

**CISALHAMENTO DIRETO EM CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO
REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO**

GABRYEL DE CARVALHO ALVES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO, 2026

**CISALHAMENTO DIRETO EM CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO
REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO**

GABRYEL DE CARVALHO ALVES

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

Orientador: Prof. DSc. Sergio Luis González Garcia

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO, 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

A474

Alves, Gabryel de Carvalho.

Cisalhamento direto em concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de Polietileno Tereftalato / Gabryel de Carvalho Alves. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

145 f.

Bibliografia: 134 - 144.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.

Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. Concreto. 2. Cisalhamento. 3. *Push-off*. 4. Agregado Reciclado. 5. Fibras PET. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624


CISALHAMENTO DIRETO EM CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE POLIETILENO TEREFALATO

GABRYEL DE CARVALHO ALVES


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

Aprovado em 06 de fevereiro de 2026


Comissão examinadora:

 Documento assinado digitalmente
SERGIO RAFAEL CORTES DE OLIVEIRA
Data: 05/05/2026 09:57:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Sergio Rafael Cortes de Oliveira, D.Sc. – IFF

 Documento assinado digitalmente
NIANDER AGUIAR CERQUEIRA
Data: 05/05/2026 09:46:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

 Documento assinado digitalmente
RANCES CASTILLO LARA
Data: 05/05/2026 09:51:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

 Documento assinado digitalmente
SERGIO LUIS GONZALEZ GARCIA
Data: 05/05/2026 20:58:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

*"E tudo o que fizerdes, seja em palavra,
seja em ação, fazei-o em nome do Senhor
Jesus, dando por ele graças a Deus Pai".*

Colossenses 3:17

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, discernimento e perseverança ao longo de toda esta jornada. Sua presença constante me sustentou nos momentos de maior dificuldade e guiou minhas escolhas durante todo o percurso acadêmico.

Aos meus pais, Alexandre e Léa, expresso minha sincera gratidão por todo o apoio, incentivo e dedicação ao longo da minha formação acadêmica e pessoal. O exemplo, os ensinamentos e o suporte oferecidos por vocês foram determinantes para que eu pudesse alcançar mais esta etapa da minha trajetória.

Ao meu orientador, Professor Sergio, agradeço pela amizade, pela orientação, pela disponibilidade e pelas contribuições técnicas e científicas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus apontamentos, discussões e direcionamentos contribuíram de maneira significativa para a condução da pesquisa e para o aprimoramento da dissertação.

À Minha Maria, deixo um agradecimento especial pelo apoio constante, pela compreensão e pela paciência demonstrados, sobretudo na reta final deste trabalho. Sua presença diária, as palavras de incentivo e a disposição em compartilhar as dificuldades desse período tornaram o processo mais leve e possível.

Aos amigos, agradeço pela convivência, pelas conversas, pelo incentivo e pelo apoio ao longo dessa trajetória. Mesmo nos momentos de maior dedicação ao trabalho acadêmico, a amizade, a compreensão e os momentos de descontração contribuíram para manter o equilíbrio necessário durante esse período.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis na Construção Civil tem incentivado a utilização de agregados reciclados e reforços alternativos na produção de concreto estrutural. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral investigar o comportamento ao cisalhamento direto de concretos com substituição parcial e total do agregado graúdo natural por agregado reciclado, bem como avaliar a influência da adição de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) nesse mecanismo resistente. O programa experimental compreendeu a moldagem de dezoito corpos-de-prova do tipo *push-off*, organizados em seis grupos: concreto de referência com 100% de agregado natural, concretos com 30% e 50% de substituição por agregado reciclado, concreto com 100% de agregado reciclado e dois concretos com 100% de agregado reciclado reforçados com fibras PET nos teores de 0,5% e 1,0% em volume. Adicionalmente, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para a determinação da resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados por meio do ensaio *push-off*, com aplicação de carregamento monotônico sob controle de deslocamento. O monitoramento dos deslocamentos e da abertura de fissuras ao longo do plano de cisalhamento foi efetuado por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens (DIC). Os resultados obtidos indicaram que a substituição do agregado natural por agregado reciclado influenciou o desempenho mecânico do concreto, com redução da resistência ao cisalhamento para os teores de 30% e 100% de substituição. Entretanto, o concreto com 50% de agregado reciclado apresentou resistência média ao cisalhamento semelhante à do concreto de referência. A adição de fibras PET resultou em melhoria significativa do comportamento ao cisalhamento, destacando-se o traço com 1,0% de fibras, que apresentou incremento médio de aproximadamente 29% na resistência ao cisalhamento em relação ao concreto com 100% de agregado reciclado sem fibras, além de comportamento pós-pico mais dúctil e maior controle da abertura de fissuras. Os resultados evidenciam o potencial do uso combinado de agregados reciclados e fibras PET como alternativa técnica e ambientalmente sustentável para a produção de concretos estruturais submetidos a solicitações predominantes de cisalhamento.

Palavras-chave: Concreto. Cisalhamento. *Push-off*. Agregado reciclado. Fibras PET.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in Civil Engineering has encouraged the use of recycled aggregates and alternative reinforcements in the production of structural concrete. In this context, the main objective of this study is to investigate the direct shear behavior of concretes with partial and total replacement of natural coarse aggregate by recycled aggregate, as well as to evaluate the influence of the addition of Polyethylene Terephthalate (PET) fibers on this resisting mechanism. The experimental program comprised the preparation of eighteen push-off specimens, organized into six groups: reference concrete with 100% natural aggregate; concretes with 30% and 50% replacement by recycled aggregate; concrete with 100% recycled aggregate; and two concretes with 100% recycled aggregate reinforced with PET fibers at volume fractions of 0.5% and 1.0%. Additionally, cylindrical specimens were prepared to determine compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity. The direct shear tests were carried out using the push-off test, with monotonic loading applied under displacement control. The monitoring of displacements and crack opening displacement (COD) along the shear plane was performed using the Digital Image Correlation (DIC) technique. The results indicated that the replacement of natural aggregate with recycled aggregate influenced the mechanical performance of concrete, with a reduction in shear strength observed for the 30% and 100% replacement levels. However, the concrete with 50% recycled aggregate showed an average shear strength similar to that of the reference concrete. The addition of PET fibers resulted in a significant improvement in shear behavior, particularly for the mix with 1.0% fibers, which showed an average increase of approximately 29% in shear strength compared to the concrete with 100% recycled aggregate without fibers, as well as a more ductile post-peak behavior and improved crack control. These results highlight the potential of the combined use of recycled aggregates and PET fibers as a technically viable and environmentally sustainable alternative for the production of structural concrete subjected predominantly to shear stresses.

Keywords: Concrete. Shear. *Push-off*. Recycled aggregate. PET fibers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração do concreto com agregado reciclado	26
Figura 2 - Mecanismo de fissuração em concretos convencionais.	33
Figura 3 - Ensaio push-off	35
Figura 4 - Barras de aço rosqueadas instrumentadas com strain gauges utilizadas no sistema de confinamento passivo.	51
Figura 5 - Porcas de aço utilizadas no sistema de confinamento passivo.	51
Figura 6 - Sistema de confinamento passivo utilizado nos ensaios de push-off.....	52
Figura 7 - Laje e corpos-de-prova para confecção e caracterização do ARC.	54
Figura 8 - Ensaio de abatimento de cone.....	54
Figura 9 - Extração dos testemunhos da laje moldada pra confecção dos ARC.....	55
Figura 10 - Processo de fragmentação da laje para produção do ARC.	56
Figura 11 - Processo de produção do agregado reciclado de concreto.	57
Figura 12 - Britador de mandíbula.....	57
Figura 13 - Agregado Reciclado de Concreto após processo de britagem.	58
Figura 14 - Ensaio granulométrico.	59
Figura 15 – Ensaio de massa específica real: (a) mensuração do cesto vazio, (b) agregado reciclado SSS e (c) Mensuração do cesto cheio.....	60
Figura 16 - Ensaio de massa unitária: (a) recipiente de volume padrão e (b) recipiente com os agregados compactados.....	60
Figura 17 - Ensaio de absorção de água: (a) agregado imerso em água, (b) agregado com SSS e (c) mensuração para diferença de massa.	61
Figura 18 - Ensaio de abrasão Los Angeles: (a) máquina de abrasão Los Angeles, (b) massa seca antes do Ensaio, (c) massa retida após o ensaio.....	62
Figura 19 - Ensaio ataque químico: a) antes do ataque, b) após 24h.	62
Figura 20 – Amostras: (a) antes e (b) depois do ensaio.....	63
Figura 21 - Confecção de fibra de PET: (a) garrafa higienizada, (b) confecção das fibras e (c) dimensão da fibra.....	64
Figura 22 - Microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550.	65
Figura 23 - Processo de metalização das amostras.....	65
Figura 24 - MEV na fibra de PET sem tratamento mecânico, a) ampliação de 18X e b) ampliação de 150X.....	66
Figura 25 – Ensaio de tração das fibras: (a) realização do ensaio e (b) rompimento da fibra.	67

Figura 26 - Esquema de ensaio de PULL-OUT	69
Figura 27 – Molde de PVC para fixação das fibras PET com matriz cimentícia para ensaio de pull-out.	69
Figura 28 - Set-up de ensaio pull-out	70
Figura 29 - Detalhamento dos corpos-de-prova push-off	70
Figura 30 - Produção do concreto reciclado reforçado com fibras PET.....	73
Figura 31 - Molde dos corpos-de-prova tipo push-off.....	74
Figura 32 - Sequência de execução do ensaio VeBe.....	76
Figura 33 - Corpos-de-prova em cura úmida submersos em água saturada de cal..	76
Figura 34 - Etapas para o ensaio de compressão: (a) retífica das faces, (b) pintura de base, (c) marcação dos pontos e secagem e (d) realização do ensaio de compressão.	78
Figura 35 - Interface do software ZEISS Inspect Correlate.	79
Figura 36 - Realização de ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova cilíndricos.	79
Figura 37 - Corpo-de-prova após ensaio.....	80
Figura 38 - Ensaio de tração por compressão diametral.....	80
Figura 39 - Set-up dos ensaios de cisalhamento direto nos corpos-de-prova tipo push-off.	82
Figura 40 - Posicionamento das barras de confinamento passivo.	82
Figura 41 - Granulometria do agregado miúdo.....	85
Figura 42 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.	86
Figura 43 - Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 20 e 30 mm.....	94
Figura 44 - Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 40 e 50 mm.....	94
Figura 45 - MEV após o ensaio: (a)- FE ampliação de 20X, (b)- FE ampliação de 100X.	95
Figura 46 - 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, (d)- FD fibra após deformação ampliação de 1000X.	96
Figura 47 - MEV após o ensaio: (a)- matriz ampliação de 17X, (b) matriz ampliação de 100X.....	97
Figura 48 - Resultados dos ensaios de compressão dos concretos produzidos.....	103

Figura 49 - Set-up de ensaio de tração da barra rosqueada.....	107
Figura 50 - Gráfico tensão vs deformação do aço das barras rosqueadas.....	108
Figura 51 - Gráfico carga vs deslizamentos médios dos diferentes tipos de concreto de concreto.....	110
Figura 52 - Curvas tensão cisalhante vs deslizamento vertical dos corpos-de prova tipo push-off.....	115
Figura 53 - Curvas tensão cisalhante vs deslizamento vertical dos corpos-de-prova tipo push-off reforçados com fibras PET.....	116
Figura 54 - Relação média entre tensão cisalhante, deslizamento e abertura das fissuras.....	118
Figura 55 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 0% de V_u	122
Figura 56 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 98% de V_u	122
Figura 57 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 100% de V_u	123
Figura 58 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 – ARC 30% em 0% de V_u	123
Figura 59 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 30% em 99% de V_u	124
Figura 60 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 30% em 100% de V_u	124
Figura 61 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 – ARC 50% em 0% de V_u	125
Figura 62 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 50% em 97% de V_u	125
Figura 63 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 50% em 100% de V_u	126
Figura 64 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 – ARC 100% em 0% de V_u	126
Figura 65 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 100% em 99% de V_u	127
Figura 66 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 100% em 100% de V_u	127

Figura 67 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 0% de V_u	128
Figura 68 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 99% de V_u	128
Figura 69 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 100% de V_u	129
Figura 70 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 0% de V_u	129
Figura 71 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 97% de V_u	130
Figura 72 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 100% de V_u	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do RCD de diferentes pesquisadores.	25
Tabela 2 - Dosagem do concreto para produção de agregado reciclado.	53
Tabela 3 - Dosagem da matriz.....	68
Tabela 4 – Detalhamento de aço para cada corpo-de-prova push-off.....	71
Tabela 5 - Nomenclatura e proporções de materiais dos corpos-de-prova push-off .	72
Tabela 6 - Dosagem dos traços.....	73
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de massa específica real	87
Tabela 8 - Resultados do ensaio de massa específica dos agregados graúdos.	88
Tabela 9 - Resultado do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos.....	89
Tabela 10 - Desgaste por abrasão dos agregados graúdos reciclados de concreto.	90
Tabela 11 - Resultado do ensaio de ataque químico	91
Tabela 12: Resultados dos ensaios à tração das fibras.	92
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de pull-out e seus parâmetros estatísticos.....	93
Tabela 14 - Abatimento de cone.	98
Tabela 15 - Resultado ensaio VeBe para os concretos com fibra.	99
Tabela 16 - Tabela de parâmetros comparativos para VeBe.	99
Tabela 17 - Resistência a compressão média dos concretos.....	102
Tabela 18: Resistência à compressão por tração diametral.	105
Tabela 19 - Módulo de elasticidade.	106
Tabela 20 - Propriedades do aço utilizado	108
Tabela 21 - Resistência ao cisalhamento no ensaio de push-off.....	112
Tabela 22 - Resultados de força última, tensão de cisalhamento, carga de fissuração e abertura de fissura no instante da fissuração dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio push-off.	120
Tabela 23 - Valores de força máxima, tensão de cisalhamento, deslizamento e abertura máxima de fissura dos corpos-de-prova obtidos por Correlação Digital de Imagens (DIC) no ensaio push-off.	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES

- Abreviaturas:

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABIPET: Associação Brasileira da Indústria do PET

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON: Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ACI: American Concrete Institute

AR: Agregado Reciclado

CAR: Concreto com Agregados Reciclados

CO₂ - Dióxido de carbono

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

JSCE: Japan Society of Civil Engineers

NBR: Norma Brasileira

PET: Polietileno Tereftalato

PGRCC: Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

- Letras romanas maiúsculas

A_c: área da interface de concreto

A_{sw}: área da armadura transversal

N: força normal

V: força cortante

V_u: força cortante última

F: força de tração

R: força de cisalhamento resistente

E: módulo de elasticidade

- Letras romanas minúsculas

c: coesão;

f_c: resistência à compressão do concreto

f_{cm}: resistência média à compressão do concreto

f_{ck}: resistência à compressão característica do concreto

f_{ct,f}: resistência à tração na flexão do concreto

f_{ct,sp}: resistência à tração indireta do concreto

f_y : tensão de escoamento da armadura

Δ : deslizamento relativo entre as superfícies

w : separação transversal entre as superfícies

x : deslocamento horizontal experimentado pelo corpo-de-prova

y : deslocamento vertical experimentado pelo corpo-de-prova

- Letras gregas

τ : tensão de cisalhamento

$\tau_{m\acute{a}x}$: tensão de cisalhamento máxima

μ : coeficiente de atrito

ρ_s : taxa geométrica da armadura transversal

λ : constante que depende da massa específica do concreto

σ_n : tensão externa normal ao plano de cisalhamento

σ_s : tensão de tração na armadura

ϵ_y : deformação de escoamento convencional do aço

ϵ_y^* : deformação de escoamento correspondente ao diagrama tensão vs. deformação

ϵ_u : deformação última da armadura na ruptura

ϵ_{st} : deformação da armadura longitudinal de tração

ϕ : diâmetro da armadura

Sumário

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS, SINAIS E UNIDADES.....	xiii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	19
1.1. Considerações iniciais.....	19
1.2. Objetivo geral	20
1.2.1. Objetivos específicos.....	20
1.3. Justificativa.....	20
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Resíduo de Construção e Demolição.....	22
2.2. Agregados Reciclados de Concretos	25
2.3. Dosagem de concretos com agregados reciclados.....	27
2.4. Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado.....	29
2.5. Concreto Reforçado com Fibras.....	31
2.6. Mecanismos de cisalhamento no concreto	32
2.7. Ensaio de cisalhamento direto	34
2.8. Atrito e restrição passiva	36
2.9. Aplicação da Correlação Digital de Imagens (DIC) na análise de cisalhamento	37
2.10. Pesquisas relacionadas à ARC e Fibras PET	39
2.11. Considerações gerais.....	45
CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48

3.1.	Considerações iniciais.....	48
3.2.	Materiais.....	49
3.2.1.	Cimento de Alta Resistência Inicial.....	49
3.2.2.	Agregados	49
3.2.3.	Água	50
3.2.4.	Armaduras	50
3.2.5.	Aditivo	52
3.3.	Produção dos agregados reciclados	52
3.3.1.	Confecção dos Agregados Reciclados de Concreto.....	55
3.3.2.	Britagem e peneiramento.....	56
3.4.	Caracterização dos Agregados	59
3.4.1.	Granulometria.....	59
3.4.2.	Massa específica real	59
3.4.3.	Massa unitária	60
3.4.4.	Absorção de água.....	61
3.4.5.	Abrasão Los Angeles.....	61
3.4.6.	Determinação de argamassa residual (ataque químico)	62
3.5.	Produção das fibras PET	63
3.6.	Caracterização das fibras PET	64
3.6.1.	Microscopia eletrônica de varredura.....	64
3.6.2.	Caracterização dimensional.....	66
3.6.3.	Ensaio de tração.....	66
3.6.4.	Ensaio de <i>pull-out</i>	68
3.7.	Corpos-de-prova <i>push-off</i>	70
3.8.	Dosagem do concreto	72
3.9.	Fôrmas	73
3.10.	Fabricação e cura dos concretos	74

3.11. Propriedade dos concretos em estado fresco	75
3.12. Propriedade dos concretos no estado endurecido	76
3.13. Procedimento do ensaio <i>push-off</i>	80
3.14. Considerações gerais.....	82
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1. Considerações iniciais.....	84
4.2. Caracterização dos materiais	84
4.2.1. Ensaio granulométrico dos agregados	84
4.2.2. Massa específica real	87
4.2.3. Massa unitária	87
4.2.4. Absorção de água.....	88
4.2.5. Ensaio de abrasão Los Angeles	89
4.2.6. Ensaio de ataque químico	90
4.2.7. Ensaio de tração na fibra de PET	91
4.2.8. Ensaio <i>pull-out</i> das fibras.....	92
4.3. Propriedades do concreto no estado fresco	97
4.4. Propriedades do concreto no estado endurecido	99
4.4.1. Resistência à compressão do concreto	100
4.4.2. Resistência à tração por compressão diametral	103
4.4.3. Módulo de elasticidade	105
4.5. Caracterização do aço de confinamento passivo	107
4.6. Ensaio <i>push-off</i>	109
4.6.1. Comportamento global força vs deslocamento.....	109
4.6.2. Resistência máxima ao cisalhamento.....	112
4.6.3. Comportamento pós-pico.....	114
4.6.4. Análise da abertura de fissura e cinemática do plano de cisalhamento	117

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES	131
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Nas últimas décadas, a industrialização da Construção Civil tem enfrentado desafios significativos no que diz respeito à sustentabilidade e à eficiência de recursos. Nos últimos séculos, a população mundial tem, por vezes, utilizado os recursos naturais sem critérios ou padrões. O período da Revolução Industrial merece destaque neste quesito, quando a exploração foi levada a níveis sem precedentes (Ballista, 2003). Desde esse período, houve um crescimento exponencial das atividades industriais e urbanas. A demanda por materiais de construção aumentou significativamente, o que acarretou um consumo massivo de recursos naturais e a emissão de grandes quantidades de CO₂ na atmosfera associados à produção de cimento (John; Agopyan, 2000).

A crescente demanda por materiais de construção aliada à necessidade de redução dos impactos ambientais tem incentivado a busca por alternativas, com a finalidade de promover a utilização de materiais reciclados e a redução de resíduos gerados. Nos últimos anos, a conscientização ambiental e a pressão por práticas de construção ecologicamente corretas impulsionaram pesquisas sobre novos materiais e tecnologias. Nesse contexto, o concreto, um dos materiais mais utilizados na Construção Civil, tem sido foco de inúmeros trabalhos que visam aprimorar suas propriedades e minimizar seu impacto ambiental.

Nessa perspectiva, a utilização de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como agregados reciclados oferece uma solução potencial para a redução do consumo de recursos naturais e a minimização de resíduos provenientes da Construção Civil. Além disso, a incorporação de fibras sintéticas recicladas, como as fibras de Polietileno Tereftalato (PET), representa uma oportunidade de reaproveitamento de plásticos descartados, o que contribui para aprimorar as propriedades mecânicas do concreto.

Apesar dos potenciais benefícios, a incorporação de agregados reciclados e fibras PET apresenta ainda um campo de estudo a seguir explorando. O comportamento ao atrito-cisalhamento de estruturas de concreto reforçados com esses materiais possui lacunas a serem estudadas. Entender como esses materiais

influenciam na resistência e durabilidade das estruturas é crucial para garantir a segurança e as previsões de seu uso em larga escala.

1.2. Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral investigar o comportamento ao cisalhamento direto de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto (ARC), reforçados com fibras de Polietileno Tereftalato (PET), por meio de ensaios experimentais em corpos-de-prova do tipo *push-off*, visando compreender a influência da substituição de agregados naturais e da adição de fibras recicladas nas propriedades mecânicas e na capacidade de transferência de tensões cortantes.

1.2.1. Objetivos específicos

- i. Avaliar a resistência à compressão e à tração por compressão diametral de concretos com diferentes teores de substituição de agregado graúdo natural por ARC.
- ii. Investigar a contribuição de diferentes teores de fibras PET recicladas (0,5% e 1%) na resistência ao cisalhamento direto de concretos com 100% de substituição por ARC.
- iii. Analisar os modos de ruptura e a distribuição de fissuras nos ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova do tipo *push-off*.
- iv. Correlacionar os dados obtidos com a literatura atual, destacando as variações de comportamento entre concretos com e sem fibras PET.
- v. Verificar a viabilidade técnica do uso combinado de ARC e fibras PET recicladas em concretos estruturais submetidos a esforços de cisalhamento direto.

1.3. Justificativa

A crescente demanda por práticas sustentáveis na Construção Civil tem incentivado a substituição de materiais convencionais por alternativas recicladas, com o intuito de reduzir o impacto ambiental da indústria. Nesse contexto, o uso de ARC representa uma estratégia eficaz para o reaproveitamento de Resíduos da Construção e Demolição, contribuindo para a diminuição do consumo de recursos naturais. No entanto, a substituição de agregados naturais por ARC pode comprometer algumas

propriedades mecânicas do concreto, especialmente no que tange à resistência ao cisalhamento.

Simultaneamente, a incorporação de fibras recicladas, como as de PET, tem se mostrado promissora na melhoria do desempenho mecânico do concreto, oferecendo vantagens em termos de ductilidade, controle de fissuração e absorção de energia. Apesar dos avanços, há escassez de estudos que investiguem de forma sistemática a interação entre ARC e fibras PET em esforços de cisalhamento direto — condição relevante para elementos estruturais submetidos a tensões cortantes localizadas, como é o caso de ligações ou interfaces.

Neste cenário, a presente pesquisa buscou preencher essa lacuna, avaliando experimentalmente o comportamento ao cisalhamento direto de concretos com ARC e fibras PET. A análise de suas propriedades mecânicas permitiu verificar a viabilidade do uso combinado desses materiais reciclados, promovendo soluções mais sustentáveis e eficientes para a engenharia estrutural.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduo de Construção e Demolição

O avanço da urbanização e o crescimento das atividades econômicas vêm ampliando de forma expressiva o volume de obras executadas, o que, por consequência, eleva significativamente a geração de resíduos provenientes da Construção Civil (Zhang *et al.*, 2023). Em escala global, estima-se que a produção anual de Resíduos de Construção e Demolição ultrapasse 10 bilhões de toneladas (Wang *et al.*, 2019). A China responde por cerca de 2,3 bilhões de toneladas por ano (Zheng *et al.*, 2017), enquanto a União Europeia registra aproximadamente 850 milhões de toneladas anuais (Eurostat, 2019) e os Estados Unidos produzem em torno de 600 milhões de toneladas (EPA, 2020). No Brasil, a estimativa é da ordem de 120 milhões de toneladas por ano (ABRECON, 2023); entretanto, apenas cerca de 45 milhões de toneladas são efetivamente coletadas anualmente (Abrema, 2023), evidenciando desafios relacionados à gestão e ao aproveitamento desses resíduos.

O aumento da quantidade de RCD causa graves problemas ambientais. Estima-se que a quantidade de resíduos provenientes da construção e demolição ocupe cerca de 40% do total de resíduos no mundo (Silva; Brito; Dhir, 2014), o que é um problema para os países e um desafio para a gestão de resíduos (Tam; Kotrayothar; Xiao, 2015). No Brasil cerca de 70% desses resíduos foram descartados de forma irregular (ABRECON, 2023). Por essa razão, a reciclagem desse resíduo como uma nova fonte de agregados para concreto tem recebido muito mais atenção devido a sua viabilidade, bem como pelos seus benefícios ambientais e econômicos (Kurad *et al.*, 2017; Puthussery; Kumar; Garg, 2017).

A reciclagem e utilização de RCD não são práticas recentes. Desde meados do século XIX, na Alemanha, artefatos de concreto foram produzidos utilizando agregados reciclados. Entretanto, foi após a Segunda Grande Guerra Mundial que essa atividade se tornou mais relevante, frente à necessidade de reconstruir cidades devastadas pela guerra e os inúmeros destroços que ficaram espalhados por todo o país. Diante deste cenário, optou-se por reciclar o entulho proveniente da destruição das construções, visto que a escassez de materiais foi uma dificuldade enfrentada na época (Levy; Roberto; Helene, 2002).

No Brasil, a primeira usina de reciclagem de entulho foi inaugurada em 1991, em São Paulo, sendo também a pioneira no Hemisfério Sul (Zordan, 1997). Desde então, o número de usinas, tanto públicas quanto privadas, tem crescido ao longo dos anos. Esse aumento está associado não apenas ao maior incentivo que a reciclagem vem recebendo, mas também à enorme quantidade de resíduos gerados pela Construção Civil nas últimas décadas.

Vale salientar que esse processo é uma excelente alternativa para diminuir a quantidade de resíduos descartados de maneira inadequada, além da diminuição da extração de recursos naturais. Historicamente, os RCD foram depositados irregularmente às margens de rios e aterros sem quaisquer tipos de tratamentos adequados. Essas práticas negligentes, embora comuns, trazem diversas consequências negativas, incluindo poluição visual, contaminação das águas, assoreamento dos rios, obstrução de sistemas de drenagem e o surgimento de zoonoses que afetam diretamente a saúde da população (Ballista, 2003).

A geração de RCD representa um desafio para a sustentabilidade ambiental e o gerenciamento urbano no Brasil. Estimativas apontam que mais de 50% da massa total de resíduos urbanos são provenientes da construção e demolição (Pinto; Agopyan, 1999). Essa alta proporção reflete não apenas o crescimento contínuo do setor de Construção Civil, mas também práticas inadequadas de manejo e descarte de materiais. A falta de políticas efetivas de gerenciamento contribui para a complexidade desse problema, exacerbando impactos ambientais e socioeconômicos (Silva, Vinícius Arcanjo da; Fernandes, 2012).

A gestão adequada dos RCD no Brasil enfrenta diversos obstáculos, incluindo a falta de infraestruturas adequadas e a fragmentação das políticas públicas relacionadas. A Resolução Conama nº 307 classificou e estabeleceu diretrizes importantes para o manejo desses resíduos, incentivando a implementação de Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) (Brasil, 2002). Quadro 1 mostra essa classificação. No entanto, a efetiva implantação desses planos ainda é um desafio. A introdução de usinas de reciclagem em diversas regiões do país, desde o início dos anos 1990, representa um avanço significativo, demonstrando uma resposta inicial para a necessidade de processamento e reciclagem de RCD (Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, 2015).

Quadro 1 - Classificação do resíduo de construção

A	Resíduos recicláveis, como agregados, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, areia e pedra.
B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação.
D	Resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos e amianto (contaminados).

Fonte: Resolução nº 307 do CONAMA.

De acordo com o Quadro 1, percebe-se que o concreto reciclado é produzido com resíduos da Classe A. Existe, portanto, uma grande heterogeneidade de resíduos (madeira, argamassa, gesso, aço, papel e plástico, entre outros). Esse fato é um dos principais motivos pelo qual a utilização de agregados reciclados ainda é tão tímida (Viera; Dal Molin, 2004).

No contexto brasileiro, os Resíduos de Construção e Demolição apresentam predominância de materiais de natureza mineral. No entanto, essa fração mineral é composta por diferentes constituintes, como concreto, argamassa, materiais cerâmicos e rochas naturais, cujas proporções variam conforme a origem e o tipo do resíduo gerado (Ângulo, 2005). Conforme destacado por Leite (2001), a composição dos RCD exerce influência direta sobre o desempenho dos agregados reciclados quando incorporados ao concreto, afetando suas propriedades físicas e mecânicas.

Nesse sentido, Hansen (1992) ressalta que a adoção de cuidados simples durante as etapas de demolição pode contribuir significativamente para o aumento do potencial de reciclagem dos resíduos, bem como para a melhoria da qualidade do agregado reciclado obtido. O autor destaca ainda que informações relacionadas à qualidade e ao histórico do concreto original constituem elementos fundamentais para a avaliação da viabilidade de reciclagem de estruturas de concreto. A Tabela 1 apresenta estimativas dos principais constituintes dos RCD reportados na literatura nacional.

Tabela 1 - Composição média do RCD de diferentes pesquisadores.

Material	Zordan (1997)¹	Leite (2001)²	Viera (2003)³	Lovato (2007)⁴
Argamassa	37,40%	28,30%	27,80%	44,20%
Concreto	21,10%	15,20%	18,60%	18,30%
Cerâmica	23,30%	26,30%	51,20%	35,70%
Outros	18,20%	30,20%	2,40%	1,80%

¹ Resíduo proveniente de São Carlos / SP, ² Resíduo proveniente de Porto Alegre / RS, ³ Resíduo proveniente de Maceió / AL, ⁴ Resíduo proveniente de Porto Alegre / RS.

Fonte: Trindade (2017).

De modo geral, os resíduos provenientes de demolição tendem a apresentar maior presença de materiais indesejáveis, uma vez que já integraram sistemas estruturais e, frequentemente, sofreram diferentes tipos de intervenções ao longo de sua vida útil. Por outro lado, os resíduos oriundos de atividades de construção correspondem, em sua maioria, a sobras de materiais nos canteiros de obras, o que reduz a probabilidade de contaminação irreversível por outros elementos (Leite, 2001). Destaca-se ainda a geração de resíduos provenientes de ensaios laboratoriais realizados por empresas, como corpos-de-prova rompidos, que apesar de não possuírem aplicação direta após os ensaios, apresentam elevado potencial para reaproveitamento (Bazuco, 1999).

A transformação dos RCD em agregados reciclados para uso em concreto geralmente envolve processos de britagem, seguidos de etapas de separação e remoção de contaminantes. Entretanto, mesmo após o beneficiamento, é comum que uma parcela de pasta de cimento antiga permaneça aderida aos grãos de agregado reciclado, não sendo passível de remoção por métodos convencionais (Marinković *et al.*, 2010). Ainda assim, Zordan (1997), pioneiro no Brasil na utilização de agregados reciclados em concreto, demonstrou que, apesar da elevada heterogeneidade desse material, os resultados obtidos para as propriedades mecânicas foram considerados satisfatórios. O autor ressalta que a adoção de critérios adequados de controle de qualidade dos resíduos pode resultar em agregados reciclados com desempenho ainda mais favorável.

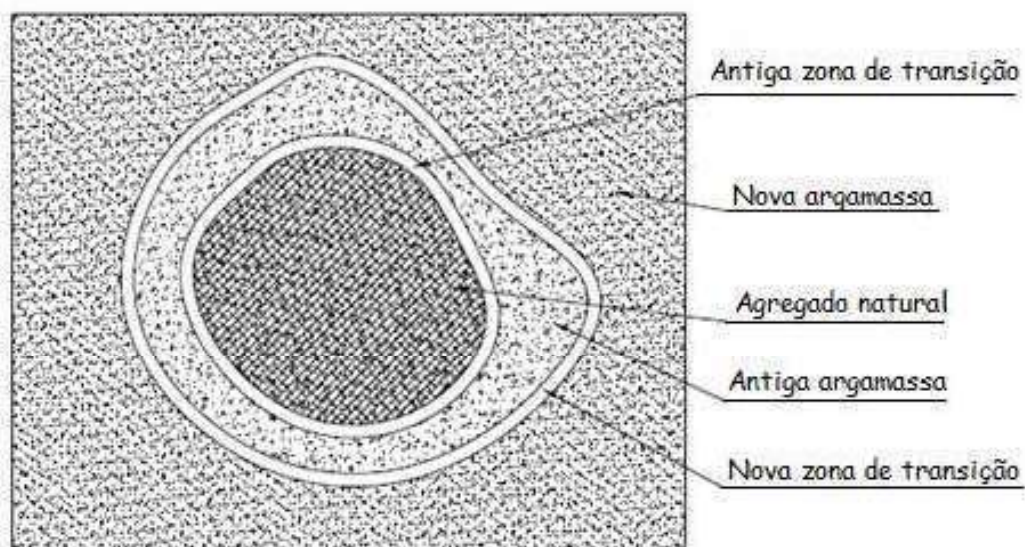
2.2. Agregados Reciclados de Concretos

A crescente preocupação com os impactos ambientais da Construção Civil tem estimulado a adoção de práticas mais sustentáveis, entre elas o uso de resíduos reciclados como substituição de materiais convencionais. O ARC é uma dessas

alternativas que vem ganhando destaque. O ARC, em especial o graúdo, é proveniente da trituração de concreto endurecido previamente utilizado em estruturas. Esse tipo de reaproveitamento não apenas reduz o volume de resíduos destinados a aterros como também contribui para a conservação de recursos naturais, ao diminuir a extração de agregados naturais (areia e brita) da natureza.

Contudo, os Agregados Reciclados de Concreto apresentam características diferentes dos agregados naturais. Eles tendem a ser mais porosos, menos densos, com maior absorção de água e presença de argamassa aderida, que não pode ser completamente removida durante o processo de reciclagem (Figura 1), o que influencia negativamente algumas propriedades do concreto, como a trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade e durabilidade. Segundo Marinković *et al.* (2010), essas limitações podem ser superadas com um cuidadoso ajuste do traço do concreto, seleção adequada do tipo de agregado reciclado, adição de fibras e controle tecnológico rigoroso.

Figura 1 - Configuração do concreto com agregado reciclado



Fonte: Cabral, 2007.

Pesquisas recentes têm buscado entender e mitigar esses efeitos. Trindade, Garcia e Fonseca (2020) investigaram concretos com diferentes proporções de substituição do agregado graúdo natural por ARC, verificando que a substituição até 50% mantém a resistência à compressão em níveis aceitáveis para aplicações estruturais. Já Resende, Cardoso e Shehata (2021) estudaram concretos estruturais com 100% de agregado graúdo reciclado de concreto e mostraram que, embora haja

redução da resistência à compressão e à tração em comparação ao concreto convencional, o desempenho pode ser considerado satisfatório se adotadas estratégias como o uso de adições minerais e o ajuste da relação água/cimento.

Outra abordagem relevante é o tratamento prévio dos agregados reciclados, buscando melhorar suas características físicas e mecânicas. Kumar *et al.* (2024) propuseram um processo de otimização da qualidade dos agregados reciclados com base em parâmetros mecânicos, utilizando métodos mecânicos de britagem e peneiramento para remoção de impurezas e controle do teor de argamassa aderida. Com isso, os concretos produzidos apresentaram desempenho superior aos concretos com agregados reciclados não tratados, especialmente em relação à resistência à compressão, módulo de elasticidade e absorção de água.

No campo específico do cisalhamento, Rahal e Al-Khaleefi (2015) mostraram que o concreto com ARC proveniente de concretos de baixa resistência pode ter sua resistência ao cisalhamento comprometida. No entanto, os autores indicam que ajustes no detalhamento estrutural e uso de reforços compensatórios podem viabilizar o uso desses materiais em estruturas submetidas a esforços cortantes. Esses achados reforçam a necessidade de se conhecer detalhadamente o comportamento mecânico dos concretos com ARC, sobretudo em situações de carregamento específico, como o cisalhamento direto.

Adicionalmente, estudos ambientais como os de Marinković *et al.* (2010) também ressaltam que o uso de ARC representa uma redução significativa no impacto ambiental global da construção, considerando o ciclo de vida dos materiais. Isso inclui menor consumo energético na produção, menor emissão de CO₂ e menores custos associados à gestão de resíduos. Dessa forma, a utilização do ARC contribui não apenas para o desempenho técnico, mas também para a construção de edificações mais sustentáveis.

Esses fatores justificam a crescente atenção dada aos concretos com ARC, e apontam para a importância de estudos que avaliem sua performance em diferentes tipos de solicitação mecânica.

2.3. Dosagem de concretos com agregados reciclados

A formulação de traços com ARC demanda uma abordagem criteriosa, uma vez que as propriedades físicas do agregado reciclado diferem das dos agregados

naturais. Em particular, a maior porosidade e absorção de água exigem cuidados específicos no controle da quantidade de água de amassamento e na escolha de aditivos para garantir a trabalhabilidade e a resistência mecânica adequadas.

A caracterização prévia dos ARC é uma etapa fundamental no processo de dosagem. Propriedades como absorção, massa específica, granulometria e o teor de argamassa aderida devem ser quantificadas com precisão. Esses dados orientam o ajuste da quantidade de água efetivamente disponível para a hidratação do cimento, bem como a seleção da relação água/cimento ideal. Estudos como os de Trindade, Garcia e Fonseca (2020) demonstram que a correta caracterização permite ajustes seguros até mesmo para elevados níveis de substituição do agregado graúdo natural.

Kumar *et al.* (2024) também destacam a relevância da incorporação de aditivos superplastificantes, que contribuem para manter a fluidez do concreto sem aumento do teor de água, favorecendo o desenvolvimento das resistências mecânicas e da coesão da mistura.

Além disso, a inclusão de adições minerais, como sílica ativa, cinza volante e escória de alto-forno, tem se mostrado eficiente na mitigação dos efeitos negativos do ARC. Tais adições promovem maior compacidade da matriz, melhorando a interface pasta-agregado e contribuindo para a durabilidade e desempenho estrutural do concreto. A escolha e dosagem dessas adições dependem das características específicas do ARC e das exigências do projeto.

Modelos matemáticos e técnicas de otimização também vêm sendo empregados para definir traços mais eficientes e sustentáveis. Essas abordagens consideram variáveis como resistência desejada, trabalhabilidade, consumo de materiais e impacto ambiental, permitindo a elaboração de concretos personalizados para diferentes aplicações estruturais.

Por fim, destaca-se que a variabilidade intrínseca do ARC demanda que haja controle de qualidade durante a produção do concreto, pois cada novo lote de agregado reciclado pode apresentar variações em suas propriedades. Neste contexto, torna-se relevante investigar como a adição de fibras pode atuar na compensação de possíveis perdas de desempenho, especialmente na resistência ao cisalhamento, contribuindo para ampliar a aplicação de concretos reciclados em estruturas de maior responsabilidade.

2.4. Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado

A utilização de ARC influencia diretamente diversas propriedades do concreto, demandando estudos específicos para garantir sua viabilidade em aplicações estruturais. Hansen (1992) aponta que concretos com ARC tendem a apresentar absorção de água de 5% a 10% superior àquela observada em concretos convencionais. Essa diferença pode se acentuar com a presença de agregado miúdo reciclado. No entanto, autores como Moreira (2010), Lovato (2007) e Leite (2001) destacam que essa absorção está fortemente vinculada à natureza do agregado graúdo. Leite (2001) em particular, observa que a formação de produtos de hidratação na superfície rugosa e porosa do agregado reciclado leva ao fechamento dos poros nos agregados miúdos, enquanto os graúdos, por sua dimensão, mantêm maior contribuição na absorção de água.

Hansen (1992) também destaca que a retração por secagem aumenta em torno de 50% quando apenas o agregado graúdo é reciclado, podendo chegar a 70% quando ambos os agregados, graúdo e miúdo, são reciclados. Quanto à fluência, observa-se aumento significativo em concretos reciclados, atribuído à presença da pasta de cimento antiga nos agregados (Bazuco, 1999).

No que tange à resistência à tração, Hansen (1992) sugere que os concretos com ARC não apresentam mudanças expressivas, embora estudos como os de Gonçalves (2011) apontem incrementos nessa propriedade, ao passo que Lovato (2007) observou reduções. Já em relação à resistência à compressão, Hansen (1992) indica uma redução média de 5% a 10% para concretos com ARC graúdo, e até 30% para concretos com ambos os agregados reciclados. O autor também observa que a substituição de até 30% do agregado graúdo por ARC pode ser feita sem prejuízo às propriedades mecânicas. Bazuco (1999) complementa que a redução da resistência está relacionada à qualidade do ARC, ao teor de substituição e ao nível de resistência do concreto, sendo os efeitos mais perceptíveis em concretos de alta resistência.

Ballista (2003) verificou resultados positivos para a resistência à compressão com o uso de ARC, atribuindo-os à boa qualidade do agregado, à maior hidratação na interface pasta-agregado e à presença de partículas de cimento não hidratadas, que contribuíram para o aumento do teor de ligante. Conclusões semelhantes foram registradas por Gonçalves (2011) e Buttler (2003). Em contraponto, Marinković *et al.* (2010) sugerem que concretos com ARC possuem resistências inferiores às de

concretos convencionais, exigindo uma elevação de cerca de 5% no teor de cimento para alcançar propriedades similares. Os autores desaconselham o uso de ambos os agregados reciclados simultaneamente e indicam que concretos com apenas ARC graúdo apresentam desempenho limitado a baixas e médias resistências.

Ghorbel, Wardeh e Fares (2019) mostraram que, com ajustes mínimos na dosagem, é possível alcançar resistências à compressão próximas àquelas do concreto convencional, inclusive com evolução de resistência semelhante até os 28 dias. Leite (2001) aponta divergências nos resultados da literatura, enfatizando a dificuldade de comparação devido à variabilidade nos métodos e parâmetros utilizados.

Troian (2010) apresenta observações relevantes sobre a relação entre a resistência do ARC e a resistência do concreto produzido. Segundo a autora, abaixo de 30–35 MPa de resistência do agregado, há uma correlação direta com a resistência do concreto; acima disso, a resistência do compósito tende a se estabilizar. Assim, a reciclagem de concretos de baixa resistência ($f_{ck} \approx 15$ MPa) exige maior cautela e caracterização rigorosa. Troian (2010) também diferencia os efeitos de agregados reciclados puros e mistos, atribuindo melhor desempenho aos primeiros.

Leite e Monteiro (2016) investigaram agregados de concretos com resistências de 40 e 80 MPa, em condições secas e saturadas. Os melhores resultados foram obtidos com agregados de alta resistência e saturados com superfície seca, indicando desempenho físico-mecânico semelhante ao concreto convencional. A zona de transição apresentou porosidade maior em agregados de menor resistência.

Por fim, Hansen (1992) observa reduções de 15% a 40% no módulo de elasticidade em concretos com ARC, atribuídas à argamassa aderida. Essa conclusão é corroborada por Lovato (2007), Buttler (2003), Angulo (2005) e Ghorbel, Wardeh e Fares (2019), que também destacam a fragilidade da zona de transição como um fator contribuinte.

Em síntese, embora muitos estudos tenham sido conduzidos, as divergências e a falta de padronização metodológica dificultam a consolidação de conclusões definitivas sobre o comportamento mecânico dos concretos com ARC. A compreensão mais profunda dessas propriedades é importante para ampliar o uso estrutural seguro desses materiais na Engenharia Civil.

2.5. Concreto Reforçado com Fibras

A adição de fibras ao concreto é uma técnica que visa melhorar as propriedades mecânicas do compósito, sobretudo sua ductilidade, tenacidade, resistência à fissuração e capacidade de absorver energia. O concreto Reforçado com Fibras (CRF) é composto por uma matriz cimentícia na qual fibras descontínuas e tridimensionalmente distribuídas são incorporadas. Essas fibras atuam como mecanismos de ponte sobre trincas, retardando sua propagação e melhorando o desempenho global do material.

As fibras utilizadas podem ser de origem metálica (como aço), sintética (polipropileno, polietileno, PET), mineral (vidro) ou natural (sisal, coco etc.). Cada tipo de fibra confere ao concreto características específicas, sendo escolhidas de acordo com a aplicação desejada. Fibras metálicas, por exemplo, são comumente utilizadas em pavimentos industriais devido à sua elevada resistência à tração e módulo de elasticidade, enquanto fibras poliméricas são valorizadas por sua resistência à tração, baixa densidade e maior resistência à corrosão.

No caso das fibras de Polietileno Tereftalato, destaca-se seu apelo ambiental. Provenientes da reciclagem de garrafas plásticas descartáveis, essas fibras não apenas agregam resistência ao concreto, como também promovem a redução do passivo ambiental associado ao descarte de resíduos plásticos.

Estudos como os de Araújo *et al.* (2022), Pelisser (2020) e Ochi, Okubo e Fukui (2007) mostraram que a adição de fibras PET ao concreto pode proporcionar melhorias na resistência à tração por compressão diametral, na resistência à fissuração e na capacidade pós-fissuração, além de colaborar com a ductilidade. Os ganhos observados são dependentes do teor de fibras, suas dimensões e da qualidade da dispersão no compósito.

Os mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras variam conforme suas propriedades geométricas (comprimento, diâmetro, relação de aspecto), físico-químicas (aderência à matriz, rugosidade superficial) e o teor volumétrico. A eficiência do reforço depende da capacidade de ancoragem das fibras na matriz, sendo este aspecto amplamente estudado por meio de ensaios do tipo *pull-out*. O estudo da interação entre matriz-fibra é essencial para compreender os ganhos proporcionados pelas fibras na resistência mecânica do concreto.

Além disso, a adição de fibras pode influenciar as propriedades reológicas do concreto no estado fresco. Dependendo do tipo e da quantidade de fibra utilizada, pode haver redução da trabalhabilidade, sendo necessário o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes para compensar esse efeito. O impacto na densidade e na absorção de água também deve ser considerado.

Em termos estruturais, as fibras contribuem principalmente para o aumento da ductilidade, o controle da fissuração e o aumento da capacidade resistente à tração e ao cisalhamento. Esse último aspecto é particularmente relevante em aplicações como pavimentos, paredes e vigas sujeitas a esforços cortantes, onde a presença de fibras pode atuar como reforço complementar ou até substitutivo aos estribos, dependendo das exigências normativas e da configuração estrutural.

A utilização de fibras PET em combinação com ARC representa uma estratégia promissora no contexto da construção sustentável. Essa combinação tem sido objeto de diversas investigações, muitas das quais indicam que as fibras são capazes de mitigar parcialmente os efeitos negativos do uso de agregados reciclados, particularmente em termos de resistência à tração e ao cisalhamento.

Por exemplo, o estudo de Araújo *et al.* (2022) observou que a incorporação de fibras PET pode promover redistribuição das tensões e atrasar a propagação de fissuras em elementos estruturais. Já Pelisser (2020) demonstrou que a presença dessas fibras melhora o comportamento pós-fissuração e reduz a abertura de fissuras sob cargas crescentes. Além disso, Ochi, Okubo e Fukui (2007) apresentou evidências de que fibras PET extraídas de resíduos podem atuar eficientemente como reforço, desde que bem ancoradas à matriz cimentícia.

Esses resultados apontam para a viabilidade técnica do uso de fibras PET no reforço de concretos com ARC, particularmente em situações de carregamento cortante. Dessa forma, o concreto reforçado com fibras PET se apresenta como uma alternativa viável técnica e ambientalmente, especialmente em elementos estruturais onde um bom desempenho sob carregamento cortante é necessário.

2.6. Mecanismos de cisalhamento no concreto

O cisalhamento em elementos de concreto é um fenômeno estrutural complexo, que envolve a interação entre diversos mecanismos de transferência de tensões. Diferentemente da flexão, cuja modelagem teórica é bem estabelecida, a resistência

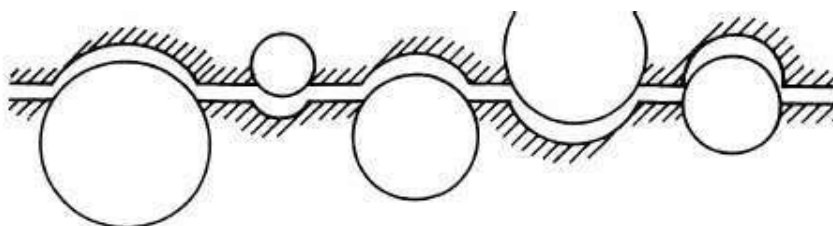
ao cisalhamento ainda suscita discussões e variações nas abordagens normativas e experimentais. A ausência de um modelo único que represente de maneira abrangente o comportamento ao cisalhamento contribui para o desenvolvimento contínuo de pesquisas nessa área.

No concreto sem armadura transversal, a resistência ao cisalhamento é atribuída à contribuição conjunta da zona comprimida, do efeito de engrenamento dos agregados, da ação de tração residual da matriz e da agregação de tensões transferidas por mecanismos como atrito e aderência entre as faces da fissura. O engrenamento dos agregados, por exemplo, é influenciado pela rugosidade da fissura, pelo tamanho máximo do agregado e pela coesão entre os constituintes do concreto.

A presença de agregados reciclados pode alterar significativamente o comportamento ao cisalhamento. O estudo de Rahal e Al-Khaleefi (2015) avaliou vigas com diferentes taxas de substituição por agregado reciclado de concreto e observou uma redução moderada da resistência ao cisalhamento com o aumento da taxa de substituição. Essa redução foi atribuída à menor densidade e resistência das partículas recicladas, o que pode comprometer os mecanismos de engrenamento e a coesão da matriz.

Outro aspecto relevante é a atuação de mecanismos de cisalhamento por atrito em superfícies fissuradas. A transferência de esforços entre faces de fissura ocorre por meio da interação entre as irregularidades das superfícies e a força normal de compressão que atua perpendicularmente ao plano de cisalhamento (Figura 2). Em elementos com armadura longitudinal contínua ou barras externas posicionadas transversalmente à fissura, essas barras exercem uma força de confinamento que aumenta a resistência por atrito, como discutido por Loov e Patnaik (1994). Esse mecanismo é particularmente importante em elementos tipo *push-off*, nos quais há predominância de esforços cortantes diretos e possibilidade de deslizamento entre as partes da peça.

Figura 2 - Mecanismo de fissuração em concretos convencionais.



Fonte: Walraven et al., 1987.

A utilização de fibras no concreto influencia o comportamento ao cisalhamento tanto pela contribuição direta na redistribuição de tensões quanto por efeitos indiretos, como o retardo na abertura de fissuras e o aumento da coesão do material. Araújo *et al.*, (2022) observaram que a introdução de fibras pode contribuir para uma redistribuição mais gradual das tensões ao longo da fissura, mantendo a integridade da seção por mais tempo. Essa atuação é relevante, especialmente quando combinada com a presença de ARC, cujo desempenho pode ser comprometido na ausência de reforço adicional.

Além disso, o estudo de Walraven e Stroband (1994) destaca que, em estruturas com descontinuidades geométricas ou de material, como as observadas em ensaios tipo *push-off*, os mecanismos de transferência de cisalhamento podem ser avaliados com base no modelo de fissura crítica. Esse modelo considera a fissuração inclinada como plano de deslizamento dominante, no qual interagem forças normais e tangenciais. Nessa perspectiva, o atrito mobilizado pelas barras externas posicionadas transversalmente à fissura pode ser interpretado como uma forma de reforço passivo externo, mesmo quando não há ligação física direta entre as partes.

A literatura ainda apresenta variações nos critérios de avaliação do cisalhamento, incluindo métodos baseados em tensão média na área cisalhada, modelos de treliça e critérios de ruptura por fissura inclinada. Hao, Visintin e Oehlers (2020), por exemplo, propõem o uso de tensões médias para caracterização da resistência ao cisalhamento direto em ensaios experimentais, que essa abordagem facilita a comparação entre composições diferentes e configurações geométricas variadas.

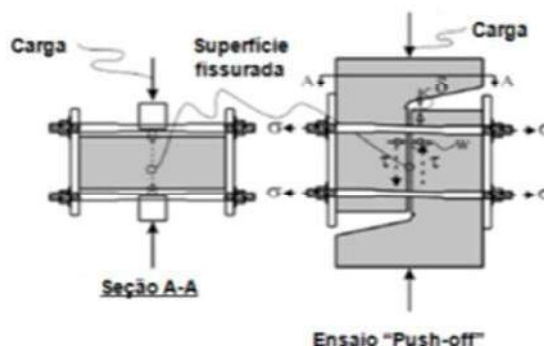
Com base nas evidências disponíveis, observa-se que a resistência ao cisalhamento em concretos com ARC pode ser aprimorada pela introdução de fibras. A compreensão dos mecanismos envolvidos é fundamental para o desenvolvimento de soluções estruturais eficientes e sustentáveis.

2.7. Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto são amplamente utilizados para investigar o comportamento mecânico do concreto em situações em que predominam tensões cortantes. Uma das metodologias mais recorrentes nesse tipo de análise é o ensaio

do tipo *push-off* ilustrado na Figura 3, que permite avaliar a resistência ao cisalhamento em regiões definidas por planos potenciais de fissura.

Figura 3 - Ensaio *push-off*



Fonte: Kim, Trejo e Hueste, 2007.

O ensaio *push-off* consiste na aplicação de uma força que induz ao deslizamento relativo entre duas regiões da peça, forçando o cisalhamento ao longo de um plano específico. Essa configuração favorece o estudo da transferência de tensões tangenciais por mecanismos como atrito, engrenamento de agregados e, eventualmente, a contribuição de fibras incorporadas à matriz. Dadd *et al.* (2024) propuseram a utilização da tensão média na área cisalhada como critério de avaliação, favorecendo a comparação entre diferentes materiais e geometrias.

Mattock, Li e Wang (1976) investigaram a transferência de cisalhamento em superfícies de contato e demonstraram que a resistência ao cisalhamento depende significativamente da rugosidade da interface, da força normal aplicada e da presença de armaduras transversais. Essa base teórica continua relevante, especialmente em configurações como a do ensaio *push-off*, nas quais o plano de cisalhamento está bem definido.

No contexto do uso de agregados reciclados de concreto (ARC), estudos como o de Rahal e Hassan (2021) mostraram que a substituição do agregado natural por reciclado pode reduzir a resistência ao cisalhamento, mas essa redução pode ser mitigada com o uso de reforços adicionais, como fibras.

A utilização de fibras PET tem sido investigada como alternativa para melhorar o desempenho ao cisalhamento, especialmente em compósitos com ARC. Araújo *et al.*, (2022) observaram que a presença das fibras contribuiu para o aumento da resistência ao cisalhamento, promovendo maior coesão da matriz e retardando o processo de fissuração. Além disso, Pelisser (2020) relatou que diferentes teores de

fibras PET influenciaram tanto a resistência ao cisalhamento quanto o padrão de fissuras, sugerindo que há uma dosagem ótima a ser determinada em função da composição do concreto.

Outro aspecto relevante nos ensaios *push-off* é a avaliação das fissuras formadas. Sagaseta e Vollum (2011) discutem que o padrão de fissuração é um indicador importante do mecanismo de cisalhamento atuante, sendo influenciado pelo tipo de agregado, pela presença de fibras e pelas condições de confinamento. A presença de barras externas, atuando como reforço transversal passivo, pode limitar a abertura de fissuras e modificar a distribuição de tensões ao longo da seção.

A combinação de agregados reciclados e fibras PET, portanto, apresenta potencial para melhorar a resposta ao cisalhamento direto, sendo os ensaios do tipo *push-off* uma ferramenta eficaz para mensurar essa contribuição. Com base na literatura analisada, fica evidente a relevância de estudos experimentais que avaliem o desempenho conjunto desses materiais, com foco nos parâmetros que controlam a formação e propagação de fissuras sob carregamento cortante.

2.8. Atrito e restrição passiva

O cisalhamento por atrito é um mecanismo relevante em interfaces de concreto, particularmente em situações em que ocorre deslizamento relativo entre superfícies de contato. A resistência ao cisalhamento, nesse caso, é gerada pelo atrito mobilizado entre as superfícies, intensificado pela aplicação de uma força normal que promove o confinamento da região cisalhada. Loov e Patnaik (1994) realizaram estudos sobre a influência da força normal e da rugosidade superficial em interfaces de concreto, demonstrando que a resistência ao cisalhamento é diretamente proporcional ao nível de confinamento aplicado, sendo esse comportamento particularmente significativo em superfícies rugosas.

Mattock e Hawkins (1972) destacaram a contribuição da força normal na resistência ao cisalhamento em juntas moldadas em separado, evidenciando a importância da coesão inicial e do atrito pós-fissuração. Em sua proposta, o atrito é tratado como um dos principais mecanismos responsáveis pela transmissão de tensões cortantes em superfícies de concreto, sendo influenciado também pela presença de armaduras transversais.

O uso de elementos de restrição passiva, como barras de aço dispostas transversalmente ao plano de cisalhamento, pode desempenhar papel semelhante ao da armadura de estribo, oferecendo resistência adicional ao deslizamento por meio do desenvolvimento de forças de atrito. Sagaseta e Vollum (2011) discutem que, além do atrito direto, há também uma componente de resistência atribuída à interação mecânica entre o concreto e os elementos de restrição, que atuam limitando a abertura e a propagação de fissuras.

Walraven e Stroband (1994) também abordam a transferência de esforços em interfaces fissuradas, considerando que a presença de armaduras transversais contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento por meio do efeito de amarração, que restringe a separação das faces da fissura e mantém a capacidade de transmissão de tensões por atrito.

A literatura consultada evidencia que a resistência ao cisalhamento por atrito em interfaces de concreto pode ser significativamente influenciada pela combinação de força normal, rugosidade superficial e presença de restrição transversal. Em estruturas experimentais do tipo *push-off*, barras externas podem atuar como elementos de restrição passiva, funcionando de maneira análoga à armadura de cisalhamento, mesmo que não estejam ancoradas como estribos convencionais. Esse tipo de configuração permite estudar o comportamento da interface cisalhada em condições mais próximas da realidade de elementos estruturais submetidos a esforços de corte, como em juntas de concretagem ou regiões com descontinuidade geométrica.

Dessa forma, o entendimento dos mecanismos de cisalhamento por atrito e da atuação de elementos de restrição passiva é fundamental para a interpretação dos resultados experimentais de ensaios diretos e para a modelagem do comportamento de elementos estruturais sujeitos a esse tipo de solicitação.

2.9. Aplicação da Correlação Digital de Imagens (DIC) na análise de cisalhamento

A Correlação Digital de Imagens é uma técnica não destrutiva e de alta precisão utilizada para a análise de deslocamentos e deformações em materiais submetidos a diferentes tipos de carregamento. Sua aplicação em estudos com concretos estruturais tem ganhado relevância, especialmente em investigações que buscam

compreender o comportamento ao cisalhamento de compósitos com materiais não convencionais, como os concretos com agregados reciclados e reforçados com fibras.

Jienmaneechotchai *et al.* (2023) empregaram a técnica de DIC em ensaios experimentais para analisar o desenvolvimento de fissuras em concretos submetidos a carregamentos estáticos. A utilização dessa técnica permitiu a observação detalhada da distribuição de deformações e a identificação dos mecanismos de propagação das fissuras, contribuindo para uma melhor interpretação do comportamento estrutural dos corpos-de-prova.

A DIC é particularmente vantajosa em ensaios do tipo *push-off*, pois possibilita o monitoramento contínuo da abertura da fissura e do deslizamento relativo ao longo do plano cisalhado. Essa abordagem fornece informações que complementam os dados obtidos por extensômetros convencionais, permitindo uma análise mais abrangente do desempenho do material.

O uso dessa tecnologia tem sido associado à caracterização de materiais inovadores, como concretos com ARC e fibras PET, cujas propriedades heterogêneas demandam métodos de instrumentação mais sensíveis. Em estudos de Resende, Cardoso e Shehata (2021), a DIC foi utilizada para mapear o comportamento do concreto sob diferentes condições de carregamento, revelando a influência dos componentes reciclados no padrão de fissuração.

Além disso, a técnica tem demonstrado utilidade na visualização da propagação de fissuras mesmo em regiões de difícil instrumentação com sensores convencionais. Isso permite uma análise detalhada da cinemática do dano, o que é particularmente útil para avaliar a interação entre as fibras PET e a matriz cimentícia durante o processo de fissuração, como relatado nos trabalhos em que se investigam materiais com comportamento pseudo-ductil.

A resolução espacial e temporal da DIC, combinada com a possibilidade de análises bidimensionais ou tridimensionais, favorece estudos aprofundados sobre mecanismos locais de transferência de esforços, como o engrenamento de agregados, a atuação de fibras na ponte de fissura e a mobilização do atrito em superfícies em deslizamento. Tais aspectos são relevantes para o entendimento da resposta mecânica de concretos produzidos com materiais reciclados, onde a heterogeneidade pode resultar em comportamentos localizados e não lineares.

Portanto, a incorporação da DIC nos ensaios de cisalhamento representa um avanço metodológico na caracterização mecânica de concretos, permitindo a análise visual e quantitativa da resposta estrutural dos materiais e contribuindo para o entendimento das interações entre agregados reciclados, fibras e matriz cimentícia em regiões críticas de cisalhamento. Essa abordagem é particularmente pertinente em pesquisas voltadas à sustentabilidade e à inovação de materiais, como aquelas que empregam ARC e fibras PET como componentes do concreto estrutural.

2.10. Pesquisas relacionadas à ARC e Fibras PET

A transferência de tensões de cisalhamento em concretos com ARC é uma temática de relevância crescente na engenharia estrutural, uma vez que o reaproveitamento de resíduos da construção pode comprometer propriedades fundamentais à integridade estrutural, como a resistência ao cisalhamento. Pesquisas recentes têm buscado compreender como o comportamento estrutural do concreto com ARC se altera diante de diferentes composições de materiais, presença ou ausência de armaduras transversais e inclusão de fibras recicladas, como as de Polietileno Tereftalato. Esta seção apresenta alguns estudos que abordam diretamente a resistência ao cisalhamento de concretos reciclados em diferentes condições experimentais.

a) Trindade, Garcia e Fonseca (2020)

O trabalho de Trindade, Garcia e Fonseca (2020) avaliou experimentalmente a resistência ao cisalhamento de concretos com diferentes percentuais de substituição de agregado graúdo natural por ARC. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova do tipo *push-off*, com e sem armadura transversal, utilizando agregados oriundos de dois grupos distintos: um composto por concretos de baixa resistência (15 a 20 MPa) e outro por concretos de alta resistência (35 a 40 MPa), possibilitando uma análise mais abrangente do efeito da qualidade do ARC sobre o desempenho mecânico do compósito.

Os resultados mostraram que, na ausência de armadura transversal, os concretos com 50% e 100% de ARC de baixa resistência (Grupo 1) apresentaram reduções significativas de resistência ao cisalhamento, da ordem de 32,75% e 38,5%, respectivamente, em comparação com o concreto de referência. Por outro lado, os

concretos produzidos com ARC oriundo de concretos de maior resistência (Grupo 2) mantiveram níveis de desempenho semelhantes ao do concreto convencional, mesmo em teores elevados de substituição, sugerindo que a qualidade do concreto de origem do ARC influencia diretamente na eficiência do intertravamento entre os agregados.

Nos ensaios com armadura transversal, verificou-se que o acréscimo da taxa de armadura resultou no aumento da resistência ao cisalhamento para todos os traços. Notou-se ainda que até 50% de ARC do Grupo 2 não comprometeu significativamente o desempenho, porém, com 100% de substituição, foram registradas reduções de 22,1% e 37,2% na resistência ao cisalhamento para dois e três estribos, respectivamente, quando comparado ao concreto de referência. Os autores também realizaram medições da rugosidade da superfície de ruptura das amostras, observando uma forte correlação entre a rugosidade média (R_a) e a tensão de cisalhamento máxima obtida, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9859$, o que reforça a importância do intertravamento mecânico na resistência ao cisalhamento em concretos com ARC.

Além da avaliação experimental, o trabalho comparou os resultados com previsões normativas, observando que a equação do ACI 318-14 apresentou estimativas conservadoras, enquanto as equações da PCI e CSA superestimaram os valores em até 20%. O estudo destaca a influência da qualidade do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento e fornece subsídios para ajustes em modelos normativos voltados a concretos reciclados.

b) Torres (2019)

O trabalho desenvolvido por Torres (2019) avaliou experimentalmente o comportamento ao cisalhamento direto de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados, utilizando o ensaio do tipo *push-off* como principal metodologia de investigação. O estudo teve como foco a compreensão dos mecanismos de transferência de esforços ao longo do plano de cisalhamento, considerando a contribuição do intertravamento dos agregados, da matriz cimentícia e do reforço por fibras de aços.

Foram moldados corpos-de-prova *push-off* com substituições parciais do agregado natural por agregado reciclado, provenientes de concretos de diferentes classes de resistência. Adicionalmente, alguns traços receberam a incorporação de

fibras de aço em distintos teores volumétricos, permitindo avaliar sua influência na resistência última e no comportamento pós-pico. O programa experimental foi complementado pela caracterização física e mecânica dos agregados reciclados, incluindo massa específica, absorção de água e teor de argamassa aderida.

Os resultados mostraram que a substituição do agregado natural por agregado reciclado levou, de modo geral, a uma redução da resistência ao cisalhamento, com quedas da ordem de até 20% em relação aos concretos de referência, dependendo da qualidade do resíduo utilizado. Essa redução foi associada principalmente à maior deformabilidade da argamassa aderida e à diminuição da eficiência do intertravamento dos agregados no plano de cisalhamento.

Por outro lado, a adição de fibras de aço apresentou efeito significativamente positivo. Para determinados teores de fibras, observou-se aumento da resistência última ao cisalhamento e, sobretudo, melhoria expressiva do comportamento pós-pico, com manutenção de níveis elevados de resistência residual mesmo após a formação da fissura principal. Em alguns casos, os concretos com agregado reciclado e fibras alcançaram resistências ao cisalhamento equivalentes ou superiores às dos concretos convencionais sem fibras.

O estudo também evidenciou que concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de concretos de maior resistência original apresentaram desempenho superior, indicando que a qualidade do resíduo exerce influência direta no comportamento mecânico do concreto reciclado. A análise estatística confirmou diferenças significativas entre os grupos analisados, especialmente quando comparados os concretos com e sem fibras.

De forma geral, o autor concluiu que o uso de agregados reciclados em concretos submetidos ao cisalhamento direto é tecnicamente viável, desde que associado a estratégias de melhoria do desempenho, como a incorporação de fibras. O trabalho reforça o potencial do ensaio *push-off* como ferramenta adequada para investigação do cisalhamento por atrito e fornece subsídios importantes para pesquisas que busquem conciliar sustentabilidade e desempenho estrutural.

c) Daad *et al.* (2025)

O estudo de Dadd *et al.* (2025) estudou o comportamento ao cisalhamento por atrito em juntas de concretos reciclados, considerando tanto agregados reciclados de

primeira geração quanto de segunda geração. A pesquisa foi conduzida na Universidade de Queensland, na Austrália, e teve como objetivo avaliar a resistência ao cisalhamento em interfaces moldadas a frio, por meio de ensaios do tipo *push-off*. As amostras foram submetidas a diferentes níveis de carregamento axial (0, 10% e 20% da resistência à compressão do concreto) e com superfícies de interface lisas, rugosas e com barras de ligação.

Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento foi influenciada pela rugosidade da superfície da junta e pelo tipo de agregado reciclado utilizado. As amostras com agregados reciclados de segunda geração apresentaram desempenho inferior em comparação às de primeira geração. A rugosidade superficial foi identificada como fator determinante para o aumento da resistência ao cisalhamento, sendo que as juntas com barras de ligação apresentaram os melhores desempenhos. Adicionalmente, foi observada uma redução de até 20% na resistência ao cisalhamento nas amostras com agregados reciclados de segunda geração, atribuída à menor qualidade da pasta de ligação e à presença de zonas de transição mais fracas. O estudo reforça a necessidade de controle das características da interface e da origem dos agregados reciclados em aplicações estruturais que envolvam solicitações de cisalhamento.

d) Ochi, Okubo e Fukui (2007)

O estudo desenvolvido por Ochi, Okubo e Fukui (2007) teve como objetivo investigar o desempenho mecânico de concretos reforçados com PET recicladas, derivadas de garrafas plásticas. As fibras foram incorporadas ao concreto com o propósito de avaliar seu efeito sobre propriedades como resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade. Foram analisadas diferentes proporções volumétricas de fibras (0,5%, 1,0% e 1,5%), mantendo constante a relação água/cimento em 0,5.

Os resultados mostraram que a adição de fibras PET provocou redução da resistência à compressão, variando entre 5% e 15% em comparação ao concreto de referência, sendo esse efeito mais acentuado nos maiores teores de fibra. Em contrapartida, a resistência à tração na flexão aumentou em todos os traços com PET, alcançando incrementos de até 65% em relação ao concreto sem fibra, especialmente nas dosagens com 1,0% de PET. A análise do módulo de elasticidade revelou

tendência à redução com o aumento da quantidade de fibra, comportamento atribuído à menor rigidez do material plástico em relação à matriz cimentícia.

A observação do padrão de fissuração revelou comportamento mais dúctil nos concretos com fibra de PET, com maior número de fissuras finas e mais distribuídas. Esse comportamento é indicativo de uma melhor capacidade de absorção de energia e maior tenacidade, características desejáveis para concretos sujeitos a solicitações de impacto e cisalhamento. Embora o estudo não tenha envolvido diretamente ensaios de cisalhamento, os autores sugerem que os aumentos da tenacidade e da resistência à tração indireta podem contribuir para um melhor desempenho em esforços cortantes. Dessa forma, os achados de Ochi, Okubo e Fukui (2007) oferecem base teórica relevante para justificar a aplicação de fibras PET recicladas em investigações posteriores voltadas à resistência ao cisalhamento em concretos estruturais.

e) Khan e Ayub (2020)

O estudo de Khan e Ayub (2020) teve como objetivo investigar o comportamento à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável armado reforçadas com diferentes formas de fibras de politereftalato de etileno (PET), incluindo fibras discretas e tiras longitudinais. O foco principal foi avaliar a viabilidade do uso de PET reciclado como reforço em concretos estruturais autoadensáveis, considerando seu impacto nas propriedades mecânicas e no modo de ruptura das vigas.

Foram moldadas vigas de concreto com dimensões de 150 mm × 200 mm × 1800 mm, armadas longitudinalmente com barras de aço e sem estribos transversais, para garantir que os mecanismos de cisalhamento fossem diretamente influenciados pela adição das fibras PET. As variáveis do estudo incluíram: tipo de reforço de PET (fibras e tiras), quantidade de PET fixada, em volume, em 1,0. A resistência característica à compressão dos concretos variou de 29,1 MPa a 38,6 MPa, dependendo do teor e tipo de PET incorporado.

Os resultados mostraram que a adição de fibras PET, em especial no formato de tiras verticais, teve um efeito positivo na resistência ao cisalhamento. A viga com 1,0% de PET em tiras verticais apresentou um aumento de 31,6% na carga última de cisalhamento em comparação com a viga de referência sem PET. Em contrapartida,

o uso de fibras curtas de PET distribuídas no volume apresentou melhora significativa. O aumento na capacidade resistente foi atribuído à ponte de fissura proporcionada pelas tiras de PET e ao redirecionamento das fissuras principais.

Adicionalmente, foi observado que o uso de PET não comprometeu significativamente o desempenho à flexão das vigas, mantendo o momento último próximo ao da viga de controle. As análises de fissuração mostraram um aumento da ductilidade nas vigas com PET, com fissuras mais numerosas e menos abruptas. O modo de ruptura das vigas com reforço de PET tendeu a ser mais gradual, com maior capacidade de absorção de energia.

Por fim, os autores concluíram que o uso de tiras de PET reciclado pode ser uma alternativa viável para reforço ao cisalhamento em concretos autoadensáveis, desde que seja utilizado um arranjo eficiente e proporções adequadas. O estudo destaca o potencial do reaproveitamento de resíduos plásticos na Construção Civil, com ganhos em sustentabilidade e desempenho mecânico.

f) Cereja (2025)

A dissertação desenvolvida por Cereja (2025) investigou o comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado produzidas com substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado de resíduos de construção e demolição, associada à incorporação de fibras PET em diferentes proporções. O programa experimental contemplou vigas ensaiadas à flexão em três pontos, com análise detalhada da fissuração por meio da técnica de Correlação de Imagem Digital.

Nos ensaios de caracterização mecânica, os concretos NAT 0% e RCD 0% apresentaram resistências médias à compressão semelhantes, da ordem de 46 MPa, indicando que a substituição total do agregado graúdo não comprometeu significativamente essa propriedade. Entretanto, o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado apresentou redução aproximada de 48% em relação ao concreto com agregado natural, evidenciando menor rigidez da matriz com RCD. Quanto à resistência à tração por compressão diametral, o concreto RCD 0% apresentou valor superior (3,19 MPa) ao NAT 0% (2,25 MPa), sugerindo boa aderência entre pasta e agregado reciclado produzido em laboratório.

No comportamento estrutural das vigas, a viga RCD 0% apresentou carga última ao cisalhamento ($V_u \approx 74$ kN) superior à viga NAT 0% ($V_u \approx 58$ kN),

demonstrando que, nas condições experimentais adotadas, o uso do agregado reciclado não reduziu a resistência global ao cisalhamento. A incorporação de fibras PET influenciou significativamente o comportamento pós-fissuração. A dosagem de 1% de fibras promoveu aumento da resistência última em relação à viga NAT 0% e melhora expressiva da ductilidade, enquanto a dosagem de 1,25% apresentou elevado índice de tenacidade e maior capacidade de absorção de energia após a fissuração. Em contrapartida, a dosagem de 0,5% mostrou desempenho inferior, indicando que baixos teores podem não garantir adequada contribuição resistente.

As análises por DIC evidenciaram que as vigas com fibras apresentaram maior número de fissuras com menores aberturas, além de comportamento menos abrupto na ruptura. O padrão de ruptura das vigas reforçadas com PET indicou melhor controle da fissura diagonal crítica, com maior redistribuição interna de tensões. Assim, o estudo concluiu que a combinação de agregado reciclado de RCD com fibras PET constitui alternativa tecnicamente viável, proporcionando melhora no desempenho pós-fissuração e na ductilidade das vigas submetidas ao cisalhamento, além de contribuir para a sustentabilidade na Construção Civil.

2.11. Considerações gerais

A análise dos estudos apresentados nesta seção evidencia avanços importantes na compreensão do comportamento ao cisalhamento de concretos com agregado reciclado de concreto, especialmente quando associados à adição de fibras poliméricas como as de PET. Os trabalhos discutidos demonstram que, embora o uso de ARC possa comprometer a resistência ao cisalhamento devido à fragilidade da zona de transição e à menor coesão interna, estratégias como a adição de fibras recicladas e o controle da rugosidade da interface podem mitigar esses efeitos.

Entretanto, observa-se uma carência de estudos que investiguem especificamente o comportamento ao cisalhamento direto em concretos que combinam ARC e fibras PET, sobretudo por meio de metodologias experimentais que isolem essa solicitação, como os ensaios *push-off*. A maioria dos trabalhos concentra-se na análise global do comportamento estrutural (como vigas armadas), o que dificulta a avaliação isolada da contribuição das fibras ao mecanismo de transferência de tensões cortantes.

Além disso, as pesquisas revisadas indicam que tanto a qualidade do concreto de origem do ARC quanto a geometria, dosagem e arranjo das fibras PET são fatores determinantes para o desempenho estrutural do compósito. Esses elementos devem ser criteriosamente considerados em novos estudos que pretendam propor soluções sustentáveis para aplicações estruturais exigentes, como aquelas sujeitas a esforços de cisalhamento.

Portanto, há uma lacuna evidente na literatura no que se refere à interação entre ARC e fibras PET em situações de cisalhamento direto. Investigações futuras que explorem essa combinação de materiais com base em metodologias experimentais sistemáticas são essenciais para o avanço do conhecimento técnico e para a consolidação do uso de materiais reciclados na engenharia estrutural com segurança e desempenho comprovado.

A síntese dos trabalhos abordados é apresentada no Quadro 2, mostrando os objetivos gerais, metodologia, variáveis de pesquisa e os principais resultados obtidos.

Quadro 2 - Síntese dos estudos sobre cisalhamento em concretos com ARC e Fibras

Autor	Objetivo	Metodologia	Variáveis	Principais Resultados
Trindade, Garcia e Fonseca (2020)	Avaliar a resistência ao cisalhamento de concretos com substituição por ARC	Ensaio <i>push-off</i> com e sem armadura transversal	<ul style="list-style-type: none"> - % de ARC (0, 50, 100%) - Qualidade do ARC (baixa e alta resistência) - Taxa de armadura 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de até 38,5% (ARC de baixa qualidade) - ARC de alta qualidade manteve desempenho - Forte correlação entre rugosidade e resistência ($R^2 = 0,9859$)
Torres (2019)	Investigar o cisalhamento direto em concretos com ARC e fibras de aço	Ensaio <i>push-off</i> e caracterização dos agregados	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo e qualidade do ARC - Teor de fibras de aço 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de até 20% com ARC - Fibras aumentaram resistência e pós-pico - Possibilidade de desempenho equivalente ao concreto convencional
Daad et al. (2025)	Avaliar cisalhamento por atrito em interfaces de concreto reciclado	Ensaio <i>push-off</i> em juntas moldadas a frio	<ul style="list-style-type: none"> - Rugosidade (lisa/rugosa) - Tipo de ARC (1ª e 2ª geração) - Nível de compressão normal 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de até 20% (ARC de 2ª geração) - Rugosidade aumenta significativamente resistência - Barras de ligação melhoram desempenho
Ochi, Okubo e Fukui (2007)	Avaliar propriedades mecânicas do concreto com fibras PET	Ensaios de compressão, flexão e módulo de elasticidade	<ul style="list-style-type: none"> - Teor de PET (0,5% a 1,5%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Redução de compressão (até 15%) - Aumento de até 65% na flexão - Maior ductilidade e tenacidade
Khan e Ayub (2020)	Analisar cisalhamento e flexão em vigas com PET reciclado	Ensaios de vigas sem estribos	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de PET (fibras vs tiras) - Teor (1%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de 31,6% no cisalhamento (tiras) - Maior ductilidade - Melhor controle de fissuras
Cereja (2025)	Avaliar vigas com ARC e fibras PET	Ensaios de flexão e análise por DIC	<ul style="list-style-type: none"> - 100% ARC - Teor de PET (0,5% a 1,25%) 	<ul style="list-style-type: none"> - ARC não reduziu resistência global - PET (1%) aumentou resistência e ductilidade - Melhor controle da fissura crítica

Fonte: Própria

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados no desenvolvimento do programa experimental da presente pesquisa, cujo objetivo principal é investigar o comportamento ao cisalhamento direto de concretos com substituição total do agregado gráúdo natural por agregado reciclado de concreto, com e sem adição de fibras de Polietileno Tereftalato. O estudo foi conduzido com base em ensaios laboratoriais, a fim de verificar o impacto dessas variáveis nas propriedades mecânicas e na resistência ao cisalhamento dos compósitos produzidos.

As principais variáveis do programa experimental foram:

- a) Teor de substituição de agregados gráúdos naturais por ARC: foram moldadas misturas com 0%, 30%, 50% e 100% de substituição, conforme diretrizes de Hansen (1992), Fonteboa *et al.* (2010) e Rahal e Al-Khaleefi (2015) e Trindade (2020). Apenas o agregado gráúdo foi substituído, mantendo-se o miúdo natural;
- b) Presença de fibras PET: as fibras foram incorporadas ao concreto em percentuais de 0%, 0,5% e 1,0% em volume, nas misturas com 100% de ARC, a fim de avaliar sua contribuição à resistência ao cisalhamento nas amostras com maior substituição de ARC;
- c) Resistência do concreto de origem do ARC: os agregados reciclados utilizados foram obtidos através da concretagem e britagem de uma laje de concreto simples produzidos em laboratório, com resistência à compressão conhecida e padronizada em aproximadamente 20 MPa. Isso permitiu o controle da origem do ARC, seguindo as observações de Troian (2010) quanto à influência da qualidade do concreto original sobre o desempenho do novo concreto;
- d) A resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados e com fibras PET foram fixadas em aproximadamente 40 MPa. Os materiais utilizados passaram por procedimentos de caracterização física, incluindo ensaios de granulometria, absorção de água, massa específica e umidade. As fibras PET também foram caracterizadas quanto às dimensões e ao formato, sendo cortadas manualmente de garrafas plásticas recicladas.

Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos para os ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral, além de corpos-de-prova prismáticos tipo *push-off* para os ensaios de cisalhamento direto. As moldagens e ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

O desempenho dos concretos foi avaliado com base nos seguintes ensaios:

- a) Resistência à compressão (f_{cm});
- b) Resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$);
- c) Cisalhamento direto (ensaio do tipo *push-off* com carregamento crescente).

As análises visam compreender a influência do ARC e das fibras PET na capacidade resistente ao cisalhamento direto, com foco em mecanismos como o intertravamento dos agregados, a contribuição da matriz e a atuação das fibras na contenção da propagação de fissuras.

Cabe destacar que o presente trabalho foi desenvolvido em conjunto com a pesquisa conduzida por Cereja (2025), sendo ambos executados no mesmo período e no mesmo ambiente laboratorial. Em razão dessa condução conjunta, as etapas iniciais referentes à caracterização dos materiais constituintes, definição das dosagens dos traços, procedimentos de mistura e moldagem, bem como o processo de concretagem e cura dos corpos-de-prova, foram realizadas simultaneamente

3.2. Materiais

3.2.1. Cimento de Alta Resistência Inicial

Para a confecção dos corpos-de-prova foi selecionado um cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) da empresa Mizu.

3.2.2. Agregados

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi uma areia quartzosa do Rio Paraíba do Sul, no município de Campos dos Goytacazes/RJ.

Os agregados graúdos foram brita granítica tipo 0 e brita reciclada proveniente de resíduos de concreto puro com granulometria semelhante ao tipo 0.

3.2.3. Água

O fornecimento de água foi feito pela concessionária Águas do Paraíba, empresa responsável pela rede de abastecimento do município de Campos dos Goytacazes/RJ.

3.2.4. Armaduras

Foram utilizadas barras nervuradas de aço CA-50 da GERDAU, com diâmetro nominal de 8 mm, destinadas à armadura principal de confinamento transversal ao plano de cisalhamento, bem como barras de diâmetro nominal de 4,2 mm, empregadas como armadura auxiliar para posicionamento e estabilização do conjunto durante a moldagem dos corpos-de-prova.

Adicionalmente, o sistema experimental contou com barras de aço rosqueadas, utilizadas especificamente para o confinamento passivo dos corpos-de-prova durante os ensaios *push-off*. Essas barras tinham diâmetro nominal de 15 mm, dimensionado de forma a resistir à magnitude das forças de tração mobilizadas em decorrência da aplicação das tensões de confinamento geradas pelo deslizamento relativo ao longo do plano de cisalhamento. As barras rosqueadas utilizadas no sistema de confinamento são apresentadas na Figura 4.

As barras de aço rosqueadas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência do tipo *strain gauges* BX120-3AA, permitindo o monitoramento em tempo real das deformações e, conseqüentemente, da força de tração mobilizada nas barras durante o ensaio.

Figura 4 - Barras de aço rosqueadas instrumentadas com strain gauges utilizadas no sistema de confinamento passivo.



Fonte: Própria

Para o rosqueamento e ancoragem das barras de aço, foram utilizadas porcas de aço com diâmetro compatível com as barras de 15 mm, assegurando a correta transmissão dos esforços de confinamento ao conjunto experimental, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Porcas de aço utilizadas no sistema de confinamento passivo.



Fonte: Própria

O sistema de confinamento foi complementado por chapas de aço, posicionadas externamente aos corpos-de-prova, responsáveis pela distribuição uniforme das forças de confinamento. As chapas utilizadas apresentavam rigidez suficiente para evitar deformações significativas durante o ensaio, garantindo a adequada aplicação das tensões de confinamento passivo. O sistema é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Sistema de confinamento passivo utilizado nos ensaios de push-off.



Fonte: Própria

3.2.5. Aditivo

Para a confecção dos concretos foi utilizado o aditivo superplastificante da marca Glenium® 51 de terceira geração, fabricado pela empresa BASF S.A. Este aditivo tem uma base química de éter carboxílico alterado. O aditivo age espalhando o material cimentício, proporcionando uma melhor homogeneização e redução na quantidade de água necessária, resultando em um concreto com maior trabalhabilidade, sem comprometer o tempo de endurecimento.

3.3. Produção dos agregados reciclados

Para a execução desta pesquisa, tornou-se necessária a produção do Agregado Reciclado de Concreto, cuja utilização foi calculada em termos de massa por metro cúbico de concreto. O traço adotado como referência baseou-se no estudo desenvolvido por Trindade (2020). Conforme indicado na literatura analisada,

considera-se uma perda média de aproximadamente 50% de material durante o processo de produção do ARC. A partir dessas premissas, foi determinada uma dosagem capaz de atingir uma resistência característica à compressão de 20 MPa, conforme apresentado na Tabela 2.

A produção do concreto foi dividida em dez etapas de volumes iguais, realizadas de forma sequencial e em conformidade com as normas técnicas vigentes. Todas as fases do processo de concretagem — incluindo transporte, lançamento, adensamento, cura e secagem — foram rigorosamente controladas. Adicionalmente, foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos, destinados à verificação das resistências mecânicas à compressão e à tração por compressão diametral do concreto produzido, conforme apresentado na Figura 7. Também foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, apresentado na Figura 8, com o objetivo de avaliar a consistência do concreto no estado fresco.

Após o período de 28 dias de cura, foram extraídos três testemunhos cilíndricos da laje moldada, com a finalidade de verificar a resistência à compressão do concreto e avaliar a eficiência do processo de cura adotado. Os resultados obtidos indicaram conformidade com os parâmetros de projeto estabelecidos, conforme ilustrado na Figura 9.

Tabela 2 - Dosagem do concreto para produção de agregado reciclado.

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

Fonte: própria

Figura 7 - Laje e corpos-de-prova para confecção e caracterização do ARC.



Fonte: própria

Figura 8 - Ensaio de abatimento de cone.



Fonte: própria

Figura 9 - Extração dos testemunhos da laje moldada pra confecção dos ARC.



Fonte: própria

3.3.1. Confecção dos Agregados Reciclados de Concreto

Os agregados reciclados de concreto utilizados nesta pesquisa foram produzidos em laboratório a partir da britagem do concreto proveniente de uma laje previamente moldada para esse fim. A utilização desse material permitiu maior controle sobre a composição, a resistência e as condições de produção do concreto de origem, assegurando a homogeneidade do agregado reciclado empregado nos ensaios experimentais.

Após o período de cura úmida de 28 dias, a laje foi fragmentada com o auxílio de um marteleto elétrico, com o objetivo de reduzir o tamanho a pequenos fragmentos e viabilizar as etapas subsequentes de britagem como mostrado na Figura 10. O material fragmentado foi então submetido ao processo de britagem, até a obtenção de partículas com dimensões compatíveis com as faixas granulométricas necessárias para o agregado graúdo reciclado.

Figura 10 - Processo de fragmentação da laje para produção do ARC.



Fonte: própria

3.3.2. 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 11 apresenta as etapas do processo.

Figura 11 - Processo de produção do agregado reciclado de concreto.



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. Nas Figuras 12 e 13 são mostrados o britador de mandíbula e o agregado reciclado de concreto britado, respectivamente.

Figura 12 - Britador de mandíbula.



Fonte: própria

Figura 13 - Agregado Reciclado de Concreto após processo de britagem.



Fonte: própria

Na sequência, o material britado passou por peneiramento utilizando o peneirador elétrico da marca Pavitest® e auxílio de peneiras granulométricas quadradas nas dimensões de 50 x 50 x 10 cm e aberturas de 12,5 e 4,75 mm, visando à classificação granulométrica e à eliminação de partículas finas ou fora dos limites especificados pelas normas técnicas vigentes. As frações que atenderam aos critérios estabelecidos foram destinadas à produção dos concretos experimentais, enquanto aquelas inadequadas foram descartadas.

Devido às características inerentes ao processo de reciclagem do concreto, especialmente à presença de argamassa aderida aos grãos, observou-se uma perda significativa de material ao longo das etapas de fragmentação, britagem e peneiramento, estimada em aproximadamente 50%, valor compatível com o reportado na literatura.

O agregado reciclado obtido foi armazenado em local seco e protegido até o momento de sua utilização, de modo a evitar contaminações e variações indesejáveis de umidade. O material foi então utilizado como substituição parcial ou total do agregado gráúdo natural, conforme definido no programa experimental da pesquisa.

3.4. Caracterização dos Agregados

3.4.1. Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a norma NBR 17054 (ABNT, 2022) por meio do peneiramento do material seco em uma série padronizada de peneiras, dispostas em ordem decrescente de abertura conforme a Figura 14. Antes da realização do ensaio, o agregado reciclado foi seco em estufa até atingir massa constante, garantindo a eliminação da umidade superficial que poderia interferir nos resultados.

Após a secagem, uma amostra representativa do material foi pesada e submetida ao processo de peneiramento mecânico. Ao final do ensaio, determinou-se a massa retida em cada peneira, possibilitando o cálculo das porcentagens retidas e acumuladas, bem como a construção da curva granulométrica do agregado reciclado.

Figura 14 - Ensaio granulométrico.



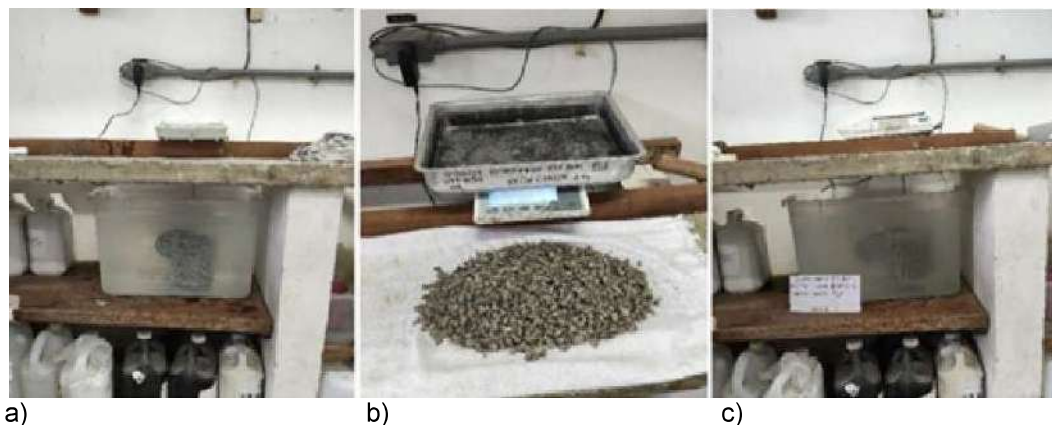
Fonte: própria

3.4.2. Massa específica real

Para a determinação da massa específica real os agregados graúdos foram ensaiados com base na NBR 16917 (ABNT, 2022), conforme mostra a Figura 15, que 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 15 – Ensaio de massa específica real: (a) mensuração do cesto vazio, (b) agregado reciclado SSS e (c) Mensuração do cesto cheio.

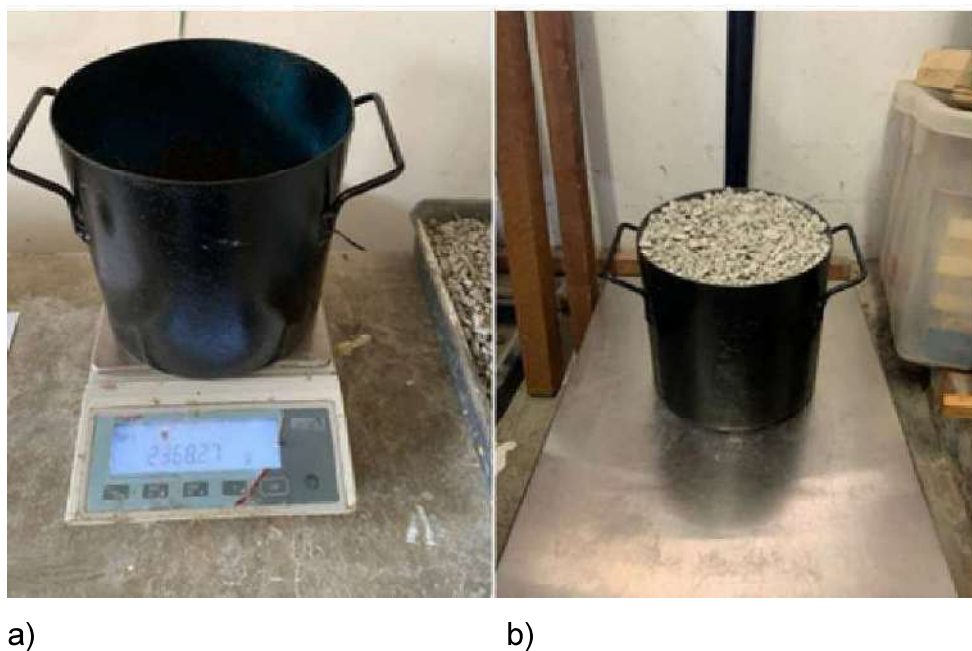


Fonte: Cereja (2025)

3.4.3. Massa unitária

A determinação da massa unitária dos agregados graúdos foi determinada pelo ensaio realizado conforme a NBR 16972 (ABNT, 2021). O recipiente de volume padrão para a realização do ensaio foi cheio com os agregados reciclados e compactados em camadas com o auxílio de uma. O ensaio está ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 - Ensaio de massa unitária: (a) recipiente de volume padrão e (b) recipiente com os agregados compactados.



Fonte: Cereja (2025)

3.4.4. Absorção de água

O ensaio para determinar a absorção de água dos agregados graúdos reciclados foram executados conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021). Os agregados foram secos em estufa por 24 horas, em seguida imersos em água por 24 horas. Após, foram retirados da água e secos superficialmente para remover o excesso de água até que atingissem a condição denominada “Saturada com Superfície Seca” (SSS). A diferença entre as massas foi o determinante de absorção de água, visto na Figura 17.

Figura 17 - Ensaio de absorção de água: (a) agregado imerso em água, (b) agregado com SSS e (c) mensuração para diferença de massa.



Fonte: Própria

3.4.5. Abrasão Los Angeles

A partir do ensaio de abrasão Los Angeles, recomendado pela NBR 16974 (ABNT, 2022), calculou-se o desgaste da superfície dos agregados. 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 (1). Todo o processo pode ser visto na Figura 18.

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

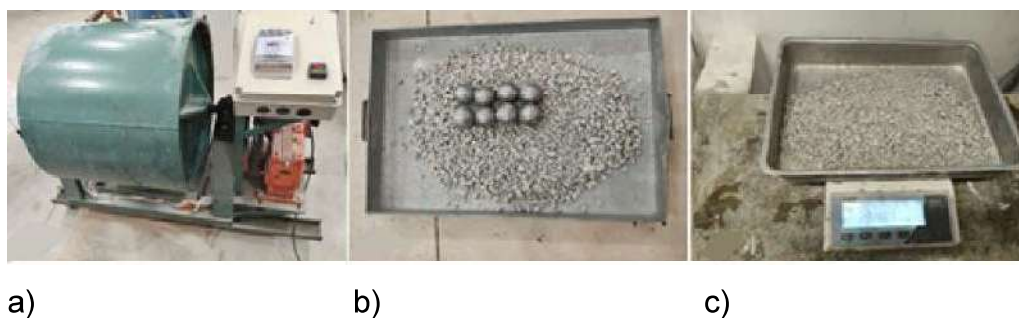
Em que:

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);

m_1 é a massa da amostra retida na peneira com abertura de malha de 17 mm conforme determina a norma expressa em gramas (g);

Figura 18 - Ensaio de abrasão Los Angeles: (a) máquina de abrasão Los Angeles, (b) massa seca antes do Ensaio, (c) massa retida após o ensaio.

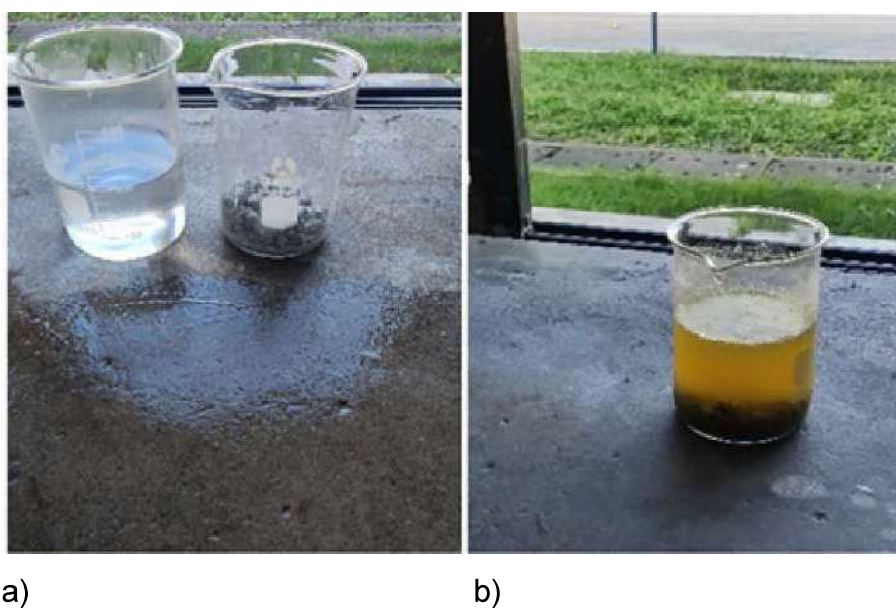


Fonte: Cereja (2025)

3.4.6. 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 de argamassa residual aderida ao ARC. O material analisado ficou imerso em solução por 24 horas. Nas Figuras 19 e 20 pode ser visualizado a execução do método.

Figura 19 - Ensaio ataque químico: a) antes do ataque, b) após 24h.



Fonte: Própria

Figura 20 – Amostras: (a) antes e (b) depois do ensaio.



a)

b)

Fonte: Cereja (2025)

3.5. Produção das fibras PET

As fibras de Polietileno Tereftalato utilizadas nesta pesquisa foram produzidas em laboratório a partir de garrafas PET recicladas de 2 litros. Inicialmente, as garrafas passaram por um processo de higienização, com o objetivo de remover impurezas e resíduos, sendo posteriormente submetidas à secagem em ar ambiente até a completa eliminação da umidade superficial.

Após a etapa de secagem, as garrafas PET foram submetidas a um processo manual de filetagem, resultando na obtenção de tiras com largura média de 2 mm, admitindo-se uma variação de $\pm 0,5$ mm, conforme ilustrado na Figura 21. Esse procedimento visou garantir a uniformidade geométrica das fibras produzidas, fator relevante para o desempenho do concreto reforçado com fibras.

Na sequência, as tiras obtidas foram cortadas em segmentos com comprimento de 50 mm, definindo a geometria final das fibras utilizadas na produção dos concretos experimentais. As fibras PET produzidas foram então armazenadas em local seco e protegido até o momento de sua incorporação à mistura de concreto, conforme as proporções estabelecidas no programa experimental.

Figura 21 - Confeção de fibra de PET: (a) garrafa higienizada, (b) confecção das fibras e (c) dimensão da fibra.



Fonte: Cereja (2025)

3.6. Caracterização das fibras PET

3.6.1. Microscopia eletrônica de varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi empregada com o objetivo de analisar a morfologia superficial e as características microestruturais das fibras de Polietileno Tereftalato utilizadas nesta pesquisa. Esse ensaio possibilitou a avaliação qualitativa da textura e da topografia superficial das fibras, aspectos diretamente relacionados ao seu desempenho mecânico e ao potencial de interação com a matriz cimentícia.

As fibras PET destinadas à análise foram previamente selecionadas e submetidas à secagem, de modo a eliminar qualquer presença de umidade que pudesse interferir nos resultados. Em razão da natureza não condutora do material polimérico, as amostras passaram por um processo de metalização superficial, com o objetivo de garantir a adequada condução elétrica e a obtenção de imagens com melhor resolução.

As análises foram realizadas em Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Shimadzu, modelo SSX-550, visto na Figura 22, no Laboratório de Materiais Avançados da UENF, operando sob condições controladas de aceleração e ampliação, permitindo a observação detalhada da superfície das fibras. As micrografias obtidas possibilitaram a identificação de irregularidades, rugosidades e características geométricas relevantes, contribuindo para a compreensão do comportamento das fibras PET quando incorporadas ao concreto.

Os resultados do ensaio de MEV foram utilizados como apoio à análise dos resultados mecânicos do concreto reforçado com fibras, auxiliando na interpretação dos mecanismos de aderência e transferência de tensões. As micrografias representativas das fibras PET encontram-se apresentadas na Figura 24.

Figura 22 - Microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550.



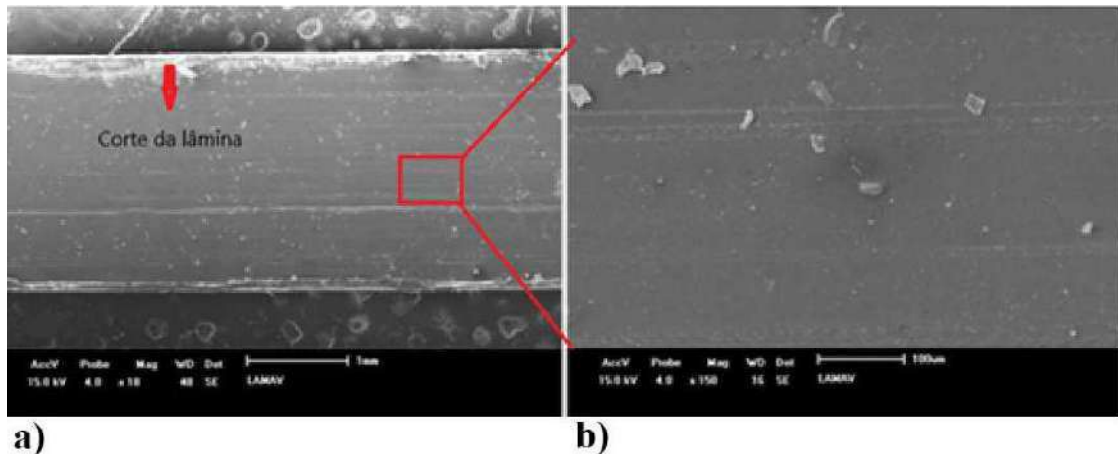
Fonte: Cereja (2025)

Figura 23 - Processo de metalização das amostras.



Fonte: Cereja (2025)

Figura 24 - MEV na fibra de PET sem tratamento mecânico, a) ampliação de 18X e b) ampliação de 150X.



Fonte: Cereja (2025)

3.6.2. Caracterização dimensional

A caracterização dimensional das fibras utilizadas foi realizada com o objetivo de determinar suas dimensões geométricas e avaliar a uniformidade das fibras produzidas. Esse procedimento é necessário para a correta interpretação do comportamento do concreto reforçado com fibras, uma vez que parâmetros geométricos como comprimento, largura e espessura influenciam os mecanismos de ancoragem e transferência de tensões na matriz cimentícia.

As medições foram realizadas com o auxílio de um paquímetro, a partir da análise de uma amostra composta por 50 fibras selecionadas de forma aleatória. Para cada fibra analisada, foram determinados o comprimento, a largura e a espessura, adotando-se procedimentos padronizados de medição com o intuito de minimizar erros experimentais.

Os valores obtidos permitiram verificar a conformidade dimensional das fibras em relação às dimensões estabelecidas na etapa de produção, bem como avaliar a dispersão dos resultados.

3.6.3. Ensaio de tração

O ensaio de tração do PET foi realizado com o objetivo de determinar suas propriedades mecânicas à tração, tais como resistência última e comportamento tensão-deformação. A caracterização dessas propriedades permite a análise do comportamento das fibras quando incorporadas à matriz cimentícia, especialmente no

que se refere à sua contribuição para a transferência de tensões e ao comportamento pós-fissuração do concreto.

Foram utilizadas seis fibras selecionadas dentre as 50 previamente empregadas na caracterização dimensional. Antes da realização dos ensaios, as fibras foram preparadas e fixadas nos dispositivos de ancoragem da máquina de ensaios, de modo a garantir o alinhamento axial e reduzir a ocorrência de deslizamentos ou concentrações de tensões nas extremidades.

Os ensaios de tração foram realizados em máquina de ensaios universais INSTRON 5582, pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), operando sob controle de deslocamento, conforme os procedimentos adotados para materiais poliméricos, como pode ser visto na Figura 25. Durante o ensaio, foram registrados os valores de força aplicada e deslocamento, possibilitando a determinação da resistência à tração das fibras, bem como a análise do seu comportamento mecânico até a ruptura.

Os resultados obtidos no ensaio de tração foram utilizados na caracterização mecânica das fibras PET e como subsídio à interpretação dos resultados experimentais do concreto reforçado com fibras, em especial no que se refere aos mecanismos de transferência de tensões e ao desempenho ao cisalhamento.

Figura 25 – Ensaio de tração das fibras: (a) realização do ensaio e (b) rompimento da fibra.



Fonte: Cereja (2025)

3.6.4. Ensaio de *pull-out*

O ensaio de arrancamento (*pull-out*) foi realizado com o objetivo de analisar o comprimento crítico e a tensão cisalhante interfacial entre as fibras PET e a matriz cimentícia. Esse ensaio permite a avaliação do comportamento de aderência fibra–matriz e do escorregamento das fibras, fornecendo subsídios para a análise do desempenho do concreto reforçado com fibras PET.

O procedimento experimental consistiu em um ensaio de arrancamento, no qual foi avaliado o comportamento da fibra embutida na matriz cimentícia sob carregamento axial, possibilitando a análise do comprimento efetivo de ancoragem das fibras. Os ensaios foram realizados LAMAV, no *campus* da UENF, utilizando a máquina de ensaios universais INSTRON 5582.

As fibras PET utilizadas no ensaio apresentaram largura de 2,5 mm ± 0,3 mm e espessura de 0,25 mm. Foram adotados quatro comprimentos de embutimento distintos, iguais a 20, 30, 40 e 50 mm. Para cada comprimento de embutimento analisado, foram moldadas três amostras, totalizando doze corpos-de-prova.

A organização do método experimental envolveu o preparo dos moldes e das fibras. Os moldes foram confeccionados a partir de tubos de PVC e fixados à base por meio de parafusos do tipo M12, permitindo sua ancoragem ao equipamento de ensaio. As fibras foram cortadas em tiras de mesmo comprimento total, variando apenas o comprimento de embutimento na matriz cimentícia.

Para a moldagem dos corpos-de-prova, foi utilizada uma argamassa com resistência à compressão aproximada de 45 MPa. A dosagem da argamassa utilizada é apresentada na Tabela 4. Após o preparo, os moldes foram preenchidos com a argamassa, realizando-se o embutimento das fibras conforme os comprimentos previamente definidos.

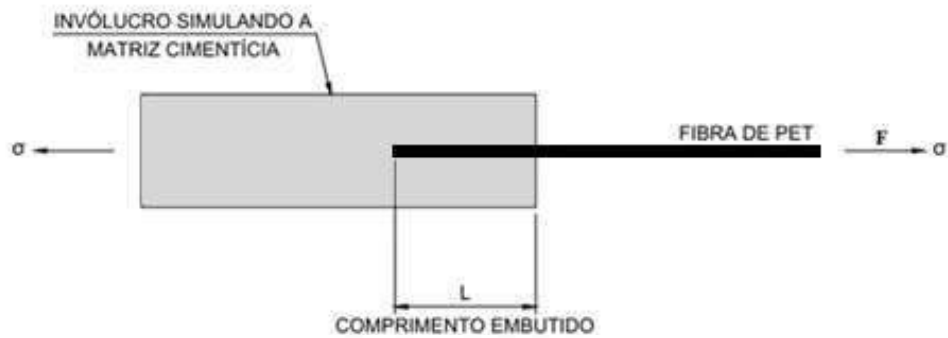
Tabela 3 - Dosagem da matriz

Dosagem da matriz	(Kg/m ³)
Cimento Portland CPV	543,13
Metacaulin	362,09
Areia	905,22
Água	353,04
Superplastificante	9,05

Fonte: Própria

A Figura 26 apresenta o esquema dos ensaios, o molde utilizado no ensaio pode ser visto na Figura 27 e na Figura 28 pode ser visualizado o *set-up* para o ensaio de *pull-out*.

Figura 26 - Esquema de ensaio de PULL-OUT



Fonte: Cereja (2025)

Figura 27 – Molde de PVC para fixação das fibras PET com matriz cimentícia para ensaio de *pull-out*.



Fonte: Própria

Figura 28 - Set-up de ensaio pull-out



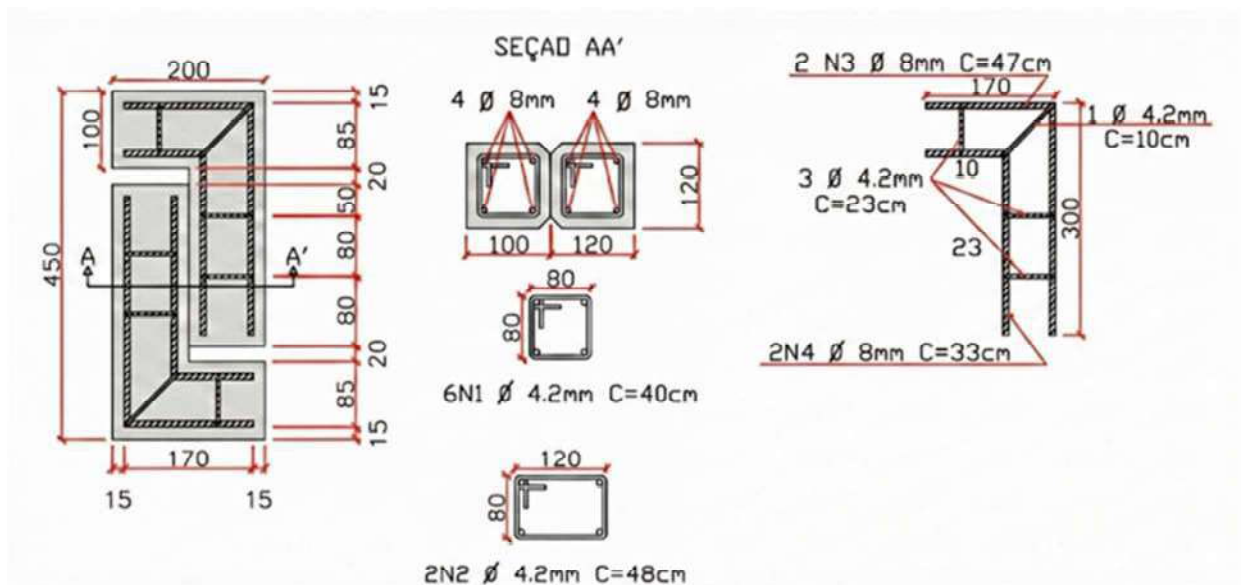
Fonte: própria

Os resultados obtidos nos ensaios permitiram determinar o comprimento mínimo de embutimento *pull-out* a ser adotado na matriz cimentícia.

3.7. Corpos-de-prova *push-off*

Os corpos-de-prova *push-off* seguiram os padrões adotados por Trindade (2020), servindo de referência para a presente pesquisa. As dimensões foram de 450 mm de comprimento com seção transversal de 200 mm x 120 mm. A área total a ser cisalhada foi de 18.900 mm². O detalhamento dos corpos-de-prova está na Figura 29 e da armadura na Tabela 4.

Figura 29 - Detalhamento dos corpos-de-prova *push-off*



Fonte Própria

Tabela 4 – Detalhamento de aço para cada corpo-de-prova *push-off*

Posição	Diâmetro (ϕ)	Quantidade	Comp. Unitário (cm)	Comp. Total (cm)	Aço (Tipo)
N1	4.2 mm	6	40	240	CA-60
N2	4.2 mm	2	48	96	CA-60
N3	8.0 mm	2	47	94	CA-50
N4	8.0 mm	2	33	66	CA-50

Fonte: Própria

A nomenclatura adotada para os corpos-de-prova foi definida de modo a identificar, de forma objetiva, a composição do concreto e a condição específica analisada em cada série experimental. Inicialmente, utilizou-se a sigla NAT para os concretos produzidos exclusivamente com agregado graúdo natural, caracterizando o traço de referência. As séries com substituição parcial ou total do agregado natural por agregado reciclado foram identificadas como ARC 30%, ARC 50% e ARC 100%, indicando, respectivamente, os teores de substituição empregados. Nos traços com adição de fibras, manteve-se a identificação do teor de agregado reciclado seguida da indicação do volume de fibras incorporado, resultando nas denominações ARC 100% – PET 0,5% e ARC 100% – PET 1%. Para os ensaios do tipo *push-off*, cada exemplar foi individualizado pela designação CP1, CP2 ou CP3, correspondente ao número do corpo-de-prova dentro de cada série. Essa sistemática permitiu rastreabilidade clara dos resultados, facilitando a correlação entre composição, propriedades mecânicas e comportamento ao cisalhamento. A Tabela 5 mostra as quantidades dos corpos-de-provas *push-off*, conforme classificação das séries e respectiva nomenclatura.

Tabela 5 - Nomenclatura e proporções de materiais dos corpos-de-prova push-off

Nomenclatura	Agreg. Natural (%)	Agreg. Reciclado (%)	Fibras PET (%)
CP1 - NAT	100	-	-
CP2 - NAT	100	-	-
CP3 - NAT	100	-	-
CP1 – ARC 30%	70	30	-
CP2 – ARC 30%	70	30	-
CP3 – ARC 30%	70	30	-
CP1 – ARC 50%	50	50	-
CP2 – ARC 50%	50	50	-
CP3 – ARC 50%	50	50	-
CP1 – ARC 100%	-	100	-
CP2 – ARC 100%	-	100	-
CP3 – ARC 100%	-	100	-
CP1 – ARC 100% - PET 0,5%	-	100	0,5
CP2 – ARC 100% - PET 0,5%	-	100	0,5
CP3 – ARC 100% - PET 0,5%	-	100	0,5
CP1 – ARC 100% - PET 1%	-	100	1,0
CP2 – ARC 100% - PET 1%	-	100	1,0
CP3 – ARC 100% - PET 1%	-	100	1,0

Fonte: Própria

3.8. Dosagem do concreto

As composições dos concretos utilizadas neste estudo foram inicialmente baseadas no trabalho desenvolvido por Trindade (2020). Entretanto, em função da baixa trabalhabilidade observada no estado fresco, sobretudo com a incorporação das fibras PET, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma nova dosagem. Para tal, adotou-se o método da ABCP, visando à obtenção de um concreto com resistência característica à compressão de 30 MPa.

Durante o processo de dosagem, foram realizados ajustes na quantidade de aditivo superplastificante e na proporção de agregado graúdo reciclado, com o objetivo de obter um desempenho adequado do concreto no estado fresco e no estado endurecido. A relação água/cimento foi mantida conforme adotado por Trindade (2020), de modo a preservar a base comparativa do estudo. Os valores correspondentes às dosagens dos materiais utilizados são apresentados na Tabela 6, expressos em kg/m³.

A etapa de concretagem consistiu na produção das vigas do tipo *push-off*, sem armadura transversal na região do vão de cisalhamento. A mistura dos concretos foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2023), respeitando-se todas as etapas do processo de produção. A Figura 30 apresenta o processo de adição das fibras e produção do concreto.

Tabela 6 - Dosagem dos traços.

Materiais	Traços					
	NAT	ARC 30%	ARC 50%	ARC 100%	ARC 100% - PET 0,5%	ARC 100% - PET 1%
Cimento (kg/m³)	410	416,15	422,33	410	410	410
Areia (kg/m³)	698	906,66	897,71	698	698	698
Brita natural (kg/m³)	981	583,63	416,88	-	-	-
ARC (kg/m³)	-	203,55	339,25	981	981	981
Água (kg/m³)	193,73	241,63	250,88	193,73	193,73	193,73
Super plastificante (kg/m³)	2,134			2,134	2,134	2,134
Relação a/c (total)	0,47	0,58	0,595	0,47	0,47	0,47
Fibra de PET (kg/m³)	-	-	-	-	1,76	3,52

Fonte: própria

Figura 30 - Produção do concreto reciclado reforçado com fibras PET.



Fonte: própria

3.9. Fôrmas

Foram utilizadas seis fôrmas metálicas destinadas à realização dos ensaios do tipo *push-off*, com o objetivo de otimizar o processo de concretagem, uma vez que foram moldados três corpos-de-prova para cada dosagem de concreto. As fôrmas

apresentam saliências nas regiões superior e inferior, com a finalidade de delimitar o plano de cisalhamento dos corpos-de-prova.

Adicionalmente, foram utilizados elementos de isopor para a conformação das aberturas nas extremidades dos corpos-de-prova. A Figura 31 apresenta as fôrmas metálicas contendo as armaduras posicionadas em seu interior, previamente à etapa de concretagem.

Figura 31 - Molde dos corpos-de-prova tipo push-off.



Fonte: própria

3.10. Fabricação e cura dos concretos

Para a fabricação dos concretos, foram adotados procedimentos distintos em função da proporção de agregado graúdo reciclado e da presença de fibras de Polietileno Tereftalato na mistura.

Nos concretos com substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado reciclado, nas proporções de 30% e 50%, bem como no concreto com 100% de agregado reciclado sem adição de fibras, foram seguidas as seguintes etapas operacionais:

- umedecimento prévio da betoneira com água;
- mistura dos agregados graúdos reciclados com uma pequena fração da água de amassamento por 1 minuto;
- adição dos agregados graúdos naturais e de aproximadamente metade da água de amassamento, seguida de mistura por 1 minuto;
- adição do cimento e do restante da água, com mistura por 30 segundos;
- adição da areia, com mistura por 2 minutos.

Para os concretos produzidos com 100% de agregado graúdo reciclado e adição de fibras PET, adotou-se o mesmo procedimento inicial, com a inclusão de uma

etapa adicional referente à incorporação das fibras. Nesse caso, após a adição da areia, as fibras PET foram introduzidas gradualmente na mistura, em pequenas quantidades, mantendo-se a betoneira em operação por aproximadamente 2 minutos, de modo a promover uma distribuição mais uniforme das fibras e reduzir a formação de aglomerados.

A sequência de introdução dos materiais seguiu o procedimento adotado por Trindade (2017). Além disso, a adição gradual das fibras PET foi realizada em conformidade com as recomendações apresentadas por Figueiredo (2015), visando minimizar a formação de aglomerações e favorecer a homogeneidade do concreto.

O adensamento do concreto foi realizado com o auxílio de mesa vibratória. Todo o processo, desde a moldagem até a cura dos corpos-de-prova e das vigas do tipo *push-off*, foi conduzido de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015). A cura foi realizada por um período de 28 dias, em tanque contendo água saturada com cal.

3.11. Propriedade dos concretos em estado fresco

Para a caracterização dos concretos no estado fresco, foram adotados métodos distintos em função da presença ou não de fibras na mistura. Para os concretos sem adição de fibras, empregou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020), com o objetivo de avaliar a consistência e a trabalhabilidade do material.

Para os concretos com adição de fibras, cuja presença tende a reduzir a fluidez da mistura, foi utilizado o ensaio VeBe, de acordo com a especificação DNIT 064/2004 – ME (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2004). Esse ensaio foi originalmente proposto por Bahrner (1940) e posteriormente aprimorado por Tattersall (1991), sendo empregado para a avaliação de concretos de baixa trabalhabilidade, normalmente associados a processos de lançamento e adensamento por vibração, como ocorre nos concretos reforçados com fibras.

De acordo com Abreu (2002), a trabalhabilidade de concretos com consistência seca pode ser reduzida, demandando o uso de equipamentos vibratórios para garantir o adequado adensamento, sem prejuízo à coesão e à homogeneidade da mistura. Nesse contexto, o ensaio VeBe permite a avaliação do comportamento do concreto nessas condições específicas.

A Figura 32 apresenta a sequência de execução do ensaio VeBe nas diferentes concretagens realizadas ao longo da pesquisa.

Figura 32 - Sequência de execução do ensaio VeBe.



Fonte: própria

3.12. Propriedade dos concretos no estado endurecido

As propriedades dos concretos no estado endurecido foram determinadas por meio dos ensaios de resistência à compressão simples (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) e módulo de elasticidade (E_c).

Para a realização desses ensaios, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de concreto com dimensões de 100 mm × 200 mm, os quais foram compactados e adensados. Após a concretagem, os corpos-de-prova permaneceram cobertos por manta úmida durante 24 horas. Em seguida, foram desmoldados e submetidos à cura submersa em água saturada com cal, onde permaneceram por um período de 28 dias. Esse procedimento é ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Corpos-de-prova em cura úmida submersos em água saturada de cal.



Fonte: própria

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada a partir de ensaios de compressão axial, utilizando-se o método DIC. Para esse fim, foram ensaiados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100 mm × 200 mm, moldados com os mesmos concretos utilizados na fabricação das vigas *push-off*. Para cada tipo de concreto, foram produzidos três corpos-de-prova.

A partir dos ensaios de compressão e das deformações obtidas por meio da análise das imagens, foi possível determinar o coeficiente de Poisson e o módulo de cisalhamento do concreto. As deformações axiais e transversais foram mensuradas com base na correlação entre os resultados de força aplicada e os campos de deformação obtidos via DIC.

Os ensaios de compressão foram realizados em equipamento de ensaios mecânicos Shimadzu® UH-F500kNI, operando com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min. Antes da realização dos ensaios, as faces dos corpos-de-prova foram submetidas à retífica, para o nivelamento das faces. Em seguida, aplicou-se uma camada de tinta branca em toda a superfície lateral, seguida da marcação de pontos pretos com tinta spray fosca, procedimento adotado para viabilizar a análise dos deslocamentos por correlação digital de imagens. Após a secagem da pintura, os corpos-de-prova foram ensaiados. A Figura 34 ilustra as etapas do procedimento, apresentando: (a) retífica das faces, (b) pintura de base, (c) marcação dos pontos e secagem e (d) ensaio de compressão.

Figura 34 - Etapas para o ensaio de compressão: (a) retífica das faces, (b) pintura de base, (c) marcação dos pontos e secagem e (d) realização do ensaio de compressão.



Fonte: própria

A análise dos dados obtidos foi realizada por meio do *software* ZEISS Inpect Correlate, responsável pela determinação das deformações sofridas pelos corpos-de-prova (Figura 35). O cálculo do módulo de elasticidade seguiu as prescrições da norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Figura 35 - Interface do software ZEISS Inspect Correlate.



Fonte: própria

Os ensaios de resistência à compressão simples foram executados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando-se uma prensa universal Shimadzu® com capacidade de 500 kN, conforme ilustrado na Figura 36.

Figura 36 - Realização de ensaio de compressão axial nos corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: própria

Figura 37 - Corpo-de-prova após ensaio.



Fonte: própria

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) foi realizado de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011), em prensa universal Shimadzu® de 500 kN, utilizando-se suporte padronizado para o posicionamento dos corpos-de-prova. Para cada variável analisada, foram ensaiados três corpos-de-prova. A execução do ensaio é apresentada na Figura 38.

Figura 38 - Ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: própria

3.13. Procedimento do ensaio *push-off*

Os ensaios do tipo *push-off* foram realizados em uma prensa universal Shimadzu®, operando sob controle de deslocamento, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min. Para cada série de concreto analisada, foram

ensaiados três corpos-de-prova, de modo a possibilitar a avaliação da repetibilidade dos resultados obtidos.

Os corpos-de-prova foram posicionados na prensa de forma a garantir o alinhamento axial da carga aplicada, assegurando que os esforços de cisalhamento se desenvolvessem predominantemente ao longo do plano previamente definido pela geometria do elemento. O carregamento foi aplicado de maneira monotônica e contínua até a ruptura do corpo-de-prova.

Adicionalmente, os corpos-de-prova foram dotados de barras de confinamento passivo, dispostas transversalmente ao plano de cisalhamento, com a finalidade de restringir a abertura das fissuras e permitir a mobilização do mecanismo de cisalhamento por atrito. Essas barras não foram previamente tracionadas, atuando exclusivamente de forma passiva, sendo solicitadas à tração à medida que ocorria o deslizamento relativo entre as faces do plano de cisalhamento. Dessa forma, o sistema experimental possibilitou a avaliação conjunta da contribuição do concreto, do atrito entre as superfícies fissuradas e do efeito de confinamento proporcionado pelas armaduras transversais.

O monitoramento dos deslocamentos foi realizado por meio da técnica de DIC. Para isso, a região central dos corpos-de-prova, correspondente ao plano de cisalhamento, foi previamente preparada com a aplicação de uma camada de tinta branca fosca, seguida da marcação de pontos pretos com tinta spray fosca, formando um padrão aleatório adequado à captura e análise das imagens.

Durante o ensaio, as imagens da superfície instrumentada foram registradas de forma contínua, permitindo a obtenção dos campos de deslocamento e deformação associados ao comportamento ao cisalhamento do concreto. A partir da correlação das imagens, foi possível avaliar os deslocamentos relativos entre as partes do corpo-de-prova ao longo do plano de cisalhamento, bem como a evolução da abertura de fissuras e do deslizamento.

As configurações do ensaio, bem como a instrumentação para o DIC, encontram-se ilustradas na Figura 39, enquanto o posicionamento das barras de confinamento passivo é apresentado na Figura 40.

Figura 39 - Set-up dos ensaios de cisalhamento direto nos corpos-de-prova tipo push-off.



Fonte: própria

Figura 40 - Posicionamento das barras de confinamento passivo.



Fonte: própria

3.14. Considerações gerais

Neste capítulo foi apresentado o programa experimental desenvolvido para a avaliação do comportamento ao cisalhamento de concretos produzidos com diferentes teores de agregado graúdo reciclado e com adição de fibras PET. Foram descritos os procedimentos adotados para a produção dos materiais, a dosagem dos concretos, a

moldagem dos corpos-de-prova e das vigas do tipo *push-off*, bem como os métodos de ensaio empregados para a caracterização dos concretos nos estados fresco e endurecido.

A confecção dos agregados reciclados a partir de concreto produzido em laboratório possibilitou maior controle das características do material de origem, enquanto a produção das fibras PET permitiu a padronização de suas propriedades geométricas e mecânicas. Os ensaios de caracterização física, mecânica e microestrutural forneceram subsídios para a compreensão do comportamento dos materiais empregados ao longo da pesquisa.

O ensaio tipo *push-off* foi adotado para a análise do comportamento ao cisalhamento direto, sendo instrumentado por meio da técnica de DIC, o que possibilitou a obtenção de informações sobre os deslocamentos e os mecanismos de deformação no plano de cisalhamento. A escolha desse método permitiu uma avaliação do desempenho dos concretos analisados, considerando diferentes composições e níveis de reforço com fibras.

Os procedimentos descritos neste capítulo estabeleceram a base experimental necessária para a análise dos resultados, os quais serão apresentados e discutidos no capítulo seguinte, com foco na influência do agregado reciclado e das fibras PET no comportamento ao cisalhamento do concreto.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do programa experimental desenvolvido, contemplando a caracterização dos materiais e o comportamento ao cisalhamento avaliado por meio dos ensaios *push-off*. A análise é conduzida de forma comparativa entre as diferentes séries de concretos, considerando os efeitos da substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado e da adição de fibras de Polietileno Tereftalato, com base nos parâmetros experimentais obtidos e em referências da literatura técnica.

4.2. Caracterização dos materiais

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) 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.

4.2.1. Ensaio granulométrico dos agregados

A Figura 41 apresenta a curva granulométrica do agregado miúdo natural utilizado, juntamente com os limites superior e inferior da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Observa-se que a curva correspondente à areia se posiciona predominantemente próxima ao limite superior da faixa normativa, ultrapassando-o pontualmente em determinados intervalos de diâmetro.

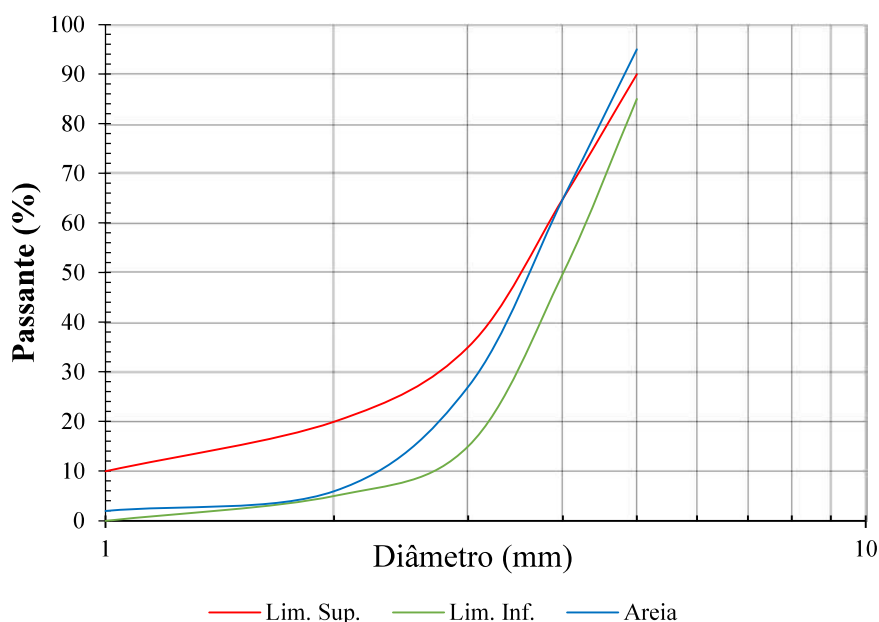
Esse comportamento evidencia uma maior participação de partículas de dimensões mais elevadas dentro da fração miúda, caracterizando uma areia com tendência a granulometria média a grossa. Essa interpretação é corroborada pelo módulo de finura determinado, igual a 2,25, valor compatível com areias de graduação intermediária, porém com menor teor de finos.

Nota-se que, para os diâmetros intermediários, a porcentagem passante apresenta crescimento mais acentuado, aproximando-se do limite superior da zona utilizável, enquanto nas peneiras de menor abertura observa-se uma quantidade reduzida de material passante. Essa distribuição indica deficiência relativa de

partículas finas, condição que pode afetar o empacotamento dos grãos e o preenchimento dos vazios entre partículas maiores.

A proximidade da curva granulométrica ao limite superior pode influenciar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, especialmente em misturas contendo agregado reciclado e fibras, exigindo maior atenção na dosagem e no uso de aditivos para garantir a adequada consistência. Ainda assim, a distribuição granulométrica apresentada atende, de modo geral, aos limites normativos, permitindo a utilização do agregado miúdo na produção dos concretos estudados, desde que considerados os ajustes realizados no traço.

Figura 41 - Granulometria do agregado miúdo.



Fonte: própria

A Figura 42 apresenta as curvas granulométricas dos agregados graúdos natural (NAT) e reciclado de concreto (ARC), juntamente com os limites inferior e superior da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Observa-se que ambos os agregados apresentam distribuições granulométricas com comportamento semelhante ao longo da faixa de diâmetros analisada, indicando compatibilidade entre os materiais sob o ponto de vista da graduação.

Nota-se que as curvas experimentais se situam, de modo geral, dentro dos limites normativos globais, ainda que em alguns trechos se aproximem dos limites da zona utilizável. Em particular, verifica-se que, nas peneiras de menor abertura, há uma tendência de menor porcentagem passante para ambos os agregados, caracterizando

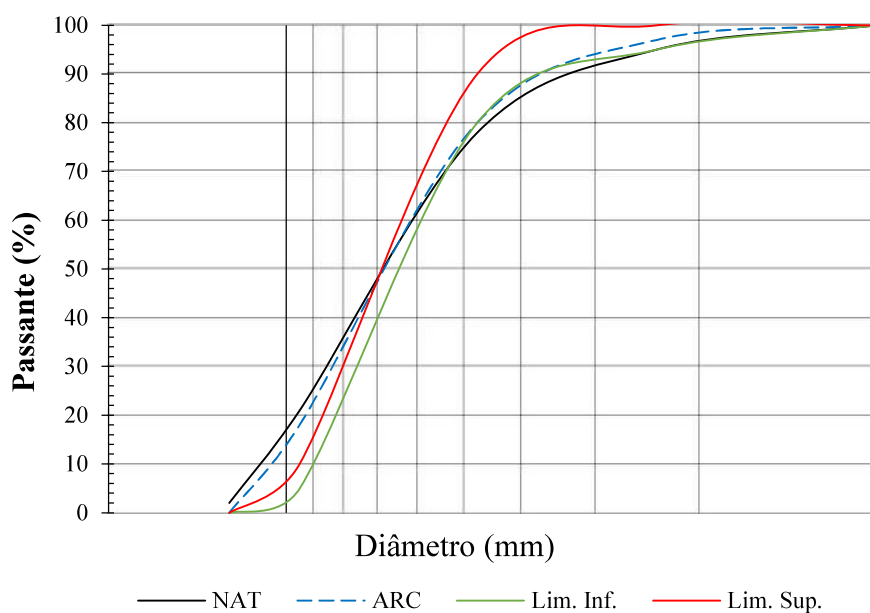
uma deficiência relativa de partículas mais finas no início da curva. Esse comportamento é mais pronunciado no agregado reciclado, cuja curva se aproxima do limite inferior nessa região.

Por outro lado, o agregado reciclado de concreto apresenta uma distribuição mais contínua ao longo da faixa granulométrica, com transição mais gradual entre os diferentes diâmetros. Essa característica favorece o empacotamento das partículas, podendo contribuir para uma maior compacidade do concreto, desde que adequadamente ajustada a proporção dos demais constituintes da mistura. O agregado natural, embora apresente comportamento semelhante, mostra variações ligeiramente mais acentuadas em determinados intervalos granulométricos.

A presença dessa deficiência de partículas menores foi considerada no planejamento das dosagens adotadas, uma vez que tal condição pode influenciar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco e o consumo de pasta. Ajustes na dosagem, como o controle da relação água/cimento e o uso de aditivos, foram empregados com o objetivo de compensar essas características granulométricas.

De forma geral, os resultados indicam que tanto o agregado graúdo natural quanto o agregado graúdo reciclado apresentam distribuições granulométricas compatíveis com sua utilização na produção dos concretos estudados, desde que consideradas as particularidades de cada material no processo de dosagem e mistura.

Figura 42 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: própria

4.2.2. Massa específica real

A Tabela 7 apresenta os valores de massa específica real dos agregados graúdos natural e reciclado, determinados nas condições seca e saturada. O agregado natural apresentou massa específica de 2610 kg/m³ na condição seca e 2640 kg/m³ na condição saturada, valores compatíveis com agregados de origem rochosa comumente utilizados na produção de concreto.

Para o Agregado Reciclado de Concreto, foram obtidos valores inferiores, iguais a 2160 kg/m³ na condição seca e 2350 kg/m³ na condição saturada. Em comparação ao agregado natural, observa-se uma redução de aproximadamente 17,2% na massa específica seca e de cerca de 11,0% na condição saturada. Essas reduções estão associadas principalmente à presença de argamassa aderida aos grãos do agregado reciclado, que apresenta maior porosidade e menor densidade em relação à rocha natural.

A diferença mais acentuada entre as condições seca e saturada observada no agregado reciclado indica maior capacidade de absorção de água, característica típica desse material. A menor massa específica implica que, para uma mesma massa incorporada à mistura, o agregado reciclado ocupa maior volume, aspecto que foi considerado no ajuste das dosagens adotadas ao longo do programa experimental.

De modo geral, os valores obtidos e as reduções observadas são compatíveis com o comportamento esperado para Agregados Reciclados de Concreto, conforme relatado na literatura técnica, e reforçam a necessidade de adequações na dosagem para garantir o desempenho adequado do concreto.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de massa específica real

Agregado	Seca (kg/cm ³)	Saturada (kg/cm ³)
Natural	2610	2640
Reciclado	2160	2350

Fonte: Própria

4.2.3. Massa unitária

A Tabela 8 apresenta os valores de massa específica unitária dos agregados graúdos reciclado e natural. O agregado natural apresentou massa específica unitária de 1488,2 kg/m³, enquanto o agregado reciclado apresentou valor igual a 1143,5 kg/m³.

A comparação entre os materiais indica uma redução de aproximadamente 23,1% na massa específica unitária do agregado reciclado em relação ao agregado natural. Essa redução está associada às características do ARC, como a maior porosidade dos grãos e a presença de argamassa aderida, que resultam em menor eficiência de empacotamento e maior volume de vazios no estado solto.

A menor massa específica unitária do agregado reciclado implica que, para um mesmo volume, a quantidade de material sólido incorporada à mistura é inferior àquela proporcionada pelo agregado natural. Esse comportamento influencia diretamente a dosagem do concreto, podendo afetar o consumo de pasta, a trabalhabilidade e o desempenho mecânico, aspecto que foi considerado no ajuste dos traços adotados no programa experimental.

De modo geral, os valores obtidos e a taxa de redução observada são compatíveis com o comportamento esperado para agregados reciclados de concreto, conforme relatado na literatura técnica.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de massa específica dos agregados graúdos.

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

Fonte: própria

Sendo:

ρ_{ap} O massa específica dos agregados graúdos

4.2.4. Absorção de água

A Tabela 9 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos reciclado (ARC) e natural (NAT). Observa-se que o agregado reciclado apresentou absorção de 7,55%, correspondente a um ganho de massa de 151,05 g, enquanto o agregado natural apresentou absorção significativamente inferior, igual a 1,30%, com acréscimo de massa de 25,91 g.

A comparação entre os materiais indica que a absorção de água do agregado reciclado é aproximadamente 5,8 vezes maior que a do agregado natural. Esse comportamento está associado às características do ARC, especialmente à presença

de argamassa aderida aos grãos e à maior porosidade do material, que favorecem a retenção de água em seus vazios internos.

A elevada absorção de água do agregado reciclado influencia diretamente o comportamento do concreto no estado fresco, uma vez que parte da água de amassamento pode ser absorvida pelo agregado, reduzindo a água efetivamente disponível para a hidratação do cimento e para a lubrificação da mistura. Esse aspecto foi considerado no ajuste das dosagens adotadas no programa experimental, de modo a garantir a consistência e o desempenho adequados do concreto.

Os valores obtidos estão em consonância com resultados reportados na literatura para Agregados Reciclados de Concreto, confirmando a influência da porosidade e da argamassa aderida nas propriedades físicas desse material.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de absorção de água dos agregados graúdos.

Agregado	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

4.2.5. Ensaio de abrasão Los Angeles

A Tabela 10 apresenta os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles realizado no agregado graúdo reciclado de concreto. Considerando uma massa inicial seca de 5000 g e uma massa retida após o ensaio de 2028,62 g, obteve-se uma perda de massa de 59,43%.

O valor elevado de perda de massa indica baixa resistência do agregado ao desgaste por impacto e atrito, comportamento característico de agregados reciclados de concreto. Esse desempenho está associado, principalmente, à presença de argamassa aderida aos grãos, que apresenta menor resistência mecânica quando comparada à rocha natural, além de maior suscetibilidade à fragmentação durante o ensaio.

Em comparação com os resultados apresentados por Trindade (2022), que reportou perdas de massa variando entre 51% e 59%, observa-se que o valor obtido neste estudo se situa no limite superior dessa faixa. Dessa forma, o resultado encontrado condiz com os valores reportados na literatura, indicando comportamento compatível com agregados reciclados de concreto de características semelhantes.

A elevada abrasão observada evidencia que o agregado reciclado analisado apresenta menor resistência ao desgaste mecânico. Entretanto, para a aplicação proposta neste estudo — concretos estruturais avaliados sob cisalhamento direto por meio de ensaios do tipo *push-off* — esse aspecto foi considerado no planejamento do programa experimental e na definição das dosagens adotadas.

Tabela 10 - Desgaste por abrasão dos agregados graúdos reciclados de concreto.

Massa seca (g)	Massa retida (g)	Perda de massa (%)
5000	2028,62	59,43

Fonte: própria

4.2.6. Ensaio de ataque químico

A Tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de ataque químico realizado no Agregado graúdo Reciclado de Concreto (ARC). Considerando uma massa inicial de 100 g e uma massa final de 70,18 g, verificou-se uma perda de massa de 29,82% após o período de exposição ao agente químico.

A perda de massa observada indica que o agregado reciclado apresenta sensibilidade à ação química, comportamento associado principalmente à presença de argamassa aderida aos grãos. A argamassa, composta majoritariamente por pasta de cimento hidratada, apresenta menor resistência química quando comparada à rocha natural, tornando o agregado reciclado mais suscetível à degradação em ambientes agressivos.

Esse resultado evidencia que parte significativa da massa do ARC é constituída por fases mais vulneráveis ao ataque químico, o que pode influenciar a durabilidade do concreto produzido com esse material quando exposto a meios potencialmente agressivos. Ainda assim, o valor obtido encontra-se compatível com resultados reportados na literatura para agregados reciclados de concreto, reforçando o comportamento esperado desse tipo de material.

No contexto desta pesquisa, o desempenho observado no ensaio de ataque químico foi considerado na análise global dos resultados, especialmente no que se refere à caracterização física e à avaliação do comportamento mecânico dos concretos produzidos, sem comprometer a aplicação proposta nos ensaios de cisalhamento direto do tipo *push-off*.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de ataque químico

Material	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda %
ARC	100	70,18	29,82

Fonte: própria

4.2.7. Ensaio de tração na fibra de PET

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração das fibras de Polietileno Tereftalato, realizado em seis corpos-de-prova selecionados aleatoriamente. As forças máximas registradas variaram entre 81,32 N e 87,04 N, refletindo uma resposta mecânica relativamente uniforme entre as amostras ensaiadas.

As tensões máximas calculadas situaram-se entre 174,51 MPa e 185,32 MPa, resultando em uma tensão média de 177,91 MPa. O desvio padrão obtido foi de 3,94 MPa, correspondendo a um coeficiente de variação de 2,21%, o que indica baixa dispersão dos resultados e boa repetibilidade do ensaio.

A reduzida variabilidade observada pode ser associada à uniformidade dimensional das fibras, previamente verificada na etapa de caracterização dimensional, bem como ao procedimento adotado para o ensaio de tração. Esse comportamento sugere consistência nas propriedades mecânicas das fibras produzidas, aspecto relevante para a análise de sua atuação como elemento de reforço no concreto.

Os valores de tensão à tração obtidos estão compatíveis com aqueles reportados na literatura para fibras PET reciclado, confirmando que o processo de produção adotado neste estudo não comprometeu o desempenho mecânico do material. No contexto desta pesquisa, esses resultados fornecem subsídios para a interpretação do comportamento do concreto reforçado com fibras, especialmente no que se refere aos mecanismos de transferência de tensões e à contribuição das fibras no comportamento pós-fissuração e ao cisalhamento.

Tabela 12: Resultados dos ensaios à tração das fibras.

CPs	Força máxima (N)	$T_{\text{máx.}}$ (MPa)	$T_{\text{med.}}$ (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Cv (%)
1	83,79	178,28			
2	81,32	174,51			
3	87,04	174,78			
4	83,39	185,32	177,91	3,94	2,21%
5	85,62	176,90			
6	85,28	177,66			

Fonte: Própria

4.2.8. Ensaio *pull-out* das fibras

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de arrancamento (*pull-out*) das fibras PET, considerando comprimentos de ancoragem de 20, 30, 40 e 50 mm, enquanto as Figuras 43 e 44 ilustram as respectivas curvas força \times escorregamento obtidas experimentalmente. A análise conjunta dos dados permite avaliar de forma mais completa o comportamento da interface fibra–matriz cimentícia.

Para os corpos-de-prova com 20 mm de comprimento de ancoragem, as forças máximas variaram entre 58,6 N e 79,8 N, resultando em valores de tensão cisalhante interfacial máxima ($T_{\text{máx}}$) entre 0,54 MPa e 0,73 MPa, com tensão média de 0,63 MPa e coeficiente de variação de 15%. As curvas força \times escorregamento correspondentes evidenciam um rápido crescimento inicial da força, seguido por um pico relativamente baixo e posterior queda acentuada, caracterizando um comportamento dominado pelo escorregamento da fibra na matriz, sem ocorrência de deformação plástica da fibra. A dispersão observada nas curvas está em consonância com o coeficiente de variação obtido, indicando sensibilidade do mecanismo de aderência para esse comprimento reduzido.

Para o comprimento de 30 mm, as forças máximas situaram-se entre 61,8 N e 90,3 N, com $\tau_{\text{máx}}$ variando de 0,38 MPa a 0,56 MPa, tensão média de 0,49 MPa e coeficiente de variação de 20%, o mais elevado entre as séries analisadas. As curvas correspondentes mostram um patamar de força mais elevado em relação ao comprimento de 20 mm, porém ainda seguido de perda de resistência com o aumento do escorregamento. Assim como observado para 20 mm, o modo de ruptura foi caracterizado pelo escorregamento da fibra na matriz sem deformação plástica, indicando que esse comprimento de ancoragem também não foi suficiente para

mobilizar a resistência à tração da fibra. A maior variabilidade observada nas curvas é coerente com o elevado coeficiente de variação obtido para essa série.

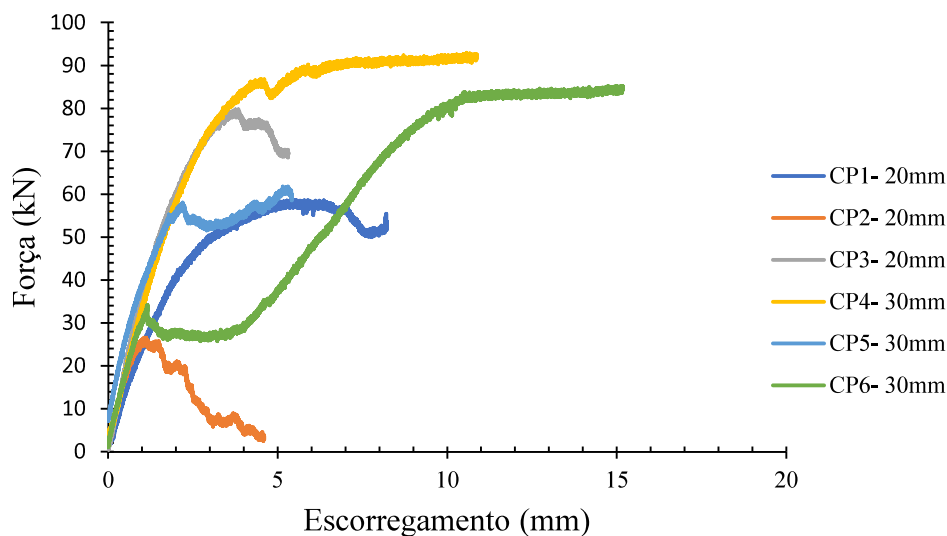
Para os comprimentos de 40 mm e 50 mm, verifica-se uma mudança significativa no comportamento. No caso de 40 mm, os valores de $\tau_{m\acute{a}x}$ variaram entre 0,47 MPa e 0,52 MPa, com tensão média de 0,46 MPa e coeficiente de variação de apenas 5%. Para 50 mm, os valores de $\tau_{m\acute{a}x}$ concentraram-se em torno de 0,35 MPa, com coeficiente de variação de 1%, indicando elevada uniformidade dos resultados. As curvas força \times escorregamento dessas séries apresentam crescimento progressivo da força, seguido por um patamar estável, sem quedas abruptas, evidenciando uma transferência de tensões mais distribuída ao longo da interface fibra–matriz e um comportamento mecânico mais estável.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de pull-out e seus parâmetros estatísticos.

Traço	Comprimento de ancoragem (mm)	Força máxima (N)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{med.}$ (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-4-30	30	90,3	0,56	0,49	0,10	20%
CP-5-30		61,8	0,38			
CP-6-30		85,2	0,52			
CP-7-40	40	85,2	0,52	0,46	0,02	5%
CP-8-40		105,9	0,49			
CP-9-40		101,0	0,47			
CP-10-50	50	93,3	0,34	0,35	0,00	1%
CP-11-50		97,8	0,35			
CP-12-50		94,3	0,35			

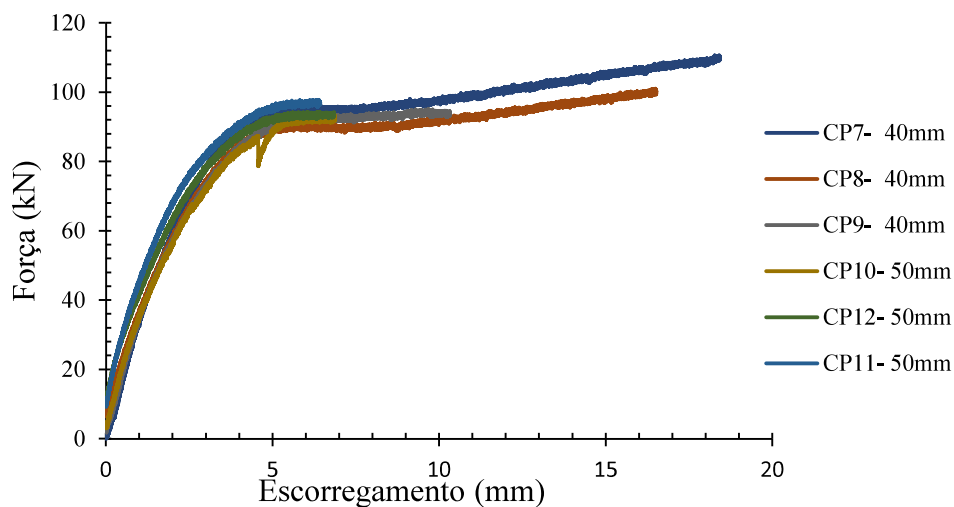
Fonte: Própria

Figura 43 - Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 20 e 30 mm.



Fonte: Própria

Figura 44 - Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 40 e 50 mm.



Fonte: Própria

A análise integrada dos resultados indica que, embora os menores comprimentos de ancoragem (20 e 30 mm) apresentem valores mais elevados de tensão cisalhante interfacial, o comportamento é governado pelo escorregamento da fibra, com maior dispersão dos resultados. Por outro lado, os maiores comprimentos (40 e 50 mm) promovem maior estabilidade do mecanismo de ancoragem, com menor variabilidade e resposta mais previsível, ainda que com valores médios de tensão cisalhante inferiores.

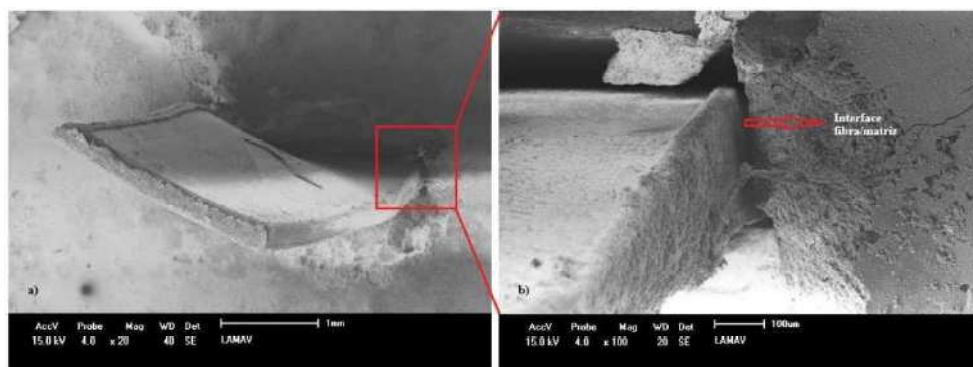
De forma geral, os resultados da Tabela 14 e das Figuras 43 e 44 demonstram que o aumento do comprimento de ancoragem contribui para uma redistribuição das tensões ao longo da interface fibra–matriz, reduzindo picos locais de cisalhamento e conferindo maior estabilidade ao sistema. Esses aspectos são relevantes para a definição do comprimento efetivo de ancoragem das fibras PET e para a interpretação de sua contribuição no comportamento mecânico do concreto reforçado, especialmente no que se refere à transferência de tensões e ao desempenho ao cisalhamento.

A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) realizada após os ensaios de *pull-out* permitiu avaliar os mecanismos de interação entre as fibras PET e a matriz cimentícia, bem como identificar os modos de ruptura associados aos diferentes comportamentos observados experimentalmente. As Figuras 45, 46 e 47 apresentam micrografias representativas das superfícies das fibras e da matriz após o ensaio.

Nas fibras que apresentaram escorregamento na matriz, observou-se a ausência de resíduos de pasta cimentícia aderidos à superfície da fibra. Esse comportamento indica uma aderência fibra–matriz limitada, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de *pull-out* para os menores comprimentos de ancoragem, nos quais a ruptura ocorreu predominantemente por deslizamento interfacial.

A Figura 45 apresenta imagens obtidas após o ensaio, destacando: (a) a fibra extraída da matriz em ampliação de 20× e (b) o detalhe da interface fibra–matriz em ampliação de 100×. Nessas imagens, a superfície da fibra mostra-se relativamente lisa, sem evidências significativas de material cimentício aderido, reforçando a predominância do mecanismo de escorregamento.

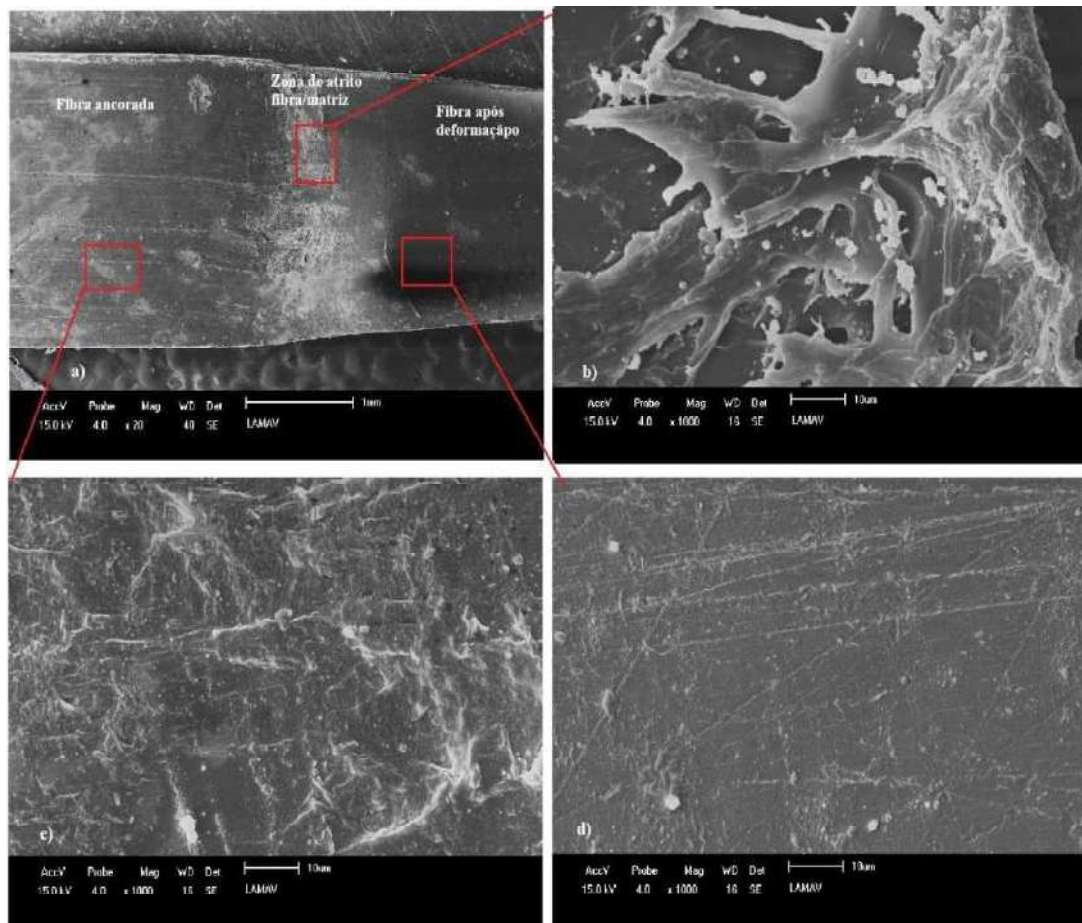
Figura 45 - MEV após o ensaio: (a)- FE ampliação de 20X, (b)- FE ampliação de 100X.



Fonte: Própria

Na Figura 46, observa-se uma análise mais detalhada da fibra que apresentou deformação durante o ensaio. A imagem (a), em ampliação de 20×, evidencia a região da fibra ancorada, enquanto a imagem (b), em ampliação de 1000×, destaca a zona de atrito entre a fibra e a matriz, na qual são observados sinais de degradação superficial associados ao atrito desenvolvido durante o carregamento. A Figura 46(c), também em ampliação de 1000×, mostra a parte da fibra originalmente ancorada na matriz, apresentando sinais de degradação superficial atribuídos às condições alcalinas da matriz cimentícia. Por sua vez, a Figura 46(d) evidencia a região da fibra após a deformação, cuja superfície apresenta aspecto predominantemente liso, sem alterações morfológicas expressivas.

Figura 46 - 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, (d)- FD fibra após deformação ampliação de 1000X.

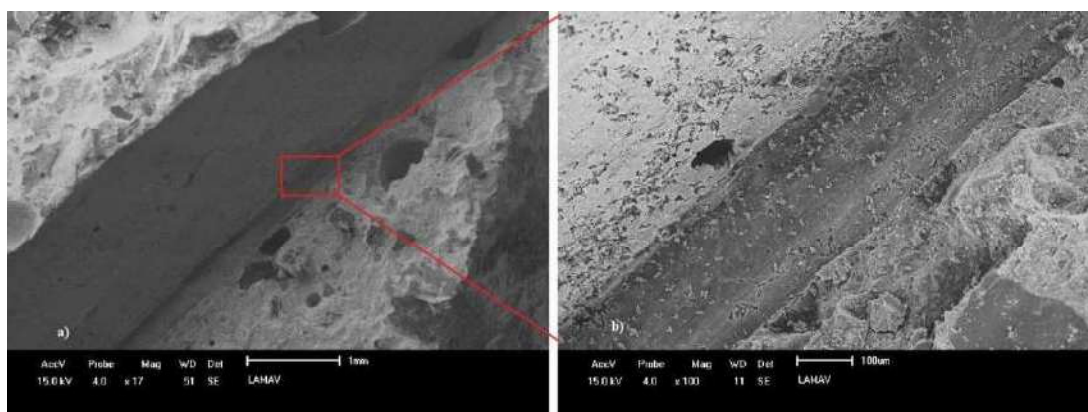


Fonte: Própria

A Figura 47 apresenta micrografias da superfície da matriz cimentícia após o ensaio, em ampliações de 17× e 100×. Nessas imagens, observa-se que a região correspondente ao local de embutimento da fibra apresenta uma superfície

relativamente lisa, sem irregularidades pronunciadas ou rugosidades capazes de favorecer um mecanismo de ancoragem mecânica mais eficiente. Esse aspecto confirma o descolamento da fibra da matriz, em consonância com o comportamento observado nos ensaios de *pull-out* para os menores comprimentos de ancoragem.

Figura 47 - MEV após o ensaio: (a)- matriz ampliação de 17X, (b) matriz ampliação de 100X.



Fonte: Própria

De forma geral, as análises por MEV corroboram os resultados mecânicos obtidos, evidenciando que o comportamento das fibras PET é fortemente governado pela qualidade da interface fibra–matriz. Nos casos em que ocorreu escorregamento, a ausência de resíduos de matriz aderidos à fibra e a morfologia relativamente lisa das superfícies indicam uma aderência limitada. Já nos casos em que houve maior interação interfacial e deformação da fibra, observam-se zonas de atrito e degradação superficial, associadas à ação mecânica e ao ambiente alcalino da matriz cimentícia.

Essas observações fornecem subsídios microestruturais importantes para a compreensão dos mecanismos de transferência de tensões observados nos ensaios de *pull-out* e para a interpretação da contribuição das fibras PET no comportamento mecânico do concreto reforçado.

4.3. Propriedades do concreto no estado fresco

A Tabela 14 apresenta os valores de abatimento obtidos para os concretos produzidos com diferentes teores de substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado. Observa-se que o concreto de referência, produzido exclusivamente com agregado natural, apresentou abatimento de 130 mm, indicando maior fluidez e trabalhabilidade no estado fresco.

Com a introdução do agregado reciclado, verifica-se uma redução progressiva do abatimento à medida que aumenta o percentual de substituição. O concreto com 30% de agregado reciclado apresentou abatimento de 98 mm, representando uma redução de aproximadamente 24,6% em relação ao concreto NAT. Para o teor de 50%, o abatimento foi de 92 mm, correspondendo a uma redução de cerca de 29,2%, enquanto o concreto com 100% de agregado reciclado apresentou o menor valor, igual a 80 mm, o que representa uma redução aproximada de 38,5%.

Essa diminuição da trabalhabilidade está associada às características intrínsecas do agregado reciclado, como a maior porosidade, a presença de argamassa aderida aos grãos e a maior absorção de água, que reduzem a água livre disponível na mistura. Além disso, a forma mais angular e a textura superficial mais rugosa do agregado reciclado tendem a aumentar o atrito interno da mistura, contribuindo para a redução do abatimento.

Apesar da redução observada, os valores de abatimento obtidos indicam que todos os concretos apresentaram trabalhabilidade compatível com o processo de moldagem adotado, desde que considerados os ajustes realizados na dosagem. Esses resultados evidenciam a influência direta do teor de agregado reciclado no comportamento do concreto no estado fresco e reforçam a necessidade de controle adequado da composição do traço quando se utiliza esse tipo de material.

Tabela 14 - Abatimento de cone.

Traço	Valores de abatimento (mm)
NAT	130
ARC 30%	98
ARC 50%	92
ARC 100%	80

Fonte: própria

As Tabelas 15 e 16 apresentam os resultados dos ensaios de consistência para os concretos com adição de fibras e a classificação conforme a norma DIN 1048-1:1991-06, respectivamente. O concreto com 0,5% de fibras PET apresentou tempo VeBe de 5,53 s, enquanto o concreto com 1% de fibras apresentou tempo inferior, igual a 4,15 s.

A redução do tempo VeBe com o aumento do teor de fibras indica uma melhor resposta do concreto à vibração, sugerindo maior facilidade de adensamento sob ação

vibratória. Esse comportamento pode estar associado à atuação das fibras PET como elementos de redistribuição interna da mistura, favorecendo o rearranjo dos grãos durante a vibração e reduzindo a resistência ao escoamento do concreto sob energia externa.

Embora a adição de fibras tenda, em geral, a reduzir a fluidez do concreto no estado fresco, os resultados do ensaio VeBe indicam que, para os teores analisados, o aumento da quantidade de fibras não comprometeu a capacidade de adensamento do concreto quando submetido à vibração. Pelo contrário, observou-se uma redução do tempo necessário para o completo adensamento, evidenciando um comportamento adequado para aplicações que exigem lançamento com vibração.

Tabela 15 - Resultado ensaio VeBe para os concretos com fibra.

Traço	Tempo VeBe (s)
ARC 100% - PET 0,5%	5,53
ARC 100% - PET 1%	4,15

Fonte: própria

Tabela 16 - 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).

Os valores obtidos confirmam a adequação do ensaio VeBe para a avaliação da trabalhabilidade de concretos com elevada rigidez e reforçados com fibras, complementando os resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone e fornecendo subsídios adicionais para a análise do comportamento dos concretos no estado fresco.

4.4. Propriedades do concreto no estado endurecido

No presente estudo, o traço ARC 0%, composto por 100% de substituição do agregado graúdo 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.

4.4.1. Resistência à compressão do concreto

Os resultados de resistência à compressão apresentados na Tabela 17 e Figura 48 indicam que a substituição do agregado graúdo natural por agregado reciclado influencia de forma significativa o desempenho mecânico dos concretos, conforme evidenciado pela análise estatística. De modo geral, observou-se uma tendência de redução da resistência à compressão para os concretos com substituição parcial do agregado natural (30% e 50%), comportamento associado às propriedades físicas do agregado reciclado.

A diminuição da resistência nos concretos com agregado reciclado está relacionada, principalmente, à menor massa específica e à maior absorção de água do agregado reciclado quando comparado ao agregado natural. Os resultados de caracterização mostraram reduções expressivas da massa específica real e unitária, além de valores de absorção de água significativamente superiores. Essas características implicam maior porosidade do sistema, maior volume de vazios e

menor eficiência no empacotamento dos grãos, fatores que contribuem para a redução da resistência à compressão do concreto.

Além disso, os elevados valores de abrasão Los Angeles obtidos para o agregado reciclado indicam menor resistência ao desgaste mecânico, refletindo a maior fragilidade do material. Essa condição favorece a geração de partículas mais frágeis e zonas de menor rigidez no interior da matriz cimentícia, o que também contribui para a redução da resistência à compressão, especialmente nos concretos com substituição parcial, nos quais coexistem agregados com propriedades mecânicas distintas.

No caso do concreto com 100% de agregado reciclado, observou-se uma recuperação da resistência média à compressão em relação aos concretos com substituição parcial. Esse comportamento pode ser atribuído a uma redistribuição mais uniforme dos constituintes da mistura, reduzindo os efeitos de heterogeneidade entre agregados naturais e reciclados e promovendo um comportamento mais homogêneo do material.

A introdução de 0,5% de fibras PET resultou em nova redução da resistência à compressão, comportamento que pode ser explicado pela combinação de diferentes mecanismos. Em teores mais baixos, as fibras podem não estar presentes em quantidade suficiente para formar uma rede eficaz de ponteamto de fissuras, mas ainda assim introduzem interfaces adicionais na matriz cimentícia. Essa condição pode favorecer a formação de vazios localizados e regiões de menor compactação, especialmente em concretos já caracterizados por elevada absorção e menor massa específica. As análises por MEV indicaram ainda uma aderência limitada entre a fibra e a matriz, o que reduz a capacidade das fibras de contribuir positivamente para a resistência à compressão nesse teor.

Por outro lado, o concreto com 1% de fibras PET apresentou resistência média à compressão próxima à do concreto de referência. Nesse caso, o maior teor de fibras favoreceu a atuação conjunta dos elementos de reforço, promovendo maior restrição à propagação de microfissuras e contribuindo para um efeito de confinamento da matriz cimentícia. Esse comportamento compensou os efeitos negativos associados às propriedades físicas do agregado reciclado, como maior absorção e menor massa específica, resultando em desempenho mecânico superior ao observado para o teor de 0,5%.

De forma geral, os resultados evidenciam que a resistência à compressão dos concretos analisados é resultado da interação entre as propriedades físicas dos agregados (massa específica, absorção de água e resistência ao desgaste) e a presença e o teor de fibras PET. A correlação entre esses parâmetros explica as variações observadas nos resultados experimentais e reforça a importância da análise conjunta das propriedades físicas e mecânicas para a compreensão do comportamento dos concretos estudados.

Tabela 17 - Resistência a compressão média dos concretos

Tipos de concreto	$f_{c,méd}$ (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
NAT	46,86	0,80	2
ARC 30%	37,73	1,59	4
ARC 50%	37,65	3,95	10
ARC 100%	41,55	1,02	2
ARC 100% - PET 0,5%	39,26	1,30	3
ARC 100% - PET 1%	46,30	0,77	2

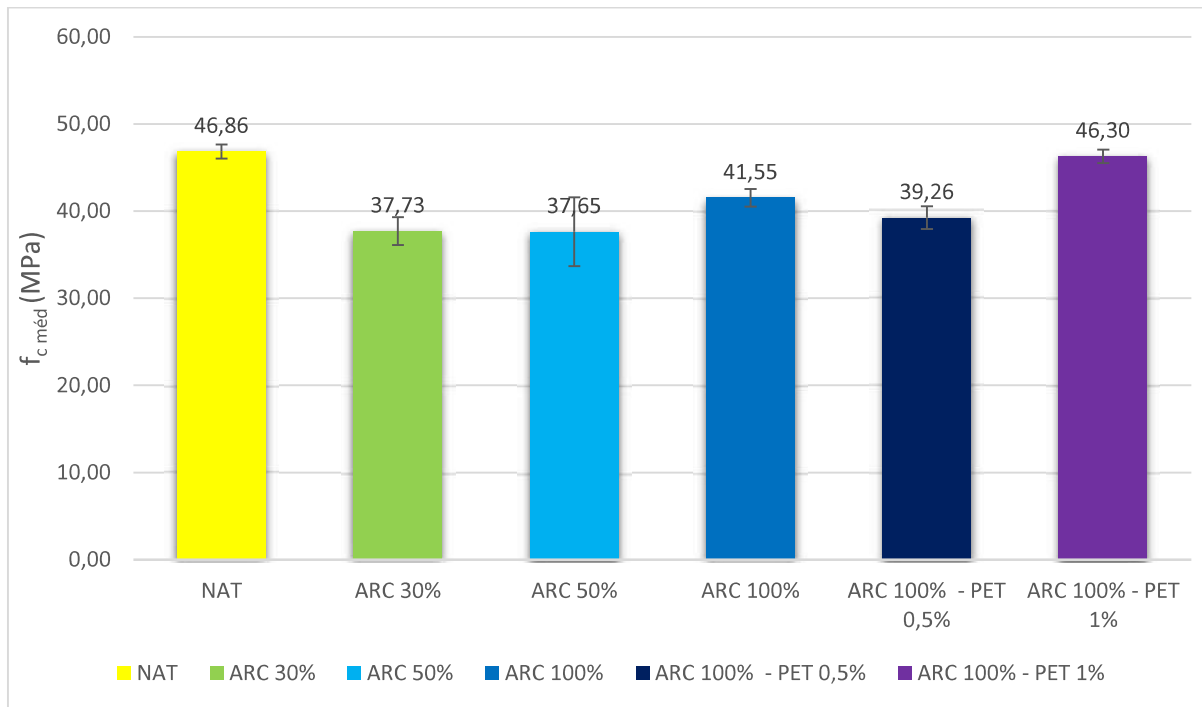
Fonte: Própria

Sendo:

DP o desvio padrão;

Cv o coeficiente de variação.

Figura 48 - Resultados dos ensaios de compressão dos concretos produzidos.



Fonte: Própria

4.4.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração apresentados na Tabela 18 mostraram comportamento distinto daquele observado para a resistência à compressão, evidenciando que esse parâmetro é mais sensível às características da interface pasta-agregado e à presença de fibras.

Os concretos com 30% e 50% de agregado reciclado apresentaram aumento da resistência média à tração em relação ao concreto de referência, com destaque para o teor de 50%, que atingiu 3,37 MPa. Esse comportamento pode ser correlacionado com a maior rugosidade superficial e angularidade do agregado reciclado, que favorecem a aderência mecânica entre a pasta cimentícia e o agregado, aspecto particularmente relevante para solicitações de tração. Esse efeito contrasta com o observado na resistência à compressão, na qual a maior porosidade e a menor massa específica do agregado reciclado exerceram influência mais pronunciada.

A maior dispersão observada para o concreto com 30% de agregado reciclado ($C_v = 13\%$) pode ser relacionada à heterogeneidade do sistema, que combina agregados naturais e reciclados com propriedades físicas distintas, conforme

evidenciado pelos resultados de massa específica, absorção de água e abrasão Los Angeles.

No concreto com 100% de agregado reciclado, a resistência à tração manteve-se superior à do concreto de referência, porém inferior à obtida para 50%. Esse comportamento pode ser associado ao aumento global da porosidade do concreto, decorrente da elevada absorção de água e da menor massa específica do agregado reciclado, fatores que, embora menos críticos para a tração do que para a compressão, passam a limitar o ganho de resistência.

A adição de 0,5% de fibras PET resultou em redução da resistência média à tração para 2,47 MPa, comportamento estatisticamente distinto dos concretos sem fibras. Esse resultado está em consonância com o observado na resistência à compressão e pode ser explicado pela atuação ainda incipiente das fibras nesse teor. As fibras introduzem interfaces adicionais na matriz, mas, em quantidade insuficiente, não promovem um mecanismo efetivo de ponteamo de fissuras. Esse efeito negativo é potencializado pelas características físicas do agregado reciclado, como alta absorção, baixa massa específica e menor resistência ao desgaste, que favorecem a formação e a propagação de microfissuras.

Por outro lado, o concreto com 1,0% de fibras PET apresentou resistência média à tração de 3,24 MPa, valor estatisticamente superior ao do concreto com 0,5% de fibras e próximo ao obtido para o concreto com 50% de agregado reciclado. Esse resultado indica que, a partir desse teor, as fibras passam a atuar de forma mais efetiva no controle da fissuração, promovendo redistribuição de tensões e retardando a propagação de fissuras. Esse comportamento é coerente com os resultados microestruturais obtidos por MEV, que evidenciaram zonas de atrito e maior interação fibra–matriz para situações em que houve mobilização mais eficiente da fibra.

Tabela 18: Resistência à compressão por tração diametral.

Tipos de concreto	$f_{ct\ méd}$ (MPa)	DP (MPa)	Cv(%)
NAT	2,62	0,11	4
ARC 30%	2,70	0,34	13
ARC 50%	3,37	0,24	7
ARC 100%	3,03	0,10	3
ARC 100% - PET 0,5%	2,47	0,13	5
ARC 100% - PET 1%	3,24	0,22	7

Fonte: Própria

Sendo:

DP o desvio padrão;

Cv o coeficiente de variação;

A correlação conjunta entre os resultados de resistência à tração, resistência à compressão, absorção de água, massa específica e abrasão indica que:

- a resistência à compressão é mais fortemente influenciada pela porosidade global e pela resistência intrínseca dos agregados;
- a resistência à tração é mais sensível à qualidade da interface pasta–agregado e aos mecanismos de controle de fissuração;
- a atuação das fibras PET depende fortemente do teor adotado, sendo observado um comportamento de transição entre 0,5% e 1,0%.

4.4.3. Módulo de elasticidade

Os valores do módulo de elasticidade obtidos experimentalmente, apresentados na Tabela 19, mostraram-se, de forma consistente, inferiores aos valores estimados por expressões empíricas, independentemente do traço analisado. Esse comportamento é recorrente em concretos especiais e está associado ao fato de que as equações normativas foram desenvolvidas com base em concretos convencionais, produzidos com agregados naturais de elevada qualidade e baixa variabilidade, não representando integralmente materiais com agregados reciclados e com incorporação de fibras poliméricas.

A substituição parcial e total do agregado graúdo natural por agregado reciclado resultou em redução do módulo de elasticidade experimental, mesmo nos casos em que a resistência à compressão apresentou valores próximos ou superiores ao concreto de referência. Esse resultado evidencia que o módulo de elasticidade é fortemente influenciado pela rigidez do agregado, sendo mais sensível às propriedades físicas do material do que a resistência mecânica global do concreto. A menor massa específica, a maior porosidade e a presença de argamassa residual aderida ao agregado reciclado contribuem para uma matriz mais deformável, o que se reflete diretamente na redução da rigidez do compósito.

Nos concretos com 100% de agregado reciclado, a incorporação de fibras PET influenciou o comportamento elástico de maneira distinta conforme o teor adotado. O concreto com 0,5% de fibras apresentou módulo de elasticidade experimental semelhante ao do traço sem fibras, indicando que esse teor não foi suficiente para promover alterações significativas na rigidez inicial do material. Por outro lado, o aumento do teor de fibras para 1% resultou em elevação do módulo de elasticidade experimental, alcançando valor próximo ao do concreto de referência. Esse comportamento pode ser associado à maior capacidade das fibras em restringir a abertura e a propagação de microfissuras na fase inicial de carregamento, contribuindo para uma resposta mais rígida do material no regime elástico.

Tabela 19 - Módulo de elasticidade.

Traço	$E_{c, estimado}$ (GPa)	$E_{c, exp}$ (GPa)
NAT	38,3	32,8
ARC 30%	34,4	29,7
ARC 50%	34,4	29,4
ARC 100%	36,1	30,4
ARC 100% - PET 0,5%	35,1	30,7
ARC 100% - PET 1%	38,1	31,6

Fonte: Própria

A tendência observada nos resultados do módulo de elasticidade apresenta coerência com as propriedades físicas e mecânicas previamente determinadas. Concretos com maiores valores de absorção de água, menor massa específica e pior desempenho no ensaio de abrasão Los Angeles apresentaram menores módulos de elasticidade, indicando a influência direta da qualidade do agregado graúdo na rigidez do concreto. Em contrapartida, o traço com maior teor de fibras PET, que apresentou

ganhos na resistência à compressão e à tração, também apresentou melhoria no módulo de elasticidade, reforçando o papel das fibras no controle de deformações e na melhoria do comportamento mecânico global do compósito.

De forma geral, os resultados demonstram que o módulo de elasticidade estimado tende a superestimar a rigidez real dos concretos com agregado reciclado e fibras PET, sendo a determinação experimental indispensável para a caracterização adequada desses materiais, especialmente em análises estruturais nas quais as deformações desempenham papel relevante no desempenho da estrutura.

4.5. Caracterização do aço de confinamento passivo

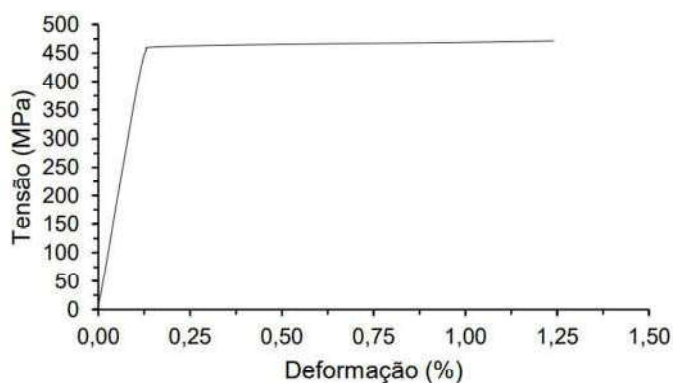
O comportamento mecânico das barras de aço rosqueadas utilizadas no sistema de confinamento passivo foi avaliado por meio de ensaio de tração uniaxial como mostra a Figura 49. O resultado típico desse ensaio está apresentado na Figura 50, na qual se observa a curva tensão–deformação do material, evidenciando o trecho elástico inicial, o patamar de escoamento e a fase de encruamento até a ruptura.

Figura 49 - Set-up de ensaio de tração da barra rosqueada.



Fonte: Própria

Figura 50 - Gráfico tensão vs deformação do aço das barras rosqueadas.



Fonte: Própria

A partir do ensaio de tração, foram determinadas as principais propriedades físicas e mecânicas do aço empregado, cujos valores estão apresentados na Tabela 20. As barras rosqueadas apresentaram tensão de escoamento média da ordem de 460 MPa, módulo de elasticidade aproximado de 370 GPa e tensão última próxima de 472 MPa, caracterizando um aço de elevada resistência e ductilidade. As deformações correspondentes ao início do escoamento e à ruptura indicam comportamento compatível com solicitações progressivas, sem ocorrência de ruptura frágil.

Tabela 20 - Propriedades do aço utilizado

Diâmetro nominal da barra (mm)	Deformação de escoamento ε_y	Deformação de ruptura ε_u	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Módulo de elasticidade E (GPa)	Tensão de ruptura f_u (MPa)
12,5	0,14	1,24	460	370	472

Fonte: Própria

O conhecimento dessas propriedades mecânicas foi fundamental para a correta interpretação do comportamento estrutural do sistema experimental, uma vez que as barras rosqueadas atuaram como elementos responsáveis pela estabilidade global do conjunto durante os ensaios do tipo *push-off*. A elevada rigidez inicial do aço garantiu a manutenção da integridade do sistema ao longo do carregamento, enquanto sua capacidade de deformação contribuiu para a segurança do ensaio, evitando falhas prematuras dos elementos metálicos.

Dessa forma, a caracterização do aço empregado assegura que os resultados obtidos nos ensaios *push-off* estejam associados predominantemente ao

comportamento do concreto e da interface de cisalhamento, e não a limitações mecânicas dos elementos metálicos do sistema experimental.

4.6. Ensaio *push-off*

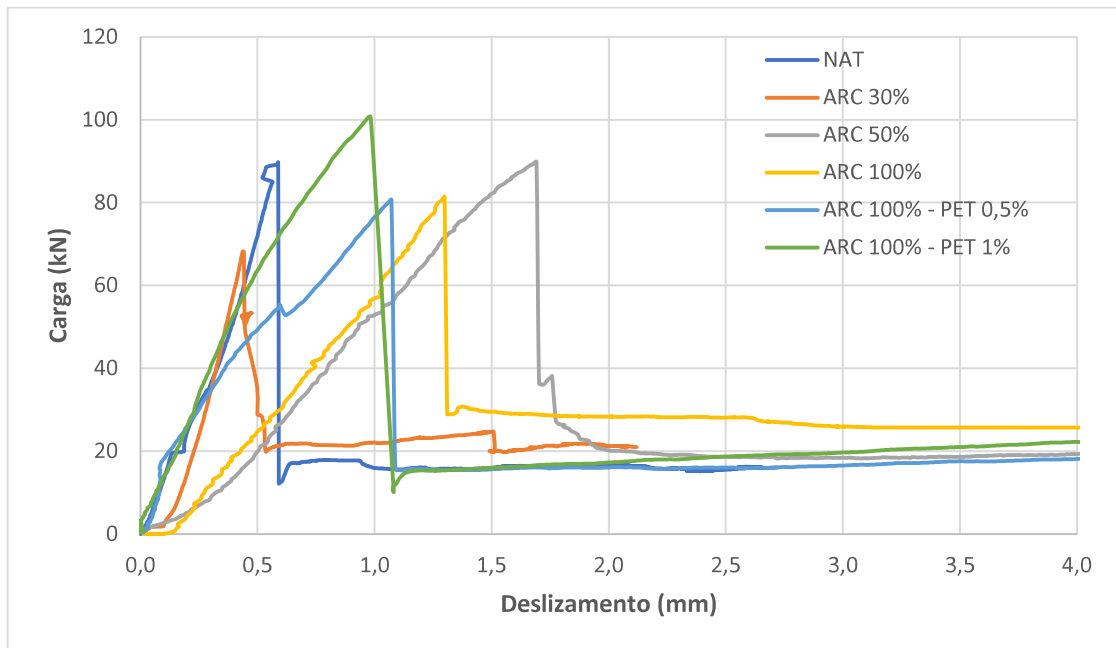
Neste item estão descritos os resultados dos ensaios *push-off* para os corpos-de-prova estudados. Os resultados apresentados referem-se a ensaios realizados sob carregamento monotônico e controle de deslocamento, considerando diferentes composições de concreto, com variação do teor de agregado graúdo reciclado e da fração volumétrica de fibras de Polietileno Tereftalato. A resistência ao cisalhamento foi determinada a partir da razão entre a carga máxima registrada e a área do plano de cisalhamento dos corpos-de-prova, sendo os resultados analisados por meio das curvas força–deslizamento e dos campos de deslocamento obtidos pela técnica de Correlação Digital de Imagens.

4.6.1. Comportamento global força vs deslocamento

O comportamento global força vs deslocamento dos corpos-de-prova ensaiados por meio do método *push-off* fornece informações relevantes sobre os mecanismos de resistência ao cisalhamento, permitindo avaliar tanto a capacidade resistente máxima quanto a resposta pós-pico dos diferentes concretos analisados. As curvas força–deslocamento obtidas experimentalmente refletem a contribuição conjunta da matriz cimentícia, do atrito ao longo do plano de cisalhamento e, quando aplicável, do efeito de ponteamto promovido pelas fibras de Polietileno Tereftalato.

A Figura 51 ilustra o comportamento global força vs deslizamento dos corpos-de-prova ensaiados por *push-off*, permitindo uma comparação direta entre o concreto de referência (NAT), os concretos com diferentes teores de agregado reciclado e aqueles reforçados com fibras PET. A análise dessas curvas evidencia diferenças significativas tanto na resistência máxima ao cisalhamento quanto na resposta pós-pico e na capacidade de transferência de esforços após a fissuração.

Figura 51 - Gráfico carga vs deslizamentos médios dos diferentes tipos de concreto de concreto.



Fonte: Própria

Observa-se que o concreto NAT apresenta a maior rigidez inicial, evidenciada pela elevada inclinação da curva, indicando maior eficiência da interface pasta-agregado e maior integridade microestrutural do material. Esse comportamento está em consonância com os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e massa específica, que indicaram melhor desempenho mecânico do concreto com agregado natural.

Os concretos com substituição parcial de agregado natural por reciclado na casa de 30% (ARC 30%) apresentam redução da rigidez inicial e da carga máxima em relação ao concreto de referência. Esse comportamento pode ser atribuído à maior heterogeneidade do concreto reciclado, à presença de argamassa aderida aos agregados e à fragilidade da zona de transição interfacial, fatores amplamente discutidos na literatura (Walraven, 1981; Loov e Patnaik, 1994; Trindade *et al.*, 2020).

Os concretos das séries ARC 50% e ARC 100% sem fibras apresentam um comportamento distinto: embora atinjam uma carga máxima expressiva, o pico ocorre em níveis mais elevados de deslizamento, seguido de uma queda abrupta de carga, caracterizando um mecanismo de ruptura mais instável. Esse comportamento sugere que, após a perda do engrenamento dos agregados reciclados, a resistência passa a ser governada principalmente pelo atrito residual ao longo do plano de cisalhamento, com contribuição limitada da matriz, em consonância com os modelos clássicos de cisalhamento por atrito propostos por Mattock (1976) e Walraven (1981).

A incorporação de fibras *PEt* altera de forma significativa o comportamento global, especialmente no regime pós-pico. Para o traço ARC 100% com 0,5% de fibras, observa-se um leve aumento da estabilidade após a ruptura inicial, porém sem ganhos expressivos na carga máxima ou na rigidez inicial. Esse comportamento indica que, nesse teor, a contribuição das fibras é limitada, possivelmente em função de dificuldades de dispersão e da baixa eficiência da ancoragem fibra–matriz, conforme já indicado pelos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Por outro lado, o traço ARC 100% com 1% de fibras PET apresenta um comportamento pós-pico substancialmente mais estável e manutenção da capacidade resistente para elevados níveis de deslizamento. Embora a carga máxima não supere significativamente a dos demais traços, a curva força–deslizamento evidencia um aumento da ductilidade e da capacidade residual, indicando a atuação efetiva das fibras como mecanismo complementar de transferência de tensões. Nesse caso, as fibras contribuem para o controle da abertura de fissuras e para a redistribuição das tensões ao longo do plano de cisalhamento, retardando a degradação do engrenamento dos agregados e promovendo um comportamento mais gradual após o pico.

Comparando-se os resultados obtidos com a literatura, observa-se boa concordância com estudos que indicam que a substituição de agregados naturais por reciclados tende a reduzir a rigidez e a resistência de pico, mas pode resultar em respostas mais deformáveis, especialmente quando associada a mecanismos adicionais de reforço, como fibras ou armaduras transversais (Sagaseta *et al.*, 2011; Trindade *et al.*, 2020; Visintin *et al.*, 2024). Da mesma forma, a melhoria do comportamento pós-pico observada nos concretos reforçados com fibras está alinhada com trabalhos que destacam o papel das fibras no aumento da ductilidade e na estabilização da resposta ao cisalhamento, mesmo quando os ganhos em resistência máxima são modestos.

Em síntese, o gráfico força–deslizamento confirma que o comportamento ao cisalhamento dos concretos analisados não deve ser avaliado apenas com base na carga máxima, mas também considerando a rigidez inicial, o nível de deslizamento no pico e, principalmente, a capacidade residual e a estabilidade pós-pico. Nesse contexto, a combinação de agregado reciclado com fibras PET, especialmente no teor

de 1%, mostra-se promissora para aplicações em que a ductilidade e o controle do processo de ruptura sejam aspectos relevantes do desempenho estrutural.

4.6.2. Resistência máxima ao cisalhamento

A resistência máxima ao cisalhamento constitui um dos principais parâmetros para a avaliação do desempenho mecânico dos concretos submetidos a esforços de cisalhamento direto, uma vez que está diretamente associada à capacidade do material em resistir ao deslizamento ao longo de planos preferenciais de fissuração. No ensaio *push-off*, essa resistência é resultado da atuação conjunta dos mecanismos de coesão da matriz cimentícia, engrenamento mecânico entre os agregados, atrito residual após a fissuração e, quando presentes, da contribuição de elementos de reforço, como fibras ou armaduras de confinamento.

A Tabela 21 apresenta os valores de força máxima de ruptura e as respectivas tensões máximas de cisalhamento obtidas para as diferentes séries analisadas, bem como as médias, desvios padrão e coeficientes de variação correspondentes. A resistência ao cisalhamento foi determinada pela razão entre a carga máxima registrada no ensaio e a área média do plano de cisalhamento dos corpos-de-prova.

Tabela 21 - Resistência ao cisalhamento no ensaio de *push-off*.

Traço	V_u (kN)	$\tau_{\text{máx.}}$ (MPa)	$\tau_{\text{med.}}$ (MPa)	DP (MPa)	Cv (%)
CP1 - NAT	86,2	2,28			
CP2 - NAT	-	-	2,33	0,05	2%
CP3 - NAT	89,8	2,38			
CP1 - ARC 30%	69,4	1,84			
CP2 - ARC 30%	69,5	1,84	1,81	0,04	2%
CP3 - ARC 30%	66,5	1,76			
CP1 - ARC 50%	87,5	2,31			
CP2 - ARC 50%	89,9	2,38	2,33	0,03	1%
CP3 - ARC 50%	87,0	2,30			
CP1 - ARC 100%	81,7	2,16			
CP2 - ARC 100%	80,7	2,13	2,13	0,05	2%
CP3 - ARC 100%	78,6	2,08			
CP1 - ARC 100% - PET 0,5%	80,1	2,12			
CP2 - ARC 100% - PET 0,5%	80,7	2,13	2,11	0,03	1%
CP3 - ARC 100% - PET 0,5%	78,3	2,07			
CP1 - ARC 100% - PET 1%	107,8	2,85			
CP2 - ARC 100% - PET 1%	102,4	2,71	2,74	0,08	3%
CP3 - ARC 100% - PET 1%	100,7	2,66			

Fonte: Própria

A análise dos resultados evidencia que o concreto de referência (NAT) apresentou tensão média de cisalhamento de 2,33 MPa, valor compatível com os níveis reportados na literatura clássica para ensaios do tipo *push-off* em concretos convencionais. Estudos pioneiros, como os de Mattock (1972) e Walraven *et al.* (1987), indicam que resistências ao cisalhamento direto da ordem de 2,0 a 3,0 MPa são típicas para concretos com resistência à compressão semelhante, o que confirma a coerência dos resultados experimentais obtidos neste trabalho.

A substituição de 30% do agregado natural por agregado reciclado (ARC 30%) resultou em uma redução significativa da resistência ao cisalhamento, com tensão média de 1,81 MPa, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 22% em relação ao concreto de referência. Esse comportamento está associado à maior porosidade do agregado reciclado e à presença de argamassa aderida, que reduzem a resistência da zona de transição interfacial e comprometem o intertravamento mecânico entre os agregados, mecanismo fundamental para a resistência ao cisalhamento direto.

Por outro lado, o concreto com 50% de substituição (ARC 50%) apresentou tensão média de cisalhamento de 2,33 MPa, valor praticamente idêntico ao do concreto NAT. Esse resultado indica que, para esse teor intermediário de substituição, a resistência ao cisalhamento não foi prejudicada, evidenciando um comportamento mecânico equivalente ao do concreto convencional.

Embora a resistência última tenha se mantido, é importante notar que concretos com agregado reciclado tendem a apresentar menor módulo de elasticidade, como observado nos resultados de caracterização mecânica. No entanto, no ensaio de *push-off*, essa menor rigidez pode atuar de forma favorável. A capacidade do agregado reciclado de se deformar levemente sem ruptura imediata, associada à argamassa aderida menos rígida, favorece uma redistribuição mais homogênea das tensões ao longo do plano de cisalhamento, reduzindo concentrações locais de tensão que poderiam induzir ruptura frágil prematura. Dessa forma, mesmo com menor rigidez global, o concreto ARC 50% consegue mobilizar de forma eficiente os mecanismos de atrito e intertravamento, compensando eventuais perdas de resistência da matriz.

No caso do concreto com 100% de agregado reciclado, a resistência média ao cisalhamento foi de 2,13 MPa, correspondendo a uma queda de cerca de 9% em

relação ao NAT. Esse resultado indica que, embora o concreto com agregado reciclado presente, em geral, maior deformabilidade e menor rigidez inicial, sua capacidade resistente máxima ao cisalhamento pode ser mantida próxima do concreto convencional, evidenciando que esse parâmetro não depende exclusivamente da resistência à compressão, mas também da mobilização do atrito e do engrenamento residual após a fissuração.

A incorporação de 0,5% de fibras PET ao concreto com 100% de agregado reciclado não promoveu ganhos significativos na resistência máxima ao cisalhamento, sendo obtida uma tensão média de 2,11 MPa, ligeiramente inferior à do traço sem fibras. Esse comportamento indica que, nesse teor, a contribuição das fibras para a resistência de pico é limitada, possivelmente em razão de efeitos como dispersão não ideal, aumento da porosidade da matriz ou interferência na compacidade do concreto, mas que atuam predominantemente no controle de fissuração e na fase pós-pico.

Em contraste, a adição de 1% de fibras PET resultou em aumento expressivo da resistência ao cisalhamento, atingindo tensão média de 2,74 MPa, o que representa um incremento de aproximadamente 18% em relação ao concreto NAT e de 29% em relação ao ARC 100% sem fibras. Esse ganho está associado à maior contribuição das fibras no mecanismo de ponteamto de fissuras, aumentando a coesão ao longo do plano de cisalhamento e retardando a propagação das fissuras críticas.

De forma geral, os resultados demonstram que a resistência ao cisalhamento em ensaios *push-off* não depende exclusivamente da resistência ou rigidez do concreto, mas da interação entre intertravamento mecânico, atrito, capacidade de redistribuição de tensões e, quando presentes, mecanismos adicionais de transferência de carga proporcionados pelas fibras. Esses achados reforçam o potencial do uso de agregados reciclados em teores intermediários e do uso adequado de fibras PET como estratégia eficaz para incremento da resistência ao cisalhamento.

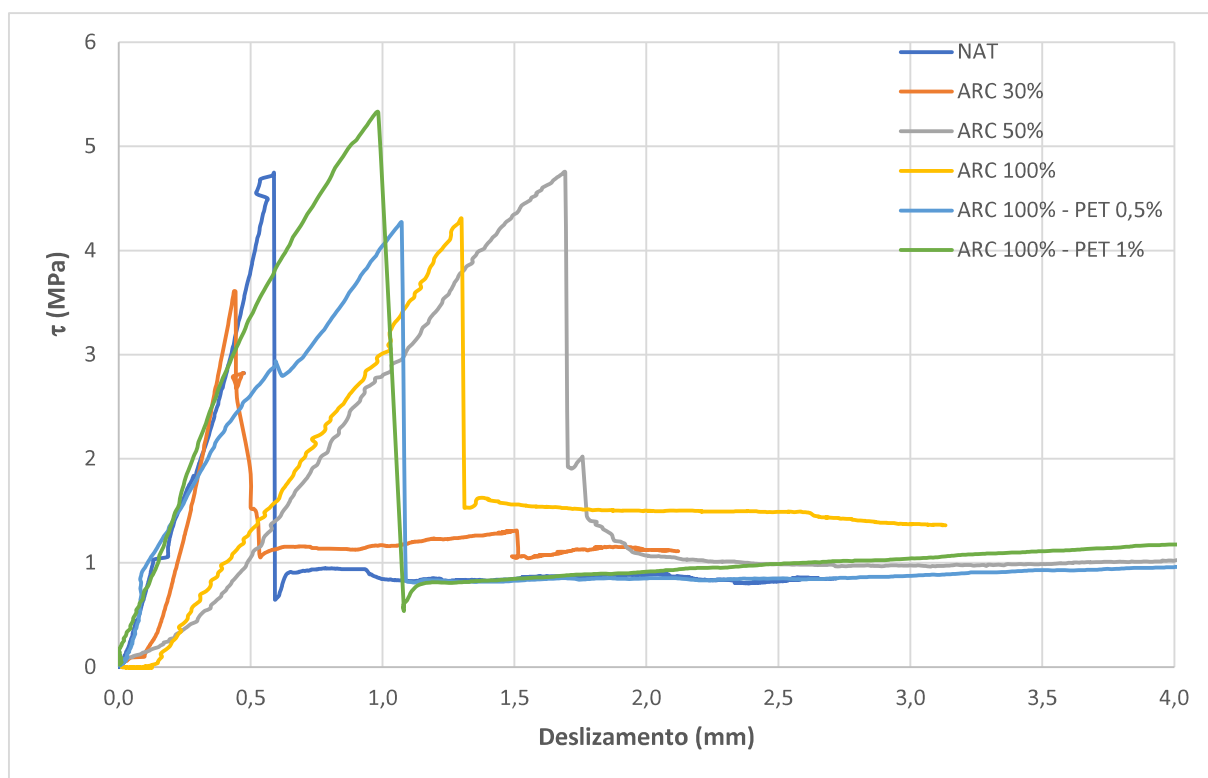
4.6.3. Comportamento pós-pico

O comportamento pós-pico ao cisalhamento constitui um aspecto importante para a compreensão do desempenho mecânico dos concretos ensaiados pelo método *push-off*, uma vez que fornece informações relevantes sobre a capacidade de redistribuição de tensões, ductilidade e resistência residual após a formação da fissura

principal no plano de cisalhamento. Diferentemente da resistência máxima, que está associada predominantemente aos mecanismos iniciais de coesão e intertravamento dos agregados, a resposta pós-pico reflete a atuação de mecanismos adicionais, como atrito entre as faces fissuradas, confinamento interno e o efeito de ponteamto proporcionado por fibras.

A Figura 52 evidencia de forma clara as diferenças no comportamento pós-pico dos concretos ensaiados, especialmente quando comparados os traços sem fibras com aqueles reforçados com fibras PET. Enquanto o pico de resistência fornece uma medida importante da capacidade última ao cisalhamento, é no trecho pós-pico que se manifestam de maneira mais significativa os efeitos do tipo de agregado e da adição de fibras.

Figura 52 - Curvas tensão cisalhante vs deslizamento vertical dos corpos-de prova tipo push-off.



Fonte: Própria

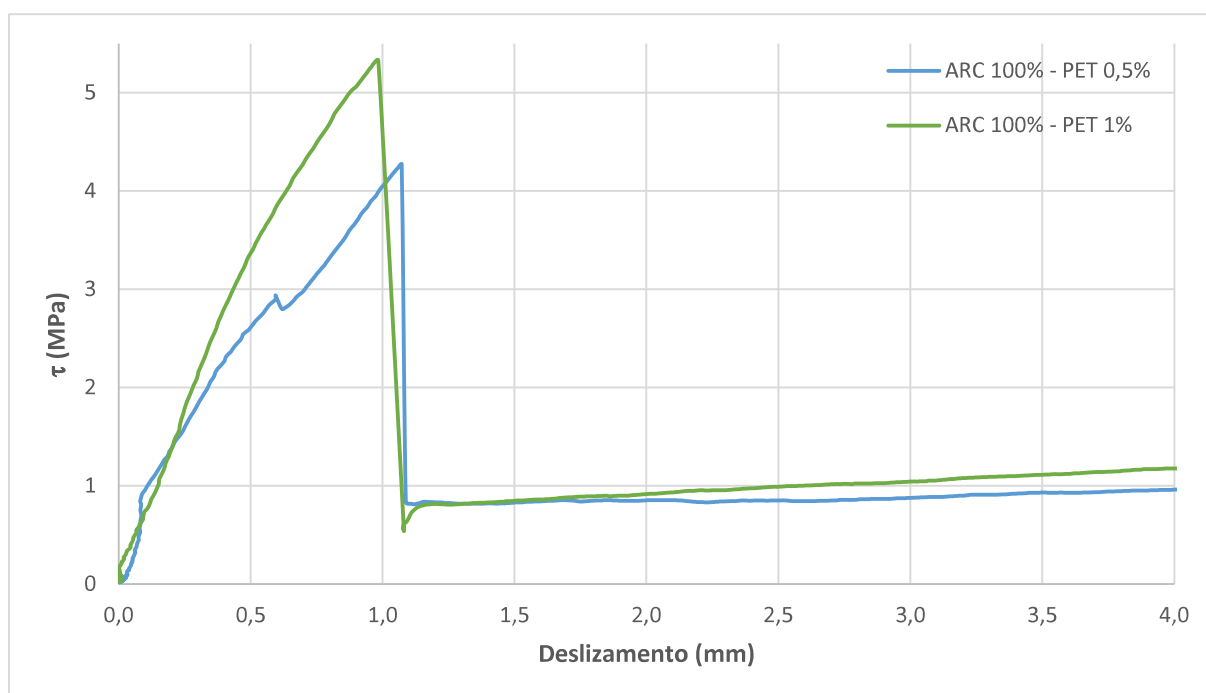
Nos concretos sem fibras (NAT, ARC 30%, ARC 50% e ARC 100%), observa-se, após atingir a tensão máxima, uma queda abrupta da tensão resistente, associada à rápida degradação dos mecanismos de coesão e intertravamento dos agregados ao longo do plano de cisalhamento. Esse comportamento é mais pronunciado no concreto NAT e no ARC 30%, caracterizando uma resposta mais frágil, com limitada capacidade de redistribuição de tensões após a formação da fissura principal. Embora

os concretos com ARC apresentem, em geral, uma redução da rigidez inicial, sua capacidade pós-pico ainda é restrita quando comparados aos concretos reforçados com fibras.

A introdução de fibras *PET* altera esse cenário, como evidenciado na Figura 53. Para as amostras ARC 100% – PET 0,5%, embora o ganho de resistência máxima seja discreto, nota-se uma resposta pós-pico significativamente mais estável. A curva apresenta um patamar de resistência residual mais bem definido, indicando que as fibras passam a atuar como elementos de ligação entre as faces da fissura, retardando a separação completa e contribuindo para o aumento da capacidade resistente ao longo do deslizamento.

Esse efeito torna-se ainda mais evidente no concreto ARC 100% – PET 1%, no qual se observa não apenas um aumento expressivo da resistência máxima, mas, sobretudo, um comportamento pós-pico dúctil. Após o pico, a tensão não sofre queda abrupta; ao contrário, mantém-se em níveis elevados por uma faixa extensa de deslizamento. Esse comportamento indica que as fibras *PET* atuam de maneira eficaz no ponteamto das fissuras, transferindo tensões por tração através do plano de cisalhamento e mobilizando mecanismos adicionais de resistência, como atrito incrementado e confinamento local induzido pelas fibras.

Figura 53 - Curvas tensão cisalhante vs deslizamento vertical dos corpos-de-prova tipo push-off reforçados com fibras *PET*.



Fonte: Própria

O acréscimo de resistência pós-pico observado nos concretos com fibras pode ser atribuído à capacidade das fibras de absorver energia e controlar a propagação das fissuras, transformando um processo de ruptura originalmente frágil em um mecanismo progressivo. Dessa forma, mesmo após a perda da coesão inicial da matriz cimentícia, o concreto mantém uma parcela significativa de sua capacidade resistente, característica altamente desejável em elementos estruturais sujeitos a solicitações de cisalhamento.

Em síntese, os resultados demonstram que, embora os concretos com agregado reciclado possam apresentar rigidez inicial inferior, a adição de fibras PET, especialmente no teor de 1%, promove ganhos substanciais no comportamento pós-pico, resultando em maior ductilidade, maior resistência residual e melhor capacidade de redistribuição de tensões. Esses aspectos reforçam o potencial do uso combinado de agregados reciclados e fibras poliméricas como uma solução estrutural tecnicamente eficiente e alinhada a critérios de sustentabilidade.

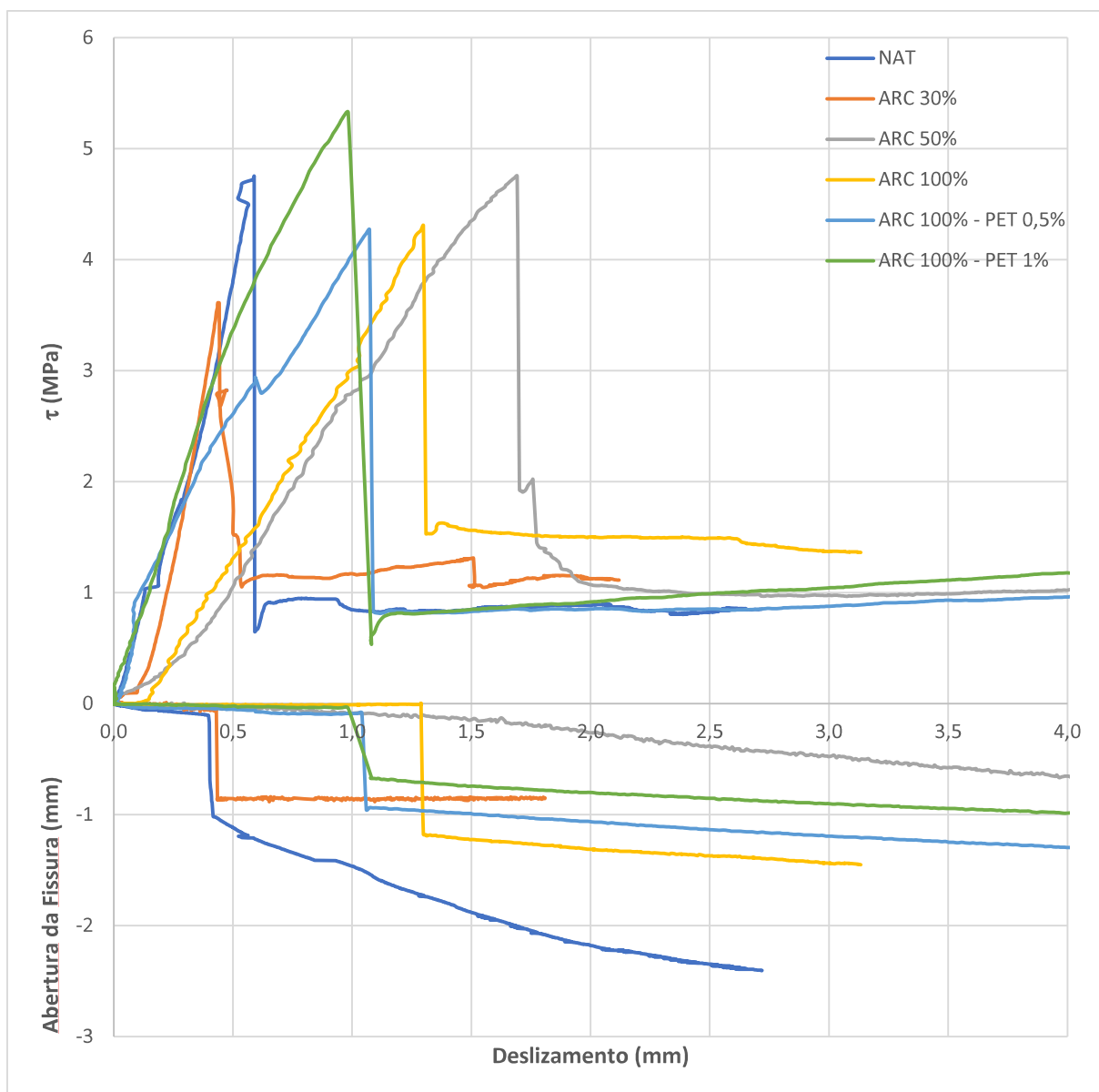
4.6.4. Análise da abertura de fissura e cinemática do plano de cisalhamento

A análise da abertura de fissuras e da cinemática do plano de cisalhamento constitui um aspecto importante para a compreensão do comportamento resistente dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio *push-off*, sobretudo no que se refere à resposta pós-pico. Por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens, foi possível acompanhar a evolução dos deslocamentos relativos, da abertura de fissuras e da redistribuição das deformações ao longo do plano de cisalhamento. Essa abordagem permite não apenas correlacionar a resposta global tensão vs deslizamento com os mecanismos locais de dano, mas também avaliar a influência do uso de agregados reciclados e da adição de fibras PET na estabilidade do processo de fissuração, na ductilidade do material e na manutenção da capacidade resistente após a ruptura da matriz cimentícia.

A Figura 54 apresenta a relação entre a tensão de cisalhamento (τ), o deslizamento relativo e a abertura de fissuras ao longo do plano de cisalhamento, para os valores médios dos três corpos-de-provas, possibilitando uma análise integrada da cinemática do mecanismo resistente nos diferentes concretos avaliados. A utilização da técnica de DIC permite observar, de forma simultânea, a resposta resistente global

e a evolução da fissuração, fornecendo subsídios relevantes para a interpretação do comportamento pós-pico.

Figura 54 - Relação média entre tensão cisalhante, deslizamento e abertura das fissuras.



Fonte: Própria

De modo geral, observa-se que todos os traços apresentam, na fase inicial de carregamento, um crescimento praticamente linear da tensão de cisalhamento com o aumento do deslizamento, associado a aberturas de fissura muito reduzidas. Esse comportamento indica que, antes da fissuração efetiva do plano de cisalhamento, a resistência é governada principalmente pela coesão da matriz cimentícia e pelo intertravamento dos agregados, como já mencionado anteriormente.

Nos concretos sem fibras (NAT, ARC 30%, ARC 50% e ARC 100%), a fissuração ocorre de forma relativamente abrupta, caracterizada por um rápido aumento da abertura de fissura associado à perda súbita de resistência após o pico. A Tabela 22 mostra que, nesses concretos, a carga correspondente à fissuração ($V_{u,fiss}$) ocorre muito próxima da carga última (V_u), com valores variando entre 94% e 100% de V_u . No concreto NAT, observa-se uma abertura de fissura relativamente elevada no pós-pico, associada a um comportamento mais frágil, com menor capacidade de redistribuição de tensões ao longo do plano de cisalhamento. Esse resultado é coerente com o maior módulo de elasticidade do concreto convencional, que favorece concentrações de tensão e a formação de fissuras mais localizadas.

No caso do concreto ARC 30%, além da redução da resistência máxima ao cisalhamento, observa-se um comportamento pós-pico pouco estável, com fissuração precoce em termos de deslocamento (Δ_{fiss} reduzido em alguns corpos-de-prova) e limitada capacidade resistente residual. Tal resposta pode ser associada à maior porosidade e à menor qualidade da zona de transição interfacial (ZTI), características típicas de concretos com baixos teores de substituição por agregado reciclado, conforme indicado pelos resultados de absorção e massa específica obtidos na etapa de caracterização dos materiais.

O concreto ARC 50% apresentou um comportamento distinto e particularmente relevante. Conforme indicado nas Tabelas 22 e 23, a resistência máxima ao cisalhamento manteve-se praticamente equivalente à do concreto NAT, porém associada a deslocamentos significativamente maiores no instante da fissuração e da carga máxima. A abertura de fissura cresce de forma mais gradual após o pico, indicando que a presença do agregado reciclado, com argamassa aderida, contribui para uma maior deformabilidade do sistema. Esse efeito favorece a redistribuição das tensões ao longo do plano de cisalhamento, retardando a estabilização completa do mecanismo resistente, mesmo em um material com módulo de elasticidade inferior ao do concreto convencional.

Para o concreto ARC 100%, observa-se, também, um aumento do deslizamento associado à fissuração, com manutenção de níveis relevantes de tensão residual após o pico. Esse comportamento sugere que a maior deformabilidade do agregado reciclado, aliada à menor rigidez global do concreto, promove um mecanismo de cisalhamento mais dúctil, no qual o intertravamento dos agregados

continua contribuindo para a resistência mesmo após a abertura da fissura principal. Os valores de abertura máxima de fissura apresentados na Tabela 24 reforçam essa interpretação, evidenciando maior capacidade de acomodação cinemática do sistema.

A introdução de fibras PET modifica de forma marcante a cinemática do plano de cisalhamento. Nos traços ARC 100% com 0,5% e 1% de fibras, observa-se uma redução significativa da taxa de crescimento da abertura de fissura no pós-pico, acompanhada pela manutenção — e, no caso do teor de 1%, pelo incremento — da resistência residual para grandes valores de deslizamento. As fibras atuam como elementos de ponteamto, restringindo a abertura das fissuras e permitindo a transferência de tensões após a ruptura da matriz cimentícia. Esse efeito é particularmente evidente no traço com 1% de PET, que apresenta os maiores valores de tensão máxima, maiores deslocamentos associados à fissuração e as menores variações relativas de abertura de fissura para grandes deslizamentos.

Tabela 22 - Resultados de força última, tensão de cisalhamento, carga de fissuração e abertura de fissura no instante da fissuração dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio push-off.

Série	CP's	V_u (kN)	τ_{máx.} (MPa)	V_{u,fiss} (kN)	τ_{fiss.} (MPa)	Δ_{fiss.} (mm)	%V_u
NAT	CP1	76,21	4,03	71,84	3,80	0,36	94%
	CP2	-	-	-	-	-	-
	CP3	89,80	4,75	88,02	4,66	0,53	98%
ARC 30%	CP1	86,13	4,56	85,17	4,51	0,43	99%
	CP2	94,22	4,99	93,45	4,94	0,68	99%
	CP3	86,13	4,56	85,17	4,51	0,43	99%
ARC 50%	CP1	87,39	4,62	84,67	4,48	1,46	97%
	CP2	89,84	4,75	89,50	4,74	1,83	100%
	CP3	89,84	4,75	88,28	4,67	1,76	98%
ARC 100%	CP1	81,39	4,31	80,63	4,27	1,66	99%
	CP2	-	-	-	-	-	-
	CP3	85,97	4,55	81,81	4,33	0,91	95%
ARC 100% - PET 0,5%	CP1	80,13	4,24	79,06	4,18	1,05	99%
	CP2	80,70	4,27	79,044	4,18	1,04	98%
	CP3	68,25	3,61	67,48	3,57	0,87	99%
ARC 100% - PET 1%	CP1	107,81	5,70	106,23	5,62	0,95	99%
	CP2	102,39	5,42	99,17	5,25	0,86	97%
	CP3	100,64	5,32	98,38	5,21	0,94	98%

Fonte: Própria

Tabela 23 - Valores de força máxima, tensão de cisalhamento, deslizamento e abertura máxima de fissura dos corpos-de-prova obtidos por Correlação Digital de Imagens (DIC) no ensaio push-off.

Série	CP's	V_u (kN)	$\tau_{m\acute{a}x.}$ (MPa)	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ (mm)	W máx. (mm)
NAT	CP1	76,21	4,03	0,31	0,08
	CP2	-	-	-	-
	CP3	89,80	4,75	0,59	0,22
ARC 30%	CP1	86,13	4,56	0,81	0,85
	CP2	94,22	4,99	0,68	0,86
	CP3	86,13	4,56	0,83	0,88
ARC 50%	CP1	87,39	4,62	1,52	0,24
	CP2	89,84	4,75	1,85	0,36
	CP3	89,84	4,75	1,06	0,30
ARC 100%	CP1	81,39	4,31	0,72	0,73
	CP2	-	-	-	-
	CP3	85,97	4,55	0,57	
ARC 100% - PET 0,5%	CP1	80,13	4,24	0,86	0,95
	CP2	80,70	4,27	1,07	0,94
	CP3	68,25	3,61	0,89	0,90
ARC 100% - PET 1%	CP1	107,81	5,70	0,61	1,15
	CP2	102,39	5,42	0,50	0,88
	CP3	100,64	5,32	0,98	0,67

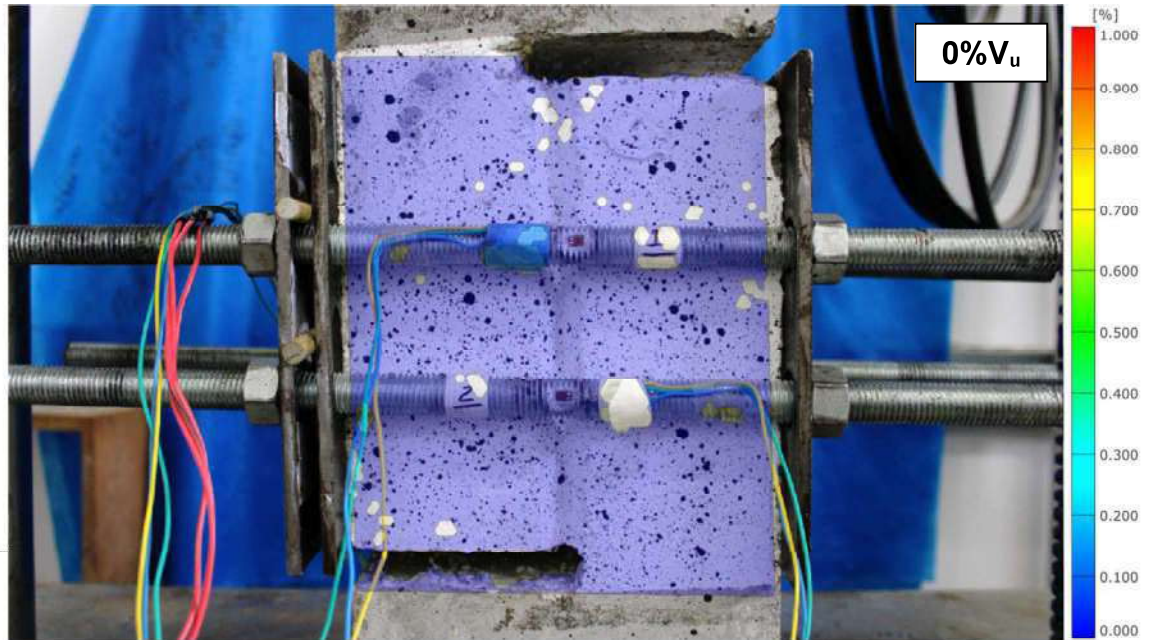
Fonte: Própria

A análise conjunta dos resultados apresentados nas Tabelas 22 e 23 e na Figura 54 evidencia que, enquanto os concretos sem fibras apresentam comportamento predominantemente frágil no pós-pico, os concretos com agregado reciclado e reforço com fibras PET desenvolvem um mecanismo de cisalhamento mais estável e dúctil. Esse comportamento está em consonância com a caracterização mecânica prévia, que indicou redução do módulo de elasticidade e aumento da capacidade de deformação desses concretos, favorecendo a dissipação de energia e a redistribuição de tensões ao longo do plano de cisalhamento.

Em síntese, os resultados obtidos por meio da técnica de Correlação Digital de Imagens confirmam que a substituição parcial ou total do agregado natural por agregado reciclado altera de forma significativa a cinemática do cisalhamento, enquanto a adição de fibras PET potencializa esse efeito, promovendo maior controle da fissuração, aumento da resistência residual e melhoria substancial do comportamento pós-pico dos corpos-de-prova submetidos ao ensaio *push-off*. Para complementar essa análise, serão apresentadas imagens extraídas da análise por DIC, as quais permitem visualizar a evolução dos campos de deslocamento e deformação, bem como a propagação e abertura das fissuras no plano de

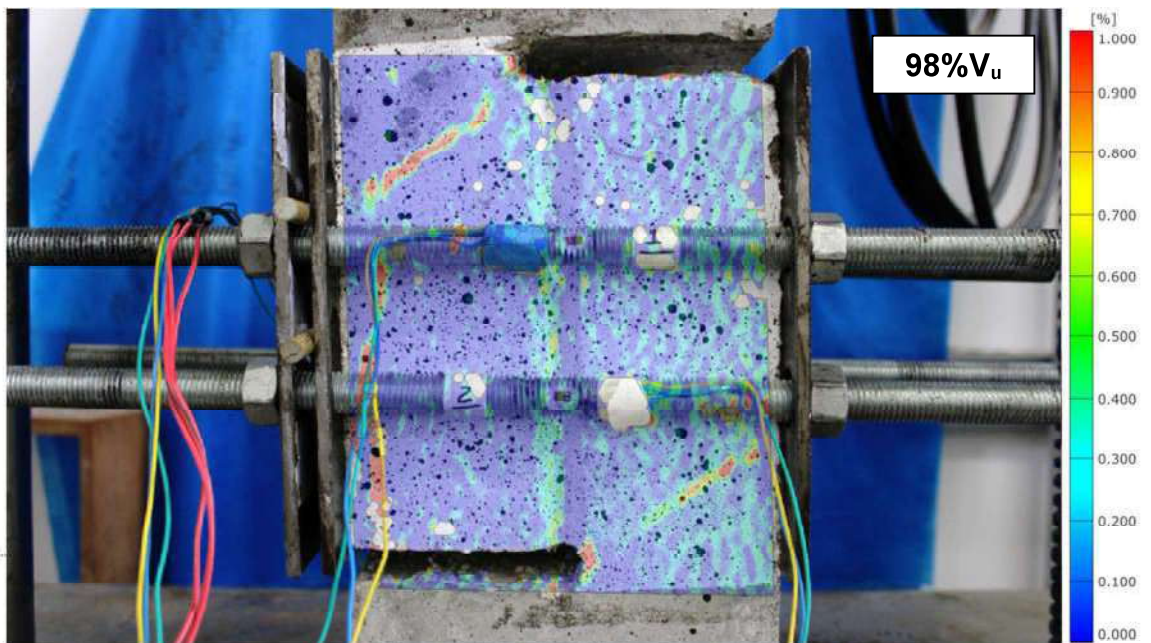
cisalhamento, contribuindo para uma interpretação mais detalhada dos mecanismos resistentes observados.

Figura 55 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 0% de V_u .



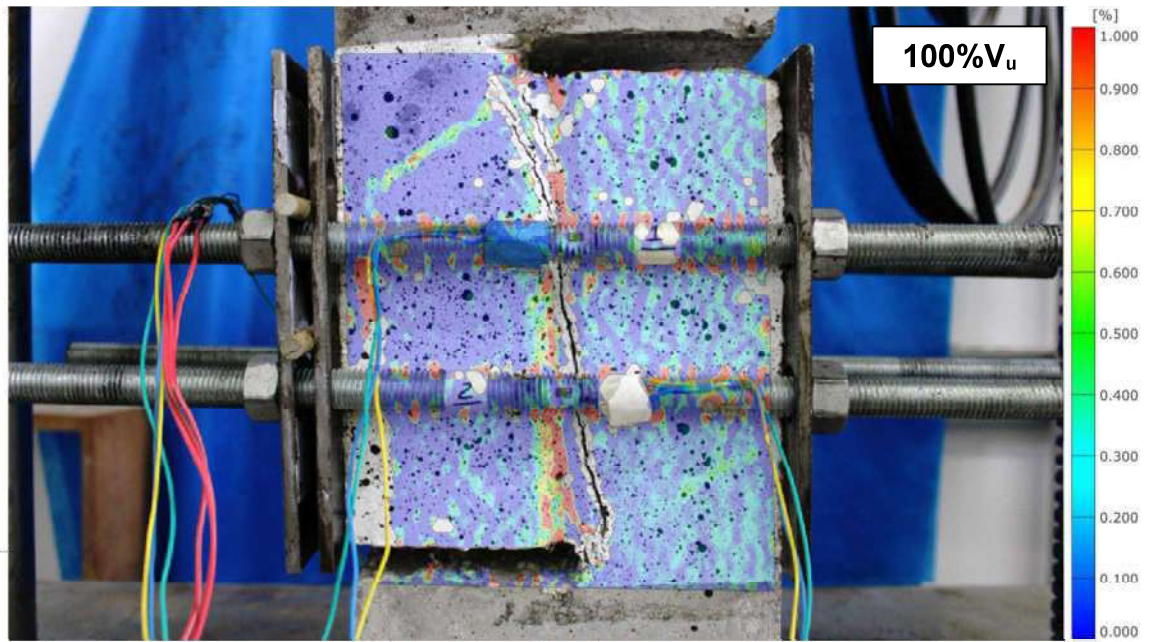
Fonte: Própria

Figura 56 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 98% de V_u .



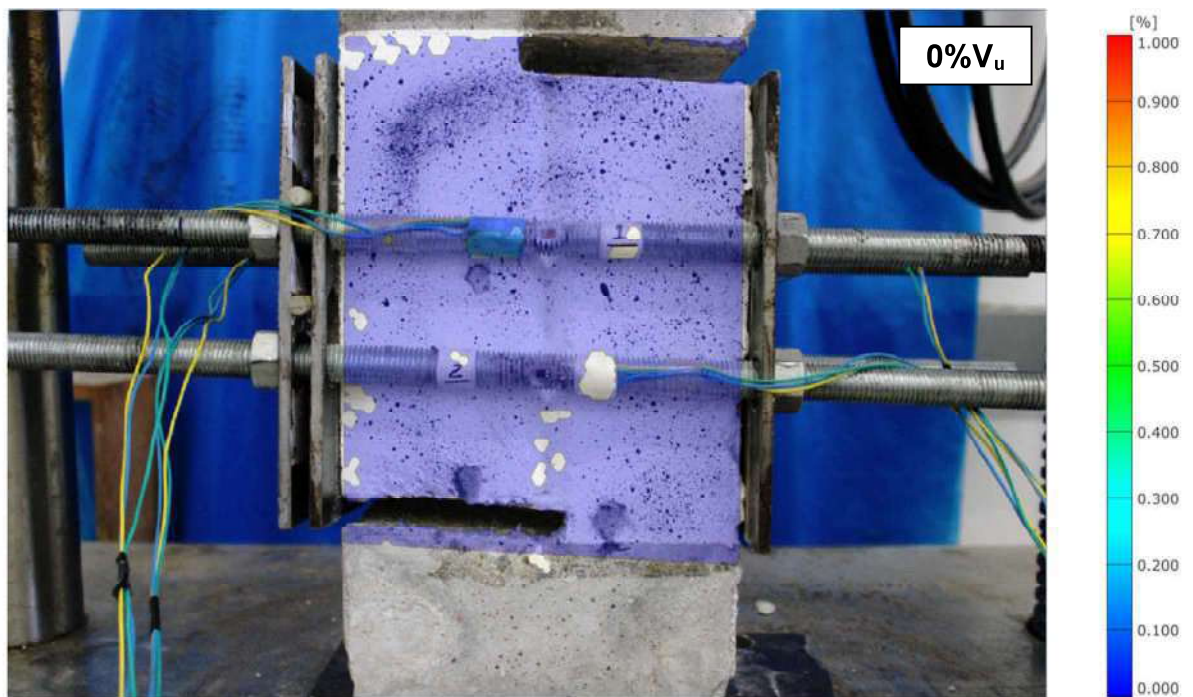
Fonte: Própria

Figura 57 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - NAT em 100% de V_u .



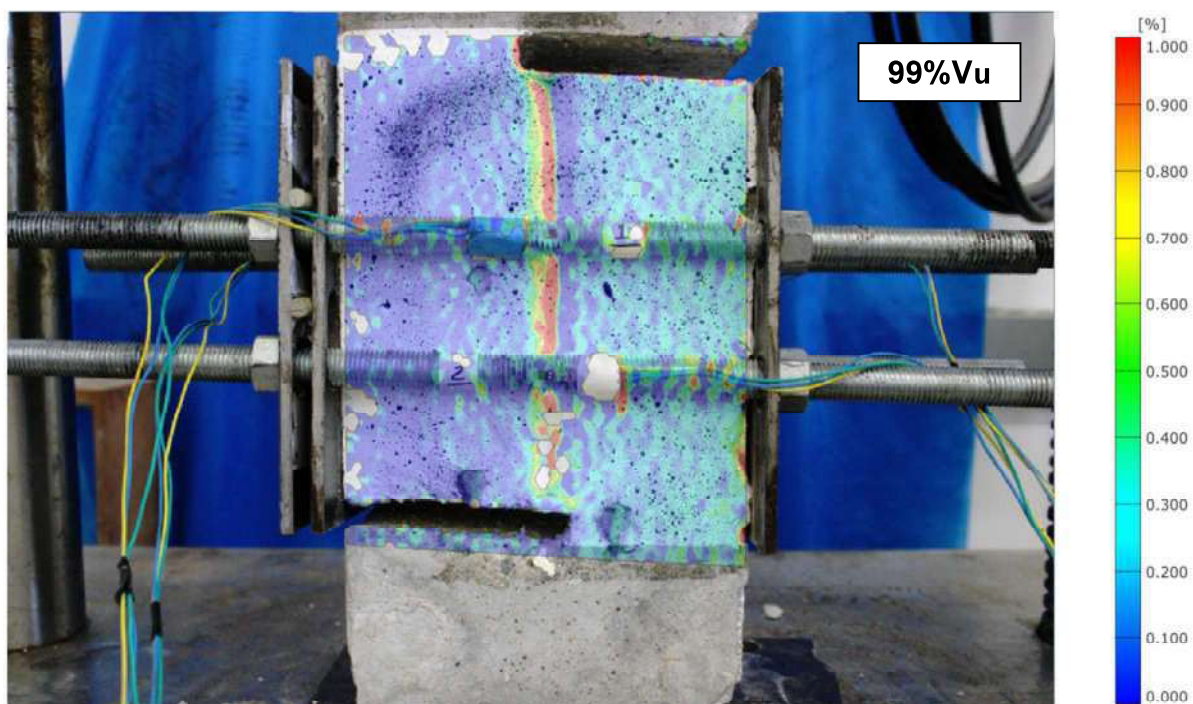
Fonte: Própria

Figura 58 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 – ARC 30% em 0% de V_u .



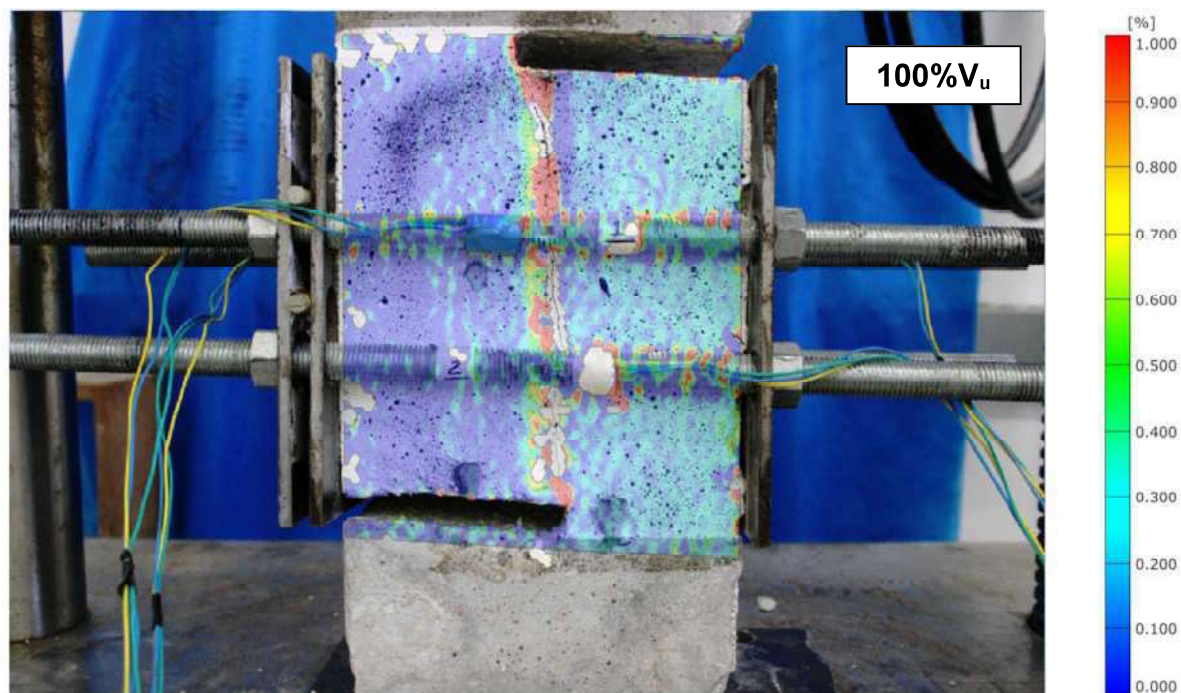
Fonte: Própria

Figura 59 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 30% em 99% de V_u .



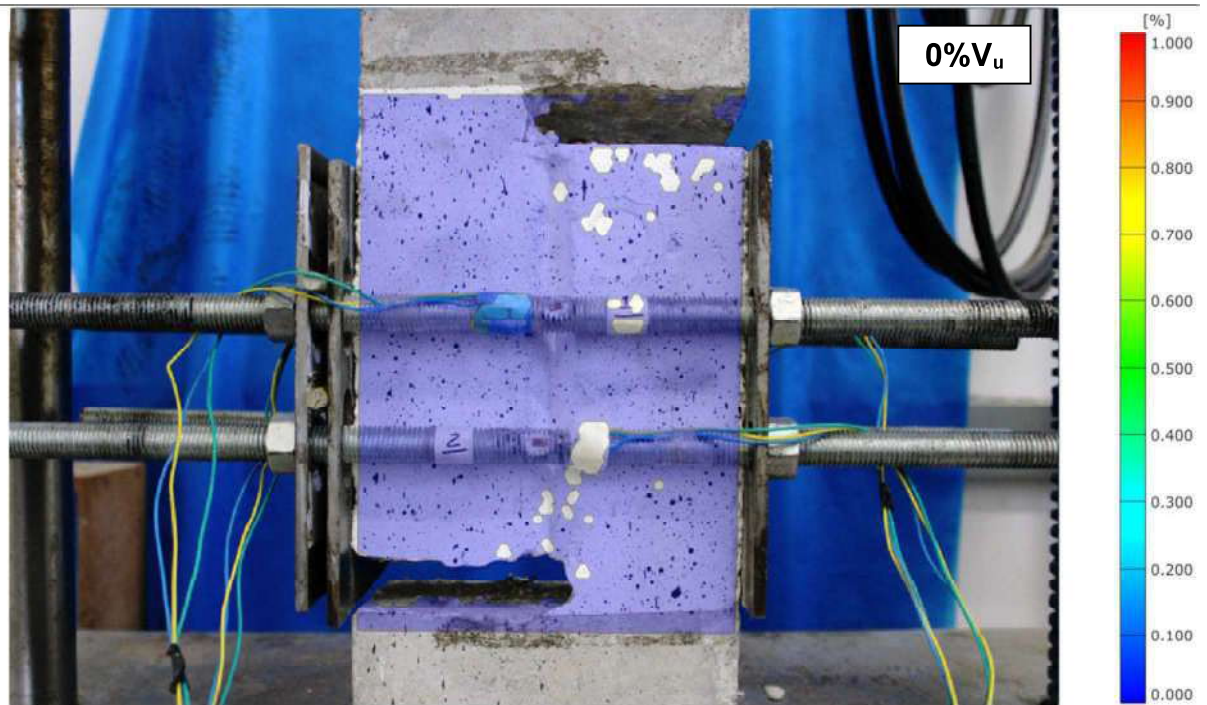
Fonte: Própria

Figura 60 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 30% em 100% de V_u .



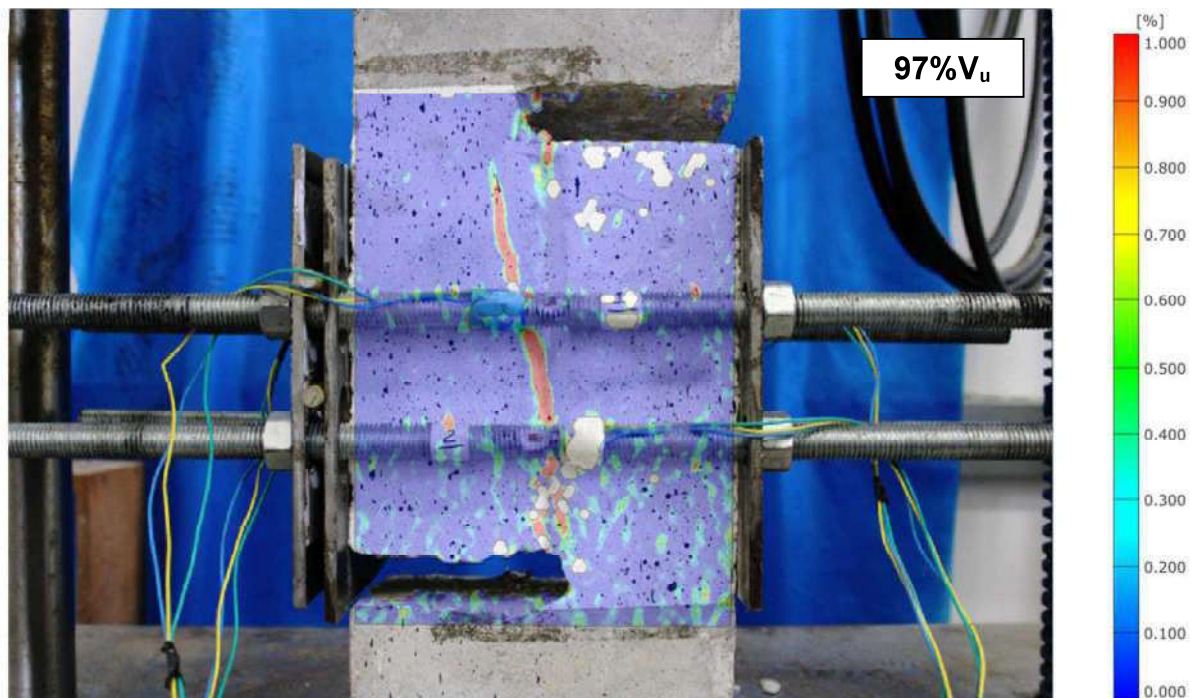
Fonte: Própria

Figura 61 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 – ARC 50% em 0% de V_u .



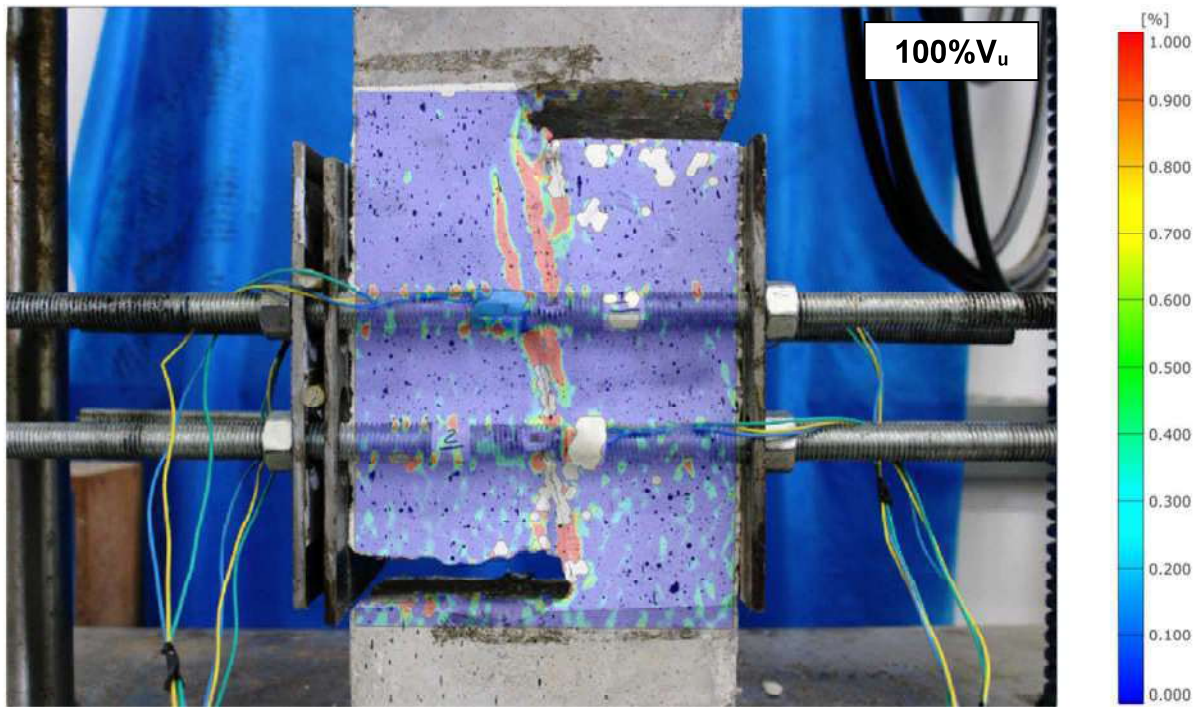
Fonte: Própria

Figura 62 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 50% em 97% de V_u .



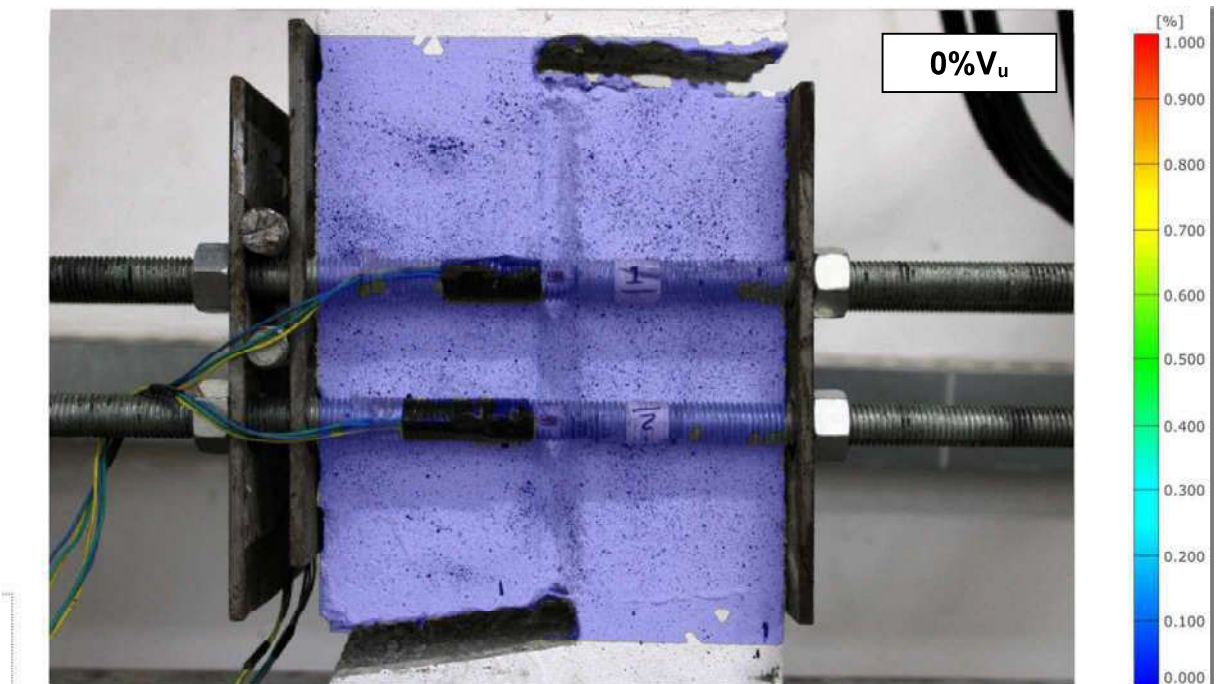
Fonte: Própria

Figura 63 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 50% em 100% de V_u .



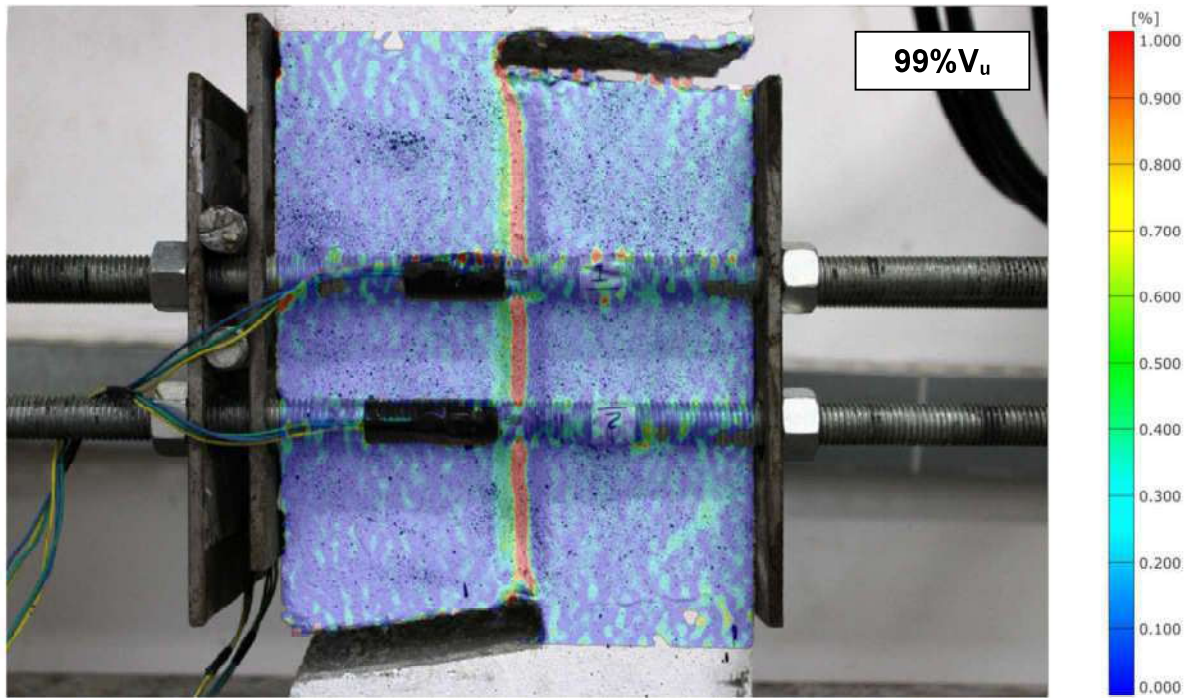
Fonte: Própria

Figura 64 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 100% em 0% de V_u .



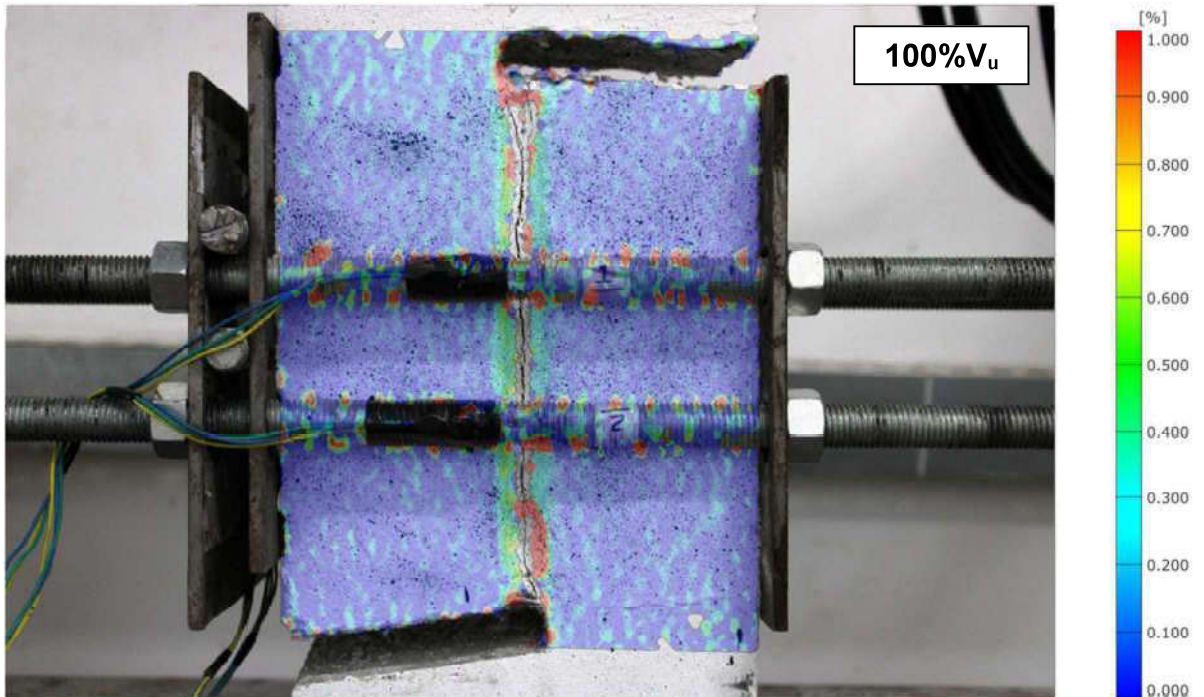
Fonte: Própria

Figura 65 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 100% em 99% de V_u .



Fonte: Própria

Figura 66 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP1 - ARC 100% em 100% de V_u .



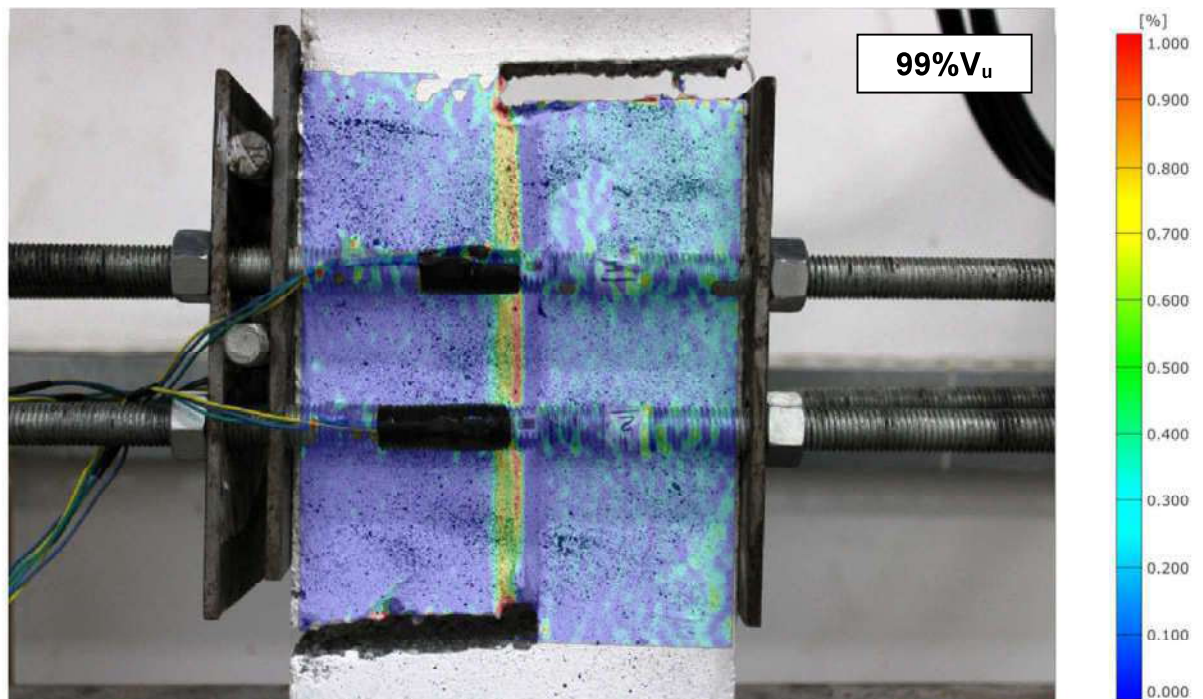
Fonte: Própria

Figura 67 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 0% de V_u .



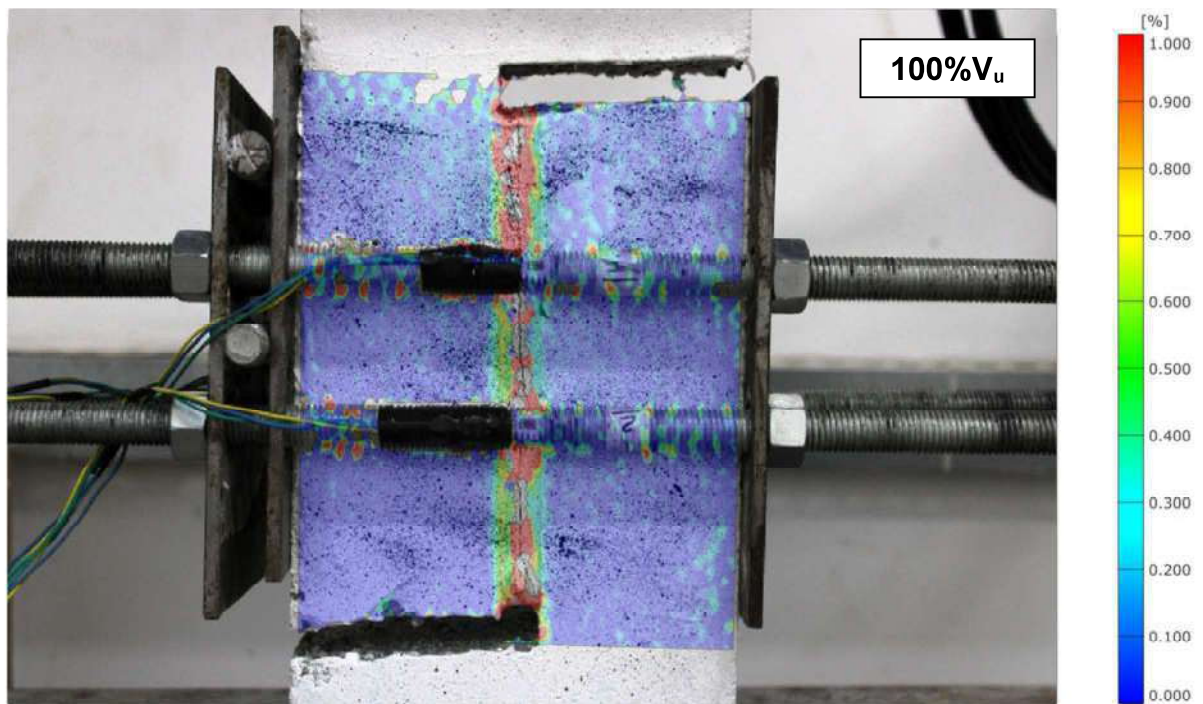
Fonte: Própria

Figura 68 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 99% de V_u .



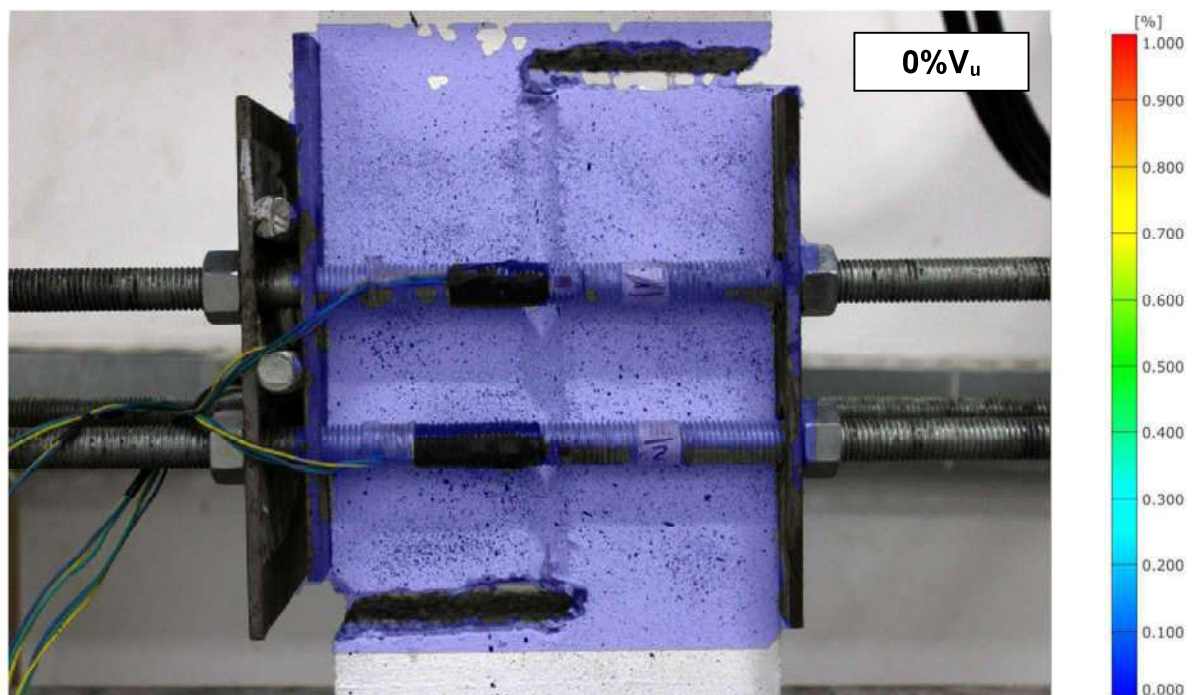
Fonte: Própria

Figura 69 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 0,5% em 100% de V_u .



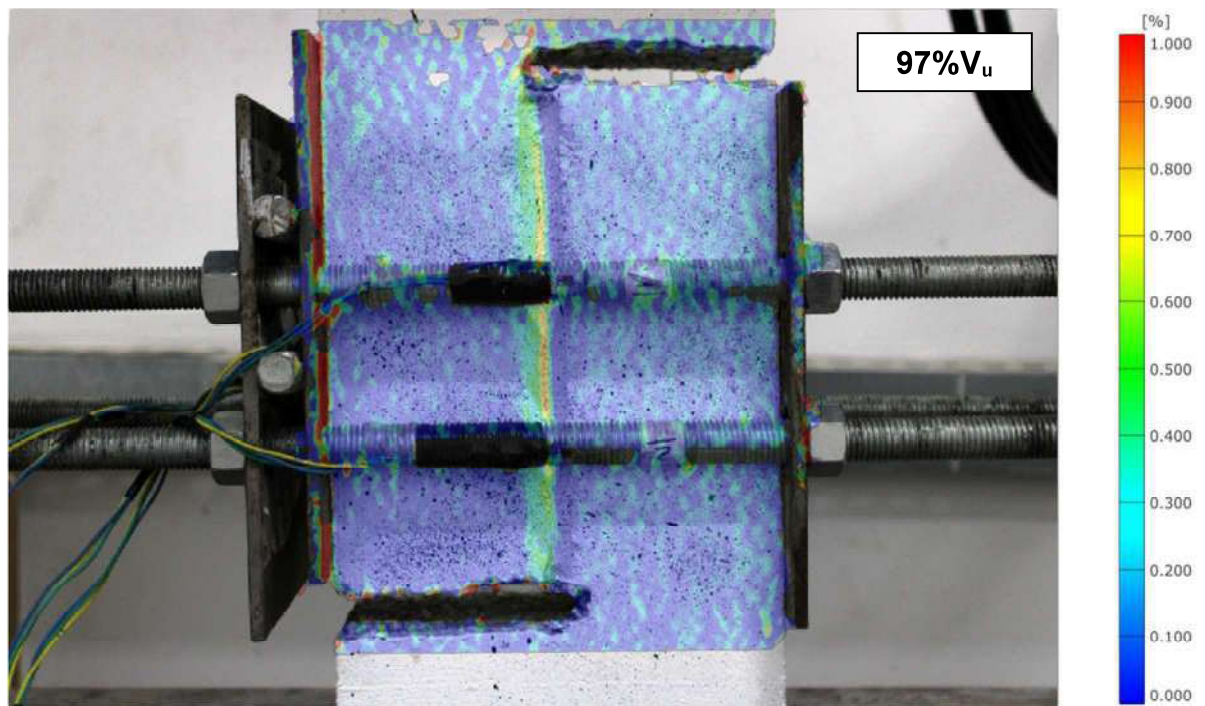
Fonte: Própria

Figura 70 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 0% de V_u .



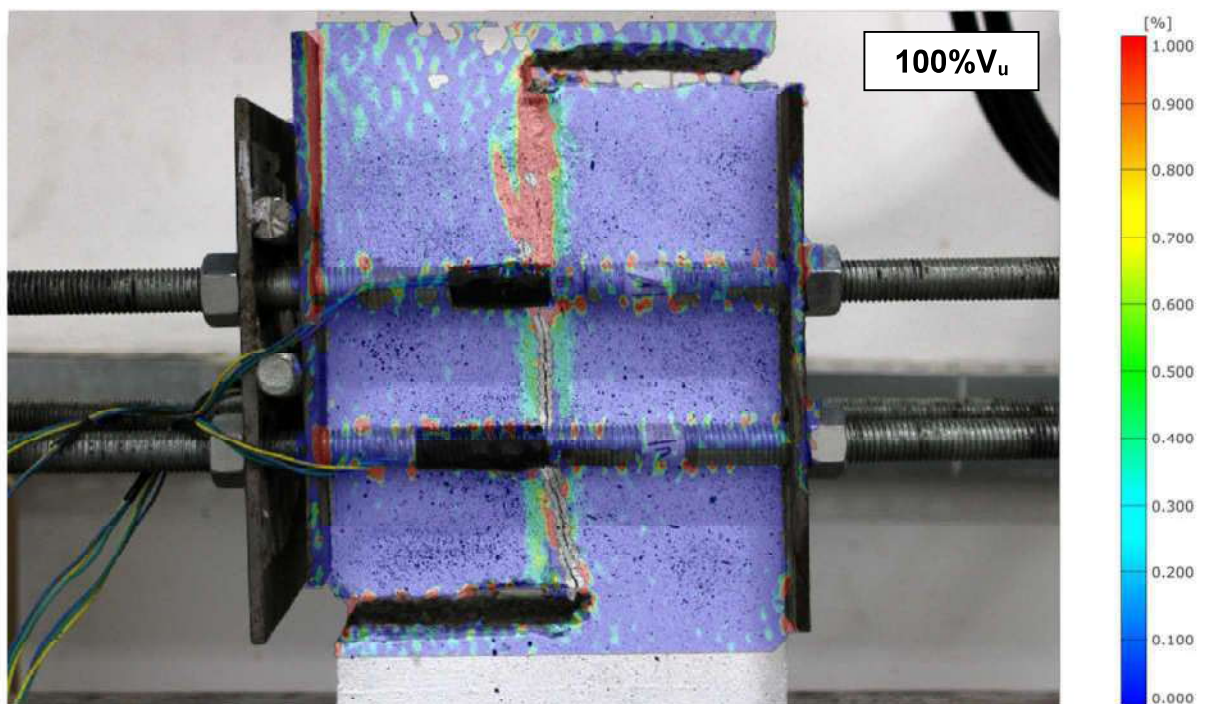
Fonte: Própria

Figura 71 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 97% de V_u .



Fonte: Própria

Figura 72 - Cinemática de fissuração do corpo-de-prova CP3 - ARC 100% - PET 1% em 100% de V_u .



Fonte: Própria

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento ao cisalhamento de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, com e sem a adição de fibras de Polietileno Tereftalato (PET), por meio de ensaios de cisalhamento direto em corpos-de-prova do tipo *push-off*. A partir dos resultados experimentais obtidos e das análises realizadas, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

A substituição parcial e total do agregado graúdo natural por agregado reciclado influenciou de maneira significativa as propriedades físicas e mecânicas dos concretos. Observou-se redução da massa específica, aumento da absorção de água e maior suscetibilidade ao desgaste mecânico dos agregados reciclados, aspectos diretamente relacionados à presença de argamassa aderida e à maior porosidade desse material. Essas características refletiram-se nos resultados mecânicos, especialmente na resistência à compressão e à tração, que apresentaram tendência de redução com o aumento do teor de agregado reciclado.

No que se refere à resistência à compressão, verificou-se que a substituição parcial de 30% resultou em redução mais acentuada, enquanto o concreto com 50% de agregado reciclado apresentou desempenho semelhante ao concreto de referência. Esse comportamento indica que, em determinados teores, a interação entre a matriz cimentícia e o agregado reciclado pode favorecer o empacotamento granular e a redistribuição de tensões, mitigando perdas de resistência. Para o concreto com 100% de agregado reciclado, observou-se redução moderada da resistência, compatível com os resultados reportados na literatura.

A adição de fibras PET influenciou de forma distinta nos concretos com 100% de agregado reciclado. O teor de 0,5% de fibras não promoveu ganhos significativos de resistência à compressão e ao cisalhamento, comportamento atribuído à possível dificuldade de dispersão das fibras e à criação de descontinuidades locais na matriz. Por outro lado, a adição de 1% de fibras PET resultou em ganhos expressivos, evidenciando que, a partir de um teor mínimo adequado, as fibras passam a atuar de forma efetiva no controle da fissuração e na transferência de tensões.

Os ensaios de cisalhamento direto do tipo *push-off* demonstraram que o mecanismo resistente foi fortemente influenciado pela composição do concreto. Os concretos com 30% de agregado reciclado apresentaram redução da resistência ao

cisalhamento, enquanto os concretos com 50% e 100% de agregado reciclado exibiram valores próximos aos do concreto de referência. Esse resultado indica que a resistência ao cisalhamento não depende exclusivamente da resistência à compressão, sendo fortemente condicionada pelos mecanismos de engrenamento dos agregados, atrito ao longo do plano de cisalhamento e capacidade de redistribuição de tensões.

O concreto com 100% de agregado reciclado e adição de 1% de fibras PET apresentou o melhor desempenho ao cisalhamento, com incremento médio de aproximadamente 26% na resistência em relação ao concreto com 100% de agregado reciclado sem fibras. Além do aumento da resistência máxima, esse traço apresentou comportamento pós-pico mais estável, com maior capacidade de absorção de energia e menor perda abrupta de resistência, caracterizando um comportamento menos frágil.

A análise das curvas força vs deslocamento evidenciou que a presença das fibras PET contribuiu significativamente para o comportamento pós-pico, promovendo maior ductilidade e capacidade residual de carga. Esse efeito foi confirmado pelas análises por Correlação Digital de Imagens, que mostraram redução da abertura das fissuras e alteração da cinemática do plano de cisalhamento nos concretos reforçados com fibras, especialmente no teor de 1%.

As análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura corroboraram os resultados mecânicos, evidenciando fraca aderência fibra–matriz nos casos em que ocorreu escorregamento das fibras e melhor interação nos casos em que houve deformação das fibras, associada ao aumento do comprimento de ancoragem e ao maior teor de fibras.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o uso de agregados graúdos reciclados é tecnicamente viável para concretos submetidos ao cisalhamento, desde que sejam adotados critérios adequados de dosagem e controle tecnológico. A incorporação de fibras PET, quando utilizada em teores apropriados, mostrou-se uma estratégia eficiente para compensar as limitações mecânicas do agregado reciclado, especialmente no que se refere ao comportamento pós-pico e à capacidade resistente ao cisalhamento.

Por fim, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre o comportamento ao cisalhamento de concretos sustentáveis, reforçando o potencial do

uso combinado de agregados reciclados e fibras poliméricas como alternativa técnica e ambientalmente viável para aplicações estruturais.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa e nas limitações inerentes ao programa experimental desenvolvido, recomenda-se a continuidade dos estudos relacionados ao comportamento ao cisalhamento de concretos com agregados reciclados reforçados com fibras PET. Inicialmente, sugere-se a ampliação do número de corpos-de-prova por série experimental, de modo a possibilitar análises estatísticas mais robustas e maior confiabilidade quanto à variabilidade dos resultados. Também se mostra relevante investigar a adição de fibras PET em outros teores de substituição do agregado natural por agregado reciclado buscando identificar com maior precisão composições que conciliem maior desempenho mecânico e sustentabilidade.

No que se refere, ainda, ao reforço fibroso, recomenda-se avaliar diferentes geometrias, dimensões e teores volumétricos de fibras de PET, considerando variações de comprimento, largura, espessura e relação de aspecto, uma vez que tais parâmetros influenciam diretamente os mecanismos de ancoragem e transferência de tensões. De forma complementar, estudos envolvendo tratamentos superficiais das fibras, por processos mecânicos ou químicos, podem contribuir para o aumento da aderência fibra-matriz e, conseqüentemente, para a melhoria do desempenho pós-fissuração.

Sugere-se ainda a realização de ensaios sob carregamentos cíclicos, repetidos ou dinâmicos, com o objetivo de simular condições reais de serviço em estruturas sujeitas à fadiga ou vibrações. Da mesma forma, torna-se importante investigar aspectos de durabilidade, incluindo absorção de água, retração, fluência, carbonatação, penetração de cloretos e comportamento em ambientes agressivos, de modo a ampliar a compreensão sobre a vida útil desses compósitos cimentícios.

A continuidade dessas investigações poderá contribuir significativamente para o avanço do conhecimento científico e para a consolidação do uso de materiais reciclados em aplicações estruturais mais amplas e seguras

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON. 70% do entulho no Brasil é descartado incorretamente. 3 jun. 2023. **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - ABRECON.** Disponível em: <https://abrecon.org.br/artigos/70-do-entulho-no-brasil-e-descartado-incorretamente>. Acessado: 17 jun. 2024.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - Abrema-(2023) Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. 54 p.

ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** jun. 2005. Universidade de São Paulo, jun. 2005. <https://doi.org/10.11606/T.3.2005.tde-18112005-155825>.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 5. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.3R-93). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993. 10p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Manual of concrete practice: part 5. ACI. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (ACI 544.1R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Concreto — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: Agregado reciclado de resíduo sólido da Construção Civil — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: Agregados reciclados de resíduos da Construção Civil — Diretrizes para aplicação em concreto estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16974: Agregados reciclados de resíduos da Construção Civil — Diretrizes para aplicação em argamassas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto endurecido — Determinação dos módulos elásticos e de deformação — Parte 1: Módulo estático à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ARAÚJO, Leylanny Silva; SILVA, Valquiria Santana Da; DOS SANTOS LEITE, Josiane; TAPAJÓS, Luamim Sales; DOS SANTOS LEITE, Jonas. 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**, [N.p.], vol. 8, nº 1, p. 2976–2997, jun. 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-197>.

BALLISTA, Luiz Paulo Zuppani. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno**. jun. 2003. Universidade de São Paulo, jun. 2003. DOI: 10.11606/D.18.2003.tde-13112015-142759. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-13112015-142759/>.

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. 1999. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. .

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da Construção Civil. . p. 95–96. [N.p.]: [N.p.], [[S.d.]].

BUTTLER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. jun. 2003. Universidade de São Paulo, jun. 2003. <https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-06082003-172935>.

CARDOSO, Allan Carvalho; LIMA, Isaque Guerreiro; FERREIRA, Maurício de Pina; SOUZA, Rafael Alves de. Influence of recycled concrete aggregates on the shear strength of reinforced concrete beams. **Revista**

IBRACON de Estruturas e Materiais, [N.p.], vol. 14, nº 1, p. 1–17, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100009>.

CEREJA, Keize Delvalle dos Santos Ferraz. *Comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de Polietileno Tereftalato*. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2025.

DADD, L; XIE, T; BENNETT, B; VISINTIN, P. Exploring the physical and mechanical characteristics of multi-generation recycled aggregate concrete at equivalent compressive strengths. **Journal of Cleaner Production**, [N.p.], vol. 451, jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141965>.

DADD, Lloyd; XIE, Tianyu; BENNETT, Bree; VISINTIN, Phillip. Shear Friction in Single-Generation and Multigeneration Recycled Aggregate Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [N.p.], vol. 37, nº 3, jun. 2025. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18716. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JMCEE7.MTENG-18716>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 064/2004-ES: Pavimentação – Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

Eurostat Statistics for Waste Flow Generation 2016 European Commission (2018) <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>

GHORBEL, Elhem; WARDEH, George; FARES, Hanaa. Mechanical and fracture properties of recycled aggregate concrete in design codes and empirical models. **Structural Concrete**, [N.p.], vol. 20, nº 6, p. 2156–2170, jun. 2019. <https://doi.org/10.1002/suco.201800335>.

GONÇALVES, Micheli Silveira. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** 2011. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011. .

HANSEN, T C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry.** [N.p.]: CRC Press, jun. 1992. DOI: 10.1201/9781482267075. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482267075>.

HAO, Xinkai; VISINTIN, Philip; OEHLERS, Deric. J. Closed-Form Solutions for Quantifying the Ductility of Concrete Beams with Passively Restrained Concrete. **Journal of Structural Engineering**, [N.p.], vol. 146, nº 8, jun. 2020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002731](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002731).

JIENMANEECHOTCHAI, Thunyawee; FOYTONG, Piyawat; KHUNKITTI, Pirat; SATA, Vanchai; CHINDAPRASIRT, Prinya. Enhancement of tensile performance of concrete by using synthetic polypropylene fibers. **Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)**, [N.p.], vol. 32, nº 4, p. 320–337, jun. 2023. DOI: 10.22630/srees.5218. Disponível em: <https://srees.sggw.edu.pl/article/view/5218>.

JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. 2000. **Seminário Nacional Sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares.** [N.p.]: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Cetesb, 2000.

KHAN, Sadaqat Ullah; AYUB, Tehmina. Flexure and shear behaviour of self-compacting reinforced concrete beams with polyethylene terephthalate fibres and strips. **Structures**, [N.p.], vol. 25, p. 200–211, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.023>.

KISKU, N; JOSHI, H; ANSARI, M; PANDA, S K; NAYAK, Sanket; DUTTA, Sekhar Chandra. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Elsevier Ltd**, vol. 131, p. 721–740, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>.

KUMAR, Amit; SINGH, Gyani Jail; CHAUHAN, Babu Lal; KUMAR, Rajesh. Strength and Durability Performance of Recycled Aggregate Structural Concrete with Silica Fume, Furnace Slag, and M-Fine. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [N.p.], vol. 36, nº 7, jun. 2024. <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-17547>.

KURAD, Rawaz; SILVESTRE, José D; DE BRITO, Jorge; AHMED, Hawreen. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, [N.p.], vol. 166, p. 485–502, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.236>.

LEITE, M B; MONTEIRO, P J M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, [N.p.], vol. 81, p. 38–48, jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.010>.

LEITE, Monica Batista. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**. 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10183/21839>.

LEVY, Salomon Mony; ROBERTO, Paulo; HELENE, Lago. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP EVOLUÇÃO HISTÓRICA DA UTILIZAÇÃO DO CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO. [N.p.], 2002.

LOOV, Robert E; PATNAIK, Anil K. Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams With a Rough Interface. **PCI Journal**, [N.p.], vol. 39, nº 1, p. 48–69, jun. 1994. DOI: 10.15554/pcij.01011994.48.69. Disponível em: https://www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/1994/January-February/Horizontal_Shear_Strength_of_Composite_Concrete_Beams_With_a_Rough_Interface.aspx.

LOVATO, Patrícia Silveira. **VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA UTILIZAÇÃO EM CONCRETO**. 2007. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. .

MARINKOVIĆ, S; RADONJANIN, V; MALEŠEV, M; IGNJATOVIĆ, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, [N.p.], vol. 30, nº 11, p. 2255–2264, jun. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.

MATTOCK, Alan H; HAWKINS, Neil M. SHEAR TRANSFER IN REINFORCED CONCRETE - RECENT RESEARCH. **PCI Journal**, [N.p.], vol. 17, nº 2, p. 55–75, jun. 1972. DOI: 10.15554/pcij.03011972.55.75. Disponível em: https://www.pci.org/PCI/Publications/PCI_Journal/Issues/1972/March-April/SHEAR_TRANSFER_IN_REINFORCED_CONCRETE_-_RECENT_RESEARCH.aspx.

MATTOCK, Alan H; LI, W K; WANG, T C. Shear transfer in lightweight reinforced concrete. **PCI Journal**, [N.p.], vol. 21, nº 1, p. 20–39, jun. 1976. <https://doi.org/10.15554/pcij.01011976.20.39>.

MOREIRA, Lucia Hiromi Higa. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. jun. 2010. Universidade de São Paulo, jun. 2010. <https://doi.org/10.11606/D.3.2010.tde-19012011-144053>.

OCHI, T; OKUBO, S; FUKUI, K. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. **Cement and Concrete Composites**, [N.p.], vol. 29, nº 6, p. 448–455, jun. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>.

PELISSER, Fernando. **Avaliação do desempenho de concreto reforçado com fibras de Polietileno Tereftalato (PET)**. 2020. Universidade Federal de Santa Catarina, 2020. .

PINTO, Tarcísio de Paula; AGOPYAN, Vahan. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Universidade de São Paulo, 1999. .

POON, Chi Sun; SHUI, Z H; LAM, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. **Cement and concrete Research**, [N.p.], vol. 34, nº 12, p. 2215–2222, 2004.

PUTHUSSERY, Joseph V; KUMAR, Rakesh; GARG, Anurag. Evaluation of recycled concrete aggregates for their suitability in construction activities: An experimental study. **Waste Management**, [N.p.], vol. 60, p. 270–276, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.008>.

RAHAL, Khaldoun N; AL-KHALEEFI, Abdul Lateef. Shear-friction behavior of recycled and natural aggregate concrete-an experimental investigation. **ACI Structural Journal**, [N.p.], vol. 112, nº 6, p. 725–734, jun. 2015. <https://doi.org/10.14359/51687748>.

RAHAL, Khaldoun N; HASSAN, Walid. Shear strength of plain concrete made of recycled low-strength concrete aggregates and natural aggregates. **Construction and Building Materials**, [N.p.], vol. 311, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125317>.

RESENDE, Thomás L; CARDOSO, Daniel C T; SHEHATA, Lidia C D. Experimental and theoretical investigation on the stress transfer across cracks due to combined action of steel fibers and aggregate interlock. **Cement and Concrete Composites**, [N.p.], vol. 124, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104239>.

SAGASETA, J; VOLLUM, R L. Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, [N.p.], vol. 63, nº 2, p. 119–137, jun. 2011. <https://doi.org/10.1680/mac9.00191>.

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**, [N.p.], vol. 13, nº 10, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13102597>.

SILVA, Vinicius Arcanjo da; FERNANDES, André Luís Teixeira. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade & Natureza**, [N.p.], vol. 24, nº 2, p. 333–344, jun. 2012. DOI: 10.1590/S1982-45132012000200012. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132012000200012&lng=pt&tlng=pt.

SILVA, R V; BRITO, J De; DHIR, R K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, [N.p.], vol. 65, p. 201–217, jun. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: avanços institucionais e melhorias técnicas**. Brasil: [N.p.], [[S.d.]].

TAM, Vivian W Y; KOTRAYOTHAR, Duangthidar; XIAO, Jianzhuang. Long-term deformation behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [N.p.], vol. 100, p. 262–272, jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.013>.

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

TORRES, Humberto Rodrigues. *Influência do teor de fibras de aço no comportamento ao atrito-cisalhamento de concretos com agregados reciclados*. 2019. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.

TRINDADE, Juliana Corrêa. (2016). A Influência do Teor de Agregados Reciclados Provenientes de Concretos Simples com Diferentes Resistências no Comportamento ao Atrito-Cisalhamento. Dissertação de mestrado de Engenharia Civil – Universidade Estadual do Norte Fluminense.

TRINDADE, Juliana; GARCIA, Sergio; FONSECA, Gabriel. Experimental Study of Direct Shear in Concrete with Recycled Aggregate. **ACI Structural Journal**, [N.p.], vol. 117, nº 5, p. 233–243, jun. 2020. <https://doi.org/10.14359/51724683>.

TROIAN, Aline. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons de cloreto**. 2010. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2010.

VISINTIN, P. *et al.* Post-cracking shear behaviour of fibre reinforced concrete interfaces. **Engineering Structures**, v. 254, 2024.

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**, [N.p.], vol. 136, nº 11, p. 1393–1400, 2010.

WALRAVEN, J; STROBAND, J. Shear Friction in High-Strength Concrete. 1994. “**SP-149: High-Performance Concrete - Proceedings, International Conference Singapore, 1994**”. [N.p.]: American Concrete Institute, 1994. <https://doi.org/10.14359/4089>.

WANG, Liang; WANG, Jialai; QIAN, Xin; CHEN, Peiyuan; XU, Ying; GUO, Jinxing. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, [N.p.], vol. 144, p. 432–441, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>.

Wang, J.; Wu, H.; Tam, V.W Y. & Zuo, J. (2019). Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*, 206, 1004-1014 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.170>

Zhang, M.; Li, W.; Wang, Z. & Liu, H. (2023a) Urbanization and production: Heterogeneous effects on construction and demolition waste. *Habitat International*, 134, 102778, <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102778>

Zheng, L.; Wu, H.; Zhang, H.; Duan, H.; Wang, J.; Jiang, W.; Dong, B.; Liu, G.; Zuo, J. & Song, Q. (2017) Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construction Building Materials*, 136, 405-413 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>

ZORDAN, Sergio Eduardo. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. jun. 1997. Universidade Estadual de Campinas, jun. 1997. DOI: 10.47749/T/UNICAMP.1997.115276. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=465170>