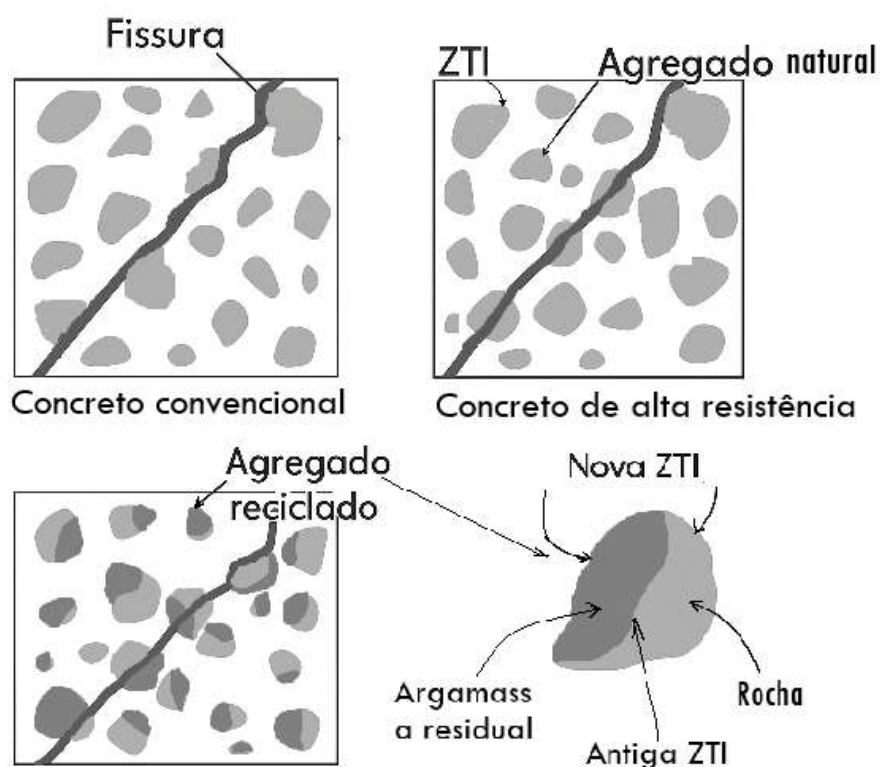
resistência está diretamente relacionada com o agregado graúdo e de sua interface com a pasta cimentícia (Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023, Rahal; Elsayed, 2021).

Vários esforços de investigação têm sido dedicados a melhorar misturas preparadas com uma elevada porcentagem ou 100% de substituição do Agregado natural (NA) pelo AR, para satisfazer os requisitos de resistência e durabilidade dos elementos estruturais (Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023).

O agregado reciclado tem características reduzidas em comparação aos agregados naturais, o que interfere no desempenho mecânico do concreto endurecido. De modo abrangente, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, a resistência à tração, a aderência e a resistência ao cisalhamento do concreto realizado com AR tendem a ser ligeiramente inferiores aos do concreto convencional. Isto ocorre principalmente porque os agregados reciclados de RDC possuem resíduos de argamassa velha em seu ao redor, que o torna mais fraco e reduz a rigidez, do que a pedra natural (Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023).

Por conter resíduos de argamassa antiga o agregado graúdo reciclado apresenta maior fragilidade nesta interface que facilita a propagação da fissura no meio do grão, deste modo, ao invés de contornar o grão como ocorre com o agregado natural, ele tende a romper o próprio agregado, A Figura 1 ilustra a diferença no padrão de fissuração entre concretos com diferentes tipos de agregados. Este quadro contribui na redução do engrenamento e conseqüentemente na redução de resistência que depende principalmente da zona de contato entre as faces da fissura (González Fonteboa et al., 2010, Xiao; Xie; Yang, 2012).

Figura 1: Evolução de fissuras em diferentes tipos de concreto



Fonte: Própria.

A atenção a esse aspecto torna-se ainda mais relevante quando componentes do concreto armado são submetidos a tensões, pois estão sujeitos a mecanismos de resistência diretamente relacionados à qualidade dos agregados graúdos e à área de transferência interfacial, que influenciam a resistência à força cortante (Rahal; Alrefaei, 2018).

Quando um elemento de concreto armado é submetido a um esforço cortante, ao atingir a carga de fissuração, parte desse esforço é transferida ao longo do plano fissurado, gerando uma predisposição ao deslizamento entre as partes do concreto. Esse fenômeno provoca tração na armadura transversal na área de interação, além de compressão entre as fissuras inclinadas. Nesse estágio, os mecanismos de resistência ao cisalhamento são ativados, destacando-se: a colaboração do concreto comprimido não fissurado; a tenacidade à tração do concreto na região fissurada, especialmente nas fissuras com menor abertura; o engrenamento dos agregados; e o efeito pino da armadura longitudinal tracionada que atravessa as fissuras (Trindade, 2022).

Entretanto, a resistência à tração e à compressão por fendilhamento do concreto contendo agregado reciclado (AR) varia conforme o percentual de substituição adotado na mistura. De modo geral, essa resistência pode apresentar uma redução entre 10% e 25% em comparação ao concreto convencional (Tabsh; Abdelfatah, 2009).

Essa diminuição está relacionada às características inferiores dos agregados reciclados, que resultam em concretos menos consistentes e com maior índice de porosidade. Conseqüentemente, há uma redução nas propriedades mecânicas do concreto, levando à perda da contribuição do engrenamento dos agregados e à diminuição da ductilidade e da resistência à força cortante (Hansen, 1992; Leite, 2001; Xiao; Xie; Yang, 2012).

A Tabela 1 que será vista no item 2.6 a seguir, apresenta um resumo dos resultados de alguns dos trabalhos de pesquisas encontrados em bibliografias que têm salientado na avaliação do desempenho ao cisalhamento do concreto estrutural realizado com agregado reciclado. A maior parte dos estudos publicadas a respeito do assunto mostra que vigas feitas com concreto com agregado reciclado (VAR) normalmente apresentam rigidez inicial inferior, com maior quantidade de fissuras e resistência ao cisalhamento reduzida em comparação com vigas correspondentes feitas com agregado natural (Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023).

2.3.1. Concreto com agregado graúdo reciclado

O concreto é um material heterogêneo, constituído por cimento, água e agregados, podendo ser acrescido de outras adições (Metha; Monteiro, 2008). As adições introduzidas ao concreto são de procedências variadas com ampla finalidade, podendo possuir aditivos químicos que atribuam a um melhor desempenho algumas características como: a trabalhabilidade do concreto, auxiliando numa mistura mais fluida e facilitando o desempenho, diminuição da permeabilidade, redução da densidade por incorporação de vazios no concreto, entre outros. Pode-se se incluir diferentes materiais com o objetivo de melhorar as propriedades, tais como, resistência, ductilidade e outras (Araújo et al., 2022).

De acordo com Angulo; Figueiredo (2011), as adições introduzidas ao concreto são de procedências variadas com ampla finalidade. O concreto com adição de materiais reciclados, é produzido com adição ou substituição parcial ou total de algum componente da mistura, pode-se se incluir agregados reciclados ou

outros materiais como fibras, com o objetivo de melhorar as propriedades, tais como, resistência, ductilidade e outras. Os agregados naturais, como brita e areia, possuem baixa porosidade e permeabilidade, o que contribui para a redução dos vazios na matriz do concreto. Essa característica favorece o desenvolvimento de misturas mais densas e homogêneas, auxiliando no controle da resistência mecânica e da durabilidade do material ao longo do tempo.

O uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como substituto dos agregados naturais no concreto tem ganhado destaque como estratégia sustentável. O concreto com agregado reciclado é produzido pela substituição parcial ou total dos agregados convencionais por materiais reciclados, principalmente provenientes da britagem de estruturas demolidas.

Diferentemente dos agregados naturais, como brita e areia que possuem baixa porosidade e favorecem misturas mais densas e homogêneas, os agregados reciclados apresentam maior porosidade e absorção de água. Essa característica eleva a relação água/cimento (a/c), o que pode comprometer a compactação da matriz e, conseqüentemente, a resistência do concreto. Nesses casos, a resistência passa a depender mais da pasta de cimento do que da densidade da mistura (Angulo; Figueiredo, 2011).

2.4. RESÍDUOS DE PET

Com a chegada do século XX decorreram grandes mudanças socioeconômicas, o crescente aumento populacional trouxe também o desenvolvimento industrial. Com tamanha evolução de nível mundial é inevitável que o planeta sofra conseqüências negativas da exploração humana. Deste modo busca-se soluções menos agressivas que reduzam a deterioração do meio ambiente e proteja as futuras gerações (Jardim, 2016).

O material polimérico, comumente conhecido como plástico, é amplamente utilizado pela população devido ao seu baixo custo e facilidade de produção. Por essas mesmas razões, também é um dos materiais mais descartados no meio ambiente, gerando grande volume de resíduos. Os polímeros englobam uma ampla variedade de materiais sintéticos, sendo o termo “plástico” derivado do grego *plastikos*, que significa “capaz de ser moldado”, em referência à sua flexibilidade e plasticidade (Jardim, 2016).

Esses resíduos, juntamente com outros tipos de sólidos descartados, compõem os chamados resíduos sólidos, que podem ter origem doméstica, comercial, industrial, agrícola, entre outras. Também são considerados resíduos sólidos materiais oriundos de processos de tratamento, como lodo de estações de tratamento de água e esgoto, bem como resíduos gerados no controle da poluição. Incluem-se ainda líquidos cuja disposição direta em corpos d'água ou redes públicas é inadequada, exigindo tratamentos inviáveis tecnicamente ou economicamente (Müller, 2020, NBR 10004, ABNT, 2004).

Dados de 2020 indicam que apenas 23,1% dos resíduos poliméricos pós-consumo foram reciclados no Brasil. Desse total, cerca de 68,5% eram oriundos de embalagens descartáveis e, alarmantemente, 61% dos resíduos plásticos gerados foram diretamente lançados no meio ambiente, sem sequer passar por sistemas formais de coleta. Dentre as 884 mil toneladas de resinas recicladas no período, o Polietileno Tereftalato (PET) representou 41,4%, o que corresponde a aproximadamente 366 mil toneladas (Plástico, 2021).

Esses números evidenciam um cenário preocupante de poluição ambiental, com grandes volumes de resíduos sólidos sendo despejados em solos, rios e mares. Esse contexto tem impulsionado a busca por soluções mais eficazes para reduzir o descarte inadequado e mitigar os impactos ambientais. Nesse sentido, a construção civil tem se destacado como um setor estratégico, ao incorporar resíduos recicláveis em seus processos, contribuindo para a sustentabilidade e redução dos danos à natureza.

2.5. POLIETILENO TEREFTALATO

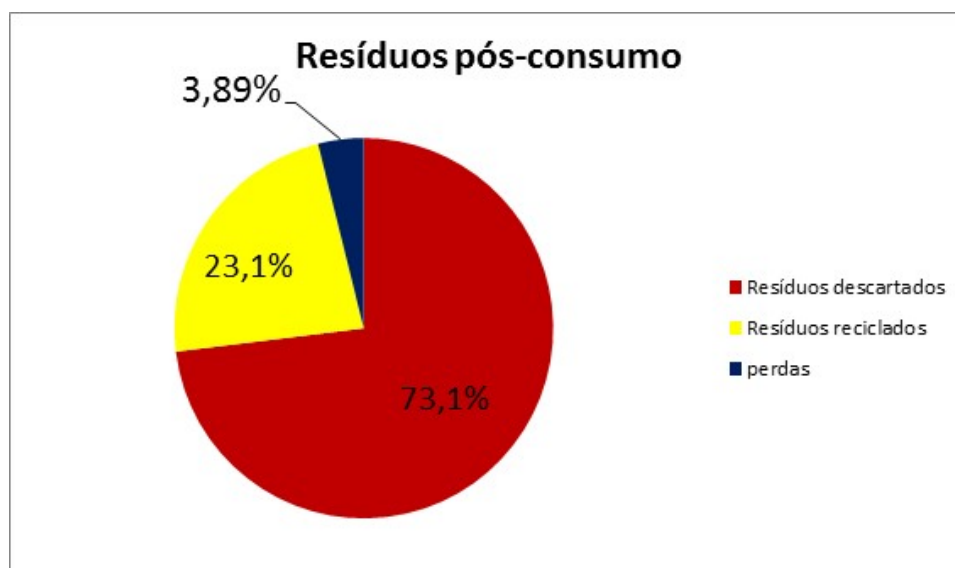
O Polietileno Tereftalato trata-se de um polímero composto por materiais orgânicos sintéticos capazes de serem moldados quando submetidos ao calor e compressão, constituídos pela repetição de suas macromoléculas. A origem de sua matéria prima são os monômeros que são moléculas por parte ou unidade de repetição, sua cadeia possui poucas ramificações ou pode ser linear, quando submetido a elevadas temperaturas pode se liquefazer tornando-se altamente flexível e facilmente moldável (Müller, 2020).

Comumente conhecido como PET, é constituído pela ação do ácido tereftálico e etileno glicol, criado em 1941 pelos químicos britânicos Whinfield e Dickson (ABIPET, 2020). É um produto leve e de grande resistência mecânica e

desempenho térmico, devido ser um material de baixo custo e de fácil produção elevou o volume de seu consumo pela população a nível mundial. Refere-se a um polímero termoplástico, devido a orientação da sua cadeia molecular também é considerado fibra, do grupo dos poliésteres (Müller, 2020).

Este material está presente no cotidiano da população, presente em quase todos os tipos de embalagens alimentícias, muito visto como garrafas de bebidas, consumido inclusive na indústria têxtil (Jardim, 2016). Em razão do consumo acelerado deste material, seu descarte é um motivo de preocupação com as questões ambientais, como pode ser visto na Figura 2, apenas uma pequena parcela dos polímeros consumidos são reciclados, a última coleta de dados desta pesquisa ocorreu em 2019.

Figura 2: Gráfico percentual de material reciclado pós consumo

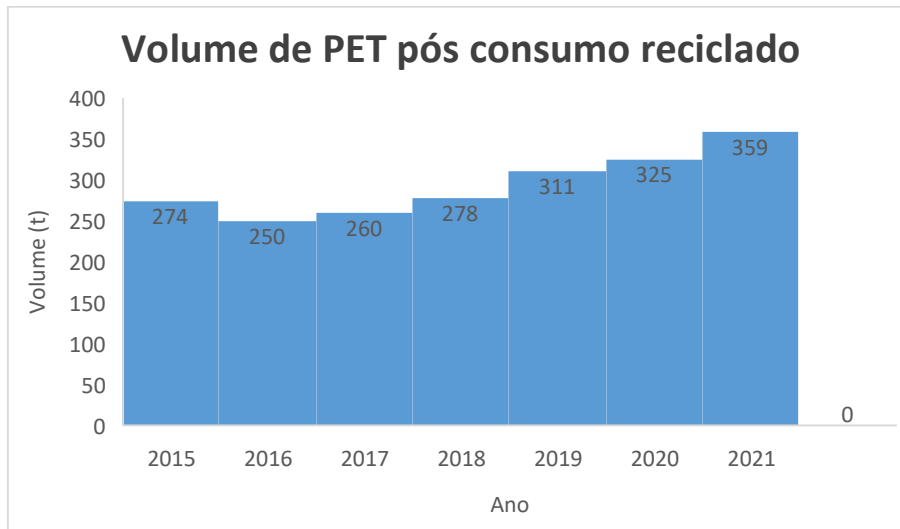


Fonte: (Adaptado ABIPET, 2020).

Em 2020 foram gerados 3.829.000 de toneladas de rejeito polimérico dentre eles foram encaminhados para reciclagem 1.033.000 toneladas com uma perda de 149.000 toneladas e apenas 884.000 toneladas foram recicladas, 2.944.000 foram descartados sem finalidade útil em aterros sanitários e lançados diretamente no meio ambiente (Plastico, 2021).

De acordo com o 12º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, em 2021 foi constatado que aproximadamente 56,4% do PET descartado pelo consumidor é reciclado (ABIPET, 2020), como pode ser visto seu desenvolvimento na Figura 3.

Figura 3: Gráfico Censo da Reciclagem do PET no Brasil

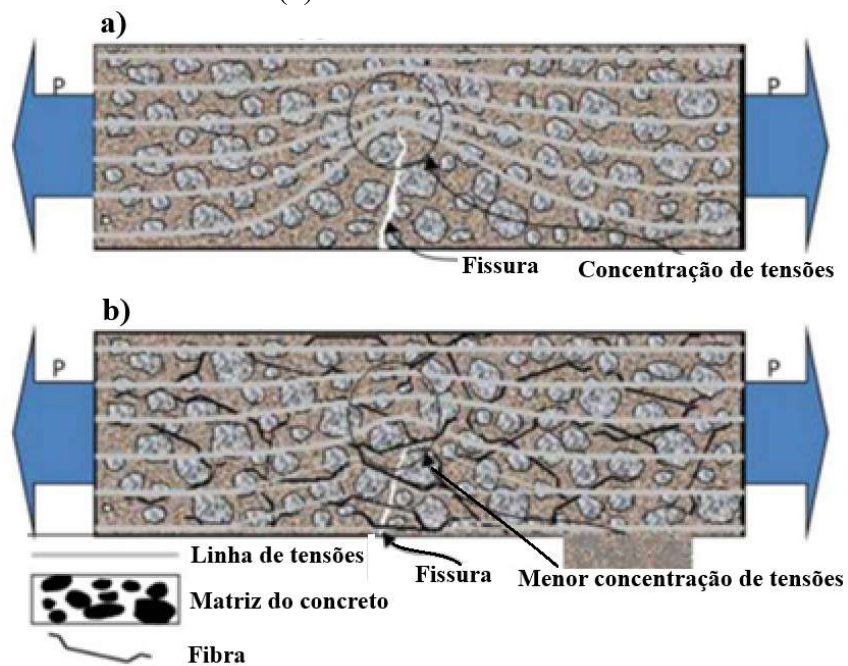


Fonte: (Adaptado ABIPET, 2022).

2.6. EFEITOS DA ADIÇÃO DE FIBRAS DE PET AO CONCRETO

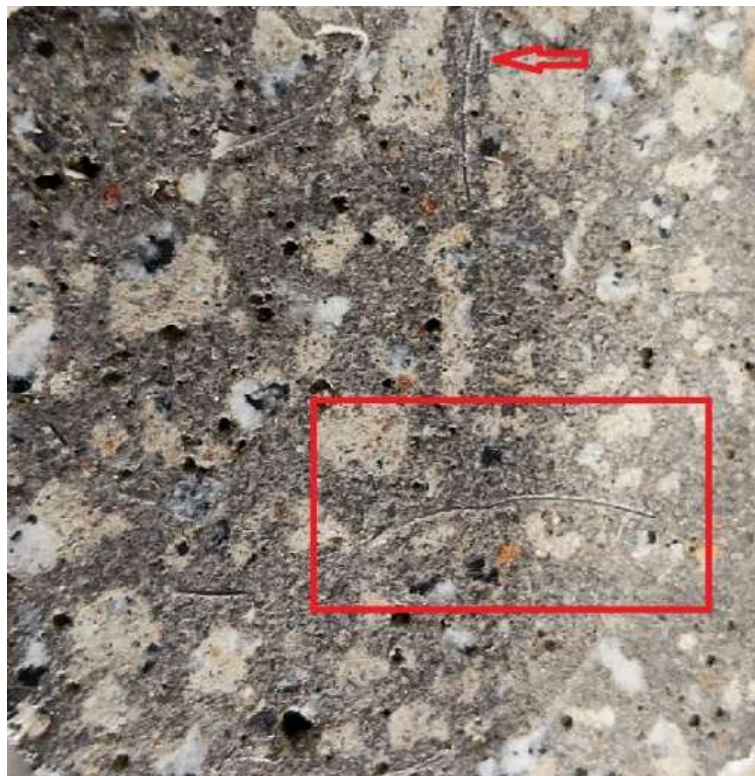
Nas últimas décadas, pesquisas científicas têm evidenciado os benefícios da adição de fibras ao concreto, especialmente em relação à resistência à tração e à ductilidade do material. A ação das fibras é particularmente eficaz na fase pós-fissuração, atuando como elementos de costura que limitam a abertura e a propagação de trincas, promovendo um comportamento mais dúctil e resistente (Kim et al., 2010). A Figura 4 ilustra esquematicamente essa atuação, enquanto a Figura 5 apresenta um caso prático observado em ensaio.

Figura 4: Fissuração em concreto reforçado com fibras (a) concreto sem fibras e (b) concreto com fibras



Fonte: (Adaptado Trindade, 2022).

Figura 5: Efeito de costura da fibra no concreto

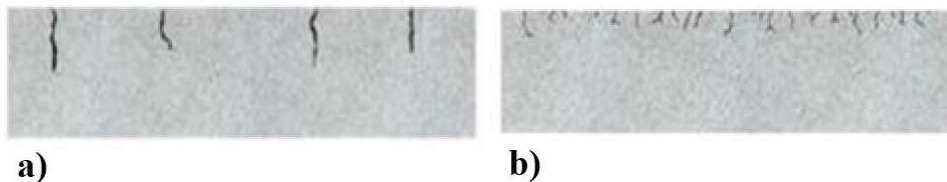


Fonte: Própria

Na fase de secagem e enrijecimento do concreto, ocorrem esforços de retração que favorecem o surgimento de fissuras como pode ser visto na Figura 6

(a) o surgimento de fissuras por retração e (b) a contribuição da adição de fibras para alterar esse padrão, proporcionando melhor distribuição das fissuras, o que favorece a auto selagem e melhora o aspecto superficial da peça (Angulo; Figueiredo, 2011; Bauer, 2000).

Figura 6: Redistribuição de fissuras (a) esforço de retração e surgimento de fissuras e (b) adição de fibras e mudança no padrão de fissuração

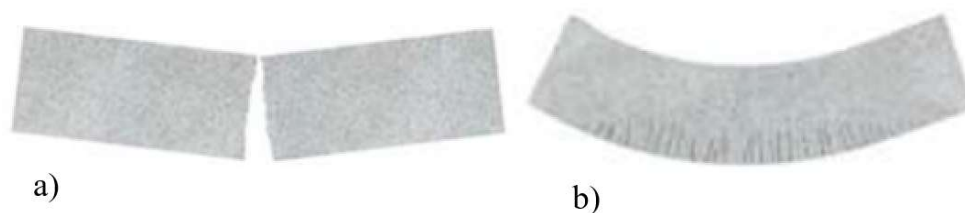


Fonte: Adaptado (SikaFiber®)

A presença das fibras também favorece o comportamento do concreto sob solicitações de cisalhamento. Elas atuam promovendo o intertravamento entre os agregados, redistribuindo as tensões internas e colaborando para retardar ou impedir a propagação das fissuras principais (Angulo; Figueiredo, 2011; Assaad; Khalil; Khatib, 2022). Essa propriedade é especialmente desejável em regiões de risco sísmico, onde estruturas com maior capacidade de deformação são essenciais para absorver energia (Siddique; Khatib; Kaur, 2008).

Dentre os materiais utilizados, destacam-se as fibras de polietileno tereftalato (PET), provenientes da reciclagem de embalagens plásticas. Estudos demonstram que essas fibras conferem ao concreto um comportamento pós-pico mais estável, mantendo a integridade da peça mesmo após a ruptura inicial. Esse efeito decorre da resistência residual proporcionada pelas fibras, que continuam transferindo tensões mesmo após a fissura se iniciar, conferindo resistência residual à matriz (Okabayashi, 2017). Essa diferença de comportamento pode ser visualizada na Figura 7 (a) apresenta o colapso abrupto de uma viga sem reforço, e (b) mostra uma viga com adição de fibras PET, cujo desempenho se assemelha ao de uma viga com armadura convencional.

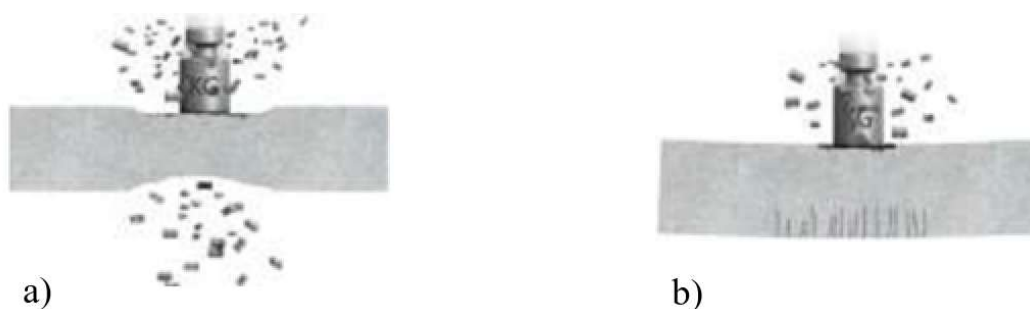
Figura 7: Desempenho da matriz do concreto (a) concreto simples e (b) concreto com fibras



Fonte: Adaptado (SikaFiber®)

O ganho em ductilidade e tenacidade é ainda evidenciado na Figura 8, a) que compara o concreto convencional, frágil e sujeito à ruptura súbita; e b) um concreto com fibras PET, mais resistente e tenaz, com contenção de fissuras e absorção de energia (Kazimbo et al., 2022).

Figura 8: Resistência mecânica do concreto (a) concreto simples e (b) concreto com fibras



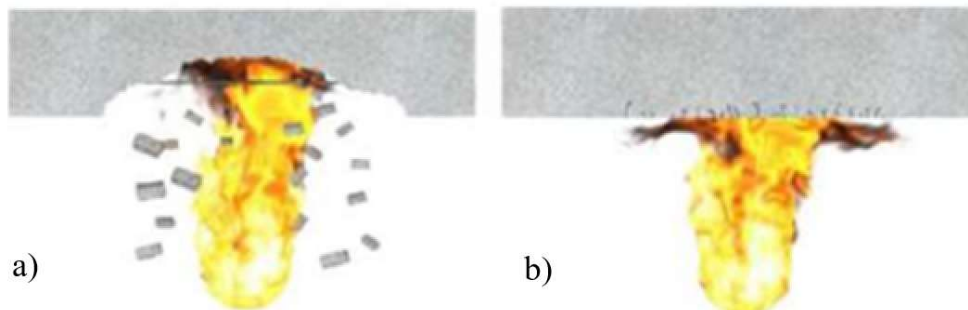
Fonte: Adaptado (SikaFiber®)

Além disso, a adição de fibras PET aumenta a resistência ao impacto e aos choques, especialmente nas regiões mais vulneráveis, como nas bordas das peças. As fibras poliméricas contribuem para essa melhoria, sendo seu desempenho potencializado pela combinação de diferentes módulos de elasticidade (SikaFiber®). Contudo, o uso de teores elevados pode comprometer a trabalhabilidade e aumentar a porosidade da matriz, o que pode afetar negativamente a resistência à compressão (Ghoneim et al., 2020; Foti, 2013).

Outro aspecto relevante é o desempenho do concreto reforçado com fibras PET sob altas temperaturas. Por possuírem baixo ponto de fusão, essas fibras derretem rapidamente em situações de incêndio, criando canais por onde o vapor d'água pode escapar. Esse mecanismo reduz a pressão interna, prevenindo o

deslocamento e contribuindo para a preservação da integridade estrutural (Araújo et al., 2022). A Figura 9 ilustra esse processo de mitigação.

Figura 9: Comportamento do concreto e situação de incêndio (a) concreto simples e (b) concreto com fibras



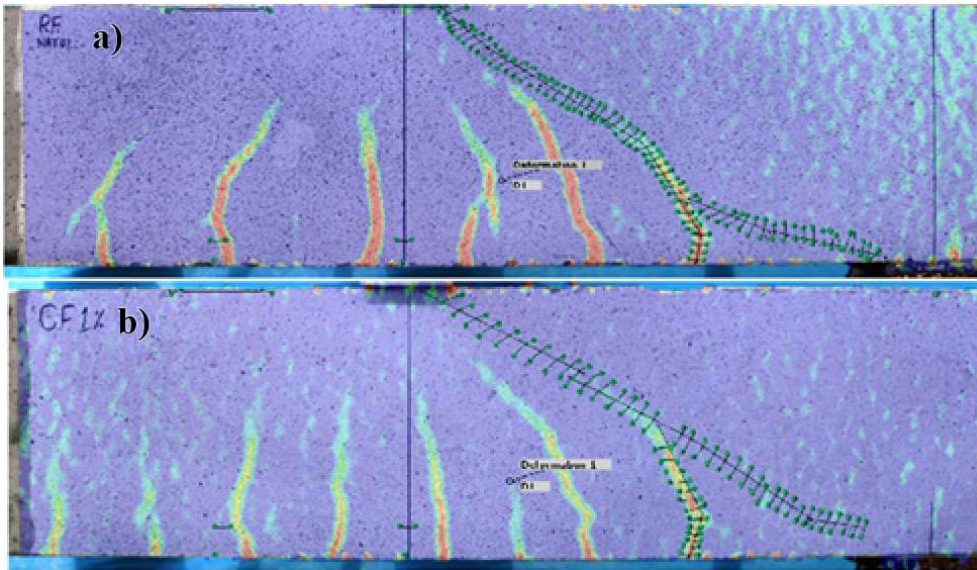
Fonte: (Adaptado SikaFiber®)

No campo estrutural, estudos experimentais mostraram que vigas sem armadura de cisalhamento, mas reforçadas com fibras PET, apresentaram fissuração distinta e suportaram maiores cargas de ruptura, evidenciando a eficácia das fibras na redistribuição de tensões e no aumento da capacidade de carga (Kazimbo et al., 2022; Mwonga; Kabubo; Gathimba, 2023). As Figuras 10 e 11 exemplificam os padrões de fissuração e ruptura observados.

A viabilidade prática da aplicação dessas fibras também foi verificada em contextos internacionais. Pesquisas desenvolvidas no Japão e na Itália comprovaram o bom desempenho térmico e estrutural do concreto com fibras PET recicladas, além da ausência de emissão de gases tóxicos durante a combustão (Ochi; Okubo; Fukui, 2007; Fraternali et al., 2011).

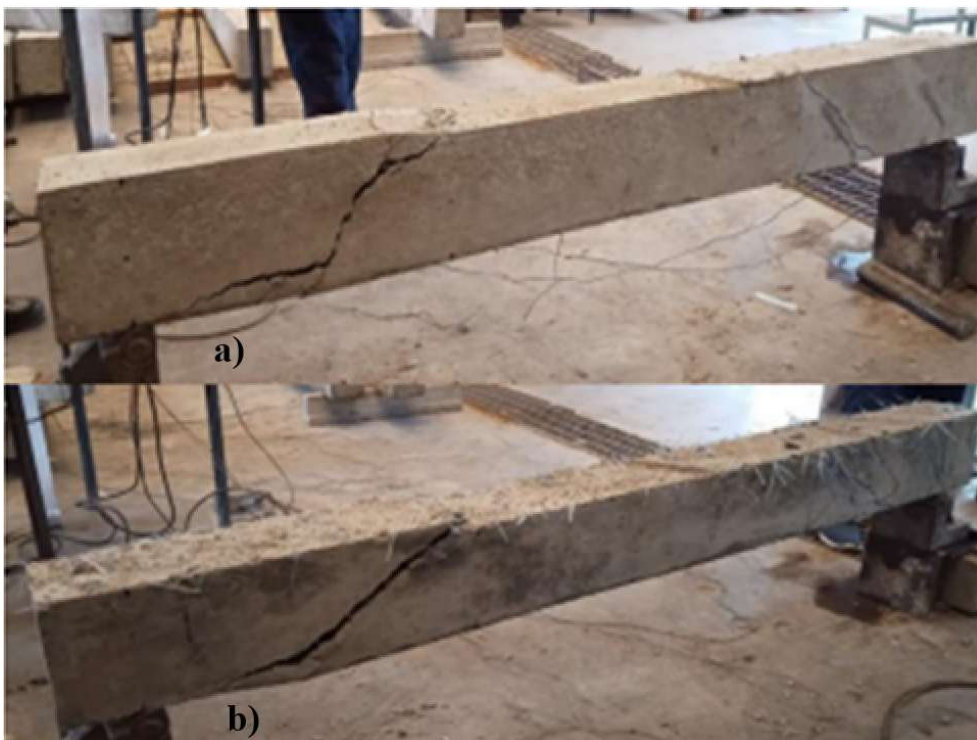
Por fim, além dos ganhos técnicos, a adição de fibras PET reforça o compromisso ambiental da construção civil ao promover o reaproveitamento de resíduos plásticos, reduzir a demanda por materiais naturais e diminuir os impactos ambientais da produção do concreto. Essa abordagem está alinhada com os princípios da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental na engenharia civil contemporânea (Amibo, 2021; Araújo et al., 2022).

Figura 10: Padrões de ruptura das vigas com armadura de cisalhamento (a) concreto sem adição de fibras e (b) concreto com adição de fibras.



Fonte: Própria.

Figura 11: Padrões de ruptura das vigas sem armadura de cisalhamento (a) concreto sem adição de fibras e (b) concreto com adição de fibras.



Fonte: (Adaptado Kazimbo et al., 2022).

Dessa forma, a incorporação de fibras de PET ao concreto representa uma solução viável e ambientalmente responsável, capaz de melhorar o desempenho mecânico, durabilidade e a segurança estrutural das peças, em situações críticas.

2.6.1. Resistência à força cortante de vigas de concreto armado

Segundo Wight e Macgregor (2012) vigas de concreto armado estão sujeitas a momento fletor e força cortante, o surgimento de fissuras iniciais surge quando a tensão de tração ultrapassa a resistência do concreto. A propagação de fissuras ocorre verticalmente devido às trações provocadas pela flexão, mas outras fissuras em diagonal aparecem decorrente da combinação de flexão e cisalhamento, redistribuindo tensões para manter o equilíbrio. A fissura angular crítica ativa os mecanismos resistentes à força cortante.

Para vigas de concreto armado com correlação a/d entre 1,0 e 2,5, a força cisalhante é distribuída de forma parcial através do efeito de arco e por causa dos mecanismos resistentes da fissura angular crítica. No entanto, se a relação a/d for maior que 2,5, o efeito de arco praticamente não tem influência, e a transferência de força cortante depende dos mecanismos resistentes ao longo da fissura principal. A resistência à força cortante é resultado da soma das contribuições do concreto não fissurado, do engrenamento dos agregados, do efeito de pino e dos mecanismos de engrenamento de agregados, o efeito de pino da armadura longitudinal e a resistência residual do concreto. Esta última é pequena, especialmente com fissuras largas, e geralmente desconsiderada pelos pesquisadores (Trindade, 2022).

As proporções relativas de cada componente que contribui para a resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado ainda são objeto de estudo, apesar de conceitos terem sido introduzidos décadas atrás. Vigas com armadura de cisalhamento, estribos ajudam a controlar a abertura das fissuras, potencializando outros mecanismos de resistência (Wight; Macgregor, 2012). A capacidade de uma viga resistir à força cortante depende de diversos fatores, como armadura transversal, altura da linha neutra, e a taxa de armadura longitudinal, além de variáveis como a relação a/d e o tipo de agregado. A complexidade do problema reside na interação entre esses fatores, tornando desafiadora a análise quantitativa da participação de cada mecanismo.

A relação entre o desenvolvimento dos mecanismos resistentes e a cinemática da fissura diagonal crítica, além de sua forma e localização, é um fator que gera divergências na quantificação da transferência de cisalhamento. A compreensão do comportamento dessa fissura demanda métodos de

monitoramento mais avançados e precisos. Métodos tradicionais, como inspeções visuais e medições básicas, têm limitações, dificultando a análise dessas fissuras. Para superar isso, pesquisas recentes adotaram a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID), que permite medir com precisão os deslocamentos e deformações da superfície do concreto, oferecendo uma visão detalhada do comportamento da fissura (Huber; Huber; Kollegger, 2016).

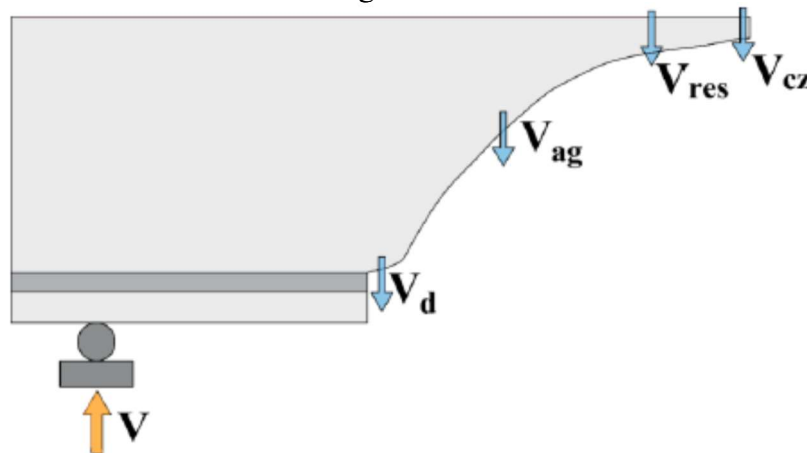
Segundo Huber, Huber e Kollegger (2016), a técnica CID é eficaz para medir o campo completo da cinemática da fissura, rastreando continuamente a fissura diagonal crítica. Isso oferece uma visão mais detalhada do comportamento de vigas de concreto armado sob força cortante, mesmo perto da ruptura. Resende et al. (2019) complementam que a CID permite monitorar a evolução da fissura crítica, bem como a fissuração ao longo da armadura longitudinal e os campos de deformação na zona comprimida. Com isso, a CID proporciona informações essenciais para entender os mecanismos resistentes, superando as limitações das técnicas tradicionais.

De acordo com Trindade (2022), alguns dos principais mecanismos que contribuem diretamente para a resistência à força cortante em vigas de concreto armado, incluem:

- Engrenamento dos agregados: o intertravamento entre os agregados nas faces da fissura, que ajuda a transferir parte da força cortante.
- Efeito de pinos: ação da armadura longitudinal, que atua como pinos atravessando as fissuras e contribuindo para a resistência.
- Resistência à tração residual do concreto: a capacidade residual do concreto de suportar forças de tração, mesmo após a formação de fissuras.
- Concreto comprimido não fissurado: o concreto que permanece comprimido, resistindo ao cisalhamento sem fissuração.
- Armadura transversal: estribos ou armaduras adicionais que resistem diretamente às forças cortantes.

Esses mecanismos, atuando de forma combinada, garantem a resistência da viga à força cortante como mostra a Figura 12 e detalhado no item 2.7.

Figura 12: Forças internas de uma viga sem estribos depois do surgimento da fissura diagonal crítica



Fonte: Adaptado (Resende, 2020)

Na condição fissurada, conforme ilustrado na Figura 1, a resistência à força cortante de vigas de concreto armado sem estribos é dada pela soma da contribuição do concreto comprimido não fissurado (V_{cz}) e dos mecanismos resistentes ao longo da fissura diagonal: o engrenamento dos agregados (V_{ag}), o efeito pino da armadura longitudinal (V_d) e a resistência residual à tração do concreto (V_{res}) (Muttoni; Ruiz, 2008). Segundo Sherwood, (2008), a resistência residual do concreto (V_{res}) é geralmente pequena, especialmente quando as fissuras são largas, razão pela qual muitos pesquisadores a desprezam em seus estudos (Kim; Park, 1996; Wight; MacGregor, 2016).

2.7. MECANISMOS QUE CONTRIBUEM PARA A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Nesta seção são apresentados os principais mecanismos que colaboram para a resistência à força cortante em vigas de concreto armado, destacando-se sua relevância com base em estudos anteriores. A atuação de cada mecanismo está relacionada a variáveis geométricas, mecânicas e estruturais, influenciando diretamente o comportamento das fissuras e a capacidade resistente das estruturas.

2.7.1. Interação Mecânica entre Agregados nas Fissuras

O engrenamento entre os agregados graúdos ocorre quando partículas atravessam uma fissura, transmitindo parte da força cortante por meio do contato entre as superfícies irregulares. Essa interação depende de fatores como a abertura

da fissura, a taxa de armadura, a relação entre o vão e a altura útil da viga, e a rugosidade da superfície de ruptura (Xiao; Xie; Yang, 2012).

Em concretos com agregados reciclados, a presença de argamassa residual e a composição heterogênea tendem a formar interfaces menos resistentes, resultando em menor rugosidade e, conseqüentemente, em menor capacidade de engrenamento. Estudos apontam que o plano de fissura nesses concretos tende a romper a partícula reciclada, o que reduz os pontos de contato e enfraquece esse mecanismo. Ainda assim, a configuração e a inclinação da fissura crítica influenciam significativamente a mobilização do engrenamento, sendo mais efetiva em fissuras inclinadas que favorecem o deslizamento relativo entre as faces (Choi et al., 2010; Sherwood, 2008; Sogo et al., 2004; Xiao; Xie; Yang, 2012).

2.7.2. Ação transversal das barras longitudinais (efeito de pino)

O chamado “efeito de pino” descreve o papel das barras da armadura longitudinal na transferência de força cortante entre as faces das fissuras. Devido à maior rigidez do aço em comparação ao concreto, as barras atuam como elementos de ligação que absorvem parte do esforço cortante, sobretudo em regiões onde a fissuração ocorre próximo a esses elementos (Vintzēleou; Tassios, 1986; Walranen, 1981).

Diversas variáveis influenciam a atuação deste mecanismo, como o diâmetro das barras, a espessura do cobrimento e a resistência do concreto. Sua contribuição é geralmente maior quando há estribos, pois o concreto ao redor da armadura sofre menos fendilhamento. Pesquisas mostram que a proximidade entre a fissura crítica e o apoio também afeta a eficiência do efeito de pino, sendo esta maior quando a fissura se estende até a região de apoio. Para elementos com agregados reciclados, possíveis perdas na resistência do concreto podem impactar negativamente esse mecanismo, principalmente na ausência de estribos (Sherwood, 2008; Xiao; Xie; Yang, 2012), (Baumann; Rüsçh, 1970; Panda; Gangolu, 2017; Sarkar; Adwan; Bose, 1999).

2.7.3. Contribuição do concreto na Resistência Residual à Tração

Mesmo após o início da fissuração, o concreto ainda é capaz de resistir parcialmente às tensões de tração ao longo da fissura, graças à sua resistência residual. Esse mecanismo está concentrado na zona de processamento de fratura, que geralmente se localiza na extremidade superior da fissura, onde a abertura ainda é reduzida (Campana et al., 2013).

Apesar de alguns estudos considerarem sua contribuição desprezível, há evidências experimentais que mostram que a resistência à tração residual pode representar parcela relevante da resistência total à força cortante, principalmente em vigas sem estribos. Em concretos com agregados reciclados, a menor energia de fratura observada nesses materiais pode reduzir a atuação desse mecanismo, embora pesquisas específicas nesse campo ainda sejam escassas (Huber; Kollegger, 2016; Sherwood, 2008; Yang, 2014).

2.7.4. Transferência de Esforço em Zonas de Concreto Comprimido

Além das regiões fissuradas, o concreto ainda pode resistir ao cisalhamento por meio das zonas comprimidas não fissuradas, geralmente localizadas próximas à linha neutra. A capacidade dessa região está associada à resistência à compressão do concreto, às dimensões da seção e às taxas de armadura (Campana et al., 2013; Huber; Kollegger, 2016).

Em vigas sem estribos, essa contribuição pode alcançar valores consideráveis, enquanto em vigas com estribos tende a ser menos expressiva. A geometria e a posição da fissura crítica também impactam diretamente esse mecanismo. Em estruturas com agregados reciclados, possíveis perdas na resistência à compressão do concreto podem comprometer essa atuação, embora ainda sejam necessárias mais investigações para esclarecer esse comportamento (Huber; Kollegger, 2016; Rahal; Alrefaei, 2018).

2.7.5. Influência da Armadura Transversal na Resistência ao Cisalhamento

A armadura transversal, composta normalmente por estribos, tem papel fundamental no aumento da resistência à força cortante em vigas de concreto armado. Sua principal função é interceptar fissuras inclinadas que surgem devido

à ação cortante, proporcionando contenção mecânica e impedindo a propagação descontrolada dessas fissuras (Wight; MacGregor, 2016).

O desempenho da armadura transversal depende de diversos fatores, como a sua taxa de armadura, o espaçamento entre os estribos, a aderência entre o aço e o concreto e a resistência do material. Quando bem distribuída e dimensionada, essa armadura atua como um sistema de travamento das fissuras diagonais, mobilizando esforços de tração nas barras e promovendo um aumento significativo na capacidade resistente da viga (Etxeberria; Marí; Vázquez, 2007).

Estudos experimentais apontam que a contribuição dessa armadura é mais efetiva em fissuras inclinadas de menor abertura e próximas ao apoio. Em situações em que a fissura se desenvolve em ângulo mais fechado ou longe da região de apoio, a atuação da armadura transversal tende a ser menor (Fonteboa, Abella, 2007).

No contexto concreto produzidos com agregados graúdos reciclados, o desempenho da armadura transversal pode ser afetado indiretamente pela qualidade do concreto. Caso a presença desses agregados reduza a resistência à tração ou à compressão do concreto, a transferência de esforços entre aço e concreto poderá ser comprometida, afetando a eficiência da ancoragem dos estribos. Estudos específicos que abordam o tema são escassos e requerem maior aprofundamento (Ignjatović; Marinković; Tošić, 2017; Rahal; Alrefaei, 2018).

2.8. COMPORTAMENTO À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

A análise do comportamento de vigas de concreto armado produzidas com agregado graúdo reciclado, quando submetidas à força cortante, está diretamente ligada a variados fatores, como: Resistência ao cisalhamento, modo de fissuração, padrão de ruptura e ductilidade. Pesquisas evidenciam padrões no comportamento de vigas quando produzidas com agregado reciclado.

Baseado na literatura, o modo de fissuração de vigas compostas por agregado graúdo reciclado normalmente é observado similaridade as vigas convencionais (Arezoumandi et al., 2015; Fathifazl et al., 2009; Sogo et al., 2004). Apesar disto, tendo em destaque as fissuras prematuras, com aberturas maiores orientadas na direção da armadura longitudinal, especialmente em de substituição de 50% de agregados graúdos reciclado (Fonteboa, Abella, 2007). Os

carregamentos no limite ou próximo da força cisalhante última, as vigas que continham agregado graúdo reciclados possuíam uma quantidade mais elevada de fissuras de flexão na parte central quando comparadas as fissuras diagonais críticas, esse valor se eleva com o aumento da proporção de substituição dos agregados reciclados (Choi et al., 2010).

Foi observado que as vigas com AR apresentaram fissuras de cisalhamento maiores e surgimento de diversas fissuras menores entre a fissura principal, em comparação às NAC com armadura transversal e as vigas com agregados naturais apresentaram fissuras mais inclinadas. As vigas que não possuíam armadura transversal as fissuras cisalhantes surgiram a nível de carga semelhante para ambos os agregados (Ignjatović; Marinković; Tošić, 2017).

Algumas pesquisas mostram que o modo de ruptura à força cortante após a fissura diagonal das vigas constituídas com AR foi similar ao das vigas compostas com AN sem estribos, mesmo tendo apresentado capacidade de carga superior (Arezoumandi et al., 2015; Choi et al., 2010; Fathifazl et al., 2009). Na análise destes estudos pode ser observado uma frágil ruptura na direção da fissura principal diagonal, com esmagamento ao redor do ponto de aplicação da carga. Quando adotada armadura transversal, o modo de ruptura foi semelhante nas vigas constituídas com AN e AR (Etxeberria; Marí; Vázquez, 2007; Fonteboa, Abella, 2007; Ignjatović; Marinković; Tošić, 2017b; Rahal; Alrefaei, 2018).

No que se refere à resistência à força cortante, a literatura apresenta resultados divergentes quanto ao comportamento de vigas compostas por agregado reciclado. Alguns estudos indicam que não há diferença significativa na capacidade resistente entre vigas com agregado natural (AN) e vigas com AR (Fonteboa, Abella, 2007; Ignjatović; Marinković; Tošić, 2017; Kim et al., 2010). Por outro lado, outros trabalhos apontam para uma redução na resistência ao cisalhamento quando utilizado AR (Arezoumandi et al., 2015; Choi et al., 2010; Rahal; Alrefaei, 2018). Há ainda estudos que relatam um aumento da resistência ao cisalhamento em vigas com AR em relação às vigas convencionais, especialmente quando determinadas condições de dosagem e tipo de resíduo são consideradas (Fathifazl et al., 2009; Katkhuda; Shatarat, 2016).

Essas variações nos resultados são compreensíveis, considerando que os estudos analisam variáveis distintas, como a porcentagem de substituição do agregado, os tipos de resíduos utilizados e as condições de ensaio. Além disso, as

propriedades físicas do agregado reciclado como a presença de argamassa residual aderida, a massa específica e o índice de absorção de água exercem influência direta sobre o desempenho mecânico do concreto. Portanto, a heterogeneidade do material reciclado e as diferentes metodologias aplicadas nas pesquisas explicam a diversidade dos resultados encontrados na literatura.

Diante dessa diversidade de resultados, diversos estudos experimentais foram analisados para embasar o presente trabalho, com foco no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto contendo agregado reciclado. As pesquisas de Trindade, (2022), Sagheer; Tabsh; Yehia, (2023), Elsayed et al., (2023), Ignjatović; Marinković; Tošić, (2017), Rahal; Alrefaei, 2018, Rahal; Elsayed, (2021), Ghoneim et al., (2020), Tabsh; Yehia, (2018), Cardoso et al., (2021), contribuíram significativamente para a compreensão dos efeitos da substituição do AN por reciclado no desempenho estrutural e resistência ao cisalhamento.

Todos os estudos analisados foram realizados com carregamento para ensaio ao cisalhamento em três e quatro pontos, até a ruptura de vigas em escala real, com variáveis da porcentagem de substituição do agregado e dimensões da peça.

O comportamento ao cisalhamento de vigas com AR pode ser explicado através dos dados de ensaio realizados, que contribuem para a definição de parâmetros que investigam o comportamento de vigas com AR, aumentando assim a confiabilidade dos modelos. A Tabela 1 mostra as principais características e principais resultados de alguns estudos que apresentam relação com esta pesquisa.

Observa-se uma redução significativa na resistência ao cisalhamento quando o agregado graúdo natural é substituído parcial ou totalmente por agregado graúdo reciclado. Essa fragilidade tem motivado diversas pesquisas que buscam soluções para mitigar essa perda de desempenho estrutural.

Os estudos analisados foram fundamentais para o direcionamento desta pesquisa, influenciando tanto na definição da dosagem do concreto quanto no dimensionamento da armadura utilizada. Entre eles, destaca-se o trabalho de Trindade (2022), que serviu como principal referência. No entanto, não foram encontrados estudos que utilizem fibras de PET como reforço no concreto com RCD com o objetivo específico de melhorar a resistência ao cisalhamento. Essa lacuna na literatura foi determinante para a escolha do tema e dos objetivos desta pesquisa.

Tabela 1 - Resumo do comportamento ao cisalhamento de vigas preparadas com AR

Referência	Característica do material e das amostras	Principais resultados
(Trindade, 2022)	R% = 0, 50% e 100%, doze vigas com AR, carga em quatro pontos, 150 × 300 mm, L = 2.000 mm, 35 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resulta num impacto adverso na capacidade, tenacidade, rigidez inicial e ductilidade das vigas testadas apresentando uma redução média de 24% no esforço cortante
(Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023)	R% = 0, 50% e 100%, doze com AR, carga em quatro pontos, 150 × 300 mm, L = 1.500 e 2.000 mm, 25 e 35 MPa.	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resulta num impacto adverso nas vigas analisadas, as vigas que foram submetidas a carga de 25 MPa superou a referência em 12,5%, já as que receberam carga de 35 MPa apresentando uma redução de 12,5 e 17,5% no esforço cortante.
(Elsayed et al., 2023)	R% = 0 e 100%, cinco vigas AR, carga em quatro pontos, 120 × 250 mm, L = 2.000 mm (vão = 1.800 mm), W/C = 0,5, f = 24,5–29,7 MPa, fy = 282– 383 MPa.	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resulta num impacto adverso na capacidade, tenacidade, rigidez inicial e ductilidade das vigas testadas. A capacidade de carga das vigas (VAR) foi melhorada com a adição de resíduos de fibra de alumínio.
(Ignjatović; Marinković; Tošić, 2017b)	R% = 0, 50% e 100%, Nove (85 vigas) vigas com AR, carga em quatro pontos, 200 × 300 mm, L = 3.500 mm, 40 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição total de AN por AR resulta num impacto similar na resistência ao cisalhamento, na e pequena perda de resistência a compressão, das vigas testadas.
(Rahal; Alrefaei, 2018)	R% = 0, 20 e 100%, dezoito vigas com AR, carga em quatro pontos, 150 × 420 mm, L = 2.900 mm, 40 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resultaram na redução da resistência ao cisalhamento de 5 à 9% das vigas testadas.
(Rahal; Elsayed, 2021)	R% = 0, 10, 20, 35, 50, 75 e 100%, sete vigas com AR, carga em quatro pontos, 150 × 420 mm, L = 2.900 mm, 50 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resultaram na falha de todas as vigas ao cisalhamento e perda de resistência a compressão, das vigas testadas.
(Ghoneim et al., 2020)	R% = 100%, oito vigas com AR, carga em quatro pontos, 150 × 200 mm, L = 1.600 mm, 40 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resultaram em uma discreta perda de resistência das vigas ao cisalhamento e perda de resistência a compressão, das vigas testadas.
(Tabsh; Yehia, 2018)	R% = 0, 50% e 100%, Três vigas com AR, carga em três pontos, 150 × 300 mm, L = 1.500 mm, 35 MPa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resultaram em uma discreta perda de resistência das vigas ao cisalhamento e perda de resistência a compressão, das vigas testadas.
(Cardoso et al., 2021)	R% = 0, 30% e 100%, seis vigas com AR, carga em três pontos, 180 × 280 mm, L = 2.200 mm, 50 Mpa	Os resultados do estudo indicaram que a substituição de AN por AR resultaram em uma significativa perda de resistência das vigas com substituição de 30%, nas vigas de 100% de substituição houve uma discreta redução, similar à de referência, na resistência ao cisalhamento.

Fonte: Própria

2.9. COMPORTAMENTO À FORÇA CORTANTE DE VIGAS COM CONCRETO ENRIQUECIDO FIBRAS DE PET

As pesquisas analisadas indicam que o concreto com agregado reciclado (RAC) ainda apresenta certas limitações quando empregado em elementos estruturais, principalmente no que se refere à resistência ao cisalhamento e à ductilidade, que são inferiores às observadas no concreto convencional. Diante dessas restrições, torna-se necessário incorporar a mistura de concreto materiais que são capazes de melhorar seu desempenho estrutural.

Nesse cenário, a adição de fibras tem se mostrado uma alternativa promissora. Diversos pesquisadores (Araújo et al., 2022; Assaad; Khalil; Khatib, 2022; Bhagwat et al., 2023; Dawood; AL-Khazraji; Falih, 2021) destacam o uso de fibras como um recurso eficaz para o aumento da resistência do concreto. Segundo Dawood; AL-Khazraji; Falih, 2021, a presença de fibras no concreto contribui significativamente para o controle da fissuração e para a redução da propagação dessas descontinuidades.

As fibras atuam como elementos de reforço, impondo restrições à abertura e ao crescimento de fissuras. Além disso, funcionam como pontes de transferência de esforços entre as faces das fissuras, absorvendo parte das solicitações aplicadas e conferindo ao concreto uma capacidade resistente mesmo após o início do processo de fissuração, tornando a ruptura mais gradual e progressiva (Kazimbo et al., 2022).

Algumas pesquisas mostram resultados satisfatórios ao se adicionar fibras PET em vigas de concreto, influenciando no modo de ruptura da força cortante para flexão. Entretanto, para vigas projetadas para romper ao cisalhamento, não muda o modo de ruptura das vigas, apresentando resultados similares ao da viga de controle. Nesta pesquisa, foram analisados os resultados de estudos de vigas projetadas para falhar ao cisalhamento, quando fibras PET são introduzidas em sua composição, a análise dos resultados foram resumidas na Tabela 2 (Mwonga; Kabubo; Gathimba, 2023, Ullah Khan; Ayub, 2020, Assaad; Khalil; Khatib, 2022, Kim et al., 2010, Kazimbo et al., 2022, Mohammed Ali, 2021, Neckel, 2022).

Com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de vigas de concreto reforçado com fibras sob esforço cortante, propõe-se uma abordagem inspirada nos critérios desenvolvidos por Ozcebe; Ersoy; Tankut, (1999) para armaduras

mínimas. Nesse contexto, uma adaptação do parâmetro V_u/V_c onde V_u representa a força cortante última e V_c a contribuição resistente do concreto, conforme a equação do ACI-318 (1995) pode ser aplicada como um indicativo da eficácia das fibras em prover resistência residual. Assim como no critério original, adota-se que valores de $V_u/V_c \geq 1,5$ sinalizam um comportamento pós-fissuração satisfatório, indicando que o reforço por fibras foi capaz de garantir desempenho estrutural adequado mesmo após a fissuração.

Outro indicador relevante é o índice de ductilidade, obtido pela razão entre o deslocamento vertical no centro do vão no instante da ruptura (Δ_u) e o deslocamento no instante da fissuração (Δ_{cr}). Com base na proposta original, assume-se que o reforço por fibras garante ductilidade adequada quando $\Delta_u/\Delta_{cr} \geq 2,5$. No entanto, considerando adaptações para compósitos com fibras, esse limite pode ser ajustado, como sugerido por Garcia, (2002), para $\Delta_u/\Delta_{cr} \geq 2,0$, de forma a refletir a natureza diferenciada do comportamento não-linear induzido por fibras, indicariam que o teor de fibras empregado apresenta desempenho equivalente de reforço transversal, caracterizando-se como suficiente para garantir estabilidade pós-fissuração e ductilidade progressiva ao elemento estrutural.

Tabela 2: Resumo do comportamento ao cisalhamento de vigas reforçadas com fibra de PET

Referência	Característica do material e das amostras	Dados importantes
(Ullah Khan; Ayub, 2020)	R% = 0 e 1%, seis vigas com fibras de PET (2 controles, 2 fibras e 2 tiras), carga de quatro pontos, 100 × 200 mm, L = 1.800 mm, 30, 45, 60 e 75 MPa. Dimensões das fibras e tira 10 x 0,8 mm L 50 e 1900 mm	Os resultados analisados mostraram que houve aumento na capacidade de carga, aumento na ductilidade e mudança no modo de ruptura. Apresentou comportamento semelhante aos estribos de aço, podendo ser usado como armadura de cisalhamento.
(Mwonga; Kabubo; Gathimba, 2023)	R% = 0 e 1,25%, oito vigas com fibras de PET, carga de quatro pontos, 150 × 250 mm, L = 2000 mm, 40 MPa. Dimensões das fibras e tira 2 x 75 mm.	Os dados do ensaio mostraram aumento na carga última de 4,1% à 5,82%, houve melhora na ductilidade, mudança no modo de ruptura, aumento na deformação compressiva e tração do concreto, acompanhado das reduções de deformação de cisalhamento e do aço. Discreta melhora no desempenho final.
(Assaad; Khalil; Khatib, 2022)	R% = 0 e 1,5, 3 e 4,5%, dez vigas com fibras de PET, carga de quatro pontos, 150 × 150 mm, L = 780 mm, 35 MPa. Dimensões das fibras trituradas eram irregulares e variaram entre 1mm a 6 mm.	Na análise dos dados foi observado que houve um aumento da resistência, já nas substituições de 3 e 4,5% teve queda na resistência a compressão, nas substituições de 1,5 e 3% houve melhora na resistência ao cisalhamento devido ao mecanismo de intertravamento do agregado, na proporção de 4,5% teve queda na resistência ao cortante.
(Kim et al., 2010)	R% = 0 e 0,5, 0,75 e 1%, quatro vigas com FPET, carga de quatro pontos, 200 × 300 mm, L = 2000 mm, 30 MPa. Dimensões das fibras 0,2 x 1,3 mm, L = 50mm.	Os resultados apresentam aumento na resistência a tração e retardo na formação de microfissuração, além de aumento na ductilidade e da resistência máxima na substituição dos 5% que reduzia conforme aumentava a proporção de substituição.
(Kazimbo et al., 2022)	R% = 0 e 1,5%, quatro vigas com fibras de PET, carga de quatro pontos, 200 × 150 mm, L = 2000 mm, 42,5 MPa. Dimensões das fibras 4 x 100 mm, L = 50mm.	As amostras ensaiadas mostraram aumento na ductilidade de 4,8 à 6,3%, aumento da capacidade de cisalhamento e crescimento do número de fissuras, aumento da carga última e deflexão, redução da espessura das fissuras. Foi observado que as fibras adicionadas a mistura afetaram o padrão de ruptura e aumento da tensão de tração.
(Mohammed Ali, 2021)	R% = 0, 0,5, 0,75, 1, 1,25 e 1,5%, seis vigas com fibras de PET, carga de quatro pontos, 120 × 150 mm, L = 1100 mm, 40 MPa. Dimensões das fibras 0,37 x 1,5 mm, L = 25mm.	A análise dos dados obtido através dos ensaios apresentou melhora 1,25% a 11% na capacidade de cisalhamento para a substituição de 1% e 43,5% na substituição de 1,25%, foi observado mudança no modo de ruptura de cisalhamento para flexão. Aumento da ductilidade e deflexão.
(Neckel, 2022)	R% = 0, 1,5 e 3%, três vigas com fibras de PET, carga de três pontos, 100 × 200 mm, L = 1000 mm, 50	O trabalho apresentou aumento na resistência a compressão de 2,91%, aumento do módulo de elasticidade, discreta perda de resistência a tração e

MPa.	Dimensões das fibras L = 50mm.	ganho de resistência ao cisalhamento de 9,07% para a proporção de 1%. Já o volume de 3% teve perda na resistência a compressão, considerável perda de resistência a tração e ganho de resistência ao cisalhamento de 16,97%.
------	--------------------------------	--

Fonte: própria

2.10. DESEMPENHO MECÂNICO DE VIGAS COM AGREGADO RECICLADO E A CONTRIBUIÇÃO DAS FIBRAS DE PET NO REFORÇO DO CONCRETO

Em 1977 Frondistou-Yannas realizou um estudo comparativo entre as propriedades mecânicas do concreto contendo agregado reciclado em comparação do concreto com agregado natural, ao substituir o agregado natural pelo AR, seus achados indicaram que o desempenho mecânico do concreto reciclado foi mais compatível com o concreto convencional quando este foi enriquecido com brita em detrimento da argamassa. O concreto contendo agregado reciclado apresentou um desempenho de inferior, 24% da resistência a compressão e um módulo de elasticidade de 60% a 100% quando comparado com a mistura de referência (Frondistou-Yannas, 1977).

Diante das limitações observadas no desempenho mecânico do concreto com agregado reciclado, especialmente em relação à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade, diversas estratégias têm sido investigadas com o intuito de mitigar essas deficiências e melhorar o comportamento estrutural do material. Entre essas estratégias, destaca-se a incorporação de fibras ao compósito, com o objetivo de aumentar a sua tenacidade através da reserva de resistência e garantir maior estabilidade mesmo após o surgimento de fissuras.

Esta capacidade adicional que um elemento estrutural apresenta de resistir a esforços mesmo após o início da fissuração do concreto é atribuída a reserva de resistência. Em concretos reforçados com fibras (CRF), essa reserva é proporcionada pela atuação das fibras como elementos de transferência de tensões entre as faces das fissuras, conferindo ao compósito um comportamento mais estável e resistente após a fissuração (ACI 544.1R, 1996).

Conforme destacado por Banthia; Sappakittipakorn (2007), após o surgimento das fissuras, a matriz cimentícia convencional perde a capacidade de resistir a tração direta, e as fibras passam a suportar parte das cargas aplicadas,

evitando a propagação brusca das fissuras e retardando o colapso estrutural. Esse mecanismo de atuação é conhecido como ponte de tensão (*bridging mechanism*), no qual as fibras mantêm a coesão do material e garantem uma resposta estrutural mais dúctil.

A ACI 544.1R, (1996) também ressalta que essa reserva de resistência está fortemente relacionada à quantidade, orientação, comprimento e propriedades mecânicas das fibras, bem como à qualidade da aderência fibra-matriz. Quanto maior for essa eficiência, maior será a contribuição das fibras para a estabilidade pós-fissuração do elemento. Portanto, a reserva de resistência promovida pelas fibras não apenas melhora a capacidade resistente residual do concreto, como também proporciona maior ductilidade e controle da fissuração, características essenciais para estruturas sujeitas a ações dinâmicas, impacto ou carga repetida (Bencardino et al., 2010).

A ductilidade é uma propriedade fundamental em elementos estruturais de concreto, especialmente quando se busca garantir segurança e desempenho após a fissuração. Em termos simples, a ductilidade refere-se à capacidade de um material ou elemento estrutural de sofrer grandes deformações antes da ruptura.

No caso do concreto com agregado reciclado, que tende a apresentar comportamento mais frágil, a adição de fibras tem se mostrado eficiente para aumentar a ductilidade, promovendo uma ruptura mais progressiva e controlada. Estudos como o de Garcia (2002) indicam que, para que uma viga de concreto seja considerada suficientemente dúctil, a razão entre o deslocamento no instante da ruptura (Δ_u) e o deslocamento no momento da fissuração (Δ_{cr}) deve ser igual ou superior a 2,0, valor frequentemente utilizado como critério mínimo em pesquisas envolvendo reforço.

A tenacidade, por sua vez, está relacionada à capacidade de absorção de energia de um material até sua ruptura, e é expressa pela área sob a curva carga \times deslocamento. Em concretos com fibras, a tenacidade é um dos principais indicadores da eficiência do reforço, já que representa a energia dissipada após a formação de fissuras. Concretos reforçados com fibras tendem a apresentar maior área sob a curva, o que demonstra sua capacidade de suportar esforços mesmo após o início da falha. Segundo ACI 554.1R (1996), o aumento da tenacidade está diretamente associado ao tipo, comprimento e volume de fibras utilizadas, sendo uma característica desejável para elementos submetidos a solicitações dinâmicas

ou de impacto, e ainda mais importante quando se utiliza agregados reciclados com menor desempenho mecânico inicial.

Já os parâmetros do cortante de fissuração (V_{cr}) e cortante de ruptura (V_u) referem-se, respectivamente, ao valor da força cortante no instante da fissuração inicial e no momento da ruptura final do elemento estrutural. A diferença entre esses dois valores reflete o quanto a viga consegue resistir após o início da fissuração, sendo, portanto, um indicativo direto da reserva de resistência fornecida pelo reforço, seja ele por armadura transversal ou fibras. O estudo de Venkatesan; Palanisamy e Pandiyan, (2020) observou que, em vigas com fibras, há um ganho considerável no valor de V_u em relação a V_{cr} , evidenciando o efeito pós-fissuração promovido pelas fibras. Espera-se, portanto, que materiais com maior tenacidade e ductilidade apresentem uma diferença significativa entre V_{cr} e V_u , sendo este comportamento desejável em elementos estruturais mais resilientes e seguros

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O programa experimental desenvolvido neste estudo teve como objetivo avaliar o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado produzidas com agregado graúdo reciclado de concreto e reforçadas com diferentes dosagens de fibras de PET reciclado. Os parâmetros adotados para a definição das variáveis experimentais foram estabelecidos com base nos dados apresentados na Tabela 1 a substituição dos agregados e na Tabela 2, que reúne informações obtidas em estudos prévios e serviu de referência para a escolha das proporções de adição das fibras. A partir desses critérios, foi possível estruturar a investigação de forma a analisar o desempenho estrutural das vigas frente à força cortante.

As variáveis adotadas no estudo foram:

- Teor de fibras PET: 0%, 0,5%, 1% e 1,25% em relação ao volume de concreto, com a finalidade de investigar o efeito da adição dessas fibras na resistência ao cisalhamento das vigas;
- Tipo de agregado graúdo: substituição total (100%) do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto.

Com base nas variáveis propostas, foram elaboradas cinco vigas de concreto armado, visualizado na Tabela 3.

Tabela 3: Nomenclatura das vigas de acordo com proporção de adição de fibras e substituição dos agregados nos concretos.

Nomenclatura	Vigas		
	NA (%)	AR (%)	Fibra (%)
NAT 0%	100	-	-
CAR 0%	-	100	-
CF 0,5%	-	100	0,5
CF 1%	-	100	1
CF 1,25%	-	100	1,25

Para facilitar a identificação durante os ensaios e análises, as vigas foram diferenciadas por cores (cinza, azul, rosa, verde e coral, respectivamente).

A metodologia experimental envolveu a produção dos concretos, moldagem das vigas, cura, instrumentação e execução de ensaios laboratoriais voltados à avaliação da resistência ao cisalhamento. A Figura 13 apresenta o fluxograma geral da metodologia empregada, dividida em etapas sucessivas para a obtenção e análise dos resultados.

Figura 13: Fluxograma da metodologia



Fonte: Própria

3.2.MATERIAIS

Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica em nos materiais empregados na fabricação das vigas de concreto armado. A Tabela 4 apresenta a relação dos materiais utilizados nos concretos produzidos nesta pesquisa.

Tabela 4: Materiais usados na pesquisa

Imagem	Material	Descrição	Fonte
	Cimento Portland CP V ARI e CII	Cimento de alta resistência inicial, utilizado nas vigas e CII usado para produção dos AR.	própria
	Água potável	A água utilizada foi da concessionária Águas do Paraíba, empresa responsável pelo abastecimento local de Campos dos Goytacazes.	própria
	Agregado miúdo	Areia extraída de maneira local do leito do Rio Paraíba do Sul, empregada como agregado miúdo.	própria
	Agregado graúdo reciclado	Proveniente de resíduos de concreto com resistência de 20 MPa. Granulometria similar a brita tipo 0.	própria
	Agregado graúdo natural	O agregado graúdo natural usou-se brita granítica tipo 0 de uma pedreira local.	própria
	Fibra de PET reciclado	Fibras manufaturadas extraídas de embalagens PET de um único tipo e coloração.	própria
	Aditivo Superplastificante	Aditivo da marca Glenium® 51 de terceira geração fabricado por BASF S.A.	própria

Fonte: Própria

3.2.1. Aditivo

Foi empregado o aditivo Superplastificante para fabricação dos concretos da marca Glenium® 51 de terceira geração fabricado por BASF S.A. Tendo este aditivo uma base química de éter carboxílico alterado. Este aditivo age espalhando o material cimentício, proporcionando uma melhor homogeneização e uma significativa redução na quantidade de água necessária, isso gerando um concreto com maior trabalhabilidade e sem comprometer o tempo de endurecimento.

3.2.2. Armaduras

Nesta pesquisa foram empregadas barras de aço nervuradas CA-50 e CA-60 de alta aderência para fabricação das armaduras longitudinais, com diâmetro nominal de 16 mm e 6,3mm e para os estribos que constituem a armadura transversal foram utilizadas barras de 5 mm.

Foi realizado o ensaio à tração em três amostras das barras de 16 mm, conforme a NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2015), o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

3.3. MÉTODOS

Para a execução do estudo foi necessário fabricar o concreto para a produção do agregado reciclado, para que deste modo houvesse uma resistência definida e precisão na coleta dos dados.

3.3.1. Correlação de imagem digital

Para a análise do processo de fissuração das vigas e dos corpos-de-prova que foram submetidos aos ensaios mecânicos, foi utilizada a técnica de Correlação de Imagem Digital, que é originário do inglês Digital Image Correlation (DIC). O método consiste na captação e na mensuração da deformação através de uma técnica óptica que é capaz de medir deformações sem que haja a necessidade de quais quer tipo de contato com a superfície, é um método não invasivo, se fazendo necessário somente o prepara da superfície com pintura, este sistema fornece dados de deformação e deslocamentos através da comparação de imagens digitais em seus estados não deformado e deformado (Pan et al., 2009).

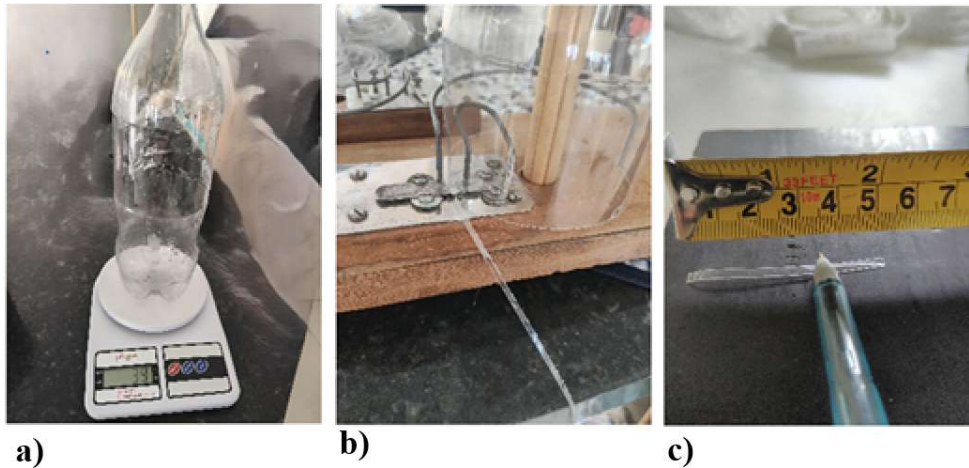
O sistema de correlação de imagens digitais analisa uma sequência de imagens capturadas durante o ensaio realizado, onde é capaz de registrar os períodos antes, durante e depois da deformação gerada no corpo de prova. Após o preparo da superfície da área delimitada para a realização da análise, são criados conjuntos de pixels, através de pontos criados com tinta preta e fosca. Através dos conjuntos de pontos é possível calcular os deslocamentos em cada ponto. A movimentação de pontos demarcados e rastreado e correlacionando com as imagens de referência em todo processo que antecede a deformação e o pós deformação. (Yao et al., 2015).

A captura das imagens para a análise via CID foi realizada com uma câmera digital Canon EOS Rebel T7, equipada com lente EF-S 18–55mm, operada pelo software digiCamControl. Durante os ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos e os ensaios de flexão das vigas de concreto armado, o software foi programado para capturar uma imagem a cada 4 segundos, enviando-as automaticamente para o computador. A análise das imagens, bem como a avaliação da abertura de fissuras, deformações e deslocamentos, foi conduzida com o auxílio do software GOM Correlate®, da empresa Zeiss Inspect.

3.3.2.Confecção das fibras de PET

Para o processo de confecção das fibras de PET foram utilizadas garrafas recicladas de 2 litros de Coca-Cola; foi realizada a higienização e secagem em ar ambiente; após secas, foram filetadas em tiras de $2\text{ mm} \pm 0,5\text{mm}$ em um processo manual, conforme ilustra a Figura 14; após o processo de filetar as garras, realizou-se cortes com 50mm de comprimento.

Figura 14: Confeção de fibra de PET (a) garrafa higienizada, (b) confecção das fibras e (c) dimensão da fibra.



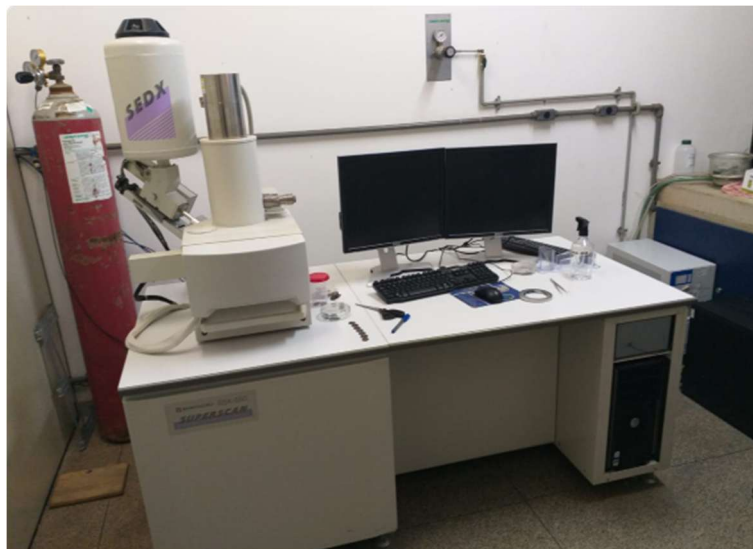
Fonte: Própria

3.3.3. Caracterização das fibras de PET

3.3.3.1. Microscopia eletrônica de varredura

Com o intuito de analisar as características morfológicas microestruturais das fibras de PET, para este fim realizou-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a realização deste ensaio foi utilizado um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550 visto na Figura 15, operado a 20 kV, que gerou as micrografias no Laboratório de Materiais Avançados da UENF, as amostras foram metalizadas como visualizado na Figura 16.

Figura 15: Microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, LAMAV.



Fonte: Própria

Figura 16: Processo de aplicação da metalização nas amostras



Fonte: Própria

3.3.3.2. Caracterização dimensional

A caracterização dimensional das fibras foi realizada de forma manual com o auxílio de um paquímetro digital, onde foram mensuradas 50 amostras e calculado a média.

3.3.3.3. Ensaio de tração

O ensaio de tração nas fibras de PET analisou o deslocamento causado pelo carregamento de tração com célula de carga e utilizado transdutores de deslocamento linear (LVDT).

O resultado do ensaio de tração pode ser visto na Figura 17 a) ensaio de tração e b) fibra após ensaio. Foi utilizado a máquina universal INSTRON 5582 no LAMAV no campus da UENF.

Figura 17: (a) Ensaio de tração e (b) Rompimento da fibra



Fonte: própria

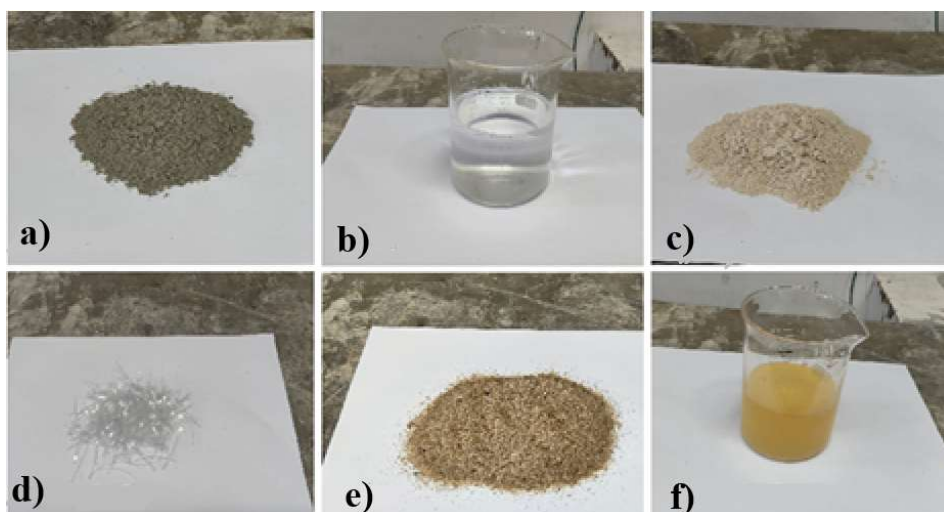
3.3.3.4. Ensaio de PULL-OUT

Para analisar o comprimento crítico e tensão cisalhante interfacial entre a fibra de PET e a matriz cimentícia, foi realizado o ensaio de escorregamento PULL-OUT, que caracteriza os aspectos de desempenho do concreto reforçado com fibra de PET e a eficácia da ligação interfacial.

O ensaio avaliou a aderência da fibra a matriz cimentícia, consistiu em um teste de arrancamento, onde foi avaliado o tamanho efetivo a ser utilizado como reforço. O experimento foi realizado no laboratório LAMAV no campus da UENF, por meio da máquina universal INSTRON 5582.

A fibra foi preparada nas dimensões de $2 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de largura, $0,25 \text{ mm}$ de espessura, foram adotados 4 tamanhos de embutimento, nas dimensões 20, 30, 40 e 50mm. A organização do método experimental envolveu o preparo dos moldes e das fibras. Os moldes foram confeccionados com tubos de PVC e fixados com parafusos em sua base, permitindo a ancoragem ao equipamento de ensaio. As fibras foram cortadas em tiras de mesmo comprimento, variando apenas quanto ao comprimento de embutimento. Em seguida, foi preparada uma argamassa com resistência aproximada 45 MPa. Os materiais utilizados para a realização da moldagem da matriz e embutimento das fibras são visualizados na Figura 18, enquanto a dosagem da argamassa é apresentada na Tabela 5. Após o preparo, os moldes foram preenchidos com a argamassa, realizando-se o embutimento das fibras conforme os comprimentos previamente definidos. Foram moldadas três amostras para cada comprimento de embutimento analisado.

Figura 18: Materiais utilizados na montagem do ensaio PULL-OUT (a) cimento, (b) água, (c) Metacaulin, (d) fibra PET, (e) areia e (f) superplastificante.



Fonte: Própria

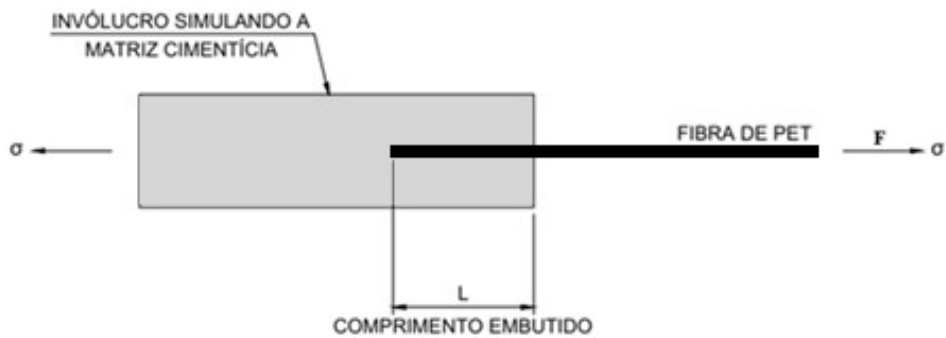
Tabela 5: Dosagem da matriz

Dosagem da matriz	(Kg/m ³)
Cimento Portland CPV	543,134
Metacaulin	362,089
Areia	905,223
Água	353,037
Superplastificante	9,052

Fonte: Própria

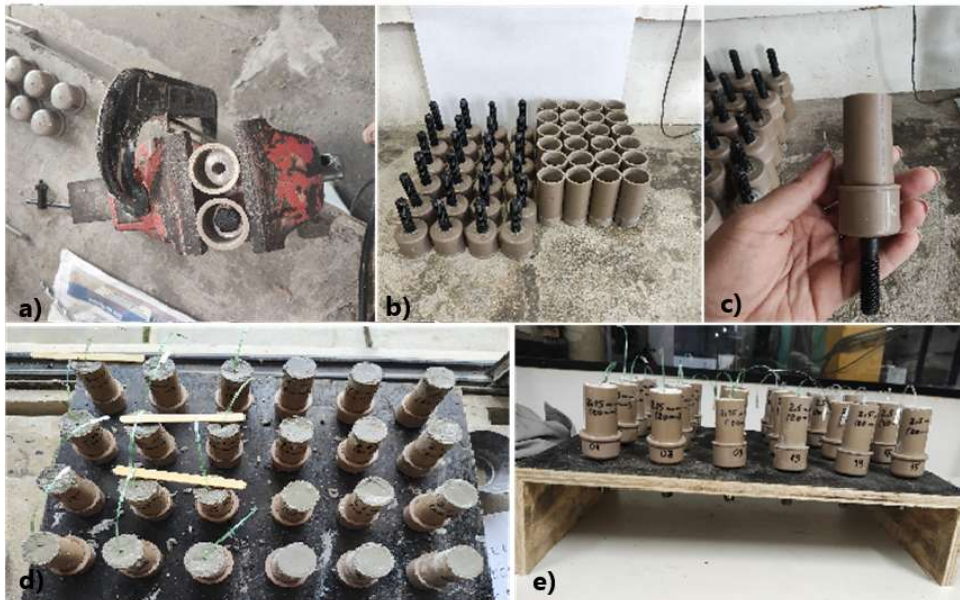
A Figura 19 apresenta o esquema do ensaio PULL-OUT, já as dimensões e preparo do ensaio podem ser visto na Figura 20 pode ser visualizado a execução, onde foram inseridas em moldes e após foram fixadas as fibras na base do molde e a introdução da matriz cimentícia em quantidade mínima para o comprimento de embutimento.

Figura 19: Esquema de ensaio de PULL-OUT



Fonte: Própria

Figura 20: Preparo do método (a) furo para acoplar parafuso no cap, (b) Corte tubo pvc no tamanho determinado, (c) colagem do tubo no cap, (d) fixação da fibra na matriz e (e) secagem da matriz.



Fonte: própria

Os corpos de prova foram compostos pelas fibras nas dimensões já estabelecidas, de forma a determinar as dimensões favoráveis que melhor caracterize a eficiência da interface fibra-matriz.

Na Figura 21 pode ser observado a realização do ensaio (a) e (b) o escorregamento da fibra.

Figura 21: Ensaio PULL-OUT (a), escorregamento da fibra (b)



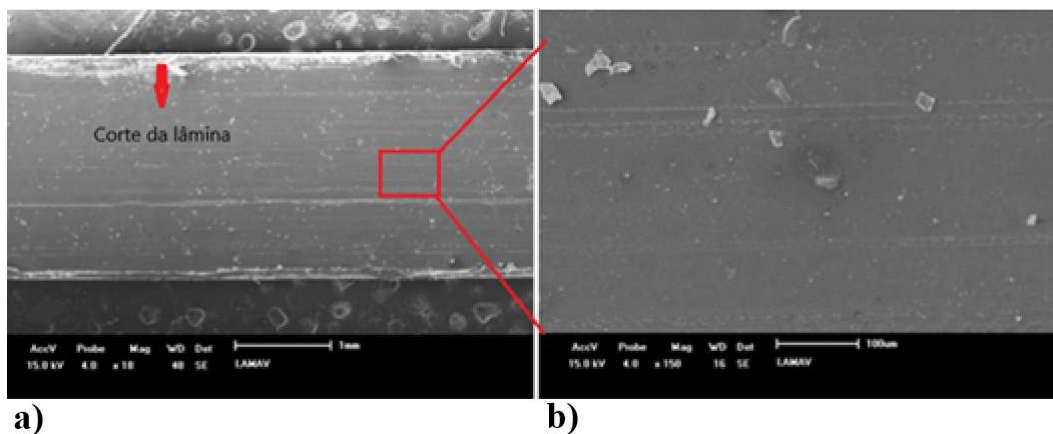
Fonte: própria

Os resultados obtidos nos ensaios permitiram determinar o comprimento mínimo de embutimento PULL-OUT a ser adotado na matriz cimentícia. Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras de PULL-OUT.

3.3.3.5. Microscopia Eletrônica de Varredura nas amostras de PULL-OUT

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de analisar as características morfológicas microestruturais das fibras de PET. Foi utilizado um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, operado a 20 kV, no LAMAV da UENF. A Figura 22 mostra as características da fibra de PET antes do ensaio, onde pode ser observada a face da fibra sem nenhum tipo de tratamento, sua superfície lisa dificulta a aderência à fibra/matriz.

Figura 22: MEV na fibra de PET sem tratamento mecânico, a) ampliação de 18X e b) ampliação de 150X.



a)

b)

Fonte: Própria

Após a realização dos ensaios de PULL-OUT, os corpos-de-prova foram classificados de acordo com o comportamento das fibras: aquelas com indícios de escorregamento (FE) e aquelas sem escorregamento aparente (FD). Em seguida, essas amostras, juntamente com a matriz cimentícia, foram submetidas à análise por microscopia eletrônica de varredura.

3.3.4. Produção do agregado reciclado de concreto

Para obtenção do ARC, foi necessário produzir uma laje de concreto de baixa resistência, produzido com 20MPa, para que este tivesse uma resistência conhecida para o estudo, já que os resíduos de demolição e construção não possuem uma resistência definida o que poderia comprometer os dados desta pesquisa, para isto foi produzido de modo a se assemelhar aos resíduos adquiridos em demolições.

3.3.4.1. Produção do concreto para confecção do agregado reciclado

Para a execução desta pesquisa foi necessário produzir o ARC, sendo calculado sua utilização em massa por m³, o traço utilizado como referência foi o estudo de Trindade (2022). De acordo com estudos analisados há uma perda de 50% de material nesta produção. Onde foi calculado uma dosagem que atingisse 20 MPa de resistência, pode ser visto na Tabela 6.

Para atingir os valores necessários de concreto, foram divididos em 10 partes iguais que foram produzidos em sequência respeitando as normas vigentes, em todas as etapas para concretagem desde transporte, lançamento, adensamento, cura e secagem pode ser visto na Figura 23, assim como foram moldados 6 CP para certificar a resistência mecânica à tração e à compressão do concreto produzido como mostra a Figura 24. Foi realizado o ensaio de abatimento de cone que pode ser visto na Figura 25.

Após 28 dias de cura, foram extraídos da laje três corpos de prova cilíndricos, com o objetivo de verificar a resistência à compressão do concreto e a eficácia do processo de cura. Os resultados confirmaram a conformidade com os parâmetros projetados, conforme ilustrado na Figura 26.

Tabela 6: Dosagem do concreto para produção de agregado reciclado

Dosagem Kg/m ³	
MATERIAIS	kg/m ³
CPII	336
Areia	642
Brita 0	1223
Água	168
Superplastificante	1,5
A/C	0,5

Fonte: própria

Figura 23: Etapas da concretagem da laje para produção dos AR (a) mistura, (b) transporte, (c) lançamento, (d) adensamento e (e) cura.



Fonte: própria

Figura 24: Laje e corpos de prova para confecção e caracteriação do AR.



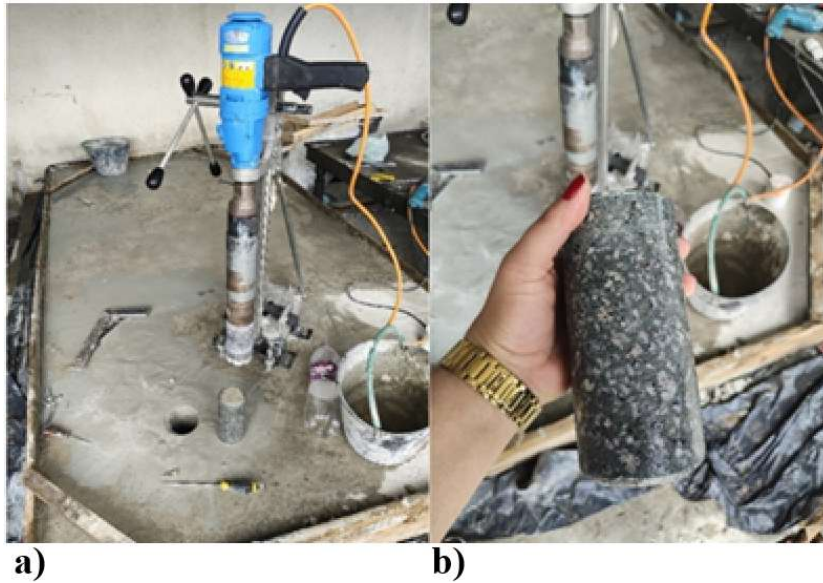
Fonte: própria

Figura 25: Ensaio de abatimento de cone (a) adensamento, (b) preenchimento, (c) remoção do molde e (d) medição do abatimento



Fonte: própria

Figura 26: Extração dos corpos de prova de reteste (a) processo de extração e (b) corpo de prova extraído.



Fonte: própria

3.3.4.2. Confeção dos agregados reciclados de concreto

O concreto destinado à produção dos agregados reciclados foi inicialmente confeccionado e, em seguida, submetido à cura úmida por um período de 28 dias. Após esse período, o material foi fragmentado, como ilustrado na Figura 27, sendo: a) de forma manual e b) com o auxílio de um marteleto. Os fragmentos obtidos foram reduzidos a tamanhos menores, de modo que pudessem ser processados no britador de mandíbulas. Em seguida, foi realizado o peneiramento, com o objetivo de atingir a granulometria previamente estabelecida.

Figura 27: Fragmentação do concreto para produção de agregado reciclado



Fonte: própria

3.3.4.3. Britagem e peneiramento

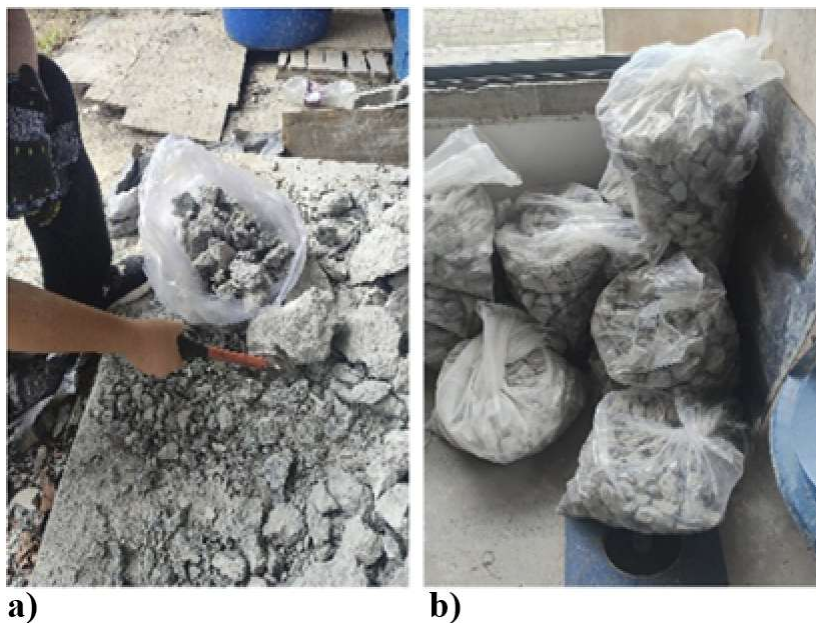
Para a execução da produção dos ARC foi usado o britador do tipo mandíbula, da marca Fritsch®, seu funcionamento se dá por compressão.

Apresenta as seguintes características:

- proporciona distribuição granulométrica dos agregados mais adequada para o uso em concreto;
- gera alterações pequenas na estrutura do agregado original do concreto a ser reaproveitado;
- produz apenas 20% de finos abaixo de 4,8 mm.

A Figura 28 apresenta as etapas do processo.

Figura 28: Processo de produção do agregado graúdo reciclado (a) fragmentação do resíduo e (b) armazenamento.



Fonte: própria

Neste processo os resíduos produzidos para a transformação do agregado reciclado passaram por um processo manual para redução das dimensões para o processo de britagem, de modo que coubessem na abertura do britador. Esse processo pode ser observado na Figura 29, (a) britador de mandíbula e (b) redução das dimensões após passar pelo britador.

Figura 29: Processo de britagem (a) britador de mandíbula e (b) redução das dimensões



a)

b)

Fonte: própria

Após a britagem dos resíduos, passaram pelo processo de peneiramento para que os agregados atendessem as especificações normativas. Sendo utilizado o peneirador elétrico da marca Pavitest®, com auxílio de peneiras granulométricas quadradas nas dimensões de 50 x 50 x 10 cm, com aberturas de 12,5 e 4,75 mm. Possibilitando assim uma boa curva granulométrica.

3.3.5. Caracterização do agregado graúdo

3.3.5.1. Ensaio granulométrico

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a norma NBR 17054 (ABNT, 2022) conforme visto na Figura 30.

Figura 30: Ensaio granulométrico

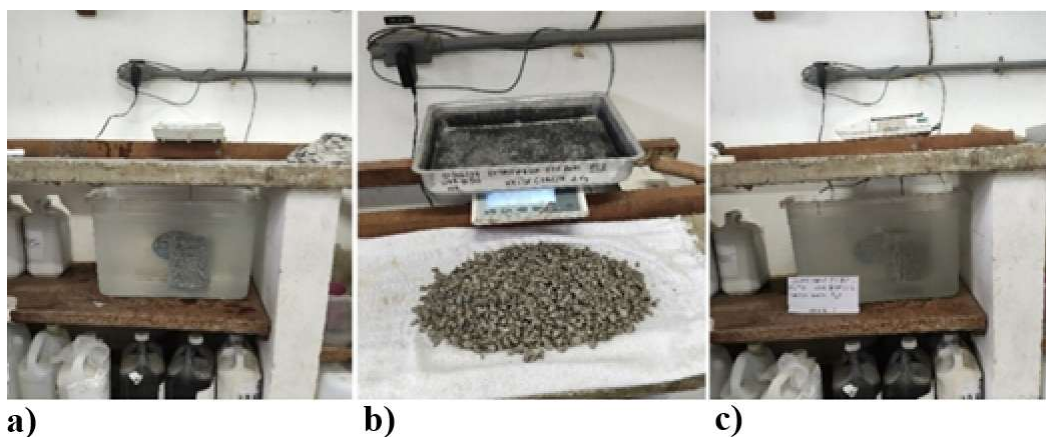


Fonte: própria

3.3.5.2. Massa específica real

Para determinação da massa específica real o ensaio foi realizado utilizando. Os agregados graúdos foram ensaiados com base na ABNT NBR 16917 (ABNT, 2022), conforme mostra a Figura 31 apresenta o ensaio de massa específica real (a) Mensuração do cesto vazio, (b) agregado reciclado com superfície saturada seca (SSS) e (c) Mensuração do cesto cheio agregado.

Figura 31: Ensaio massa específica real (a) Mensuração do cesto vazio, (b) agregado reciclado SSS e (c) Mensuração do cesto cheio



Fonte: própria

3.3.5.3. Massa unitária

A determinação da massa unitária dos agregados graúdos foi determinada pelo ensaio realizado conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021). Onde o recipiente de volume padrão para a realização do ensaio, foi completo com os agregados reciclados e compactados com o auxílio de uma haste para uma melhor compactação das camadas. Ilustrado pela Figura 32.

Figura 32: Ensaio de massa unitária (a) recipiente de volume padrão e (b) recipiente com os agregados compactados



a)

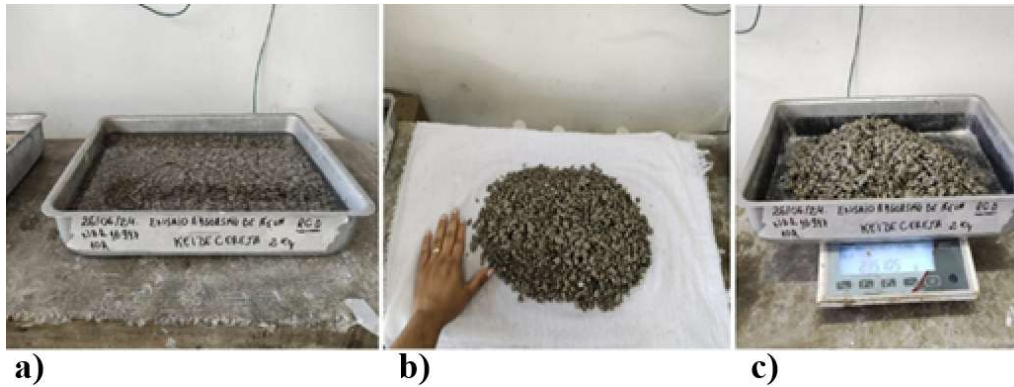
b)

Fonte: própria

3.3.5.4. Absorção de água

O ensaio para determinar a absorção de água dos agregados graúdos reciclados foram executados conforme especificado pela NBR 16917 (ABNT, 2021). Onde os agregados foram secos em estufa por 24 horas, em seguida imersos por água por 24 horas, após foram retirados da água e secos superficialmente para remover o excesso de água até que atinja a condição denominada “Saturada com Superfície Seca” (SSS). A diferença entre as massas foi o determinante de absorção de água, visto na figura 33.

Figura 33: Ensaio de absorção de água (a) agregado imerso em água, (b) agregado com SSS e (c) mensuração para diferença de massa



Fonte: própria

3.3.5.5. Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles recomendado pela NBR 16974 (ABNT, 2022), calculou o desgaste da superfície dos agregados. Onde foram utilizadas amostras de agregados que foram inseridos em um tambor com esferas de aço padrão que realizaram uma média de 500 rotações. Sendo analisado a perda de massa por abrasão calculando a diferença de massa de antes e depois de passarem por este processo conforme a equação 2. Todo o processo pode ser visto na Figura 39.

$$P = \frac{m - m_1}{m} \times 100 \quad (1)$$

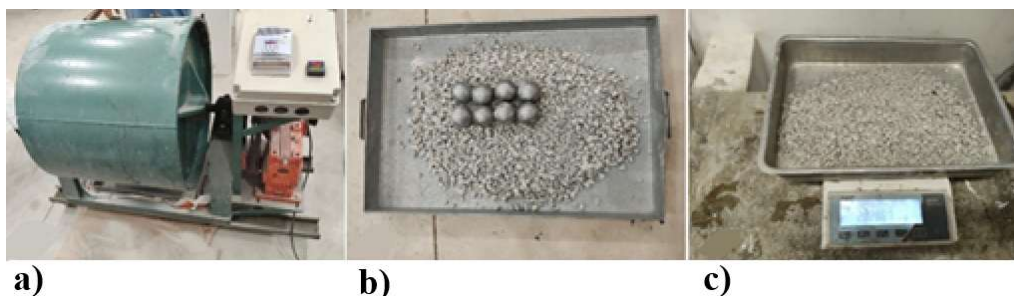
Onde

P é a perda de massa por abrasão, expressa em porcentagem (%);

m é a massa da amostra seca, determinada conforme a norma expressa em gramas (g);

m₁ é a massa da amostra retida na peneira com abertura de malha de 17mm conforme determina a norma expressa em gramas (g);

Figura 34: Ensaio de abrasão Los Angeles, (a) Máquina de abrasão Los Angeles, (b) Massa seca antes do Ensaio, (c) Massa retida após o ensaio

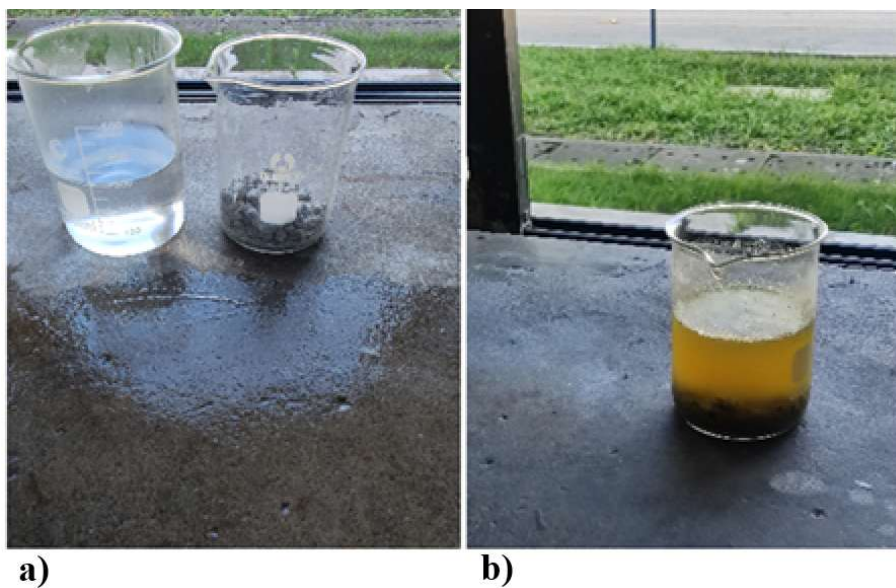


Fonte: própria

3.3.5.6. Determinação de argamassa residual (Ataque químico)

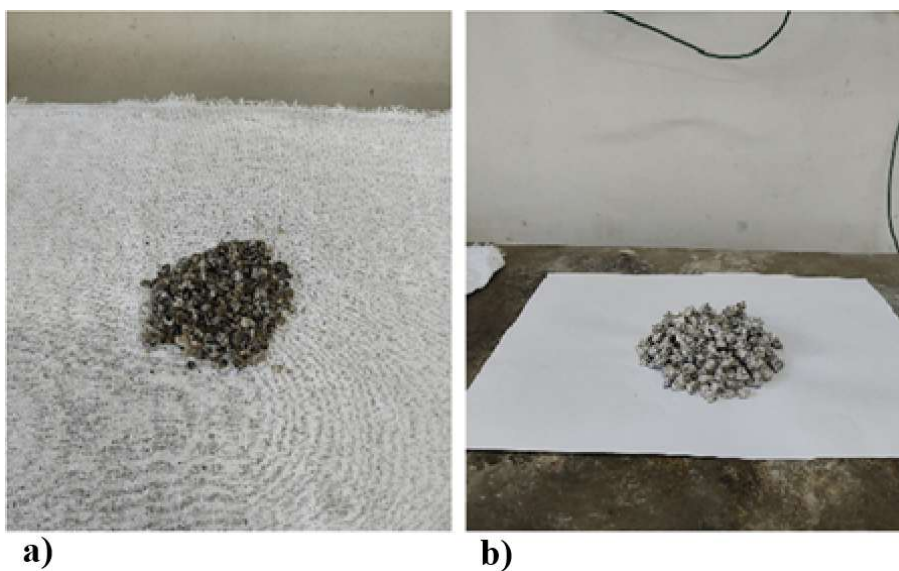
Este ensaio consistiu em um processo de ataque por ácido, utilizado uma solução de ácido clorídrico em concentração de 10% massa/volume, resultando na quantificação da quantidade de argamassa residual aderida ao ARC, onde o material analisado ficou imerso em solução por 24 horas. Nas Figuras 35 e 36 pode ser visualizado a execução do método.

Figura 35: Ensaio ataque químico, a) antes do ataque; b) após 24h



Fonte: própria

Figura 36: Amostras antes (a) e Depois do ensaio (b)



Fonte: própria

3.3.6. Detalhe das vigas

O dimensionamento das vigas adotou, como ponto de partida, a dosagem e o cálculo geométrico utilizados nas vigas produzidas na tese de doutorado de Trindade (2022), os quais foram posteriormente ajustados ao longo da pesquisa, de forma a compatibilizar as dimensões ao porte dos moldes disponíveis no Laboratório de Estruturas do LECIV, no campus da UENF.

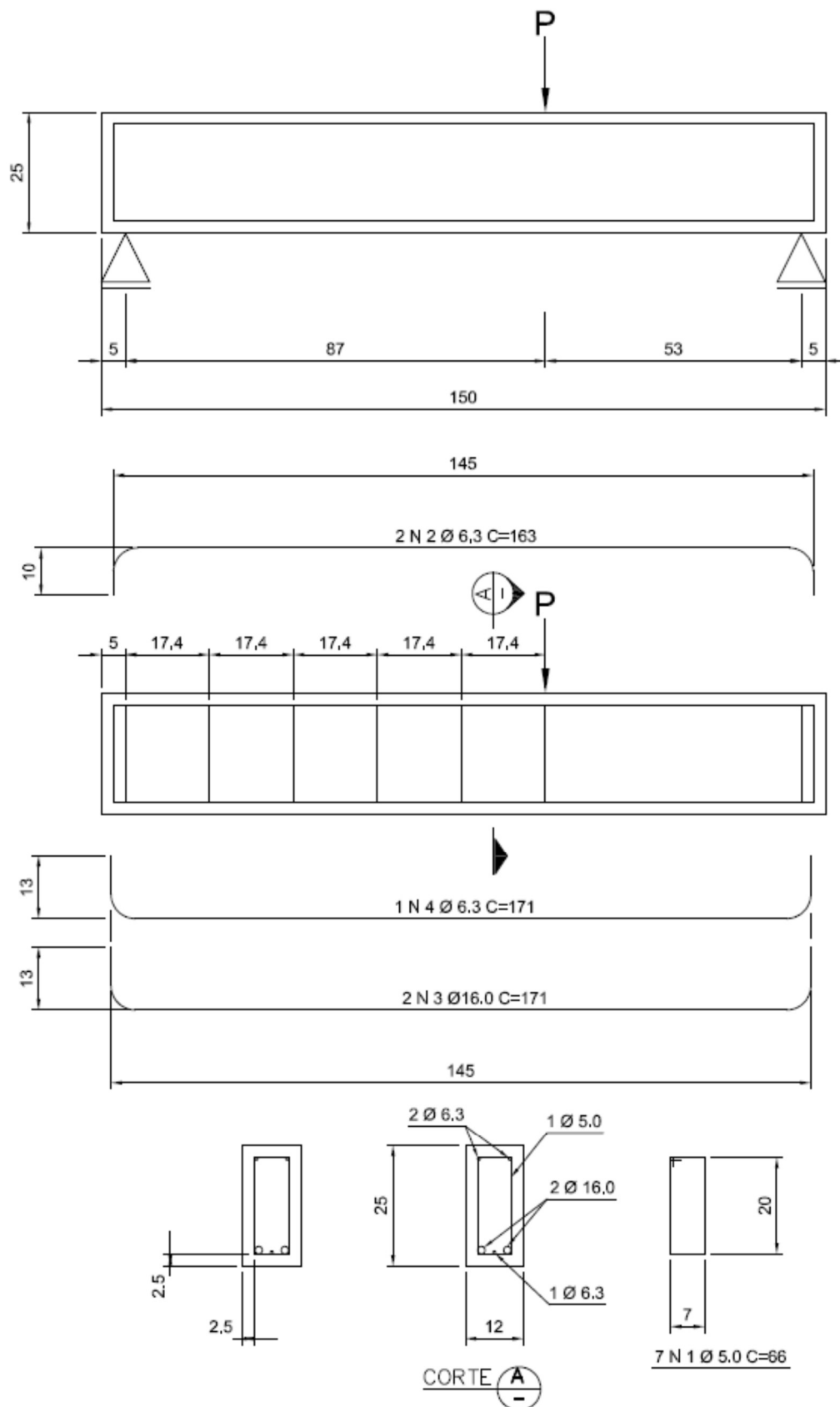
Para o estudo, foram moldadas vigas prismáticas de seção retangular, com dimensões de 120 mm de largura, 250 mm de altura e 1500 mm de comprimento.

As armaduras foram dimensionadas com o objetivo de induzir a ruptura por cisalhamento, e não por flexão, durante o ensaio de carregamento em três pontos. Para isso, a resistência à flexão foi projetada de forma a superar a resistência ao cisalhamento, garantindo que o modo de ruptura avaliasse prioritariamente a contribuição das fibras de PET na resistência ao cisalhamento.

A norma ABNT NBR 6118:2023 estabelece a utilização de aços classificados conforme a ABNT NBR 7480:2023, que define os valores característicos de escoamento para as categorias CA-25, CA-50 e CA-60.

Nesta pesquisa, foram empregados dois tipos de aço para as armaduras: o aço CA-50, utilizado tanto na armadura principal da zona tracionada quanto na armadura construtiva da parte superior das vigas; e o aço CA-60, aplicado nos estribos que compõem a armadura transversal. O detalhamento completo da armadura está representado na Figura 37.

Figura 37: Detalhamento das vigas e armadura (Dimensões em cm)



Fonte: própria

3.3.7. Montagem das Formas

Para a realização da montagem das formas foi utilizado MDF marítimo, nas dimensões já estabelecidas, fixadas com auxílio de prego e impermeabilizada com manta asfáltica de modo a preservar a umidade do concreto. visto na Figura 38.

Figura 38: Montagem das formas para molde das vigas



Fonte: própria

3.3.8. Armadura

Para a investigação do comportamento à força cortante de vigas confeccionadas com o ARC e reforçada com fibras de PET, foi adotada uma taxa de armadura longitudinal de 2,50% que foram aplicadas às vigas. A taxa de armadura transversal foi de 0,1136%, sendo está baseada na taxa de armadura transversal mínima recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

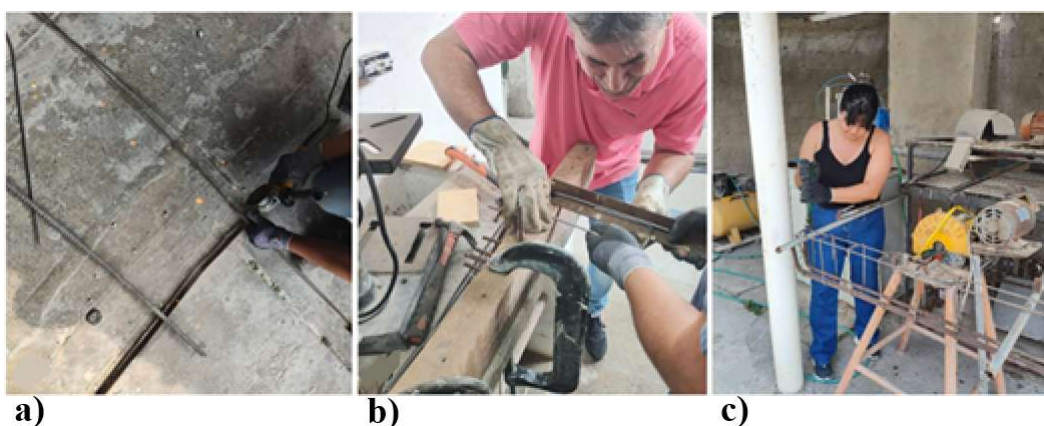
O ensaio foi conduzido em uma viga para cada combinação de variável previamente definida e analisada.

Para a armadura das vigas foi adotada a taxa da armadura do tipo 4 do estudo de (Trindade, 2022). As vigas deste tipo possuíam taxa de armadura transversal mínima recomendada pelo ACI 318 (2019), não foi utilizada armadura transversal na zona crítica. A armadura mínima foi adotada somente no vão

definido para ruptura, com estribos de 5m. espaçamento de 17,4 cm de eixo a eixo dos estribos.

Na Figura 39, é possível visualizar todas as etapas da montagem das armaduras utilizadas nas vigas.

Figura 39: Etapas do processo de montagem da armadura: (a) corte das barras de aço; (b) moldagem dos estribos; (c) montagem da armadura.



Fonte: própria

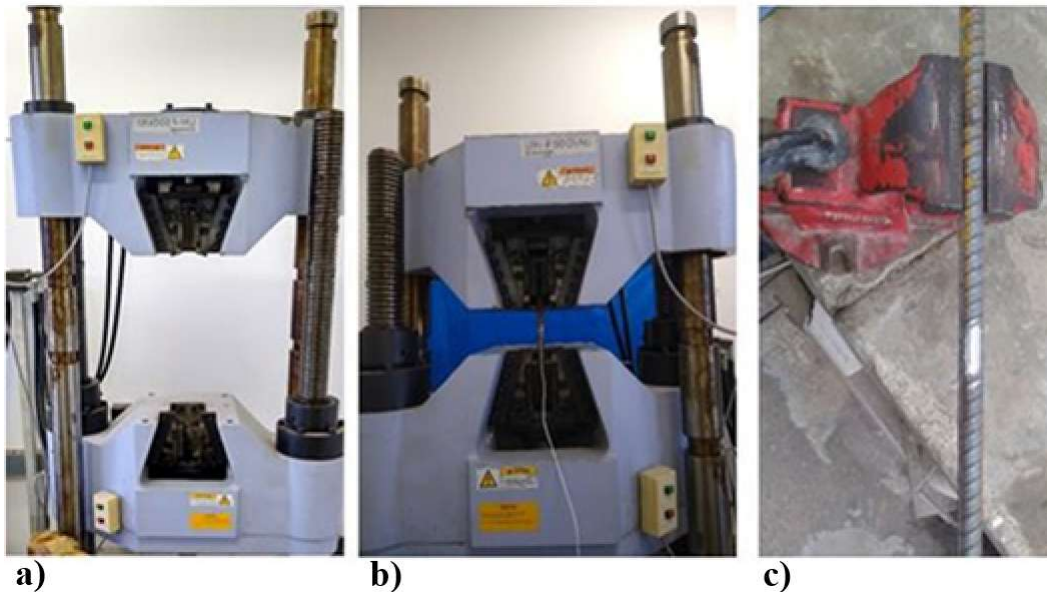
3.3.8.1. Barras de aço

A taxa de armadura adotada nesta pesquisa seguiu as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2023), conforme aplicado no estudo de Trindade (2022). O detalhamento completo das armaduras pode ser consultado no item 3.3.2.

As propriedades mecânicas das barras de aço foram determinadas por meio de ensaios de tração direta, realizados no Laboratório de Estruturas e Construção Civil (LECIV/UENF), utilizando uma prensa universal da marca SHIMADZU®, com capacidade máxima de 500 kN. A velocidade de deslocamento adotada no ensaio foi de 0,5 mm/min, conforme especificado na NBR 6892-1 (ABNT, 2013).

Foram ensaiados três corpos de prova de aço CA-60 (diâmetro de 5,0 mm) e três corpos de prova de aço CA-50 (diâmetro de 16,0 mm), todos com 300 mm de comprimento. Para a obtenção das deformações durante o ensaio, os corpos de prova foram instrumentados com sensores elétricos de resistência (strain gauges). A preparação da superfície das barras envolveu lixamento e limpeza com álcool isopropílico, a fim de garantir a adequada aderência dos sensores e assegurar a precisão das leituras. A Figura 40 apresenta a máquina de ensaio, o procedimento experimental e a preparação dos corpos de prova.

Figura 40: Ensaio de tração direta das barras de aço: (a) máquina universal de ensaio SHIMADZU®; (b) execução do ensaio de tração direta; (c) preparação do corpo de prova para colagem do strain gauge.



Fonte: própria

A tensão de escoamento das barras de aço CA-50 e CA-60, foi determinada através da formação de um patamar de escoamento no gráfico tensão deformação para as barras CA-50, conforme indicado pela NBR 7480 (ABNT, 2022). A Tabela 8 apresenta as propriedades físicas e mecânicas das barras de aço ensaiadas

3.4. AVALIAÇÃO INDIRETA DA DEFORMAÇÃO DA ARMADURA LONGITUDINAL POR CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

A análise da deformação específica das armaduras longitudinais foi realizada por meio da técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID), que permite avaliar de forma não destrutiva a deformação superficial do concreto durante o ensaio. Essa técnica baseia-se no acompanhamento da movimentação de padrões marcados na superfície do elemento, por meio da captura sequencial de imagens ao longo do carregamento. O processamento dessas imagens, realizado com o software GOM Correlate®, possibilitou a obtenção de dados precisos sobre a deformação do conjunto concreto-aço.

Embora a armadura esteja embutida no concreto, a técnica CID foi aplicada com foco na zona de tração, mais precisamente na região da superfície do concreto próxima à linha das armaduras longitudinais, onde ocorrem os maiores

alongamentos. Conforme destacado por Rahal; Elsayed, (2021), a deformação da superfície do concreto nessa região pode ser considerada representativa do comportamento da armadura, principalmente em estruturas onde a aderência entre aço e concreto é eficiente. Isso ocorre porque, até o início do deslizamento significativo, a armadura e o concreto atuam em conjunto, transferindo esforços por aderência.

A deformação da armadura foi inferida a partir da variação da distância entre pontos marcados na superfície do concreto na altura correspondente à armadura longitudinal. A técnica CID foi, portanto, uma ferramenta eficaz para monitorar a evolução dessas deformações ao longo do carregamento, permitindo a construção das curvas tensão–deformação da armadura de forma indireta, porém confiável. Estudos como os de Tang et al., (2020) e Totter et al., (2018) validam essa abordagem, demonstrando a eficiência da CID na avaliação do comportamento mecânico de materiais compósitos e estruturas de concreto armado.

A adoção dessa técnica neste trabalho possibilitou o monitoramento contínuo e detalhado da resposta estrutural das vigas, permitindo a identificação de aspectos relevantes como a ductilidade, o comportamento pós-pico e a redistribuição de tensões após a fissuração. Além disso, a CID eliminou a necessidade de instrumentação direta na armadura, o que poderia comprometer a integridade da peça ou alterar seu comportamento local.

3.5. DOSAGEM, PREPARO E MOLDAGEM DOS CONCRETOS

As composições dos concretos utilizadas neste estudo foram inicialmente baseadas no trabalho de Trindade (2022). No entanto, devido à baixa trabalhabilidade observada no estado fresco especialmente considerando a adição de fibras foi necessário desenvolver uma nova dosagem com base no método da ABCP, visando um concreto com resistência característica de 30 MPa. Durante o processo, foram realizados ajustes na quantidade de aditivo superplastificante e na proporção de agregado graúdo reciclado, a fim de garantir um desempenho adequado do concreto. Devido à baixa densidade do agregado reciclado, o volume final foi inferior ao necessário, o que poderia comprometer a resistência do material. A relação água/cimento foi mantida conforme o estudo de Trindade

(2022). Os valores correspondentes à dosagem dos materiais estão apresentados na Tabela 7, em kg/m³.

A etapa de concretagem consistiu na produção das vigas sem armadura transversal na região do vão de cisalhamento. A mistura dos concretos foi realizada conforme os critérios da NBR 6118 (ABNT, 2023), respeitando todas as etapas do processo de produção. A Figura 41 ilustra as etapas de fabricação dos concretos.

Tabela 7: Dosagem do concreto das vigas

Materiais	Kg/m ³				
	Vigas		PET 0,5%	PET 1%	PET 1,25%
	NAC	RAC			
Cimento CPV ARI	410	410	410	410	410
Agregado miúdo	698	698	698	698	698
Agregado Graúdo Natural	981	-----	-----	-----	-----
Agregado graúdo reciclado	-----	981	981	981	981
Água	193,73	193,73	193,73	193,73	193,73
Super plastificante	2,134	2,134	2,134	2,134	2,134
Relação A/C	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Fibra de PET	-----	-----	1,76	3,52	4,4

Fonte: própria

Figura 41: Processo de produção dos concretos para as vigas



Fonte: própria

3.5.1. Moldagem das vigas

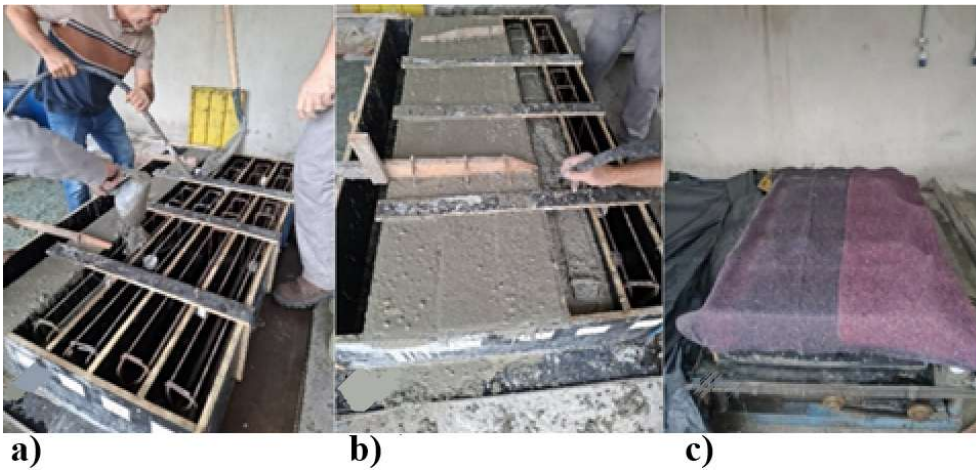
Para a produção das vigas foram utilizadas fôrmas de compensado naval na espessura de 19mm. As paredes das formas foram untadas com desmoldante, para o cobrimento foram utilizados espaçadores de 25mm e fixados na armadura para promover o cobrimento no tamanho estabelecido. Na Figura 42 apresenta-se o procedimento que antecede a concretagem dos espécimes e a Figura 43 ilustra a execução das etapas da concretagem dos corpos-de-prova logo após a execução da concretagem.

Figura 42: Procedimento antes da concretagem



Fonte: própria

Figura 43: Etapas do processo de concretagem das vigas: (a) lançamento do concreto nos moldes; (b) adensamento do concreto com vibrador de imersão; (c) cura inicial com manta úmida por 24 horas.



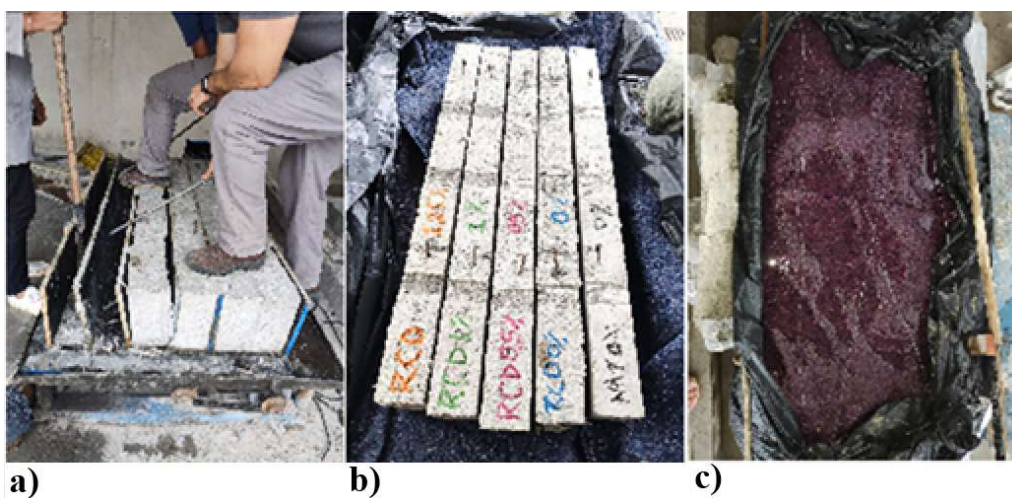
Fonte: própria

Após o lançamento do concreto nos moldes, os corpos de prova foram adensados por vibração, utilizando dois métodos complementares: vibrador de imersão portátil e uma mesa vibratória, com o objetivo de eliminar bolhas de ar e garantir o adequado preenchimento dos moldes.

Concluído o adensamento, os espécimes foram cobertos com mantas úmidas durante as primeiras 24 horas, a fim de manter a hidratação superficial do concreto. pós a concretagem, as vigas permaneceram nas formas por 24 horas, sendo cobertas com manta úmida durante esse período inicial de cura. Em seguida, foram desmoldadas e submetidas à cura úmida em água saturada com cal. Para isso, foi montado um reservatório revestido com manta plástica, onde as vigas foram envoltas com mantas e totalmente submersas, conforme ilustrado na Figura 44.

Da mesma forma, os corpos de prova também foram desmoldados após 24 horas e transferidos para um tanque de cura úmida com água saturada com cal, onde permaneceram submersos por 28 dias, conforme as recomendações das normas técnicas.

Figura 44: Etapas do preparo e cura dos corpos de prova: (a) Desmolda das vigas; (b) identificados das vigas; (c) cura úmida em tanque com água saturada com cal.



Fonte: própria

3.5.2. Produção dos corpos de prova

Para a produção dos corpos-de-prova foram utilizadas formas metálicas cilíndricas na dimensão de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, onde foram produzidas três amostras para cada variável.

3.5.3. Propriedade dos concretos em estado fresco

Para a caracterização dos concretos no estado fresco, foram adotados métodos distintos conforme a presença ou não de fibras na mistura. Para os

concretos sem adição de fibras, utilizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), visando avaliar a consistência e a trabalhabilidade da mistura. Já para os concretos com adição de fibras, cuja presença tende a reduzir a fluidez da mistura, foi empregado o ensaio VeBe, de acordo com a especificação DNIT 064/2004 – ME (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2004).

O ensaio VeBe foi originalmente proposto por Bahrner (1940) e posteriormente aperfeiçoado por Tattersal (1991), com o objetivo de avaliar concretos de baixa trabalhabilidade, geralmente aplicáveis em situações que exigem lançamento por vibração, como é o caso dos concretos reforçados com fibras. Segundo Abreu (2002), a trabalhabilidade de concretos com consistência seca pode ser comprometida, exigindo o uso de equipamentos vibratórios para garantir o adequado adensamento, sem, contudo, comprometer a coesão e a homogeneidade do material.

Adicionalmente, foi realizado o ensaio de abatimento de cone em mesa vibratória, para ampliar a avaliação do comportamento dos concretos produzidos. A Figura 45 apresenta a sequência de execução do ensaio VeBe nas diferentes concretagens da pesquisa, enquanto a Figura 46 mostra: (a) medição do abatimento, e (b) o ensaio de abatimento de cone.

Figura 45: Execução do ensaio VeBe (a) Ensaio montado em mesa vibratória, (b) abatimento de cone, (c) Sedimentação do cone, (d) preparo para vibração, (e) vibração até preencher os vazios, (f) resultado do ensaio



Fonte: própria

Figura 46: Caracterização do concreto no estado fresco: (a) ensaio de abatimento de cone, (b) ensaio de consistência VeBe



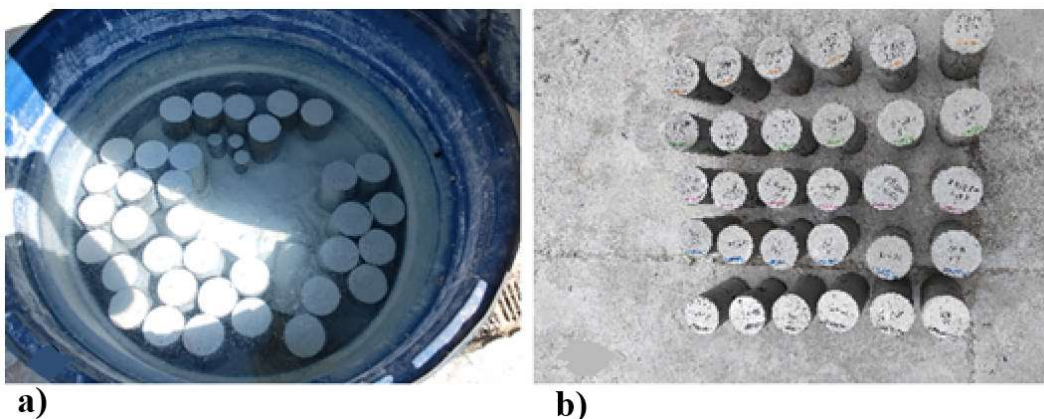
Fonte: própria

3.5.4. Propriedade dos concretos no estado endurecido

As propriedades dos concretos em estado endurecido foram determinadas por intermédio de ensaios de resistência à compressão simples (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e módulo de elasticidade (E_c).

Os corpos-de-prova cilíndricos de concreto na dimensão de 100 mm por 200 mm, foram compactados e adensados com auxílio de um vibrador de imersão em contato com a face lateral externa dos moldes. Após a concretagem, os moldes receberam uma cobertura com uma manta úmida pelo período de 24 horas, após foram desmoldados e levados a cura submersa em água saturada com cal, permanecendo por 28 dias. Esse processo por ser visto na Figura 47.

Figura 47: Cura úmida dos corpos-de-prova (a) imersão em água; (b) secagem após 28 dias.



Fonte: própria

3.5.5. Caracterização mecânica

Após o período de cura de 28 dias, os corpos de prova tiveram suas extremidades retificadas para garantir a uniformidade do apoio, sendo então submetidos aos ensaios mecânicos correspondentes.

3.5.5.1. Módulo de elasticidade longitudinal, módulo de cisalhamento

Para a determinação do módulo de elasticidade foi utilizado o sistema de correlação de imagem digital, a partir do ensaio de compressão.

Foram realizados ensaios de compressão axial nos corpos-de-prova cilíndricos nas dimensões 100mm por 200mm, onde utilizou-se os concretos

produzidos para a moldagem das vigas. Para cada tipo de concreto foram produzidos três corpos-de-prova.

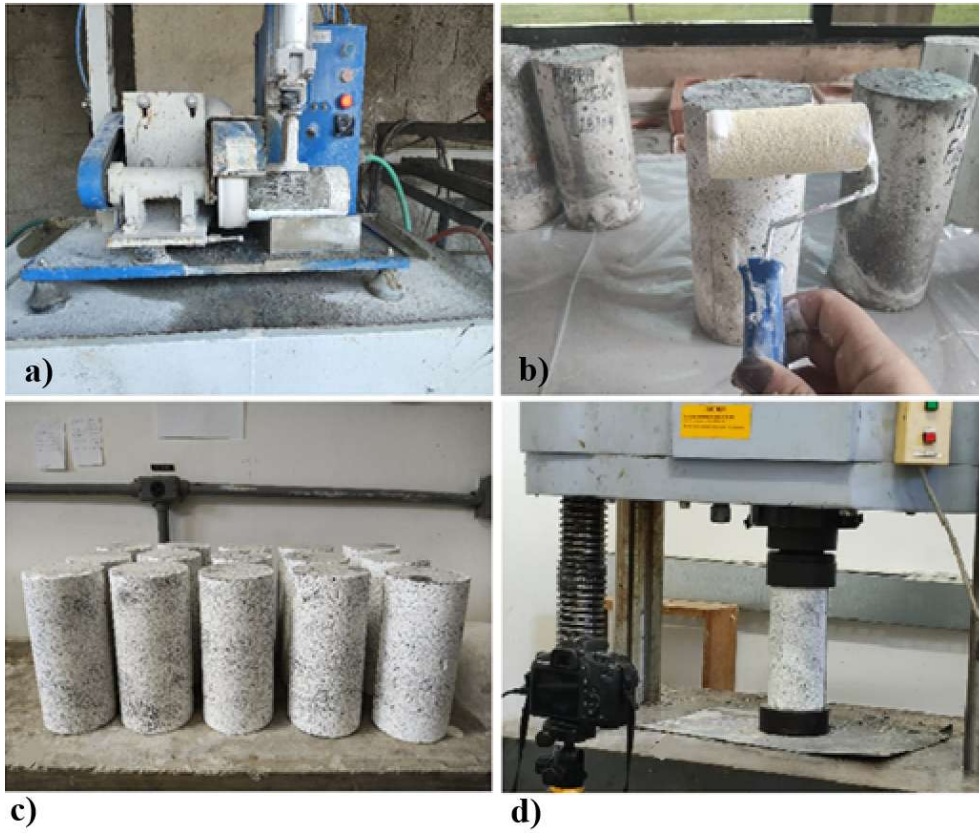
Realizou-se a determinação do coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento. A coleta dos dados foi possível através dos resultados dos ensaios de compressão correlacionado com a deformação obtida através da coleta de imagens. Assim foi possível mensurar as deformações axiais e transversais.

Utilizou-se o equipamento de ensaios mecânicos Shimadzu® UH-F500kNI, com uma velocidade de 0,5 mm/min.

Após a retífica da face dos corpos-de-prova, foi aplicada tinta branca em toda a lateral, seguida da marcação com pontos pretos em tinta spray fosca, com o objetivo de analisar o deslocamento entre esses pontos. Após o processo de secagem, os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios. A Figura 48 ilustra todo o procedimento, apresentando: (a) retífica, (b) base pintura, (c) pintura dos pontos e secagem e (d) ensaio de compressão.

A análise dos dados foi realizada por meio do software GOM Correlate, que forneceu as deformações sofridas pelos corpos de prova. A determinação do módulo de elasticidade seguiu as prescrições da norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Esse procedimento está ilustrado nas Figuras 49, correspondente à fase de preparo dos corpos-de-prova até à aplicação da carga, e 50, após a aplicação da carga, porém antes da ruptura.

Figura 48: Tratamento dos corpos de prova para ensaio: (a) retificação dos corpos de prova; (b) aplicação da pintura de base branca; (c) aplicação dos pontos pretos; (d) início da aplicação da carga.



Fonte: própria

Figura 49: Tratamento dos dados através do GOM



Fonte: própria

Figura 50: Deformação sofrida no momento antes da ruptura



Fonte: própria

3.5.5.2. Ensaio de resistência a compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram executados conforme a norma da NBR 5739 (ABNT, 2018) em prensa universal Shimadzu® de 500kN. Visualizado na Figura 51.

Figura 51: Ensaio de resistência à compressão: (a) registro por fotogrametria; (b) momento da ruptura



a)

b)

Fonte: própria

3.5.5.3. Ensaio de resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) foi executado conforme a norma da NBR 7222 (ABNT, 2011) em prensa universal Shimadzu ® de 500kN, sendo usado um suporte padronizado para apoio dos CPs, sendo ensaiados três CPs para cada variável analisada. A execução do ensaio é visualizada através da Figura 52.

Figura 52: Ensaio de resistência com compressão diametral: (a) preparo dos corpos-de-prova; (b) execução do ensaio; (c) após ruptura.

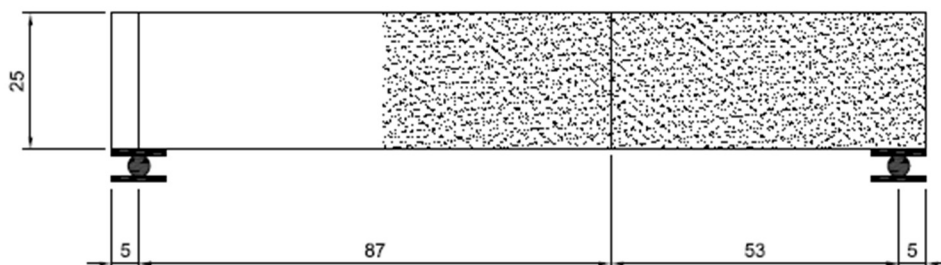


Fonte: própria

Para o estudo do comportamento à força cortante de vigas de concreto armado com agregado graúdo reciclado de concreto e reforçadas com fibras de PET, foram moldadas cinco vigas. Dentre essas, duas serviram como referência: a primeira foi confeccionada com agregado graúdo natural e sem adição de fibras, enquanto a segunda utilizou 100% de substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado, também sem fibras. As três vigas restantes foram produzidas com 100% de substituição por agregado reciclado e receberam diferentes teores de fibras de PET, sendo uma viga para cada proporção testada.

Concluído o processo de moldagem e desforma das vigas, deu-se início à preparação para os ensaios estruturais, que envolveram a captura de imagens ao longo do carregamento, utilizando a técnica de fotogrametria. Para viabilizar esse processo, realizou-se o tratamento da superfície no vão crítico de cisalhamento, com a aplicação de tinta branca e posterior marcação com pontos em tinta spray fosca, conforme o mesmo procedimento adotado nos corpos de prova utilizados para a determinação do módulo de elasticidade. A Figura 54 apresenta o esquema de tratamento superficial realizado nessa região das vigas.

Figura 54: Pintura realizada nas vigas no vão de cisalhamento (dimensões em cm).



Fonte: Própria

A Figura 55 mostra como ficaram as vigas após o tratamento da superfície de pintura e criação dos pontos para a realização das capturas de imagem.

Figura 55: Vigas após tratamento na superfície de pintura



Fonte: própria

Para a realização dos ensaios, a face correspondente ao vão crítico de cisalhamento das vigas foi previamente preparada com o padrão necessário à aplicação da técnica de Correlação de Imagens Digitais (CID), conforme procedimento já descrito anteriormente. Essa técnica permitiu o monitoramento da evolução das fissuras, da deformação específica na face superior das vigas e do deslocamento vertical ao longo do ensaio.

Os ensaios foram realizados 30 dias após a moldagem das vigas, utilizando um atuador hidráulico modelo 661.23F-01, controlado por sistema servo-hidráulico MTS®, com capacidade de carga de 500 kN e velocidade de aplicação de 1,0 mm/min até a ruptura. Os testes foram conduzidos na laje de reação da Oficina de Estruturas do LECIV/UENF.

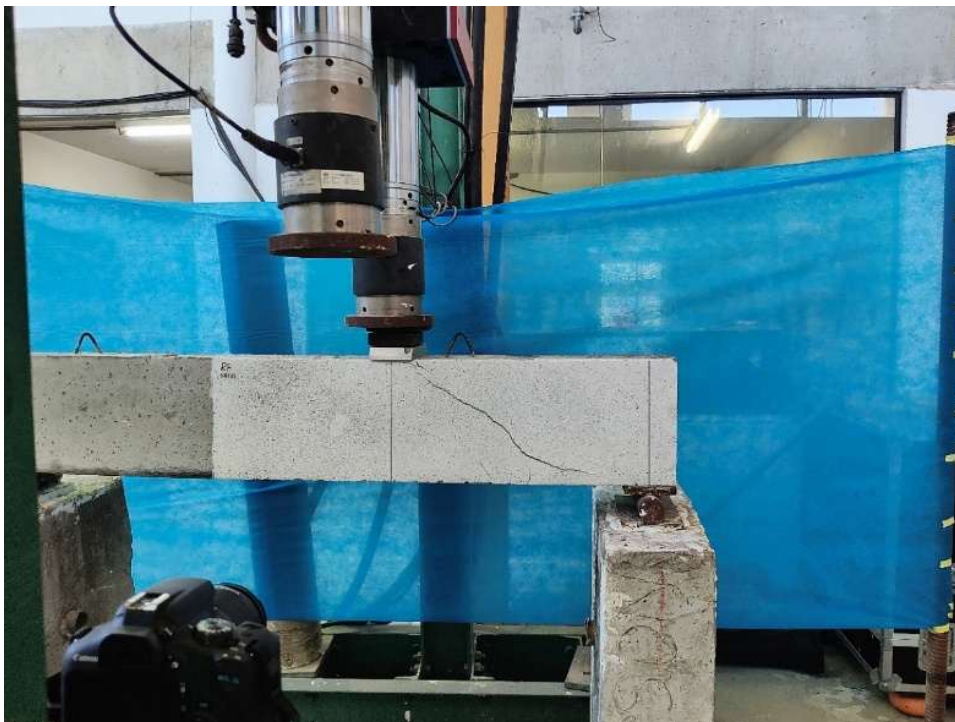
A Figura 56 apresenta o início da execução do ensaio, com a superfície já preparada e a aplicação da técnica de CID. A Figura 57 mostra o início da fissuração na viga de referência NAT 0%.

Figura 56: Realização do ensaio de flexão da viga de referencia NAT 0%



Fonte: própria

Figura 57: Execução do ensaio no momento pós fissuração



Fonte: própria

4. RESULTADOS E DISCURSÕES

A interpretação dos resultados foi conduzida com base nos valores absolutos obtidos, sem suporte e inferência estatística. Não foi realizada a análise estatística dos resultados das vigas analisada em virtude da execução dos ensaios com apenas uma amostra por condição experimental. A inexistência de réplicas inviabiliza a aplicação de métodos estatísticos para a verificação da significância das variáveis investigadas. Assim, cabe destacar que, em investigações experimentais envolvendo elementos estruturais de grande porte, é recorrente a limitação do número de repetições, em função de fatores como custo, tempo e complexidade operacional dos ensaios. No entanto, para os concretos moldados em corpos-de-prova, aplicou-se o método estatístico de Análise de Variância (ANOVA), com o objetivo de verificar a significância das variações observadas entre os diferentes traços avaliados.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), localizado no campus de Campos dos Goytacazes. A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos nessa etapa.

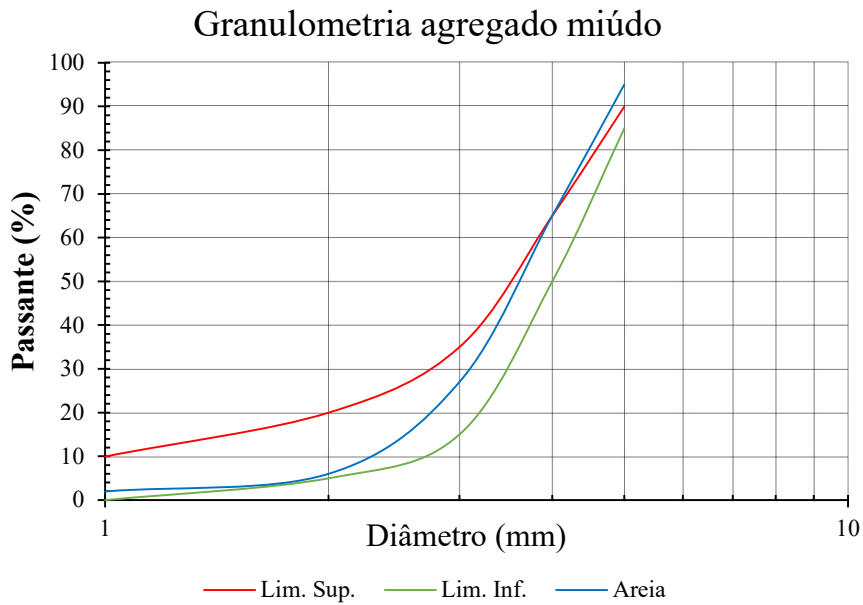
4.1.1. Ensaio granulométrico dos agregados

A Figura 58 apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo natural utilizado. Observa-se que o traçado se posiciona discretamente acima do limite superior da zona utilizável conforme os parâmetros da NBR 7211 (ABNT, 2009), indicando uma granulometria mais grossa que a recomendada. Essa característica reflete uma maior concentração de partículas retidas nas peneiras de maiores aberturas, o que pode influenciar o empacotamento dos grãos. Esse pequeno desvio não comprometeu a qualidade do material, permitindo sua utilização na produção dos concretos. O módulo de finura da areia foi de 2,25.

Por outro lado, os agregados graúdos natural e reciclado de concreto visto na Figura 59, apresentaram uma maior proporção de partículas retidas nas peneiras de menor abertura, no início da curva, na parte inferior do gráfico. Esse fato indica uma granulometria mais fina do que a recomendada nas primeiras

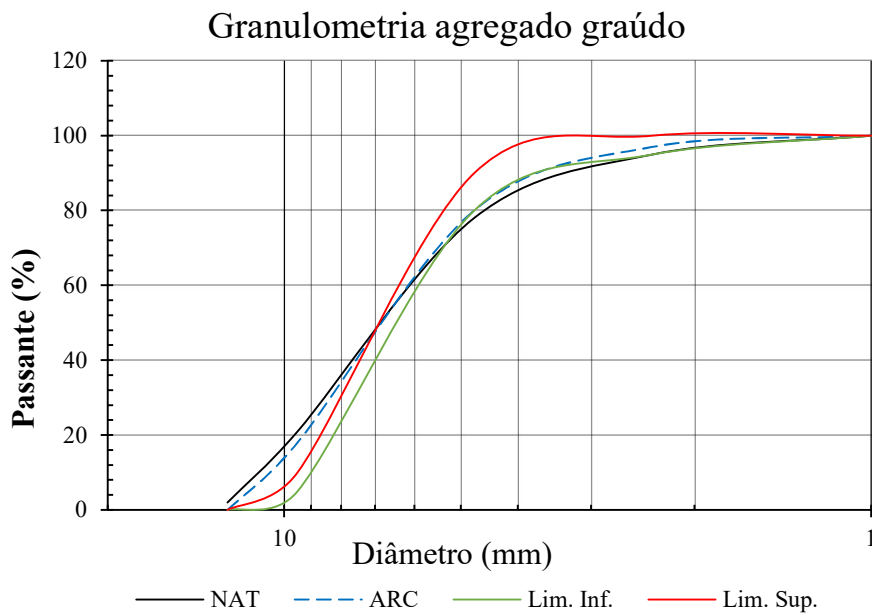
peneiras, o que pode afetar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas do concreto, fato que foi levado em consideração no planejamento da dosagem.

Figura 58: Granulometria do agregado miúdo



Fonte: própria

Figura 59: Curva granulométrica dos agregados graúdos



Fonte: própria

As curvas granulométricas dos agregados graúdos natural e reciclado apresentaram comportamento semelhante, ambos enquadrando-se dentro dos limites gerais normativos, apesar de não atenderem plenamente aos critérios

específicos da zona utilizável. O agregado reciclado destacou-se por uma distribuição mais homogênea ao longo da faixa granulométrica, favorecendo o empacotamento dos grãos e potencialmente resultando em concretos mais densos e com melhor desempenho. Em contraste, os agregados revelaram uma leve deficiência de partículas menores nas peneiras menores, foi um dos fatores que demandaram ajustes realizados na dosagem, para otimizar a trabalhabilidade e resistência do concreto. De forma geral, ambos os agregados se mostraram adequados para a produção de concretos.

4.1.2. Massa específica real

A análise dos resultados de massa específica evidenciou diferença entre os agregados graúdos natural e reciclado. A Tabela 8 apresenta os resultados dos ensaios. O agregado reciclado apresentou valores inferiores de massa específica em ambas as condições analisadas. Em estado seco, a redução foi de aproximadamente 17% em relação ao agregado natural, enquanto em condição saturada e superficialmente seca (SSS), a diferença foi de cerca de 11%.

Essas variações são atribuídas à presença de argamassa residual aderida às partículas do agregado reciclado, que contribui para uma maior porosidade e menor densidade. Essas características também foram consideradas no processo de dosagem dos concretos.

Apesar dessas particularidades físicas, os concretos produzidos com ARC apresentaram desempenho mecânico satisfatório. Tais resultados reforçam a viabilidade do uso do agregado reciclado em substituição ao natural em aplicações estruturais, desde que adotados os ajustes necessários no traço e no controle tecnológico da produção

Tabela 8: Resultados do ensaio de massa específica real

Massa específica real (kg/cm ³)		
Massa específica Em condições	Agregado Natural	Agregado Reciclado
Seca	2610,	2160,
Saturada	2640,	2350,

Fonte: Própria

4.1.3. Massa unitária

A Tabela 9 apresenta os resultados da massa unitária dos agregados graúdos analisados. Observa-se que o agregado reciclado de concreto apresentou uma massa unitária consideravelmente inferior à do agregado natural. Essa diferença está associada à maior porosidade e à presença de materiais, como argamassa aderida ao grão.

Essa característica influencia diretamente o volume ocupado pelo agregado no traço do concreto e conseqüentemente, a densidade do concreto no estado fresco. Por esse motivo, a massa unitária foi um parâmetro considerado no ajuste das proporções dos materiais, visando garantir uma boa compactidade e desempenho do concreto produzido com agregado reciclado.

Tabela 9: Resultados do ensaio de massa específica dos agregados graúdos

Massa específica unitária (kg/m ³)	
ρ_{ap} ARC	1143,5
ρ_{ap} NAT	1488,2

Fonte: própria

Onde;

ρ_{ap} - massa específica dos agregados graúdos

4.1.4. Absorção de água

O agregado reciclado de concreto apresentou um índice de absorção de água 5,8 vezes superior ao do agregado graúdo natural, conforme mostrado na Tabela 10. Esse elevado índice indica uma maior porosidade e microestrutura mais permeável do agregado reciclado, característica típica de materiais provenientes de resíduos de construção e demolição. Tal comportamento pode influenciar diretamente as propriedades do concreto, especialmente no que se refere à trabalhabilidade, durabilidade e resistência, devido à maior quantidade de água absorvida pelo agregado durante a mistura. Portanto, o conhecimento desse parâmetro foi outro fator fundamental para o ajuste correto da dosagem do concreto, evitando prejuízos ao desempenho final da estrutura.

Tabela 10: Resultado do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos.

Absorção de água				
Material	Massa seca (g)	Massa saturada (g)	Absorção (g)	Absorção (%)
ARC	2000	2.151,05	151,05	7,55
NAT	2000	2.025,91	25,91	1,30

Fonte: própria

4.1.5. Ensaio de abrasão Los Angeles

O resultado obtido no ensaio de abrasão Los Angeles para o agregado reciclado utilizado neste estudo foi de 59,4% de perda de massa, conforme apresentado na Tabela 11. Esse valor indica uma resistência moderada à abrasão e ao impacto, condizente com a literatura, considerando-se a natureza mais frágil dos agregados reciclados devido à presença de argamassa aderida, microfissuras e maior porosidade. Em comparação com os resultados obtidos por Trindade (2022), que relatou uma perda de massa inferior, observa-se que o agregado por ela empregado apresentou melhor desempenho frente ao desgaste mecânico. Essa diferença pode estar relacionada a diversos fatores, como a origem e a qualidade dos resíduos de construção e demolição utilizados, o processo de britagem, a granulometria e o teor de argamassa residual.

Apesar da maior perda de massa observada neste trabalho, é importante destacar que os agregados reciclados ainda apresentaram desempenho estrutural satisfatório nos ensaios de resistência mecânica, o que indica que sua resistência à abrasão, embora inferior à de agregados naturais e à de outros reciclados, como os utilizados por Trindade, não comprometeu a integridade do concreto produzido. Esse resultado reforça a viabilidade do uso de agregados reciclados na produção de concretos estruturais, desde que suas limitações sejam conhecidas e compensadas adequadamente no projeto do traço. Além disso, o aproveitamento desses materiais contribui significativamente para a sustentabilidade da construção civil, alinhando-se com práticas de economia circular e redução de impactos ambientais.

Tabela 11: Desgaste por abrasão dos agregados graúdos reciclados de concreto.

Abrasão Los Angeles		
Massa seca (g)	Massa retida (g)	Perda de massa (%)
5000	2028,62	59,4276

Fonte: própria

4.1.6. Ensaio de ataque químico

O ensaio de ataque químico revelou que o agregado reciclado de concreto apresentou uma perda de massa de 29,8% após a exposição ao meio agressivo, conforme apresentado na Tabela 12. Esse valor indica uma certa sensibilidade do material à ação química, atribuída principalmente à presença de porosidade elevada e de compostos solúveis oriundos da argamassa residual componente frequente em agregados reciclados.

No entanto, ao comparar esse resultado com outros estudos, observa-se que a perda de massa foi inferior à verificada por Trindade (2022), que identificou maiores índices de deterioração em agregados reciclados submetidos a condições similares. Isso sugere que o desempenho do material avaliado neste trabalho pode ser considerado satisfatório dentro do contexto de agregados reciclados de concreto, apontando para uma qualidade relativamente superior do resíduo utilizado.

Adicionalmente, apesar da perda observada, os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram que o desempenho estrutural do concreto não foi comprometido. Isso reforça o potencial de uso do agregado reciclado, desde que se adotem critérios adequados. Ressalta-se, ainda, o benefício ambiental do aproveitamento desse tipo de material, alinhando a aplicação técnica à promoção de práticas sustentáveis na construção civil.

Tabela 12: Resultado do ensaio de ataque químico

Ensaio ataque químico			
Material	Massa g	Massa depois do ataque	Perda %
ARC	100	70,18	29,82

Fonte: própria

4.1.7. Ensaio de caracterização do aço

A caracterização das barras de aço utilizadas nas armaduras foi essencial para assegurar a confiabilidade dos resultados estruturais. Como apresentado na Tabela 13, os valores de tensão de escoamento obtidos para os aços CA-50 e CA-60 foram compatíveis com os limites da NBR 7480 (ABNT, 2022). As curvas tensão versus deformação, mostradas nas Figuras 60 e 61, confirmam o comportamento típico de cada material. As barras CA-50, utilizadas como armadura longitudinal, apresentaram patamar de escoamento bem definido e resistência próxima a 500 MPa, indicando boa ductilidade. Já as barras CA-60, usadas nos estribos, atingiram tensão de escoamento próxima a 600 MPa, com resposta adequada para sua classe.

Esses resultados confirmam a adequação dos materiais empregados, contribuindo para a validade das análises estruturais realizadas, especialmente nos ensaios de cisalhamento.

Tabela 13: Propriedades mecânicas das armaduras

Classe do aço	Φ (mm)	Área (mm ²)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{sy} (‰)	ϵ_{sy} (‰)	ϵ_{su} (‰)
CA-60	5,0	19,63	763,0	806,0	5,83	3,70	12,25
CA-50	16,0	201,06	592,0	656,0	3,10	-	12,31

Fonte: Própria

Onde,

f_y é a tensão de escoamento do aço;

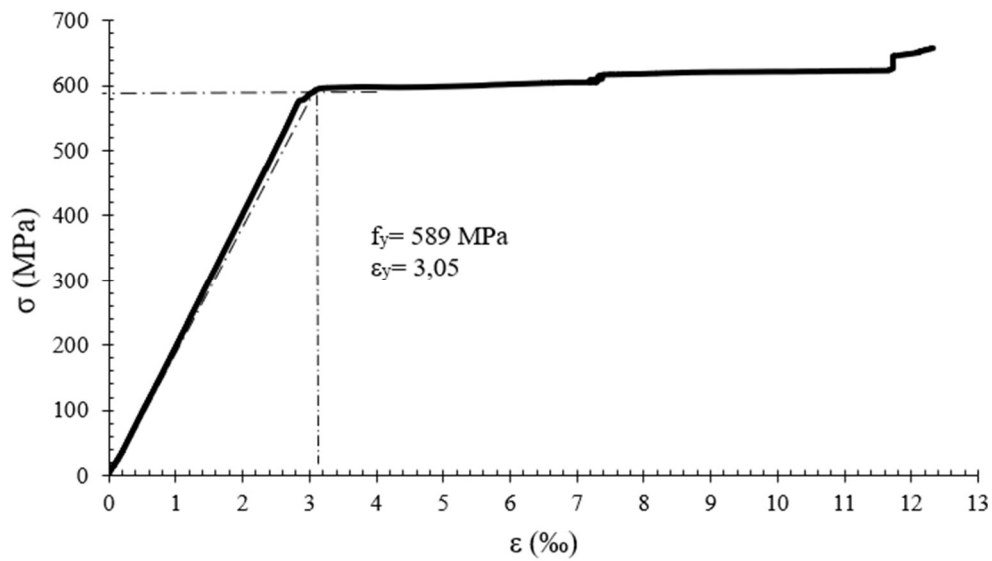
f_u é a resistência última do aço;

ϵ_{sy} é deformação específica de escoamento do aço;

ϵ_{sy}^* é deformação específica de escoamento do aço correspondente ao diagrama tensão-deformação bilinear;

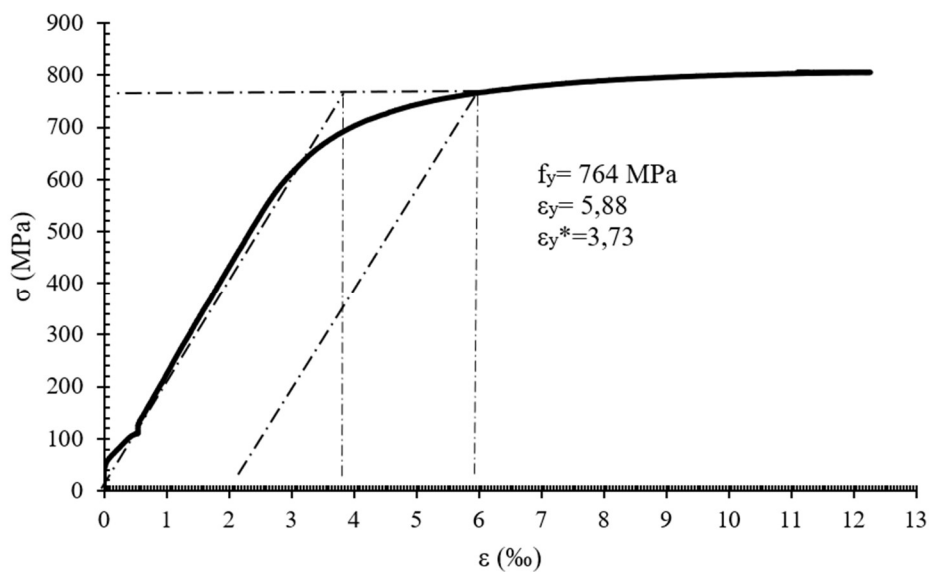
ϵ_{su} é deformação última do aço na ruptura.

Figura 60: Curva tensão versus deformação aço CA-50, 16mm



Fonte: Própria

Figura 61: Curva tensão versus deformação aço CA-60, 5mm



Fonte: Própria

4.1.8. Caracterização das fibras

4.1.8.1. Ensaio de tração na fibra de PET

Os resultados do ensaio de tração das fibras de PET, apresentados na Tabela 14, indicaram uma tensão média de ruptura de 177,91 MPa, com desvio padrão de

3,94 MPa e coeficiente de variação de 2,21%. Esses valores demonstram boa uniformidade entre os corpos de prova e confirmam que as fibras utilizadas possuem resistência compatível com aplicações em reforço de concreto, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas do compósito.

Tabela 14: Resultados dos ensaios à tração das fibras.

Corpos-de-prova	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Tensão Média (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
1	83,791	178,28			
2	81,320	174,51			
3	87,041	174,78			
4	83,393	185,32	177,91	3,94	2,21%
5	85,618	176,90			
6	85,278	177,66			

Fonte: Própria

Onde:

DP- é o desvio padrão;

Cv é o coeficiente de variação

4.1.8.2. Ensaio PULL-OUT das fibras

O ensaio de pull-out foi realizado com o objetivo de avaliar a aderência das fibras de PET à matriz cimentícia e identificar o comprimento mínimo de embutimento necessário para garantir sua ancoragem eficiente no compósito. Foram analisados corpos de prova com comprimentos de embutimento de 20, 30, 40 e 50 mm. A Tabela 15 apresenta os valores máximos de tensão de cisalhamento ($\tau_{\text{máx}}$) obtidos para cada condição de embutimento, permitindo a comparação direta entre os diferentes comprimentos e a identificação do comportamento de extração das fibras.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de PULL-OUT e seus parâmetros estatísticos

Corpos-de-prova	Comprimento de ancoragem (mm)	Força máxima (N)	T _{máx.} (MPa)	T _{máx, med.} (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
CP-1-20	20	58,6	0,54	0,63	0,10	15%
CP-2-20		66,0	0,61			

CP-3-20		79,8	0,73			
CP-1-30		90,3	0,56			
CP-2-30	30	61,8	0,38	0,49	0,10	20%
CP-3-30		85,2	0,52			
CP-1-40		85,2	0,52			
CP-2-40	40	105,9	0,49	0,46	0,02	5%
CP-3-40		101,0	0,47			
CP-1-50		93,3	0,34			
CP-2-50	50	97,8	0,35	0,35	0,00	1%
CP-3-50		94,3	0,35			

Fonte: Própria

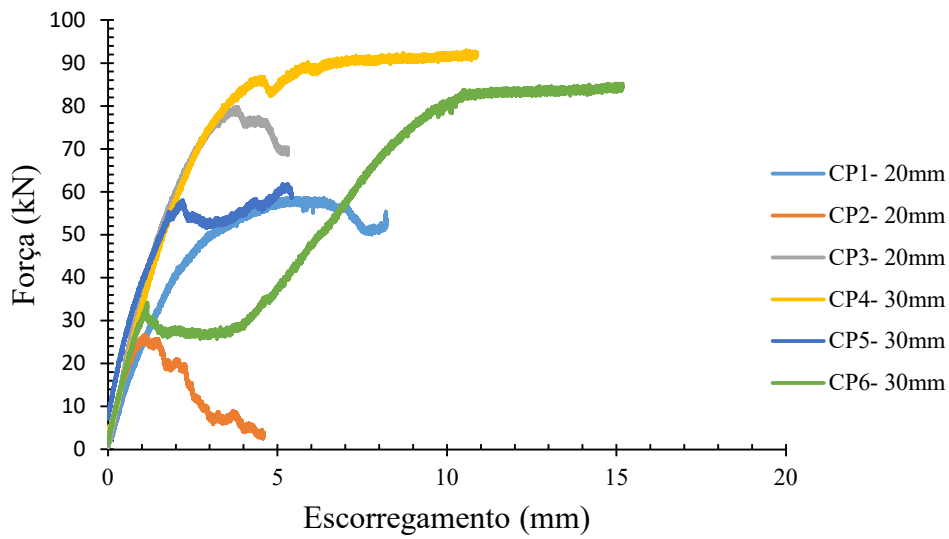
Onde:

DP- é o desvio padrão;

Cv é o coeficiente de variação

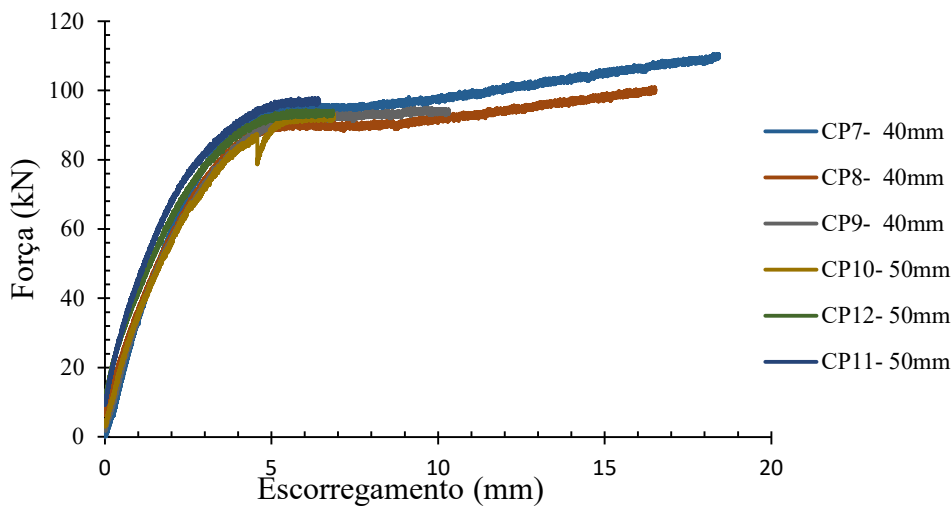
Os resultados mostram que os corpos de prova com embutimentos de 20 e 30 mm apresentaram escorregamento das fibras na matriz cimentícia, sem ocorrência de deformações plásticas, o que evidencia uma ancoragem insuficiente. Por outro lado, para os embutimentos de 40 e 50 mm, observou-se deformação plástica das fibras, sem escorregamento, indicando que o comprimento de 40 mm representa o limite mínimo efetivo de ancoragem. No entanto, considerando a distribuição aleatória das fibras no concreto, foi adotado o comprimento de 50 mm para garantir uma melhor interface de contato com a matriz. As Figuras 62 e 63 ilustram as curvas tensão cisalhante (τ) em função do escorregamento para os diferentes comprimentos de embutimento, evidenciando a transição do comportamento de extração para o regime de deformação plástica.

Figura 62: Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 20 e 30 mm



Fonte: Própria

Figura 63: Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 40 e 50 mm.



Fonte: Própria

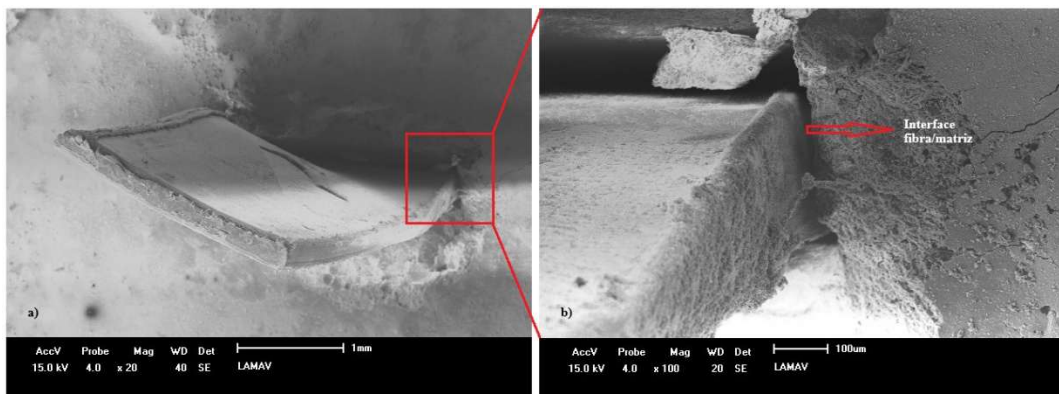
As amostras com 20 mm (CP-1-20, CP-2-20, CP-3-20) têm picos mais baixos comparados às amostras de 30 mm (CP-4-30, CP-5-30, CP-6-30). Isso sugere que o comprimento maior da fibra aumenta a resistência ao arrancamento, devido a uma maior área de interação. Nos corpos-de-prova com 40 mm de ancoragem da fibra (CP-7-40, CP-8-40, CP-9-40) e 50 mm (CP-10-50, CP-11-50, CP-12-50) apresentaram curvas bem similares, com maior estabilidade após o pico, o comprimento adicional contribui para uma melhor dissipação de energia,

não apresentaram escorregamento e sim deformação plástica. Nota-se que diferente dos comprimentos de 20 e 30 mm de ancoragem, não teve queda tensão, devido ao rearranjo das moléculas das fibras de PET, que resultam em aumento da resistência da fibra.

Observa-se através das curvas, que os corpos-de-prova que apresentaram escorregamento da fibra tiveram queda na tensão e não houve aumento na força. Já para os corpos-de-prova que não escorregaram, apresentaram a curva de deformação seguida de aumento da tensão, que se deu pelo rearranjo das moléculas da fibra de PET que as tornam mais resistentes.

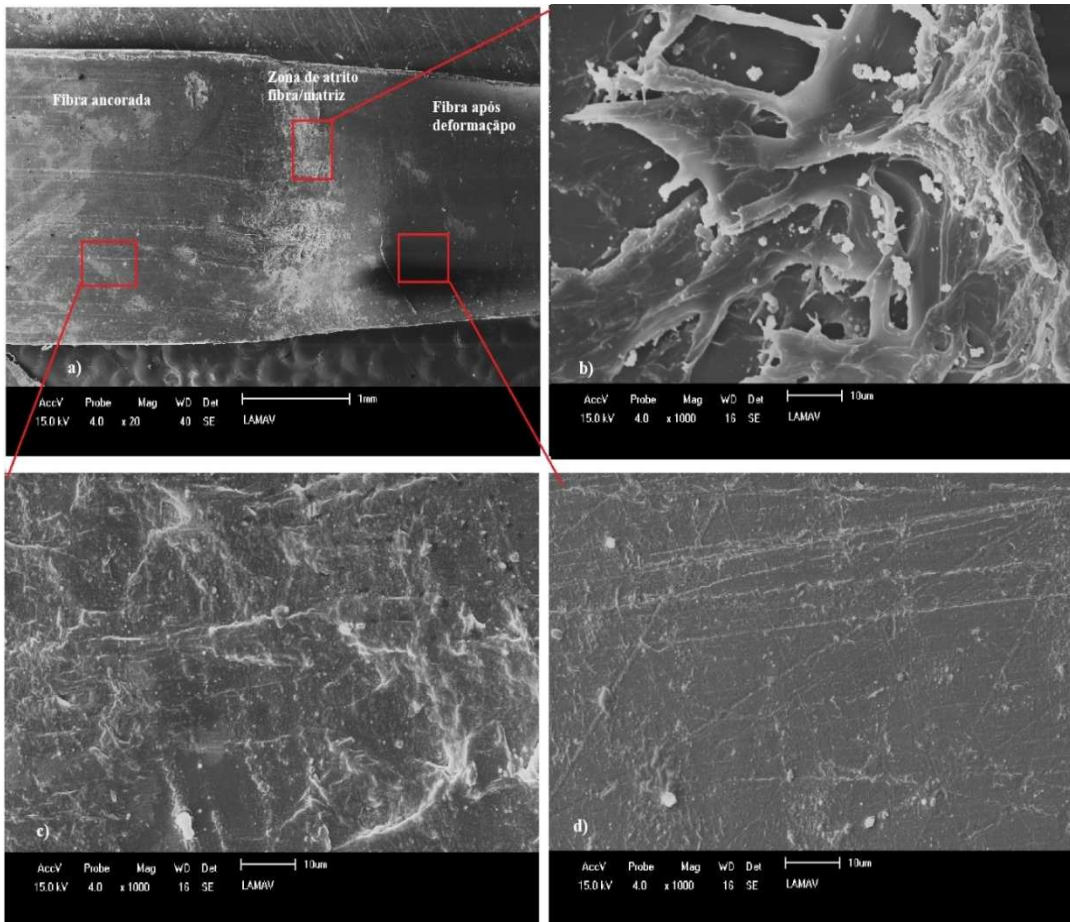
A análise realizada pelo MEV mostra que as Figuras 64, 65, e 66 evidenciam que, as fibras que apresentaram escorregamento, não foram observados resíduos da matriz aderido à fibra, indicando uma fraca aderência fibra/matriz conforme ilustrado na Figura 67.

Figura 64: MEV após o ensaio: (a)- FE ampliação de 20X e (b)- FE ampliação de 100X



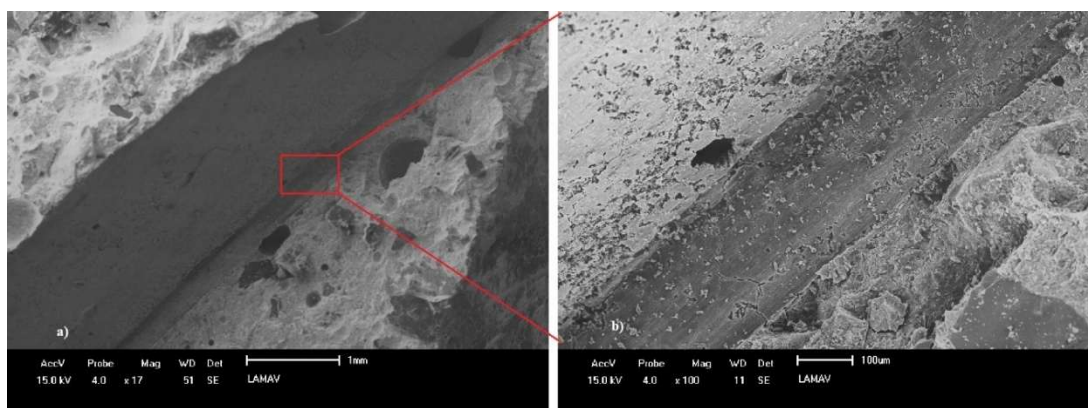
Fonte: Própria

Figura 65: MEV após o ensaio: (a)- FD ampliação de 20X, (b)- FD zona de atrito matriz/ fibra ampliação de 1000X, (c)- FD parte ancorada ampliação de 1000X e (d)- FD fibra após deformação ampliação de 1000X



Fonte: Própria

Figura 66: MEV após o ensaio: (a)- matriz ampliação de 17X e (b) matriz ampliação de 100X



Fonte: Própria

A Figura 65 por sua vez detalhou uma análise da fibra que apresentou deformação, na figura 65 a) os detalhes sofreram ampliação de 1000X em três

pontos, na Figura 65 b) a interface de atrito entre fibra e matriz que apresentou sinais de degradação devido ao atrito gerado durante o ensaio, na Figura 65 c) a face da fibra ancorada na matriz sofreu degradação em decorrência das condições ambientais alcalinas da matriz e por fim na Figura 65 d) a face deformada da fibra, observada após o ensaio de PULL-OUT, exibiu uma superfície lisa, sem alterações significativas. A Figura 66 por sua vez, revelou a face da fibra embutida na matriz cimentícia, onde foi observado descolamento da fibra da matriz. Nessa região, a superfície da matriz exibiu uma aparência lisa, sem sinais de irregularidades ou características rugosas que poderiam favorecer uma melhor aderência entre a fibra e a matriz.

4.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

A Tabela 16 apresenta os resultados do ensaio de abatimento de cone realizado para os concretos sem adição de fibras. O concreto com agregados naturais apresentou um abatimento de 130 mm, indicando elevada trabalhabilidade e consistência plástica. Já o concreto com agregados reciclados (CAR 0%) apresentou abatimento de 80 mm, evidenciando uma redução significativa na fluidez.

Essa diminuição na trabalhabilidade pode ser atribuída à maior absorção de água dos agregados reciclados e à presença de partículas mais angulosas e porosas, que comprometem a mobilidade da mistura. Apesar disso, os valores obtidos ainda são compatíveis com aplicações estruturais, desde que se adote um controle adequado do teor de água e aditivos plastificantes, quando necessário.

Tabela 16: Abatimento de cone

Concreto	Valores de abatimento (mm)
Natural	130
ARC	80

Fonte: própria

As Tabelas 17 e 18 apresentam, respectivamente, os resultados dos ensaios de consistência para os concretos com adição de fibras e a classificação conforme a norma DIN 1048-1:1991-06. Com a adição das fibras de PET, observou-se uma diminuição adicional da trabalhabilidade, comportamento que está de acordo com o esperado na literatura. Os tempos obtidos no ensaio VeBe variaram entre 4,15 s

e 5,6 s. Segundo a classificação da Tabela 18, esse intervalo compreende as faixas fluido e plástico, indicando trabalhabilidade aceitável para concretos com fibras, mesmo com o efeito de entrelaçamento das fibras que tende a aumentar a coesão e dificultar o fluxo da mistura.

Tabela 17: Resultado ensaio VeBe, para os concretos com fibra

Concreto	Tempo (s)
CF 0,5	5,53
CF 1%	4,15
CF 1,25	5,6

Fonte: própria

Tabela 18: Tabela de parâmetros comparativos para VeBe

Tempo de Vebe (s)	Classificação	Descrição da Consistência
0 – 3	Muito fluido	Alta trabalhabilidade (pouco comum para esse ensaio)
3 – 5	Fluido	Boa trabalhabilidade
5 – 10	Plástico	Trabalhabilidade média
10 – 15	Semi-seco	Baixa trabalhabilidade
> 15	Seco	Muito baixa trabalhabilidade

Fonte: Adaptado (DIN 1048-1:1991-06).

O menor tempo de VeBe (4,15 s) foi registrado para o concreto com 1% de fibras, indicando melhor desempenho de consistência dentro dos traços com fibras. Esse resultado pode estar relacionado a uma distribuição mais eficiente das fibras nesse teor, promovendo um equilíbrio entre coesão e mobilidade. Por outro lado, os traços com 0,5% e 1,25% de fibras apresentaram tempos de 5,53 s e 5,6 s, respectivamente, caracterizando uma mistura de consistência plástica. Essa elevação nos tempos pode estar associada a um menor volume de fibras (no caso de 0,5%) que não contribui para a fluidez ou a um excesso de fibras (em 1,25%), que aumenta o atrito interno da mistura.

De forma geral, todos os concretos com fibras mantiveram uma trabalhabilidade satisfatória, permitindo lançamento e adensamento eficientes, desde que se mantenha atenção ao controle de materiais e à escolha adequada de

aditivos. A redução da fluidez é um fator importante a ser considerado, mas não inviabiliza o uso estrutural, reforçando a viabilidade técnica da incorporação tanto do agregado reciclado quanto das fibras de PET.

4.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

No presente estudo, o traço CAR 0%, composto por 100% de substituição do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de concreto, apresentou desempenho superior em resistência à tração e à compressão em comparação aos demais traços. Esse comportamento pode ser atribuído a diversos fatores apontados na literatura. Primeiramente, a presença de pasta de cimento aderida nos agregados reciclados pode favorecer a zona de transição interfacial, promovendo melhor aderência com a nova matriz de cimento (Cardoso et al., 2021; Sagheer; Tabsh; Yehia, 2023). Além disso, a correta correção da relação a/c para os traços com agregados reciclados realizada neste estudo e o controle na cura evitou perdas de água de hidratação, contribuindo para uma matriz mais densa (Tam; Soomro; Evangelista, 2018).

Outro aspecto relevante é o possível efeito pozolânico de finos residuais presentes nos agregados, que podem reagir com o hidróxido de cálcio, promovendo o preenchimento de poros e aumento da resistência mecânica (Poon; Shui; Lam, 2004). A seleção adequada dos agregados reciclados e sua origem em um concreto de boa qualidade também exerceram papel fundamental na melhoria do desempenho (Tam; Soomro; Evangelista, 2018; Voo; Poon; Foster, 2010). A combinação desses fatores, aliada ao controle tecnológico rigoroso durante o preparo das misturas, incluindo pesagem precisa, homogeneização adequada e correção da água de amassamento, foi decisiva para garantir a uniformidade da mistura e a eficiência na hidratação, resultando em um concreto reciclado de alto desempenho.

4.3.1. Resistência a compressão

A análise dos resultados de resistência à compressão (Tabela 19 e Figura 67) demonstram que os concretos produzidos com agregado natural (NAT 0%) e com agregado reciclado (CAR 0%) apresentaram desempenhos praticamente equivalentes, com resistências médias de 46,73 MPa e 46,89 MPa,

respectivamente, ambos com coeficientes de variação de 4%. Esse comportamento indica que a substituição total do agregado graúdo natural por reciclado não comprometeu o desempenho mecânico à compressão, reforçando a viabilidade técnica do uso de ARC em concretos estruturais, especialmente quando se adota um controle rigoroso sobre a origem, seleção e preparo do material reciclado. Para os traços com fibras de PET, observou-se uma redução na resistência média, em especial nas dosagens de 0,5% (39,26 MPa) e 1,25% (38,11 MPa). No entanto, o traço com 1,0% de fibras (CF 1%) apresentou resistência de 44,76 MPa, valor muito próximo aos traços de referência.

De acordo com os resultados da ANOVA, não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre os traços NAT 0%, CAR 0% e CF 1%, indicando que tanto a substituição do agregado natural pelo reciclado quanto a adição de 1% de fibras de PET não afetaram negativamente a resistência à compressão do concreto. Assim, a combinação entre agregado reciclado e 1% de fibras mostrou-se uma alternativa promissora, aliando ganhos ambientais à manutenção do desempenho mecânico exigido em aplicações estruturais.

Tabela 19: Tabela de resistência a compressão média dos concretos

CP	f_c média (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
NAT 0%	46,73	2,06	4
CAR 0%	46,89	1,76	4
CF 0,5%	39,26	1,3	3
CF 1,0%	44,76	1,97	4
CF 1,25%	38,11	1,93	5

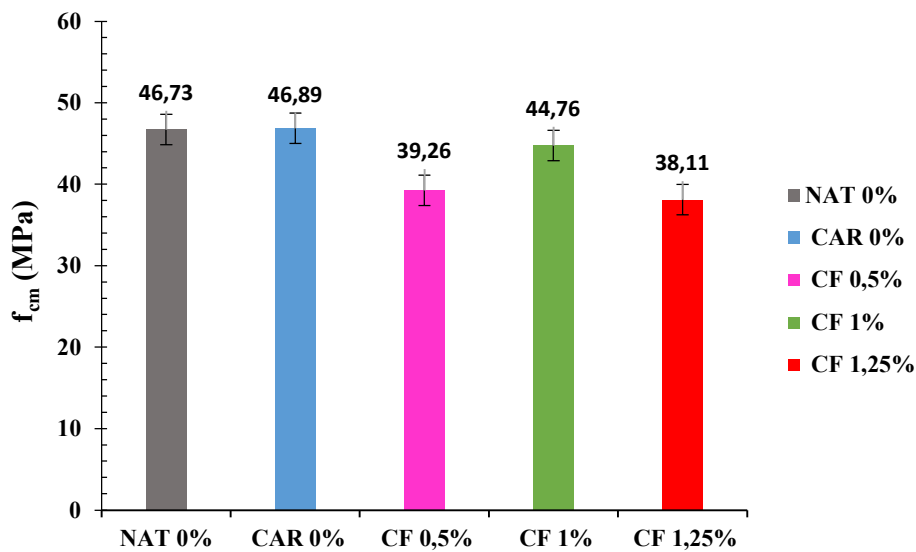
Fonte: Própria

Onde:

DP- é o desvio padrão;

Cv é o coeficiente de variação

Figura 67: Resultados dos ensaios de compressão dos concretos produzidos



Fonte: Própria

4.3.2. Resistência a tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral (Tabela 20 e Figura 68) revelam um desempenho superior do concreto com agregado reciclado (CAR 0%), que obteve a maior resistência média, superando o traço com agregado natural NAT 0%. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de partículas com maior rugosidade superficial nos resíduos e à boa adesão pasta-agregado, favorecida pelo controle tecnológico do material reciclado.

A incorporação de fibras de PET também promoveu um ganho moderado na resistência à tração em comparação ao NAT 0%, com destaque para o traço com 1,0% de fibras (2,72 MPa). Contudo, os maiores coeficientes de variação (14%) observados nos traços CF 1,0% e CF 1,25% indicam variações significativas entre os corpos de prova, possivelmente atribuídas à dificuldade de homogeneização e distribuição uniforme das fibras na matriz.

A análise estatística dos dados, por meio da ANOVA, confirmou que os diferentes traços não pertencem ao mesmo grupo estatístico, indicando diferenças significativas entre as médias. O teste de Tukey evidenciou que o traço CAR 0% difere estatisticamente do NAT 0%, corroborando o ganho de resistência promovido pelo uso do agregado reciclado. Já os traços com fibras, apesar da dispersão, não apresentaram diferenças estatisticamente relevantes entre si, mas

mantiveram desempenho superior ao NAT 0%, o que reforça o potencial das fibras PET na melhoria do comportamento à tração, especialmente quando sua incorporação é realizada com controle adequado.

Tabela 20: Tabela de resistência compressão por tração diametral

CP	f_{ct} média (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
NAT 0%	2,25	0,16	7
CAR 0%	3,19	0,05	2
CF 0,5%	2,52	0,42	8
CF 1,0%	2,72	0,38	14
CF 1,25%	2,63	0,36	14

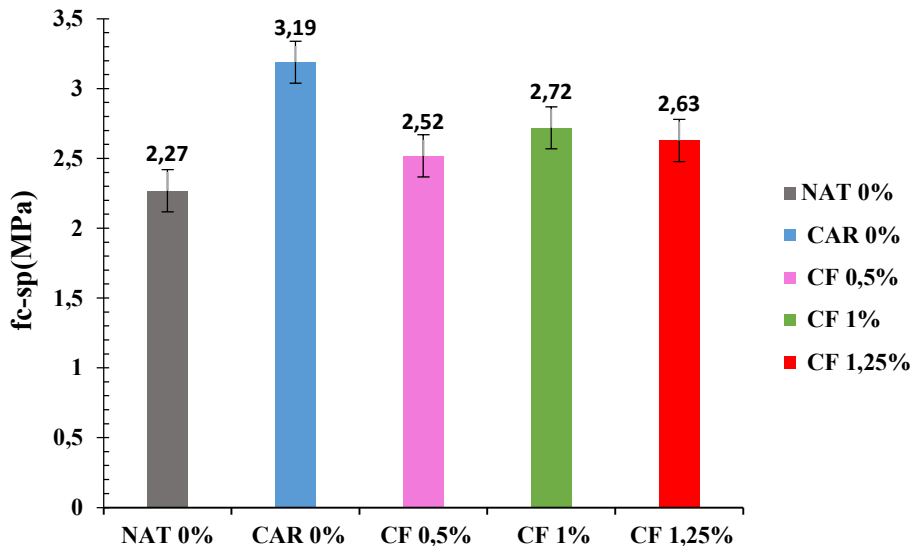
Fonte: Própria

Onde:

DP- é o desvio padrão;

Cv é o coeficiente de variação

Figura 68: Gráfico comparativo do ensaio de resistência a tração por compressão diametral



Fonte: própria

4.3.3. Modulo de elasticidade

A partir dos resultados apresentados na Tabela 21, observa-se que o concreto produzido com agregado reciclado (CAR 0%) apresentou uma redução

significativa no módulo de elasticidade longitudinal, passando de 23,9 GPa, no traço com agregado natural (NAT 0%), para 17,65 GPa, o que representa uma queda de aproximadamente 26%. Esse comportamento está alinhado com a literatura, como observado por Xiao (2018), que aponta que a substituição total dos agregados graúdos naturais por reciclados pode acarretar reduções de até 45% nesse parâmetro. Tal redução é geralmente atribuída à presença de argamassa aderida e à antiga matriz de concreto, que são mais porosas e menos rígidas do que os agregados naturais.

Além disso, os resultados indicam que a adição de fibras de PET aos concretos com ARC não promoveu uma recuperação estatisticamente significativa da rigidez do material na dosagem de 0,5%, cujo módulo de elasticidade foi de 17,75 GPa equivalente ao do traço com 0% de fibras. Já o traço com 1,0% de fibras apresentou módulo de 18,13 GPa, sugerindo um efeito positivo moderado, embora essa diferença de aproximadamente 2% deva ser interpretada com cautela, dado que não foi confirmada como estatisticamente significativa.

Na dosagem de 1,25%, o módulo retornou ao mesmo valor observado no traço com 0% de fibras, o que pode indicar que teores mais elevados comprometem a compactação e a integridade da matriz, anulando os eventuais benefícios observados em teores intermediários.

Dessa forma, os resultados apontam que, a substituição do agregado natural pelo reciclado comprometa a rigidez do concreto, a utilização controlada de fibras de PET apresenta potencial para atenuar parcialmente esse efeito, desde que se respeite um intervalo adequado de dosagem. Isso reforça a viabilidade do uso de fibras recicladas como estratégia complementar em concretos mais sustentáveis.

Tabela 21: Modulo de elasticidade

CPs	Modulo de elasticidade
NAT 0%	23,9
CAR 0%	17,65
CF 0,5	17,75
CF 1%	18,13
CF 1,25%	17,65

Fonte: Própria

4.4.RESULTADO DOS ENSAIOS DAS VIGAS

As vigas estudadas nesta pesquisa foram projetadas para apresentar ruptura por cisalhamento, apresentando uma fissura diagonal principal durante os ensaios de flexão em três pontos. Sem que houvesse ocorrência de esmagamento do concreto nem escoamento da armadura longitudinal, os ensaios ocorreram após os 28 dias da confecção das vigas.

Os resultados obtidos nos ensaios estão exemplificados na Tabela 22, apresentando os seguintes parâmetros: força de cisalhamento na fissuração (V_{cr}), força de cisalhamento última (V_u), resistência ao cisalhamento na fissuração (τ_{cr}), resistência ao cisalhamento última (τ_u), além das respectivas resistências normalizadas pela raiz quadrada da resistência à compressão do concreto ($\tau_{cr}/\sqrt{f_c}$ e $\tau_u/\sqrt{f_c}$). Também foram avaliados o deslocamento no centro do vão (Δ_u).

Todos os parâmetros citados foram analisados e discutido em tópicos. As deformações do concreto (ϵ_{cu}), por sua vez, são apresentadas em uma tabela separada, no item 4.5.3.

Tabela 22: Resultados principais dos ensaios nas vigas

Viga	Carga máxima (kN)	V_{cr} (kN)	V_u (kN)	τ_{cr} (MPa)	τ_u (MPa)	$(\tau_{cr}/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	$(\tau_u/\sqrt{f_c})$ (MPa ^{-0,5})	Δ_u (1) (mm)	Δ_u (2) (mm)	Δ_u (3) (mm)
CAR 0%	120,08	44,15	74,06	1,73	2,91	0,25	0,43	9,443	3,27	12,2
NAT 0%	92,97	43,71	57,77	1,72	2,27	0,25	0,33	4,781	2,58	8,86
CF 0,5%	68,11	38,89	42,32	1,53	1,66	0,24	0,26	2,84	1,42	6,0
CF 1,0%	96,22	38,34	59,79	1,51	2,35	0,22	0,35	5,602	0,56	5,63
CF 1,25%	105,52	38,37	65,57	1,51	2,58	0,24	0,42	6,429	2,13	7,53

Fonte: Própria

 Δ_u (1) - deslocamento vertical no meio do vão referente à carga máxima. Δ_u (2) - deslocamento referente à momento de fissuração Δ_u (3) - deslocamento referente à última medição

4.4.1. Comparação entre as vigas com fibra de PET e as vigas de referência (NAT 0% e CAR 0%)

Com o objetivo de avaliar o impacto da adição de fibras de PET no desempenho ao cisalhamento das vigas de concreto, realizou-se a comparação dos resultados obtidos para as vigas com 100% de agregado reciclado e adição de fibras (0,5%, 1% e 1,25%) em relação às duas vigas de referência: a viga NAT 0% e a viga CAR 0%. Os parâmetros comparados foram a carga de V_{cr} e V_u , e o índice de ductilidade (razão entre carga de ruptura e fissuração). As vigas analisadas não possuíam estribos na região do cisalhamento, onde houve a ruptura, sendo resistido somente pelo concreto (V_c) os esforços de cisalhamento, considerando a resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

4.4.1.1. Resistência à força cortante

Conforme apresentado na Tabela 22, as vigas de referência NAT 0% e CAR 0% apresentaram valores semelhantes para o cortante de fissuração (V_{cr}), demonstrando que a substituição do agregado não comprometeu o comportamento inicial à fissuração. No entanto, em termos de resistência última (V_u), a viga CAR 0% superou a NAT 0% em aproximadamente 22%, indicando que, quando bem processado, o uso de AR pode inclusive favorecer o desempenho ao cisalhamento. Este comportamento positivo pode estar associado à qualidade do agregado reciclado utilizado, cuja produção envolveu controle rigoroso. A rugosidade do AR favorece a aderência na interface pasta-agregado, como destacado por Trindade (2022).

A introdução de fibras PET nas vigas com AR revelou um comportamento sensível à dosagem adotada. Os valores de V_{cr} se mantiveram estáveis entre as vigas com fibra, com variações inferiores a 2%, o que sugere que as fibras têm influência sobre a fissuração inicial. Contudo, a contribuição das fibras foi mais expressiva na fase pós-fissuração.

A viga CF 0,5% apresentou o desempenho mais baixo entre todas, com reduções de 42% em V_u em relação à CAR 0% e 27% em relação à NAT 0%. Essa perda pode estar relacionada à má distribuição das fibras em teores baixos, gerando descontinuidades na matriz e favorecendo a formação precoce de fissuras, conforme observado também por Mohammed Ali, (2021). Este comportamento

revela um limite mínimo de efetividade da adição de fibras, um ponto não explorado por alguns estudos, mas que se mostrou crítico nesta análise.

Por outro lado, a viga CF 1% já demonstrou melhora no desempenho estrutural. Apesar de apresentar V_{cr} ligeiramente inferior (-12%) à NAT 0%, sua carga última foi discretamente superior, evidenciando que, após a formação das fissuras, as fibras atuaram na contenção e redistribuição das tensões. Rahal e Alrefaei (2018) relataram que o uso exclusivo de AR pode reduzir a resistência ao cisalhamento devido à fragilidade na zona de transição interfacial. No entanto, os resultados deste trabalho indicam que o uso combinado de AR e fibras PET pode mitigar esses efeitos, especialmente no estágio pós-fissuração.

A viga CF 1,25% foi a que apresentou o melhor desempenho entre os traços com fibras. Mesmo com uma leve antecipação da fissuração (-12,2%), sua carga última foi 22% superior à da NAT 0%. Esse resultado confirma o papel das fibras como mecanismo de reforço na fase pós-pico, aumentando a tenacidade do sistema e retardando o colapso. Embora Xião tenha estudado o impacto do CAR sob diferentes carregamentos, os ganhos obtidos com a introdução de PET reciclado neste trabalho representam uma inovação no controle da propagação das fissuras nesse concreto.

Esses dados reforçam os achados de Kazimbo et al. (2022), que observaram ganhos na ductilidade e carga última com o uso de 1,5% de fibras PET, além de modificação no padrão de fissuração e aumento da capacidade de absorção de energia. Assaad, Khalil e Khatib (2022) também identificaram melhorias significativas no cisalhamento em teores entre 1,5% e 3%, associando os ganhos ao intertravamento entre fibras e matriz cimentícia, mecanismo similar ao identificado com 1,25% de fibras neste estudo.

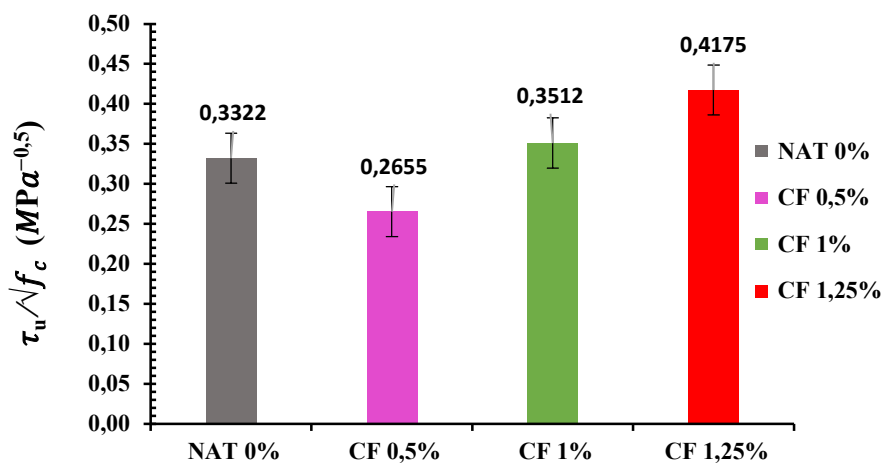
De forma complementar, Kim et al. (2010) identificaram ganhos de resistência à tração e ductilidade com teores de PET entre 0,5% e 1%. No presente trabalho, tais benefícios foram claramente perceptíveis na dosagem de 1,0%, que resultou em V_u superior à NAT 0%, embora com fissuração antecipada. Já a dosagem de 0,5% mostrou-se ineficaz, com desempenho estrutural inferior, confirmando a importância de uma dosagem mínima crítica para que as fibras exerçam seu papel estrutural de forma efetiva.

As Figuras 69 e 70 ilustram os resultados das resistências normalizadas ($\tau_u/\sqrt{f_c}$ e $\tau_{cr}/\sqrt{f_c}$), permitindo uma comparação equitativa entre os diferentes traços

de concreto. Observa-se que as vigas com maiores teores de fibra (1,0% e 1,25%) apresentaram melhor desempenho relativo em termos de resistência residual e capacidade de redistribuição de tensões.

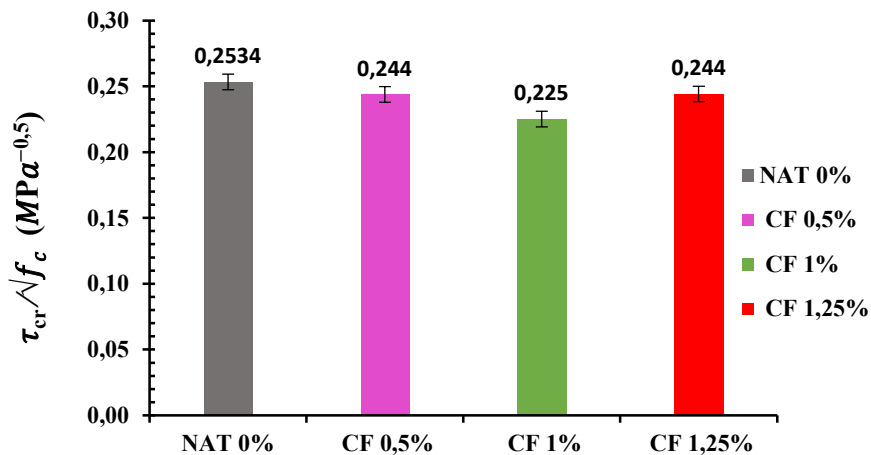
Em síntese, os dados desta pesquisa demonstram que a adição controlada de fibras PET, especialmente na proporção de 1,25%, pode proporcionar ganhos importantes em tenacidade, resistência residual e comportamento pós-fissuração, sem comprometer significativamente a trabalhabilidade do concreto. Esses resultados ampliam o conhecimento prévio sobre o uso de AR em concretos estruturais e evidenciam o potencial técnico e sustentável das fibras PET como reforço ao cisalhamento, quando são comparadas com a NAT 0%, principalmente em estruturas submetidas a ações cíclicas ou de impacto.

Figura 69 : Gráfico de tensão última normalizada das vigas com fibra versus NAT0%



Fonte: própria

Figura 70 : Gráfico de tensão de fissuração das vigas com fibra versus NAT 0%



Fonte: própria

A viga de referência CAR 0%, apresentou o melhor desempenho estrutural entre todas as vigas analisadas, com carga de fissuração (V_{cr}) de 44,15 kN, carga última (V_u) de 74,06 kN e índice de ductilidade de 1,69. Esses resultados não apenas superaram os da viga NAT 0%, mas também confirmam a viabilidade do uso do AR em concretos estruturais quando sua produção é acompanhada por adequado controle tecnológico, conforme discutido por Xião et al. (2020).

Ao se comparar a CAR 0% com as vigas com fibras PET, observa-se que a introdução das fibras não resultou em aumento da resistência máxima ao cisalhamento, mas promoveu alterações significativas no comportamento pós-fissuração e na ductilidade das vigas. Essa mudança de padrão sugere que o papel das fibras se manifesta predominantemente após o surgimento das fissuras, influenciando a capacidade de absorver e redistribuir as tensões internas.

A viga CF 0,5% apresentou o desempenho mais comprometido em relação à CAR 0%, com reduções de 12% em V_{cr} e 43% em V_u , além do menor índice de ductilidade (1,09). Assim como ocorreu ao comparar com a NAT 0%, este comportamento pode ser atribuído à baixa eficiência de entrelaçamento das fibras em teores reduzidos, comprometendo a formação de uma rede de contenção adequada das fissuras, tal como evidenciado por Mohammed Ali (2021).

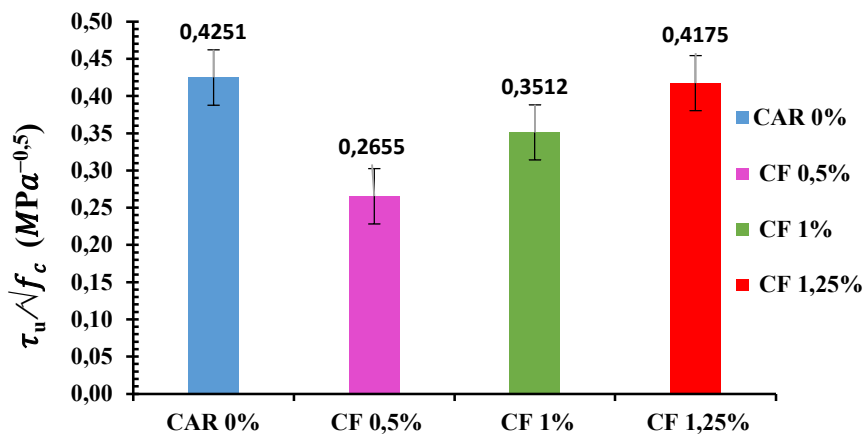
Já a viga CF 1% demonstrou uma redução de 19% em V_u em comparação à CAR 0%, mas com um índice de ductilidade significativamente mais elevado (1,56), evidenciando maior capacidade de dissipação de energia na fase pós-fissuração. Esse padrão confirma o potencial das fibras em melhorar a resposta estrutural mesmo diante de uma resistência máxima inferior, em linha com os achados de Kim et al. (2010), que relataram ganhos expressivos em tenacidade para teores de PET entre 0,5% e 1%.

A viga CF 1,25%, embora não tenha superado a V_u da CAR 0%, obteve o mais alto índice de ductilidade entre todas as vigas ensaiadas (1,71), superando inclusive a própria viga de referência com CAR0%. Esse resultado evidencia o papel das fibras como reforço eficaz no estágio pós-fissurado, ao retardar o colapso estrutural e distribuir melhor as tensões cisalhantes. A literatura corrobora esse comportamento: Assaad, Khalil e Khatib (2022) destacaram que teores entre 1,5% e 3% de fibras PET favorecem o desempenho ao cisalhamento justamente por esse mecanismo de intertravamento entre fibras e matriz.

Portanto, embora nenhuma das vigas com fibras PET tenha superado a resistência máxima da viga CAR 0%, os traços com 1% e 1,25% demonstraram avanços importantes em termos de ductilidade e desempenho residual. Isso reforça a efetividade das fibras como recurso de reforço complementar, atuando diretamente no prolongamento da vida útil do elemento estrutural após o início da fissuração diagonal.

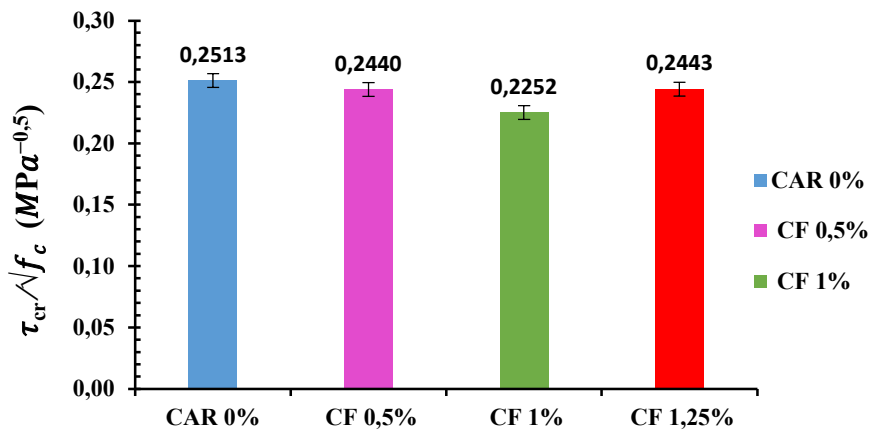
Os dados normalizados de resistência ao cisalhamento ($\tau_u/\sqrt{f_c}$ e $\tau_{cr}/\sqrt{f_c}$), apresentados nas Figuras 71 e 72, ilustram essas tendências de forma clara, permitindo a comparação equitativa entre os traços e destacando a atuação diferenciada das fibras PET como elemento mitigador da fragilidade pós-fissura. Esses achados se alinham aos estudos de Kazimbo et al. (2022) e CORÓ, (2002); Foti, (2013), que apontam o uso de fibras como uma estratégia sustentável e eficiente para o reforço de estruturas sujeitas a ações dinâmicas.

Figura 71 : Gráfico de tensão de última das vigas com fibra versus CAR 0%



Fonte: própria

Figura 72 : Gráfico de tensão de fissuração das vigas x CAR 0%



Fonte: própria

Esse desempenho superior evidencia que, quando bem selecionado e controlado, o uso de ARC pode resultar em concretos com elevada resistência ao cisalhamento e boa ductilidade, consolidando-se como uma alternativa viável e sustentável ao agregado natural. Assim, mesmo sem adições de fibras, a viga CAR 0% destacou-se pelo melhor equilíbrio entre resistência e ductilidade.

4.4.2. Deformações específicas das armaduras longitudinais

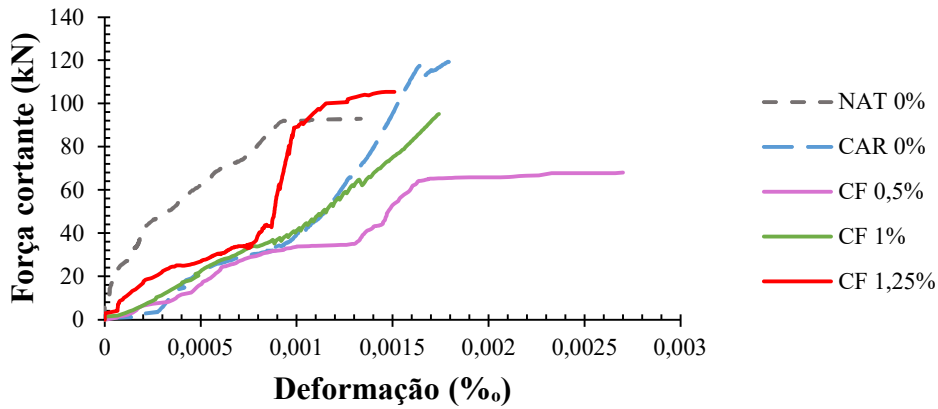
As curvas tensão–deformação das armaduras longitudinais, apresentadas na Figura 73, revelam o comportamento do aço sob carregamento nas diferentes vigas ensaiadas. A aplicação da técnica CID, foi fundamental para essa análise, permitindo a obtenção de dados de deformação indireta da armadura por meio do mapeamento da superfície do concreto na zona de tração, região crítica para o estudo do desempenho pós-fissuração. A partir da análise das imagens processadas no software GOM Correlate, foi possível identificar as regiões de maior deformação, notadamente no eixo longitudinal na altura da armadura, junto ao ponto de aplicação da carga.

Observou-se que, com o aumento da tração, houve uma redução progressiva da distância entre os pontos de controle, refletindo a deformação efetiva do aço ao longo do ensaio. A partir dessas variações, foram construídas as curvas representativas da resposta tensão–deformação das armaduras.

A comparação entre as vigas de referência NAT 0% e CAR 0%, ilustrada nas Figuras 74 e 75, evidencia diferenças expressivas quanto à tenacidade e ao comportamento pós-pico do aço. A armadura da viga NAT 0% apresentou uma resposta mais rígida, com menor deformação e ruptura mais brusca após atingir a carga máxima. Por outro lado, a armadura da viga CAR 0% demonstrou maior alongamento após o pico de carga, indicando um comportamento mais dúctil e resistente à propagação de fissuras.

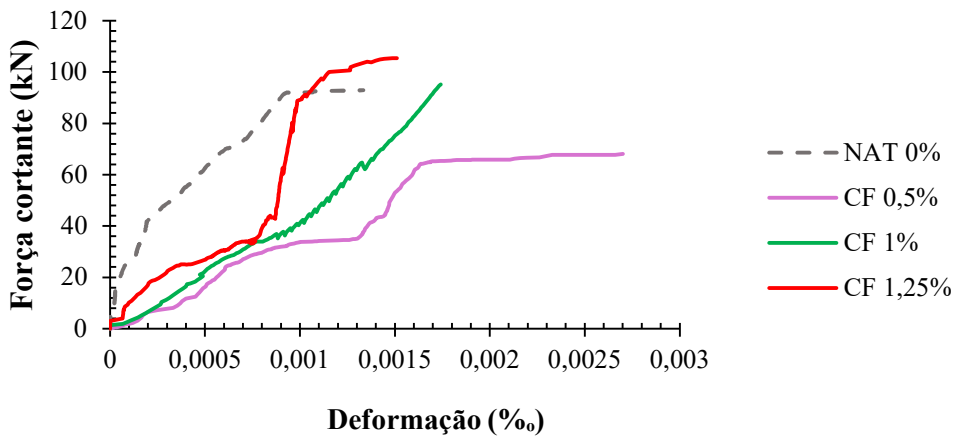
Esses resultados sugerem que o tipo de agregado influencia não apenas o desempenho do concreto, mas também a forma como as armaduras participam da redistribuição de esforços após o início da fissuração. A avaliação detalhada da resposta das armaduras contribui significativamente para a compreensão do desempenho estrutural global, especialmente em situações de carregamento extremo, em que a tenacidade e a capacidade de absorção de energia tornam-se fatores determinantes para a segurança da estrutura.

Figura 73: Comparação de todas as vigas analisadas, entre as curvas carga versus deformação das armaduras



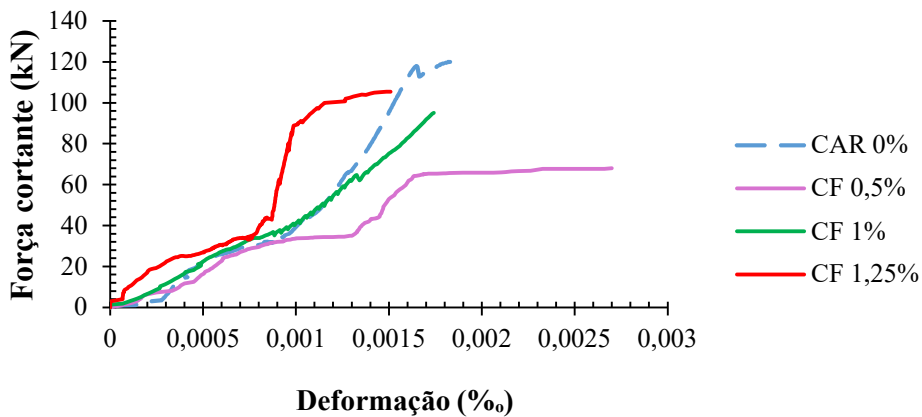
Fonte: própria

Figura 74: Comparação das vigas com adição de fibra com a referência NAT 0%, entre as curvas carga versus deformação das armaduras.



Fonte: própria

Figura 75: Comparação das vigas com adição de fibra com a referência CAR 0%, entre as curvas carga versus deformação das armaduras.



Fonte: própria

As curvas obtidas a partir da técnica CID demonstram o comportamento das armaduras longitudinais sob carregamento, evidenciando as influências do tipo de agregado e da adição de fibras PET nas deformações específicas do aço. A viga NAT 0% apresentou um comportamento típico de concreto convencional, com crescimento gradual de força até aproximadamente 110 kN, acompanhado de uma deformação relativamente baixa da armadura, o que indica alta rigidez e menor capacidade de absorção de energia após o pico de carga. A resposta do aço nessa viga mostra uma deformação contida, coerente com os achados de Kim et al. (2010), que relataram comportamento predominantemente elástico do aço em vigas com concreto convencional sem fibras.

A viga CAR 0%, embora tenha apresentado desempenho resistente elevado, mostrou deformações mais acentuadas na armadura após o início da fissuração. Esse aumento na deformabilidade pode ser atribuído à maior porosidade e fragilidade da zona de transição interfacial no concreto com agregado reciclado, como destacado por Rahal e Alrefaei (2018). O aço, nesse caso, foi mais exigido, revelando uma maior participação no processo de redistribuição de esforços, o que resultou em um comportamento mais tenaz da armadura na fase pós-fissurada.

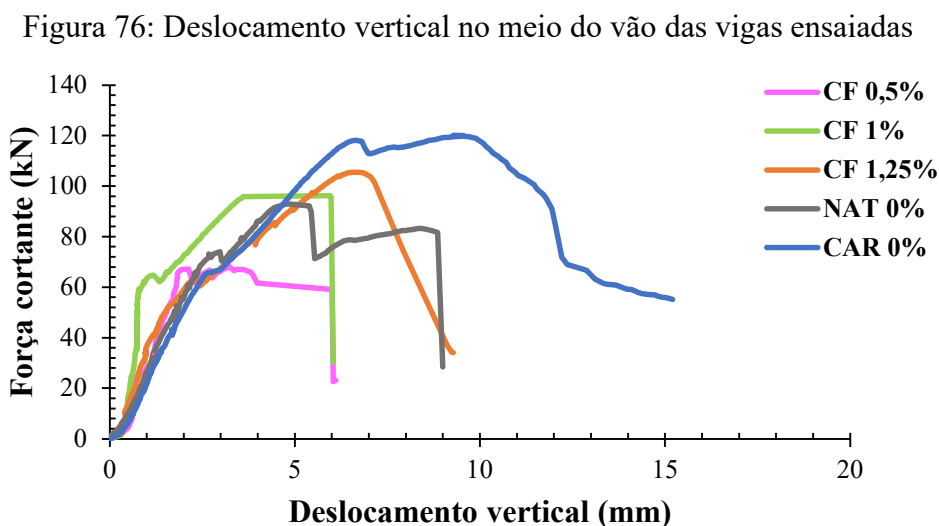
Nas vigas com adição de fibras de PET, observou-se um comportamento visivelmente distinto. A CF 0,5% apresentou o menor desempenho em termos de deformação da armadura, com baixa resistência e pouca contribuição do aço após o pico, comportamento que pode estar associado à má distribuição das fibras, conforme indicado por Mohammed Ali (2021). A ausência de uma rede eficaz de transferência de tensões comprometeu o desempenho conjunto concreto-aço.

Por outro lado, as vigas CF 1% e CF 1,25% demonstraram deformações mais significativas no aço, com curvas que evidenciam maior absorção de energia antes do colapso. A CF 1,25%, em particular, apresentou o maior alongamento da armadura entre todas as vigas, sinalizando uma atuação eficaz das fibras no controle da fissuração e na transferência de esforços para o aço. Esse comportamento está em consonância com os resultados de Assaad, Khalil e Khatib (2022), que observaram melhora na resposta do aço com o uso de fibras PET em teores superiores a 1%, e com Kazimbo et al. (2022), que relataram aumento da ductilidade e da capacidade de absorção de energia em vigas com fibras.

Esse padrão também reforça a contribuição das fibras para a ancoragem mecânica e o retardo do colapso, permitindo que o aço atue de forma mais progressiva e eficiente. O aumento da deformação da armadura nas vigas com 1% e 1,25% de fibras indica um comportamento pós-pico mais estável e com maior capacidade de dissipação de energia, o que é desejável em estruturas sujeitas a ações cíclicas ou extremas.

4.4.3. Análise do deslocamento vertical no meio do vão

Para a realização da análise do deslocamento vertical nas vigas ensaiadas, foi utilizado o software Gom Correlate®, onde empregou-se a técnica de correlação de imagens digitais. Onde foram criados pontos na base da viga no centro do vão e analisado os deslocamentos no eixo vertical (dy) em todas as etapas de carregamento com intervalo de tempo de 5 segundo entre a coleta de cada dado. Conseguindo assim medir o deslocamento progressivo à medida que o carregamento aumentava, realizando a análise da flexa na viga. Essa análise pode ter uma melhor avaliação na Figura 76. Onde mostram as curvas de força cortante versus deslocamento de todas as vigas.



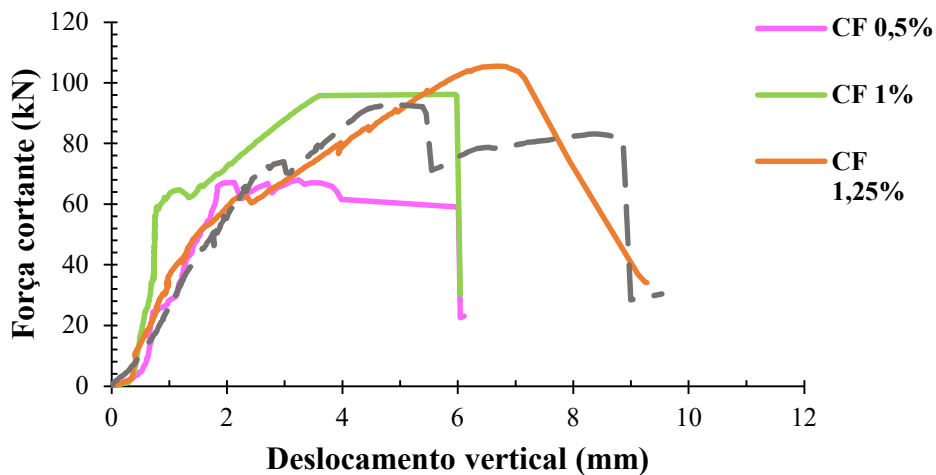
Fonte: própria

A análise do deslocamento vertical no meio do vão das vigas submetidas a esforço cortante é fundamental para compreender a rigidez estrutural, a capacidade de deformação e o comportamento pós-fissuração dos diferentes traços de concreto utilizados. O gráfico de força cortante versus deslocamento,

apresentado na Figura 76, apresentou o desempenho das cinco vigas ensaiadas: a viga de referência com agregado natural (NAT 0%), a viga com agregado reciclado (CAR 0%) e as vigas com adições de fibra PET nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,25% (CF 0,5%, CF 1% e CF 1,25%, respectivamente).

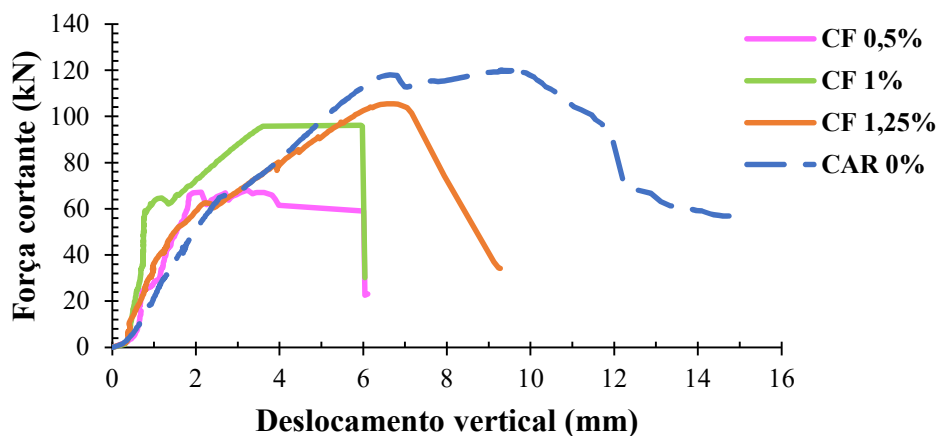
Para melhor interpretação dos efeitos da adição de fibras, foram realizados comparativos diretos entre cada viga de referência e as vigas com fibras. A Figura 77 apresenta a comparação entre a viga NAT 0% e as vigas com fibras, enquanto a Figura 78 mostra o comparativo entre a viga CAR 0% e os traços reforçados com PET. Essa abordagem permite avaliar, de forma isolada, o impacto das fibras no comportamento estrutural em relação a cada tipo de matriz original.

Figura 77: comparativo do deslocamento vertical entre a viga de referência NAT 0% e as vigas com fibra.



Fonte: própria

Figura 78: comparativo do deslocamento vertical entre a viga de referência CAR 0% e as vigas com fibra.



Fonte: própria

As curvas iniciais das vigas NAT 0% e CAR 0% apresentaram inclinações semelhantes, indicando rigidez inicial elevada. Esse comportamento é típico de concretos com agregado natural, que tendem a apresentar melhor compactação e menor índice de vazios. No caso da viga CAR 0%, a rigidez comparável pode ser atribuída à maior porosidade superficial dos agregados reciclados, o que favorece a aderência entre a matriz cimentícia e os agregados, promovendo uma boa interação na zona de transição.

Em contraste, as vigas com adição de fibras (CF 0,5%, CF 1% e CF 1,25%) demonstraram curvas iniciais com menor inclinação na fase elástica, refletindo uma rigidez inicial inferior. Essa redução pode estar relacionada a diversos fatores, como a menor trabalhabilidade do concreto com fibras, a possível má distribuição e orientação das fibras na matriz e a geração de zonas frágeis durante o adensamento. Tais fatores comprometem a uniformidade e a qualidade microestrutural do compósito, afetando negativamente sua resposta inicial ao carregamento.

Apesar dessa redução as fibras na rigidez inicial, as fibras trabalham de forma positiva no período de pós fissuração, elevando a tenacidade e controlando o desenvolvimento das trincas, elas não reforçam a parte elástica, mas, atuam diretamente na fase plástica, melhorando o comportamento.

A viga NAT 0% atingiu ruptura com deslocamento final de 10,95 mm, caracterizando um colapso mais abrupto, com menor capacidade de deformação e limitada tenacidade pós-pico. Em comparação, a viga CAR 0% apresentou não apenas o maior pico de força cortante entre todas as vigas ensaiadas, como também o maior deslocamento máximo, alcançando 15,57 mm. Esse desempenho indica uma maior capacidade de carga aliada a uma significativa capacidade de deformação, evidenciando um comportamento mais dúctil e tenaz após a fissuração. A curva força-deslocamento da viga CAR 0% se estende com declínio gradual da carga, demonstrando boa resistência residual e maior dissipação de energia mesmo após o pico, o que é desejável em termos de segurança estrutural.

Entre as vigas com adição de fibras PET, a CF 1,25% apresentou o melhor desempenho global, com resistência máxima superior à da viga NAT 0% e deslocamento de 8,88 mm. Embora não tenha superado a viga CAR 0% em capacidade de carga, mostrou um comportamento equilibrado entre rigidez,

resistência e ductilidade, além de um bom desempenho pós-fissuração, evidenciado pela extensão da curva após o pico de carga.

A viga CF 1% também se destacou, suportando cerca de 96 kN com deslocamento de 5,63 mm, e apresentou uma curva mais prolongada após o pico, indicando maior tenacidade em relação à NAT 0%, apesar de ter rompido antes da viga CAR 0%. Esse comportamento revela a eficácia das fibras na dissipação de energia e na contenção da propagação de fissuras.

Por outro lado, a viga CF 0,5% demonstrou o desempenho mais limitado entre todas. Apresentou ruptura precoce, com deslocamento de apenas 5,7 mm, e uma curva abrupta, sem prolongamento significativo após o pico de carga. Esse comportamento frágil pode estar associado à baixa concentração de fibras, que, quando insuficientemente distribuídas, não formam uma rede eficaz de contenção das fissuras, comprometendo a tenacidade e a capacidade de deformação do sistema.

De modo geral, o comportamento pós-fissuração foi mais favorável nas vigas CAR 0%, CF 1% e CF 1,25%, que apresentaram maior prolongamento das curvas após o pico de carga, evidenciando maior resistência residual e capacidade de absorção de energia. No caso específico da viga CAR 0%, esse comportamento mais tenaz, mesmo sem adição de fibras, pode ser atribuído às propriedades do agregado reciclado, cuja superfície mais rugosa e porosa favorece a aderência na interface pasta-agregado, proporcionando maior atrito interno e retardando o colapso estrutural. Além disso, partículas de argamassa aderida presentes no CAR podem atuar como zonas de microtravamento, contribuindo para a dissipação de energia após o surgimento das fissuras. Esses aspectos explicam a capacidade do concreto com ARC de manter resistência residual mesmo após o pico de carga, conforme também observado por Kou; Poon, (2012 e Rahal; Alrefaei, (2018).

Esses resultados reforçam a contribuição positiva tanto do uso do agregado reciclado quanto da adição de fibras PET desde que utilizadas em teores adequados para o desempenho estrutural de vigas submetidas ao cisalhamento, sobretudo em termos de tenacidade e comportamento pós-fissurado.

4.4.4. Deformação específicas do concreto na seção no meio do vão

O comportamento de deformação específica dos concretos foi avaliado na seção central das vigas, considerando a deformação de início de fissuração (ϵ_{cr}) e

a deformação última (ϵ_{cu}). Os dados foram obtidos através da utilização da técnica CID. Onde foram marcados dois pontos na parte comprimida do concreto no meio do vão, no eixo x, a captura de imagens foi gradativa de acordo com a aplicação da carga, que registrou a aproximação entre os pontos e constatando a compressão do concreto, calculando a diferença do estágio inicial e do estágio final para cada ponto analisado. A partir da diferença entre a distância obtida na carga última e distância inicial, dividido pela distância inicial, obteve-se a deformação do concreto para o cortante último, os resultados podem ter uma melhor compreensão através da Tabela 23.

Tabela 23: Deformação específica do concreto comprimido nas condições de fissuração e carga última.

Viga	ϵ_{cr} (‰)	ϵ_{cu} (‰)
NAT 0%	0,11	0,20
CAR 0%	0,10	0,38
CF 0,5%	3,48	3,22
CF 1%	0,62	0,47
CF 1,25%	0,24	0,46

Fonte: Própria

A análise das deformações específicas revelou que a incorporação de fibras de PET modificou o comportamento do concreto submetido à flexão. O traço com 0,5% de fibras apresentou deformações excessiva, acima do limite estabelecido pela norma de desempenho estrutural recomendados. Indicando comportamento excessivamente plástico e possível comprometimento da integridade da matriz. Em contrapartida, os concretos com 1,0% e 1,25% de fibras demonstraram evolução positiva no desempenho deformacional, com valores de fissuração e ruptura que, embora superiores aos do concreto convencional, mantiveram-se dentro de níveis aceitáveis para concretos reforçados com fibras. Tais resultados ressaltam que o teor de fibras exerce papel determinante na resposta mecânica do concreto: teores moderados (em torno de 1,0%) proporcionam aumento de ductilidade e tenacidade sem prejudicar a estabilidade estrutural, enquanto teores excessivos podem comprometer o comportamento esperado. Além disso,

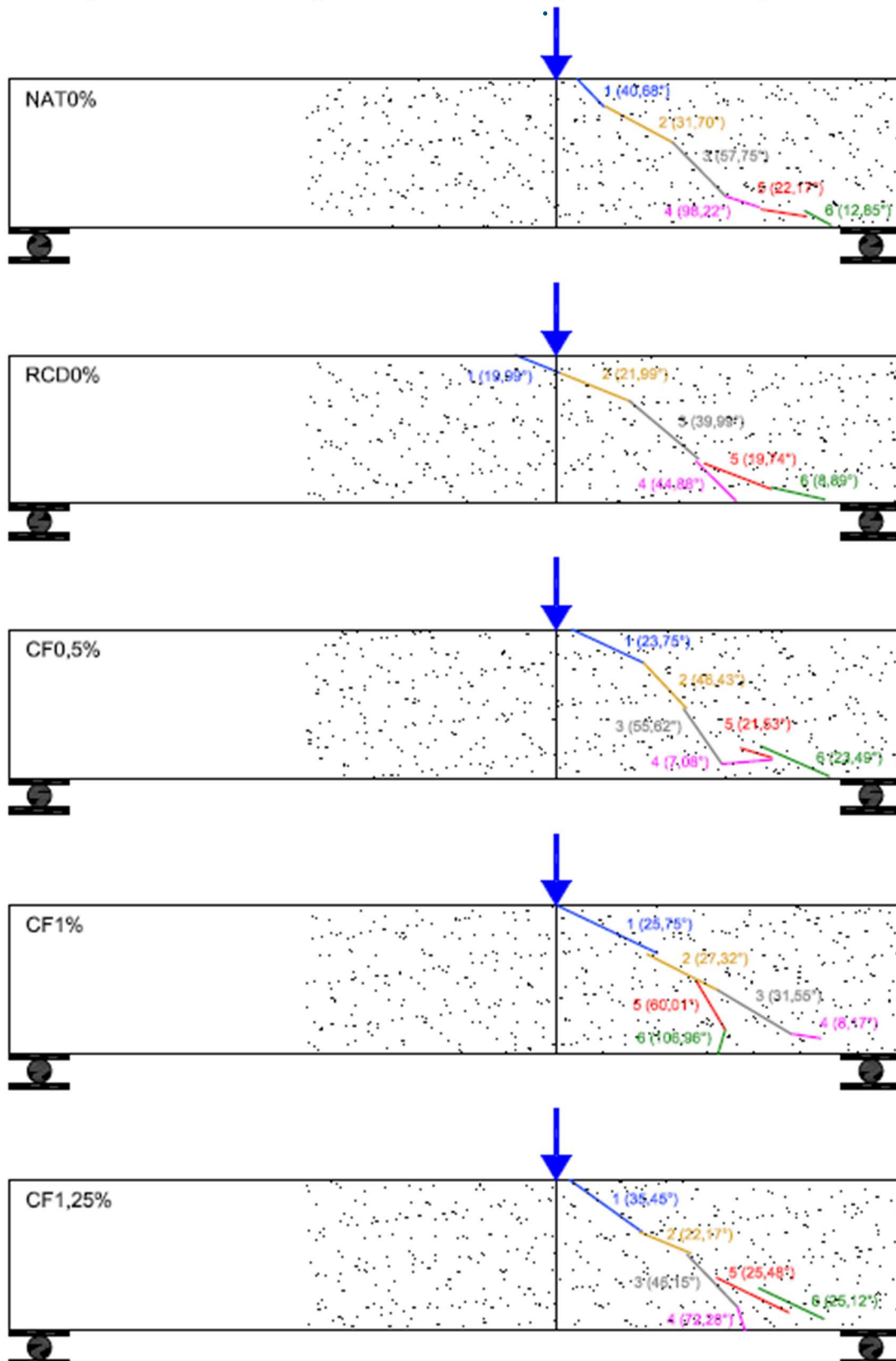
observou-se que o emprego de agregados reciclados favoreceu o aumento da deformabilidade do concreto, reforçando seu potencial de aplicação em sistemas estruturais que demandam maior capacidade de absorção de energia e controle de fissuração.

4.4.5. Análise de abertura de fissura e deslizamento nas vigas ensaiadas

O estudo analisou a influência da adição de fibras de PET no comportamento à fissuração de vigas de concretos, através da utilização da fotogrametria obtidas durante a execução dos ensaios, que determinou a abertura de fissuras durante a aplicação de carga, nas vigas ensaios. As vigas analisadas tiveram ruptura por cisalhamento com fissura diagonal crítica do ponto de carga até o apoio.

Para uma melhor análise da fissura diagonal crítica, esta foi dividida por trechos de acordo com a inclinação, todas as fissuras analisadas foram divididas em seis trechos cada, que objetivou simplificar a fissura diagonal principal em trechos retilíneos que mais se assemelhassem o formato original, o esquema da divisão dos trechos e ângulo de inclinação, pode ser melhor compreendido através da Figura 79.

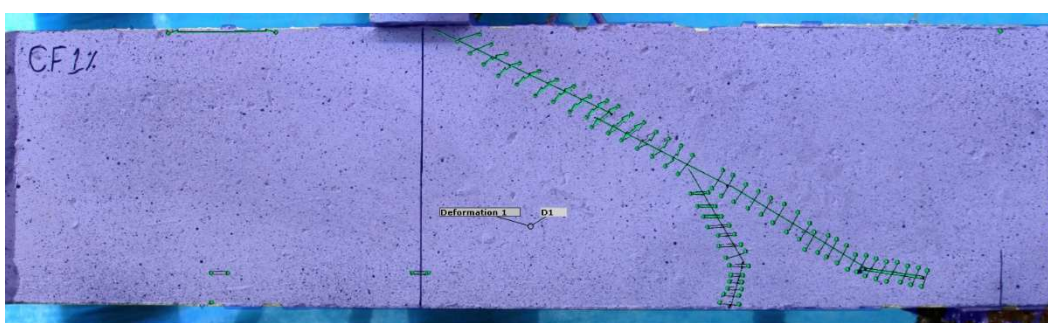
Figura 79: Formato simplificado da fissura diagonal crítica das vigas



Fonte: própria

Para a realização das análises tanto da abertura de fissura quanto do deslizamento da fissura diagonal crítica, foi utilizada a técnica CID, com o suporte do software Gom Correlate®, que analisou a distância entre pontos, onde foram posicionados pares de pontos paralelos em forma de costura na fissura, de modo que pudesse ser mensurada a distância entre os pares de pontos em conjunto com a aplicação da carga, fornecendo assim a variação da distância entre eles. A Figura 80 apresenta a execução dos pontos no software.

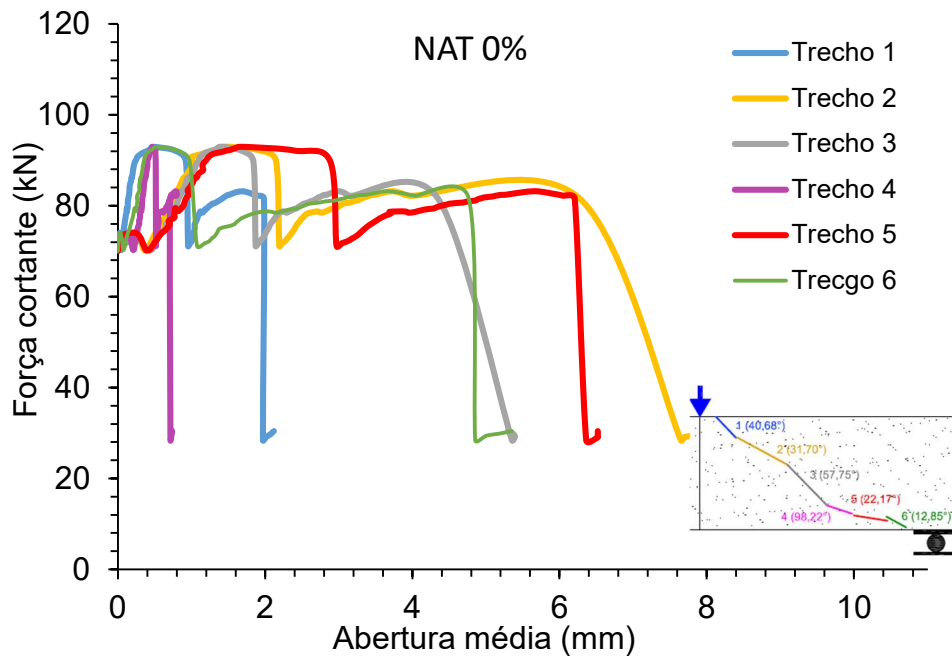
Figura 80: Tratamento da Fissura diagonal principal de cisalhamento da viga CF 1% no software Gom Correlate® dividida em trechos e marcação dos pares de pontos no para análise da abertura de fissuras e deslizamento.



Fonte: própria

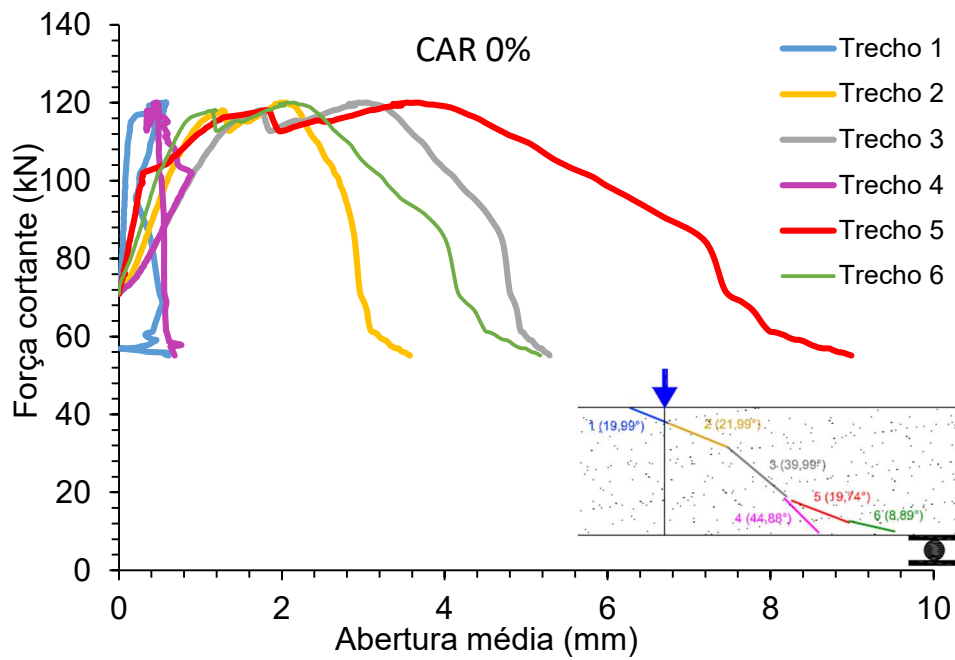
Com os pontos criados, foi possível calcular a distância entre eles e a variação causada pelo deslocamento provocado através da aplicação de carga, calculando a abertura média das fissuras e o deslizamento de cada trecho. A partir dos dados obtidos foram gerados gráficos das curvas das aberturas de fissuras e deslizamentos médios em cada trecho, como pode ser visto através das Figuras 81 viga NAT 0%, 82 viga CAR 0%, 83 viga CF 0,5%, 84 viga CF 1% e 85 viga CF 1,25% a abertura de fissura versus força cortante média de cada trecho e 86 NAT 0%, 87 CAR 0%, 88 viga CF 0,5%, 89 viga CF 1% e 90 viga CF 1,25% os deslizamentos médios versus força cortante de cada trecho das vigas ensaiadas.

Figura 81: Abertura de fissura média viga NAT 0%



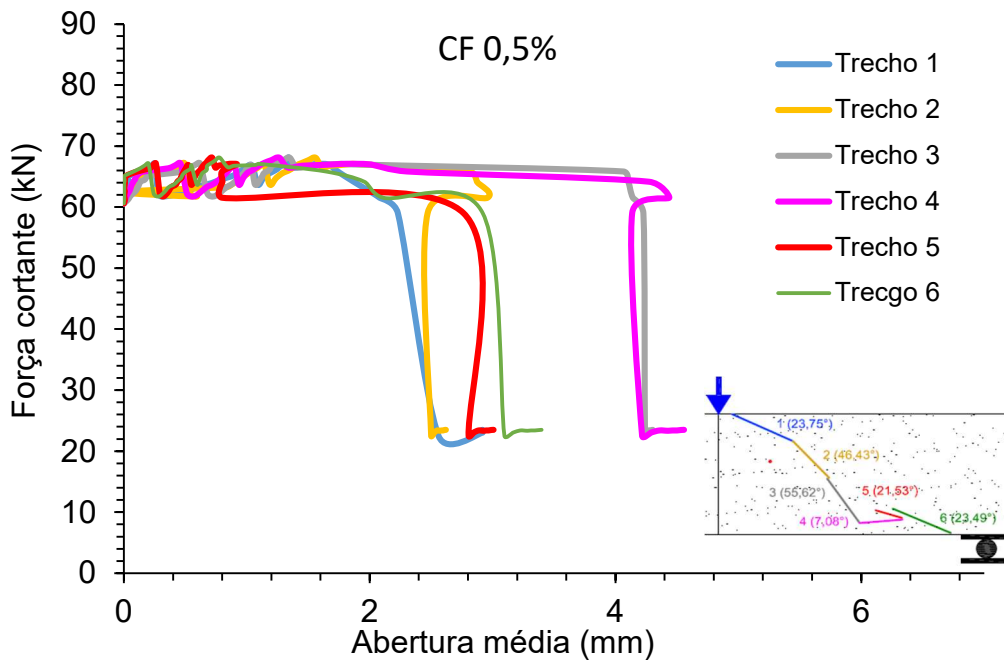
Fonte: Própria

Figura 82: Abertura de fissura média viga CAR 0%



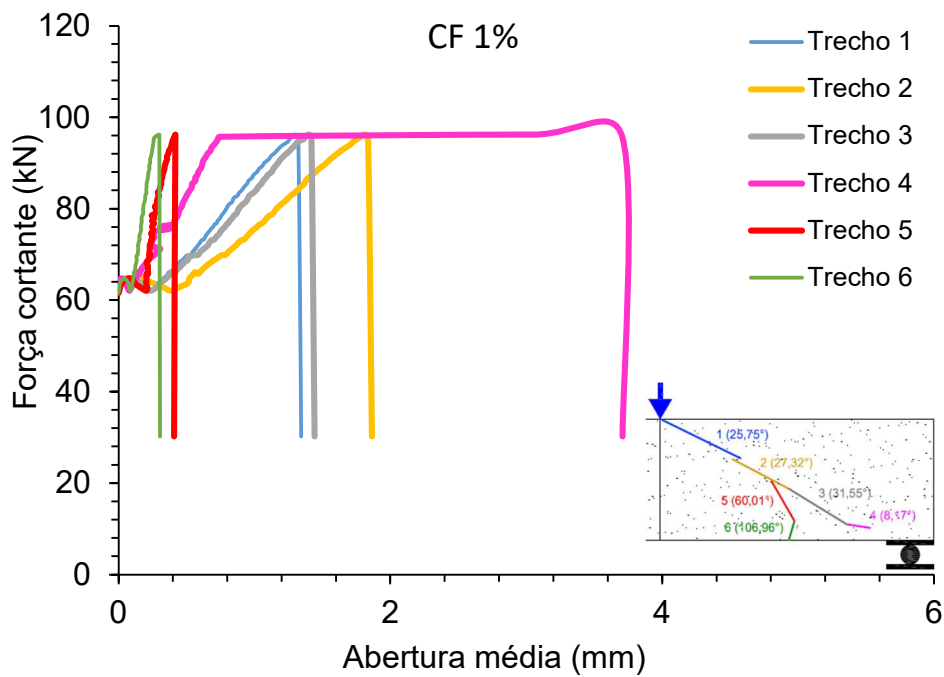
Fonte: Própria

Figura 83: Abertura de fissura média CF 0,5%



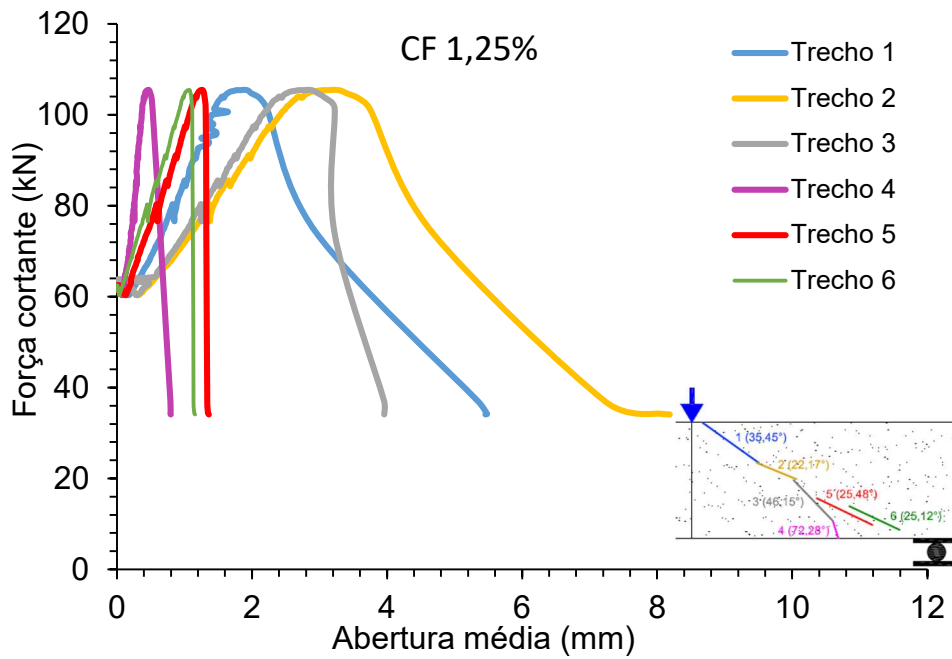
Fonte: Própria

Figura 84: Abertura de fissura média CF 1%



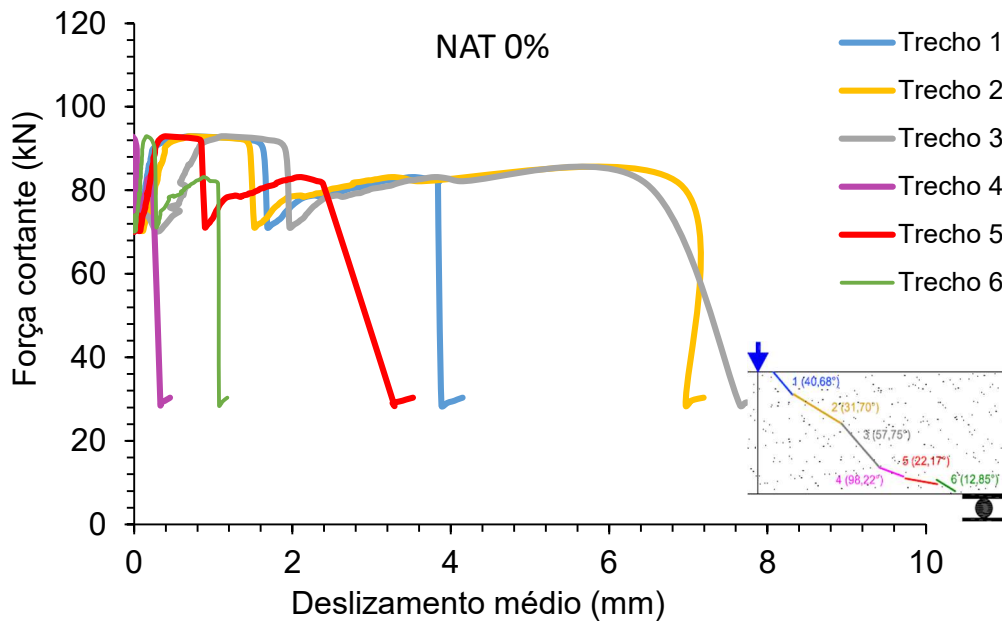
Fonte: Própria

Figura 85: Abertura de fissura média CF 1,25%



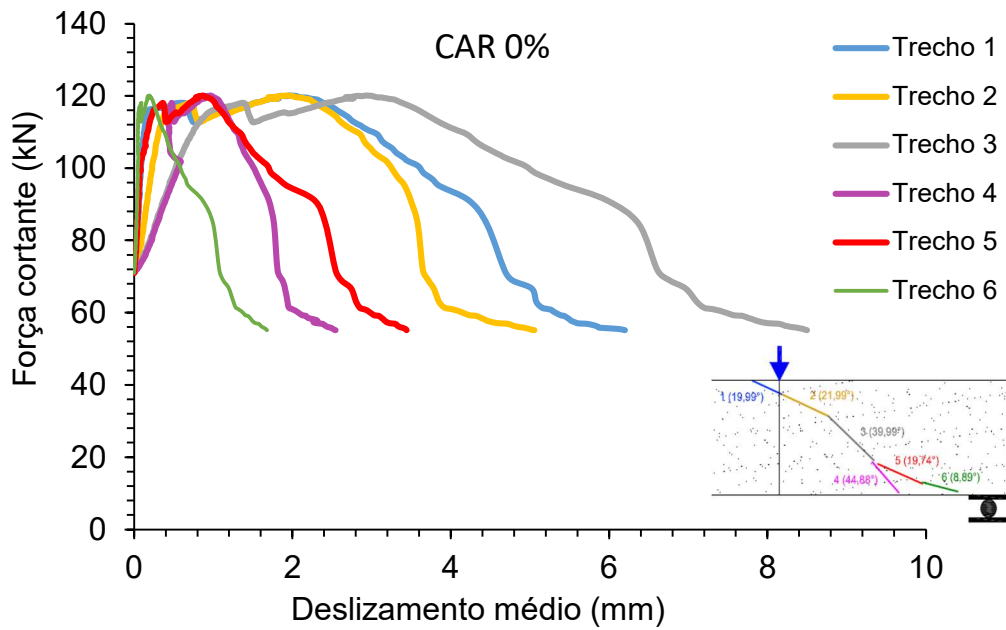
Fonte: Própria

Figura 86: Deslizamento médio viga NAT 0%



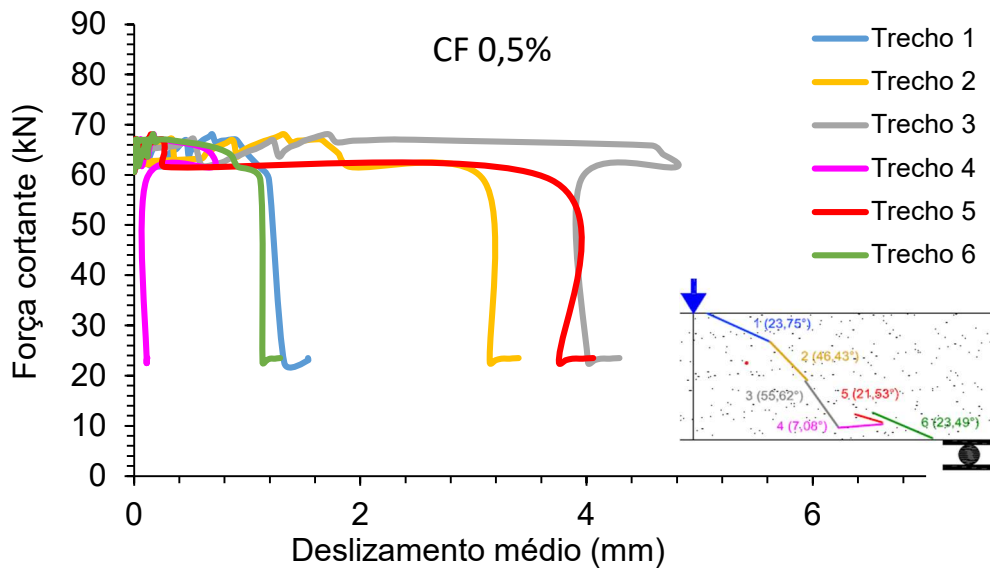
Fonte: Própria

Figura 87: Deslizamento médio viga CAR 0%



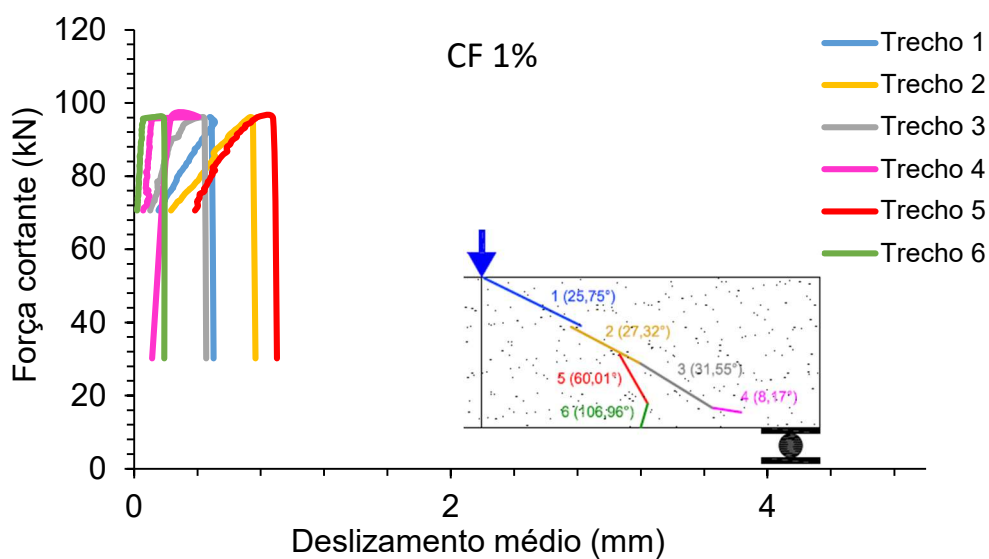
Fonte: Própria

Figura 88: Deslizamento médio viga CF 0,5%



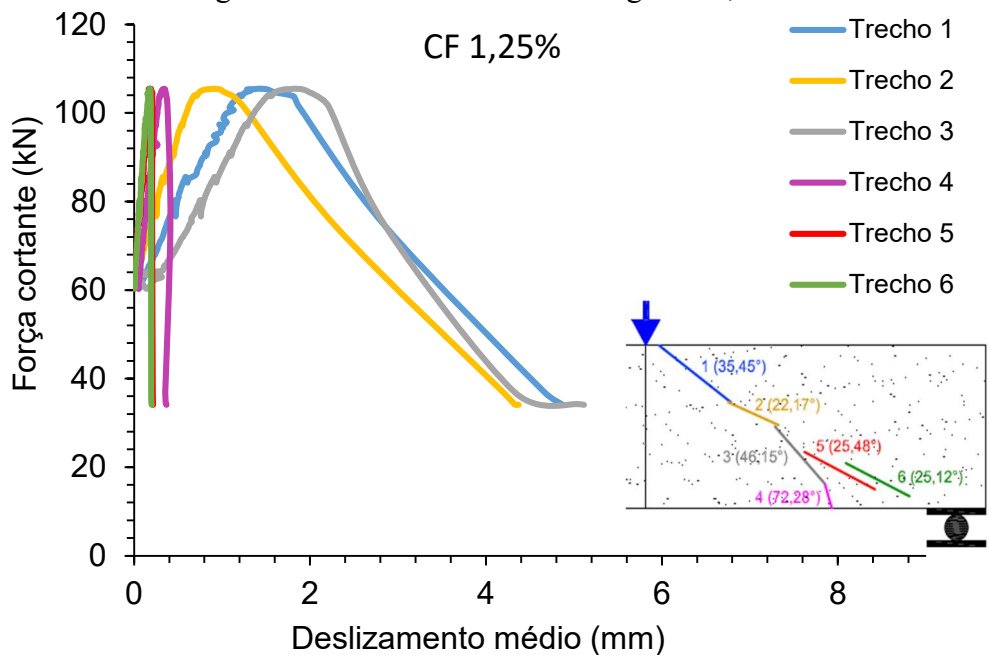
Fonte: Própria

Figura 89: Deslizamento médio viga CF 1%



Fonte: Própria

Figura 90: Deslizamento médio viga CF 1,25%



Fonte: Própria

A análise comparativa entre a evolução da abertura de fissuras e o comportamento de deslizamento das vigas permite uma avaliação mais completa da ductilidade e da capacidade de redistribuição de tensões nas diferentes proporções de adição de fibra das vigas estudadas em comparação com as vigas de referência.

A viga de referência NAT 0%, apresentou um comportamento caracterizado por alta rigidez inicial tanto nas curvas de abertura de fissuras quanto nas curvas de deslizamento. No entanto, após o pico de carga, observou-se uma queda brusca de resistência, com rápido crescimento das fissuras e aumento do deslocamento médio. Esse comportamento indica uma estrutura pouco dúctil, em que a fissuração leva rapidamente à perda de capacidade resistente e a grandes deslocamentos com baixa resistência residual, comportamento característico do concreto convencional.

Já a viga CAR 0%, mostrou comportamento semelhante ao NAT 0%, mas de forma ainda mais acentuada, com a resistência máxima foi superior e a abertura de fissuras ocorreu de forma mais prematura. Após o pico de carga, tanto a evolução das fissuras quanto o deslizamento foram abruptos, caracterizando uma ruptura frágil. O CAR 0% apresentou menor capacidade de suportar aberturas de fissura e deslocamentos médios significativos, evidenciando a influência negativa da substituição do agregado natural pelo reciclado sobre o comportamento pós-pico.

A vigas CF 0,5%, apresentou um melhor comportamento em relação as vigas de referência. Na análise da abertura de fissuras, observou-se um crescimento mais controlado após o pico de carga, com manutenção de parte da resistência mesmo diante de maiores aberturas. A resposta em termos de deslizamento também foi positiva, com uma redução da taxa de queda de força após o pico e uma capacidade de suportar maiores deslocamentos sem ruptura imediata. Esse comportamento demonstra que a adição de 0,5% de fibras conferiu ao concreto maior tenacidade e resistência à propagação de fissuras.

No entanto a viga CF 1% apresentou o melhor desempenho geral entre todas as séries avaliadas. As curvas de abertura de fissuras mostraram uma significativa capacidade de retenção de carga mesmo com o aumento da abertura, refletindo forte resistência à propagação das fissuras. Da mesma forma, as curvas de deslizamento indicaram elevada ductilidade, com a manutenção de força residual em altos níveis mesmo após deslocamentos relativamente grandes. Este comportamento comprova que a combinação da matriz de concreto com 1,0% de fibras de PET promoveu não apenas maior resistência inicial, mas também uma notável capacidade de absorção de energia e redistribuição de tensões pós-fissuração.

Já a viga CF 1,25% confirmaram a tendência de melhoria, com curvas de abertura de fissuras indicando resistência residual ainda significativa para grandes aberturas, associadas a deslocamentos médios elevados. Embora tenha havido maior variabilidade nos resultados individuais, a resposta geral em termos de contenção de fissuras e ductilidade foi superior à dos concretos sem fibras e próximo à do CF 1%. A elevada capacidade de suportar grandes deformações com resistência residual torna o traço CF 1,25% adequado para aplicações onde a ductilidade e a capacidade de dissipação de energia sejam requisitos fundamentais.

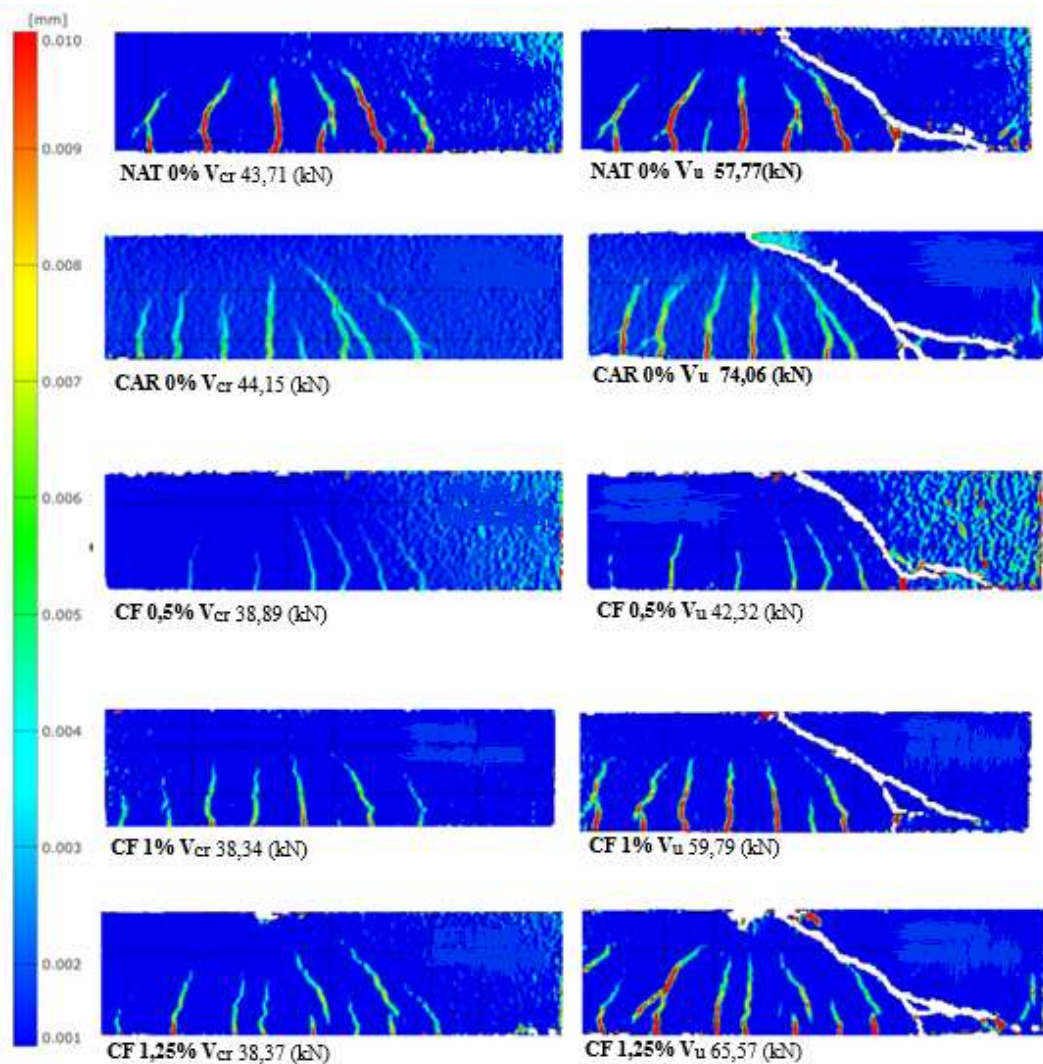
Assim, a comparação integrada revela que, enquanto os concretos NAT 0% e CAR 0% apresentaram comportamento típico de materiais frágeis, com forte correlação entre a rápida abertura de fissuras e o aumento abrupto do deslocamento, os concretos reforçados com fibras de PET, especialmente CF 1,0% e CF 1,25%, conseguiram controlar eficazmente a evolução das fissuras e sustentar deslocamentos médios elevados com resistência residual significativa. Esses resultados ressaltam o papel das fibras como elementos fundamentais para o aumento da ductilidade, resistência pós-fissuração e prolongamento da vida útil estrutural.

Os resultados deste estudo mostram que a incorporação de fibras de PET às vigas com agregado reciclado proporcionou ganhos expressivos tanto na contenção da abertura da fissura diagonal crítica quanto, de forma ainda mais contundente, na redução do deslizamento entre as faces fissuradas. Enquanto Trindade (2022), Rahal e Al-Refaei (2018) verificaram que vigas com agregado reciclado, mas sem fibras, sofrem fissuração abrupta após o pico de carga e perdem resistência rapidamente, as vigas reforçadas aqui analisadas apresentaram crescimento gradual das trincas, retenção de carga após a fissuração e diminuição do deslocamento relativo das faces da fissura. Esse controle do deslizamento mais efetivo que o próprio limite da abertura evidencia a ação das fibras como costura ativa que redistribui tensões, prolonga a fase pós-pico e eleva a resistência residual, conferindo ductilidade adicional ao elemento. Assim, a combinação de agregado reciclado com 1 %, 1,25 % de fibras de PET surge como solução viável para superar as limitações mecânicas observadas em concretos reciclados convencionais, garantindo desempenho estrutural mais seguro e eficiente sob esforços de cisalhamento.

4.4.6. Resultado da superfície de ruptura

A análise da superfície de ruptura foi conduzida a partir das imagens obtidas por meio da técnica de correlação de imagem digital, registradas nos instantes correspondentes ao início da fissuração (V_{cr}) e ao carregamento último (V_u), conforme ilustrado na Figura 91. Essa abordagem permitiu mapear de forma detalhada a distribuição e a progressão das fissuras nas diferentes composições avaliadas.

Figura 91: Campos de deformações V_{cr} e V_u das vigas analisadas.



Fonte: própria

A partir das imagens da superfície de ruptura das vigas foi possível mapear a distribuição e evolução das fissuras ao longo do carregamento. As imagens comparativas em dois momentos distintos o carregamento de primeira fissuração

(V_{cr}) e o carregamento último (V_u) evidenciam diferenças significativas no comportamento estrutural entre os traços analisados.

A viga de referência NAT 0% apresentou um padrão de fissuração típico de flexão combinada com tração diagonal. As fissuras foram bem distribuídas ao longo do banzo tracionado e propagaram-se inclinadamente em direção ao apoio, com forte concentração de deformações no momento da ruptura. A fissura crítica assumiu características abruptas e com elevada abertura, refletindo um colapso frágil, o que é compatível com a ausência de mecanismos internos de contenção após o pico de carga.

A viga CAR 0%, embora tenha demonstrado resistência final superior à NAT 0%, exibiu uma superfície de ruptura mais ampla e com maior número de fissuras inclinadas, muitas das quais se estenderam até a linha de compressão. A presença do agregado reciclado pode ter contribuído para um comportamento menos coeso da matriz, resultando em fissuração mais dispersa. Ainda assim, a superfície de ruptura revelou uma falha típica de cisalhamento em regiões críticas próximas ao apoio, indicando que, apesar da boa resistência à carga, o controle de fissuração foi inferior ao da viga de referência NAT 0%.

As vigas com adição de fibras PET apresentaram um comportamento distinto, caracterizado por uma distribuição mais homogênea das fissuras e menor concentração localizada de deformações. A CF 0,5% exibiu poucas fissuras no estágio de V_{cr} , com avanço mais gradual da ruptura e fissura principal menos abrupta em V_u . Essa evolução indica que as fibras atuaram no controle da propagação das fissuras e no retardamento do colapso.

Na CF 1%, a superfície de ruptura foi mais extensa, com numerosas fissuras diagonais finas, porém com menor abertura em comparação com a NAT 0% e a CAR 0%. Essa dispersão sugere um comportamento mais dúctil e uma maior redistribuição interna de tensões. A CF 1,25% foi a que apresentou a superfície de ruptura mais controlada: as fissuras surgiram em maior número, mas mantiveram baixa abertura e progressão limitada. A fissura crítica, embora presente, não dominou a ruptura, o que evidencia um colapso mais gradual e previsível.

De forma geral, a adição de fibras PET proporcionou uma melhora significativa na integridade pós-fissuração, promovendo um comportamento mais estável nas fases finais de carregamento. Isso se confirma pela morfologia das superfícies de ruptura, onde se observa que as fibras auxiliaram na contenção da

fissura crítica e favoreceram a formação de múltiplas fissuras menos intensas. Tais características são desejáveis em estruturas que requerem alta tenacidade e resistência ao colapso frágil.

Esses achados são consistentes com os resultados obtidos por Kazimbo et al. (2022), que também observaram alteração no padrão de ruptura em vigas de concreto reforçadas com fibras, com transição de fissuras concentradas para múltiplas fissuras dispersas, indicando maior tenacidade e capacidade de redistribuição de esforços. Assim como na presente pesquisa, Kazimbo et al. atribuíram tal comportamento à atuação das fibras como elementos de restrição à propagação da fissura crítica, promovendo uma ruptura mais gradual e controlada.

Portanto, a avaliação da superfície de ruptura evidencia que a adição de fibras de PET reciclado influencia significativamente o mecanismo de fissuração das vigas, promovendo um comportamento mais favorável do ponto de vista estrutural e contribuindo para o aumento da vida útil da estrutura ao mitigar a formação de fissuras localizadas e abruptas.

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa avaliou o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado produzidas com substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado de resíduos de concreto, incorporando diferentes teores de fibras de PET reciclado. O objetivo foi analisar a influência dessa combinação nas propriedades estruturais do concreto, com ênfase na resistência ao cisalhamento, ductilidade e resposta pós-fissuração.

Os ensaios demonstraram que a adição de fibras de PET melhorou significativamente o desempenho pós-fissuração das vigas. A dosagem de 1,0% se destacou, apresentando maior resistência residual, contenção eficiente da fissura diagonal crítica e melhor redistribuição de tensões. A dosagem de 1,25% também apresentou bons resultados, embora com maior variabilidade. Já o teor de 0,5% mostrou desempenho inferior, possivelmente em função da má dispersão das fibras na matriz cimentícia.

Com desempenho superior ao previsto, a viga CAR 0% confeccionada com 100% de AR e sem adição de fibras alcançou a maior resistência ao cisalhamento entre todos os traços avaliados, superando inclusive a viga de referência com agregado natural NAT 0%. Esse comportamento foi atribuído ao controle tecnológico e à qualidade do agregado reciclado utilizado, indicando que, mesmo sem reforço fibroso, o concreto com RCD pode atingir desempenho estrutural satisfatório.

Além disso, as vigas com fibras apresentaram os melhores resultados no controle da abertura da fissura diagonal e do deslizamento relativo, contribuindo para um comportamento mais dúctil e seguro em regime pós-fissuração. A técnica CID mostrou-se uma ferramenta precisa e eficaz na análise da evolução das fissuras, permitindo uma avaliação mais abrangente e confiável do comportamento estrutural.

Portanto, os resultados obtidos confirmam que a substituição do agregado natural por AR é tecnicamente viável e que a adição de fibras de PET potencializa o desempenho do concreto, especialmente sob solicitações cortantes. A combinação desses dois resíduos, amplamente disponíveis e de baixo custo, oferece uma alternativa inovadora, sustentável e eficaz para aplicações estruturais, contribuindo simultaneamente para a valorização de resíduos sólidos e para o

avanço da engenharia civil com foco em desempenho e responsabilidade ambiental.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo avaliou o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado, associada à adição de fibras de PET reciclado. No decorrer da pesquisa, identificaram-se oportunidades relevantes para aprofundamentos futuros, visando ampliar o conhecimento técnico sobre o uso combinado desses materiais em elementos estruturais.

Recomenda-se a realização de estudos envolvendo diferentes percentuais de substituição do agregado graúdo natural por reciclado, a fim de verificar o desempenho estrutural intermediário entre os extremos (0% e 100%) e suas possíveis otimizações. Além disso, sugere-se investigar a influência de tratamentos mecânicos ou superficiais nas fibras de PET (como abrasão, ancoragem química ou plasma), com o objetivo de melhorar a aderência interfacial entre as fibras e a matriz cimentícia, contribuindo para um reforço mais eficaz.

Outro aspecto relevante para estudos futuros é a avaliação da durabilidade e estabilidade das fibras no interior da matriz ao longo do tempo, com análises realizadas em diferentes idades do concreto. Ensaios de envelhecimento acelerado, ciclos de umidade e temperatura, bem como avaliações de resistência em longo prazo, podem fornecer dados importantes sobre o comportamento das fibras e sua influência na integridade estrutural em condições reais de exposição.

Por fim, propõe-se o uso de modelagem numérica avançada ou simulações por elementos finitos para complementar os dados experimentais, permitindo prever o comportamento de vigas reforçadas com fibras de PET sob diferentes solicitações estruturais, e avaliar seu desempenho em situações de serviço ou de falha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Nota Técnica ABIPET 0920**, p. 94, 2020.

ACI, A. C. I. 544.1 R State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. **ACI manual of concrete practice–Part**, v. 5, 1996.

ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, Antônio D. Concreto com agregados reciclados. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, n. January 2011, p. 1968, 2011.

ARAÚJO, Leylanny Silva *et al.* Análise Experimental do Uso da Fibra de PET (Polietileno Tereftalato) em Concreto Estrutural convencional / Experimental Analysis of the Use of PET Fiber (Polyethylene Terephthalate) in Conventional Structural Concrete. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 2976–2997, 2022.

AREZOUMANDI, Mahdi *et al.* Effect of recycled concrete aggregate replacement level on shear strength of reinforced concrete beams. **ACI Materials Journal**, v. 112, n. 4, p. 559, 2015.

ASSAAD, Joseph J.; KHALIL, Mario; KHATIB, Jamal. Alternatives to Enhance the Structural Performance of PET-Modified Reinforced Concrete Beams. **Environments - MDPI**, v. 9, n. 3, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. NBR 10004: RESÍDUOS SÓLIDOS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.** , 2004.

BANTHIA, Nemkumar; SAPPAKITTIPAKORN, M. Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. **Cement and concrete research**, v. 37, n. 9, p. 1366–1372, 2007.

BAUMANN, Theodor; RÜSCH, H. **Versuche zum studien der verdübelungswirkung der biegezugbewehrung eines stahlbetonbalkens.** [S.l.]: Ernst, 1970.

BENCARDINO, Francesco *et al.* Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 41, n. 1, p. 17–24, 2010.

BHAGWAT, Yamuna *et al.* Effect of polypropylene fibres on strength and durability performance of M-sand self compacting concrete. **Cogent Engineering**, v. 10, n. 1, 2023.

CAMILO, Beatriz Queiroga *et al.* Resíduos sólidos na construção civil: análise da gestão frente aos impactos causados ao meio ambiente. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e32711220994, 2022.

CAMPANA, Stefano *et al.* Analysis of shear-transfer actions on one-way RC

members based on measured cracking pattern and failure kinematics. **Magazine of concrete research**, v. 65, n. 6, p. 386–404, 2013.

CARDOSO, Allan Carvalho *et al.* Influence of recycled concrete aggregates on the shear strength of reinforced concrete beams. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 1, p. 1–17, 2021.

CHOI, H. B. *et al.* Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 2, p. 103–114, 2010.

COELHO, André; DE BRITO, Jorge. Economic analysis of conventional versus selective demolition - A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 382–392, 2011.

CORÓ, ANGELA GHISLENI. INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET. p. 64, 2002.

COSTA, Laís *et al.* Estabilização de Solos Estabilização de Solos. v. 01, 2017.

DAWOOD, Abbas O.; AL-KHAZRAJI, Hayder; FALIH, Raad S. Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. e00482, 2021.

ELSAYED, Mahmoud *et al.* Structural performance of recycled coarse aggregate concrete beams containing waste glass powder and waste aluminum fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, n. August 2022, p. e01751, 2023.

ETXEBERRIA, Miren; MARÍ, Antonio R.; VÁZQUEZ, Enric. Recycled aggregate concrete as structural material. **Materials and structures**, v. 40, p. 529–541, 2007.

FATHIFAZL, GBBS *et al.* Shear strength of reinforced recycled concrete beams without stirrups. **Magazine of Concrete Research**, v. 61, n. 7, p. 477–490, 2009.

FIBRAS, Reforço C. O. M. CONCRETO TECNOLOGIA SikaFiber®. *[S.d.]*.

FONTEBOA, ABELLA, Fernando. Shear strength of recycled concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 4, p. 887–893, 2007.

FOTI, Dora. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. **Composite Structures**, v. 96, p. 396–404, 2013.

FRONDISTOU-YANNAS, S. Waste Concrete as Aggregate for New Concrete. **ACI Journal Proceedings**, v. 74, n. 8, 1977.

GARCIA, Sergio Luis González. Taxa de armadura transversal mínima em vigas de concreto armado. **Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro**, 2002.

GHONEIM, Mohamed *et al.* Shear strength of fiber reinforced recycled aggregate

concrete. **Materials**, v. 13, n. 18, 2020.

GONZÁLEZ FONTEBOA, B. *et al.* Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, v. 60, n. 299, p. 53–67, 2010.

HAMADA, Hussein M. *et al.* Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 105833, 2023.

HANSEN, Torben C. **Recycling of demolished concrete and masonry**. London and New York: CRC Press, 1992.

HUBER, Patrick; HUBER, Tobias; KOLLEGER, Johann. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics. **Engineering Structures**, v. 113, p. 41–58, 2016.

IGNJATOVIĆ, Ivan S.; MARINKOVIĆ, Snežana B.; TOŠIĆ, Nikola. Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. **Engineering Structures**, v. 141, p. 386–401, 2017a.

IGNJATOVIĆ, Ivan S.; MARINKOVIĆ, Snežana B.; TOŠIĆ, Nikola. Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. **Engineering Structures**, v. 141, p. 386–401, 2017b.

JARDIM, Rosiéli Ribeiro. ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR AGREGADO MIÚDO RECICLADO DE PET EM CONCRETOS CONVENCIONAIS. p. 71, 2016.

JOHNSON, Mark K.; RAMIREZ, Julio A. Minimum shear reinforcement in beams with higher strength concrete. **Structural Journal**, v. 86, n. 4, p. 376–382, 1989.

JORGE, Pascoal Paulo *et al.* Construção civil, resíduos sólidos e crise urbana: estudo sobre a implantação da centralidade de Kilamba. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e360101219624, 2021.

KABIRIFAR, Kamyar *et al.* A conceptual foundation for effective construction and demolition waste management. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 1, n. October, p. 100019, 2020.

KATKHUDA, Hasan; SHATARAT, Nasim. Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 63–71, 2016.

KAZIMBO, Percy *et al.* Flexural and Shear Behaviour of Reinforced Concrete Beams Modified with Polyethylene Terephthalate Fibre and Blue Gum Eucalyptus Wood Ash. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 70, n. 10, p. 195–209, 2022.

KIM, Jin-Keun; PARK, Yon-Dong. Prediction of shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement. *In*: American Concrete Institute, 1996.

KIM, Sung Bae *et al.* Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 3, p. 232–240, 2010.

KOU, Shi-cong; POON, Chi Sun. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and building materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001.

LIANNE, Bervylly; SANTOS, De Farias. Avaliação Das Propriedades Físicas , Mecânicas E Microestruturais Do Concreto Incorporado Com. 2018.

METHA, P. Kumas; MONTEIRO, Paulo J. M. Microestrutura do Concreto. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais.**, p. 751, 2008.

MOHAMMED ALI, Taghreed Kh. Shear strength of a reinforced concrete beam by PET fiber. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 6, p. 8433–8450, 2021.

MOURA OLIVEIRA, LARISSA MOURA, Sahore; PINTO COELHO FRANCO, Luiza. Estudo Do Comportamento Do Concreto Com Adição De Fibras De Polietileno Tereftalato Pós-Consumo Para a Elaboração De Pavimento Rígido. n. 1, 2019.

MÜLLER, Eduardo Baesso. **Estudo da reciclagem química de polietileno tereftalato (PET) pós-consumo em solvólise alcalina e uso de método de análise multicritério para a escolha da operação em escala industrial.** [S.l.: S.n.].

MUTTONI, Aurelio; RUIZ, Miguel. Shear strength of members without transverse reinforcement as function of critical shear crack width. 2008.

MWONGA, Michael Mwendwa; KABUBO, Charles; GATHIMBA, Naftary. Effect of polyethylene terephthalate fibres on the structural performance of reinforced concrete beams with openings in the shear region. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130539, 2023.

NBR 15116 (ABNT, 2021). Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. **Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021**, 2021.

NECKEL, Rafael Matheus. Shear strength of concrete beams with high-density polyethylene fibers addition. p. 61, 2022.

NOVAES, Ricardo Carneiro. **Desenvolvimento sustentável na escala local : a agenda 21 local como estratégia para a construção da sustentabilidade.** Campinas, SPUniversidade Estadual de Campinas, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Campinas, SP. Disponível em: 20.500.12733/1589681, , 2001.

OLIVEIRA, L. S.; SANTANA, Lidiane. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** [S.l.: S.n.].

OZCEBE, Guney; ERSOY, Ugur; TANKUT, Tugrul. Evaluation of minimum shear reinforcement requirements for higher strength concrete. **Structural Journal**, v. 96, n. 3, p. 361–368, 1999.

PANDA, Sushree Sangeeta; GANGOLU, Appa Rao. Study of Dowel Action in Reinforced Concrete Beam by Factorial Design of Experiment. **ACI Structural Journal**, v. 114, n. 6, 2017.

PAULA, Ana; SCHILLER, Sturbelle; PALIGA, Charlei Marcelo. Revisão literária – Argamassas com incorporação dos resíduos de construção civil Literary review - Mortars with incorporation of construction waste Reseña literaria - Morteros con incorporación de residuos de construcción. v. 2022, p. 1–16, 2022.

PAULINO, Rafaella Salvador *et al.* Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 3, p. 83–97, 2023.

ABIPLAST, Associação Brasileira da Industria do plastico. **Associação Brasileira da Industria do Plastico.** , 2021.

POON, Chi Sun; SHUI, Z. H.; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. **Cement and concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2215–2222, 2004.

RAHAL, K. N.; ALREFAEI, Y. T. Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 866–876, 2018.

RAHAL, Khaldoun N.; ELSAYED, Khalad. Shear strength of 50 MPa longitudinally reinforced concrete beams made with coarse aggregates from low strength recycled waste concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122835, 2021.

ROSSE CALDAS, Lucas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solo-cimento considerando diferentes especificações de projeto. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 16, n. 2, p. 149–172, 2021.

SAGHEER, Abdullah M.; TABSH, Sami W.; YEHIA, Sherif. The Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Made with Locally Produced Recycled Aggregate in the UAE. **Buildings**, v. 13, n. 10, 2023.

SARKAR, S.; ADWAN, O.; BOSE, B. Shear stress contributions and failure mechanisms of high strength reinforced concrete beams. **Materials and structures**, v. 32, n. 2, p. 112–116, 1999.

SHERWOOD, Edward G. **One-way shear behaviour of large, lightly-reinforced concrete beams and slabs.** [S.l.: S.n.].

SOGO, Masaru *et al.* Shear behavior of reinforced recycled concrete beams. *In*: 2004.

TABSH, Sami W.; ABDELFAH, Akmal S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009.

TABSH, Sami W.; YEHIA, Sherif. Shear strength of reinforced concrete beams made with recycled aggregate. **World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering**, n. c, p. 1–7, 2018.

TAM, Vivian W. Y.; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

TANG, Zhuo *et al.* Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 185, p. 107776, 2020.

TOTTER, Eduardo *et al.* Seismic upgrading of RC structures with only beam connected Steel Plate Shear Walls. **Ingegneria Sismica. International Journal of Earthquake Engineering**, v. 35, n. 2, 2018.

TRINDADE, Juliana Corrêa. COMPORTAMENTO À FORÇA CORTANTE DE VIGAS DE CONCRETO COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS. p. 254, 2022.

ULLAH KHAN, Sadaqat; AYUB, Tehmina. Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips. **Structures**, v. 25, n. December 2019, p. 200–211, 2020.

VENKATESAN, Vignesh Prabu; PALANISAMY, Deepak Ottarkarattupalayam; PANDIYAN, Balaganesh. Structural behavior of self-curing concrete with partial replacement of coarse aggregates with fly ash pellets. *In*: IOP Publishing, 2020.

VINTZĒLEOU, E. N.; TASSIOS, T. P. Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions. **Magazine of concrete research**, v. 38, n. 134, p. 13–22, 1986.

VOO, Yen Lei; POON, Wai Keat; FOSTER, Stephen J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups. **Journal of structural engineering**, v. 136, n. 11, p. 1393–1400, 2010.

WALRANEN, J. C. Theory and Experiments on the Mechanical Behaviour of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading. **Heron**, v. 26, n. 1, 1981.

WIGHT, James K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete**. [S.l.]: Pearson Education UK, 2016.

XIAO, Jianzhuang; XIE, He; YANG, Zhenjun. Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 5, p.

700–709, 2012.

YANG, Yuguang. Shear behaviour of reinforced concrete members without shear reinforcement: a new look at an old problem. 2014.