

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS DE AÇO NO COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO
DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS**

HUMBERTO RODRIGUES TORRES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE (UENF)
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ
FEVEREIRO - 2019

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS DE AÇO NO COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO
DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS**

HUMBERTO RODRIGUES TORRES

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

Orientador: Prof. Sergio Luis González Garcia

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE (UENF)
CAMPOS DOS GOYTACAZES-RJ
FEVEREIRO - 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

T693

Torres, Humberto Rodrigues.

Influência do teor de fibras de aço no comportamento ao atrito-cisalhamento de concretos com agregados reciclados / Humberto Rodrigues Torres. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.

140 f. : il.

Bibliografia: 113 - 124.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2019.

Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. agregado reciclado. 2. concreto. 3. push-off. 4. fibras de aço. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

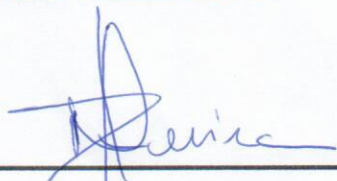
CDD - 624

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS DE AÇO NO COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO
DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS**

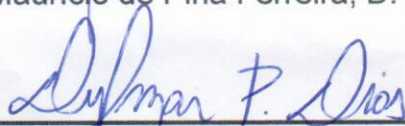
HUMBERTO RODRIGUES TORRES

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

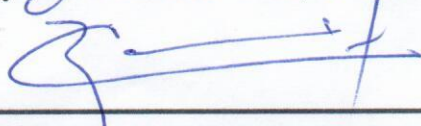
Comissão examinadora:



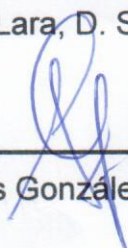
Prof. Maurício de Pina Ferreira, D. Sc. - UFPA



Prof. Dylmar Penteado Dias, D. Sc. - LECIV-UENF



Rancés Castillo Lara, D. Sc. - LECIV-UENF



Prof. Sergio Luis González Garcia, D. Sc. - LECIV-UENF

Orientador

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.”
(Marthin Luther King).

AGRADECIMENTOS

A realização de uma importante etapa marcada por uma felicidade imensa que me traz a uma impreterível reflexão. Ao final dessa jornada, recordo que a cada passo que foi dado para alcançar esse objetivo Deus colocava importantes pessoas em meu caminho para que com a ajuda delas eu pudesse atingir esse sonho. Dessa forma, gostaria de, nesse curto espaço, mas nem por isso menos importante, de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma, seja com pequenos gestos, fizeram parte da minha história e contribuíram de forma decisiva para essa realização, tornando pequenos momentos, inesquecíveis recordações e eternos agradecimentos.

Agradeço primeiramente à Deus pela força, determinação e coragem que me proporcionou para alcançar esse objetivo. Agradeço pelo seu amor imensurável e sua bondade infinita que me ajudou a seguir sempre em frente e a nunca desistir. Agradeço por ele colocar grandes pessoas em meu caminho, pois sem elas não conseguiria chegar ao fim. Agradeço pela paz, tranquilidade, motivação, pelo respeito, e pelo infinito amor que me renova a cada dia. Obrigado por estar sempre ao meu lado e por estar presente em minha vida.

Aos meus pais por sempre me incentivarem a trilhar nos caminhos da educação, por se esforçarem para que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço a eles por eu ser essa pessoa que me tornei. Agradeço a meus irmãos por cada dificuldade que tive, eles estavam sempre ao meu lado para me apoiar e ajudar.

Agradeço à minha esposa por estar sempre ao meu lado me incentivando a chegar ao fim, me apoiando em todas as decisões, afinal em nosso tempo de vida, estamos mais tempos juntos do que separados. Agradeço, todos os dias, à Deus por ter colocado você em minha vida e por ter me dado o maior presente, meu filho, que sem entender ainda, me motivou a buscar um objetivo maior para nossa família.

Ao meu orientado e professor Sergio Luis por ter me apoiado e incentivado desde o início para que eu pudesse realizar o meu melhor. Por sempre estar disposto a ajudar, independente do horário e lugar. E hoje agradeço a Deus por ter colocado você em meu caminho, pois sei que não teria melhor pessoa.

A meus amigos que compartilharam comigo esse trabalho. Juliana que palavras não expressam minha gratidão, sem dúvida essencial a realização dessa pesquisa, ao Lucas que compartilhou inúmeras horas comigo no laboratório com realizações de vários ensaios, ao Rodrigo Pierott pela grande amizade que foi criada e pela ajuda essencial ao longo dessa jornada, sendo peça chave para o desenvolvimento e término dessa pesquisa, ao Pedro Augusto que sem sua compreensão e seu coração enorme não teria nem começado essa jornada em minha vida e tantos outros.

À CAPES pela contribuição financeira e pelo desenvolvimento dessa pesquisa.

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações iniciais.....	01
1.2 Objetivos	08
1.3 Justificativas.....	08
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Transferência de tensões de cisalhamento entre interfaces de concreto	10
2.2 Transferência de cisalhamento pela superfície de contato.....	11
2.3 Transferência de cisalhamento pela armadura transversal à interface...	12
2.4 Teoria atrito-cisalhamento.....	12
2.5 Recomendações práticas normativas para atrito-cisalhamento.....	18
2.6 Ensaio <i>push-off</i>	19
2.7 Agregado reciclado	19
2.8 Dosagem de agregados reciclados	21
2.9 Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado.....	23
2.10 Concreto com fibras.....	24
2.11 Fibras de aço	26
2.12 Interação fibra-matriz.....	31
2.13 Pesquisas relacionadas à transferência de tensões de cisalhamento em concretos com agregados reciclados	32
2.14 Pesquisas relacionadas a concretos reforçados com fibras de aço.....	42
2.15 Considerações gerais	53
CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
3.1 Considerações gerais	54
3.2 Materiais.....	55
3.2.1 Cimento de alta resistência inicial.....	55
3.2.2 Agregados.....	55
3.2.2.1 Agregado miúdo	55
3.2.2.2 Agregado graúdo.....	56
3.2.3 Água	56
3.2.4 Aditivo químico	56
3.2.5 Armadura	56
3.2.6 Fibras de aço	58
3.3 Produção do agregado reciclado.....	59
3.3.1 Coleta dos corpos de prova de concreto utilizados como agregado reciclado.....	59

3.3.2 Britagem.....	60
3.3.3 Peneiramento, pesagem e armazenamento	61
3.4. Caracterização dos agregados	62
3.4.1 Composição granulométrica	62
3.4.2 Massa específica real e unitária	63
3.4.3 Absorção de água	63
3.4.4 Abrasão Los Angeles.....	64
3.4.5 Quantidade de argamassa antiga aderida no agregado reciclado	64
3.4.6 Massa específica real e absorção de água do agregado após ataque químico.....	65
3.5. Descrição dos corpos de prova	65
3.5.1 Corpos de prova <i>push-off</i>	67
3.6 Dosagem dos concretos.....	68
3.7. Fôrmas	69
3.8. Fabricação e cura dos concretos	70
3.9 Caracterização dos concretos no estado fresco	71
3.10 Caracterização dos concretos no estado endurecido	72
3.11 Procedimento do ensaio <i>push-off</i> e instrumentação	73
CAPÍTULO IV – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
4.1 Caracterização dos agregados	75
4.1.1 Composição granulométrica do agregado miúdo.....	75
4.1.2 Composição granulométrica dos agregados graúdos.....	75
4.1.3 Massa específica real do agregado miúdo.....	76
4.1.4 Massa específica real e unitária dos agregados graúdos	76
4.1.5 Absorção de água dos agregados graúdos.....	77
4.1.6 Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos	78
4.1.7 Argamassa residual presente nos agregados graúdos reciclados	78
4.1.8 Massa específica real e absorção de água dos agregados graúdos reciclados após o ataque ácido	79
4.2 Caracterização do concreto no estado fresco	79
4.3 Caracterização do concreto no estado endurecido	80
4.3.1 Resistência à compressão	80
4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral	83
4.3.3 Absorção de água e massa específica real.....	87
4.4 Ensaio de <i>push-off</i>	87
4.4.1 Ensaio <i>push-off</i> para os corpos de prova da série 2	88
4.5 Deformação da armadura transversal	91
4.6 Discussão dos resultados dos ensaios <i>push-off</i>	93
4.6.1 Influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados empregados em concretos sem armadura transversal	95
4.6.2 Influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados empregados em concretos com armadura transversal	100
4.6.3 Influência das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal.	101
4.6.4 Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com resultados provenientes de equações propostas por outros autores e normas	104
4.6.5 Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com valores experimentais presentes na literatura.....	107

4.7 Análise quantitativa das fibras de aço na superfície de ruptura dos corpos de prova <i>push-off</i>	108
--	-----

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
5.1 Conclusões	110
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	111

CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
---	-----

ANEXO	125
--------------------	-----

Resultados dos corpos de prova da série 1	126
--	-----

Resultados dos corpos de prova da série 3	129
--	-----

Resultados dos corpos de prova da série 4	133
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Configuração do concreto com agregado reciclado (adaptado de González <i>et al.</i> , 2016)	03
Figura 1.2 – Exemplos de transferência de cisalhamento: a) dente Gerber; b) viga composta; c) mísula (adaptado de Rahal, 2010 e Ahmed e Ansell, 2010).....	04
Figura 1.3 – Mecanismo de transferência de tensões cisalhantes (adaptado de Santos e Júlio, 2014).....	06
Figura 1.4 – Novelo formado por fibras de aço mal misturadas ao concreto (Figueiredo, 2000).....	07
Figura 2.1 – Mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento em uma interface de concreto com superfície rugosa (Araújo, 1997)	10
Figura 2.2 – Modelo atrito-cisalhamento (Santos e Júlio, 2014).....	13
Figura 2.3 – Teoria atrito-cisalhamento (Patnaik, 1992, adaptado por Araújo, 1977)	16
Figura 2.4 – Ensaio <i>push-off</i> (Kim, Trejo e Hueste, 2007).....	19
Figura 2.5 – Classificação e geometria das fibras de aço (Figueiredo, 2008)	27
Figura 2.6 – Esquema adotado para ensaio de dobramento da fibra de aço (Figueiredo, 2008).....	28
Figura 2.7 – Fibras emendadas pelo topo (Figueiredo, 2008).....	30
Figura 2.8 – Fibras sem ancoragem completa (Figueiredo, 2008)	31
Figura 2.9 – Concentração de tensões para: (a) concreto sem fibras; e (b) concreto com fibras (Figueiredo, 2000).....	32
Figura 2.10 – Comparação entre os resultados experimentais de Xiao <i>et al.</i> (2012) e equações da literatura de outros pesquisadores (adaptado de Xiao <i>et al.</i> , 2012) (Figueiredo, 2008).....	35
Figura 2.11 – Curva representativa da transferência de tensões cisalhantes de concretos com agregados reciclados (adaptada de Rahal e Al-Khaleefi, 2015) ..	37
Figura 2.12 – Influência da porcentagem de agregados reciclados na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017).....	39
Figura 2.13 – Influência da resistência à compressão do concreto original na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017).....	40
Figura 2.14 – Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal (Trindade, 2017).....	41

Figura 2.15 – Influência da taxa de armadura transversal na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017).....	41
Figura 2.16 – Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados sem fibras (Série UC1) (adaptada de Ahmed <i>et al.</i> , 2010)	44
Figura 2.17 – Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados com fibras (UC1-1, UC2-1, UC3-1 e UC4-1) (adaptada de Ahmed <i>et al.</i> , 2010).....	44
Figura 2.18 – Tensão de cisalhamento <i>versus</i> deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados com estribos (UC1-3, UC3-3, e UC4-4 com $\rho_{fy} = 6,9$ MPa) (adaptada de Ahmed <i>et al.</i> , 2010)	45
Figura 2.19 – Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de armadura transversal para corpos de prova não fissurados (Série UC, exceto UC2-3 e UC4-4) (adaptada de Ahmed <i>et al.</i> , 2010).....	45
Figura 2.20 – Curvas de tensões cisalhantes de concretos SCRC C35. (a) abertura da fissura (b) deslocamento vertical (adaptada de Ahmed <i>et al.</i> , 2010).....	48
Figura 2.21 – Curvas de tensões cisalhantes de concretos SCRC C60. (a) abertura da fissura (b) deslocamento vertical (adaptada de Khanlou <i>et al.</i> , 2012).....	48
Figura 2.22 – Comparação dos dados experimentais para um modelo de tensão última de cisalhamento do SFRC (adaptada de Khanlou <i>et al.</i> , 2012).....	49
Figura 2.23 – Curvas força cisalhante <i>versus</i> deslocamento vertical: (a) teor de fibras de aço; (b) resistência à compressão; (c) relação de substituição de RCA (adaptado de Gao <i>et al.</i> , 2017).....	51
Figura 3.1 – Ensaio de tração realizado na barra de 8 mm.....	57
Figura 3.2 – Curva tensão <i>versus</i> deformação para a armadura longitudinal e estribos de diâmetro de 8 mm.....	57
Figura 3.3 – Fibra de aço utilizada na pesquisa	58
Figura 3.4 – Corpos de prova armazenados e identificados para produção do agregado reciclado.....	59
Figura 3.5 – Britador de mandíbula: (a) representação esquemática do britador de mandíbula (Figueira <i>et al.</i> , 2004); (b) britador de mandíbula utilizado nessa pesquisa	60

Figura 3.6 – Processo de fabricação e britagem (a) quebra dos corpos de prova para produção do agregado graúdo; (b) entrada no britador; (c) material na saída do britador	61
Figura 3.7 – Processo de peneiramento: (a) material retido na peneira de 4,75 mm; (b) material retido na peneira de 12,5 mm	61
Figura 3.8 – Determinação da massa específica real do agregado miúdo: a) início do ensaio; b) final do ensaio.....	63
Figura 3.9 – Pesagem do agregado graúdo submerso: a) início do ensaio; b) término do ensaio.....	63
Figura 3.10 – Ação do ácido no agregado reciclado: a) Grupo I – 15 a 20 MPa; b) Grupo II – 35 a 40 MPa	64
Figura 3.11 – Realização do ensaio de ataque químico nos agregados reciclados: a) antes e depois do ataque químico no Grupo I; b) antes e depois do ataque químico no Grupo II.	65
Figura 3.12 – Distribuição esquemática dos corpos de prova	66
Figura 3.13 – Detalhamento dos corpos de prova sem estribos.....	67
Figura 3.14 – Detalhamento dos corpos de prova com 2 estribos de 8 mm.....	67
Figura 3.15 – Fôrmas metálicas para os corpos de prova <i>push-off</i> : (a) detalhe da fôrma sem a armadura; (b) detalhe da fôrma com a armadura disposta em seu interior	70
Figura 3.16 – Produção dos concretos: (a) detalhe do polvilhamento das fibras de aço; (b) detalhe da mistura dos materiais	71
Figura 3.17 – Lançamento dos concretos: (a) detalhe da moldagem dos corpos de prova; (b) detalhe do adensamento do concreto na mesa vibratória.....	71
Figura 3.18 – Ensaio do concreto no estado fresco: (a) detalhe do ensaio de <i>slump</i> (b) detalhe do ensaio do tempo VeBe	71
Figura 3.19 – Ensaio de resistência à compressão o concreto	72
Figura 3.20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	73
Figura 3.21 – Produção de corpos de prova: a) moldagem; b) corpos de prova para a realização do ensaio de absorção e massa específica	73
Figura 3.22 – Esquema dos <i>LVDTs</i> no ensaio <i>push-off</i>	74
Figura 3.23 – Posicionamento dos <i>LVDTs</i> nos corpos de prova.....	74
Figura 3.24 – Posicionamento <i>strain gages</i> nos estribos das armaduras	74

Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo	75
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos	76
Figura 4.3 – Resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados em função do teor de fibras de aço	81
Figura 4.4 – Resistência à compressão do concreto com agregado reciclado com adição de fibras de aço em relação ao estudo de Trindade (2017).....	82
Figura 4.5 – Resistência à compressão dos concretos com agregados naturais e reciclados com fibras em relação ao de Trindade (2017), sem fibras.	83
Figura 4.6 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados em função do teor de fibras de aço	84
Figura 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto com agregado reciclado com adição de fibras de aço em relação aos resultados de Trindade (2017), sem fibras	86
Figura 4.8 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados naturais e reciclados com adição de fibras de aço dessa pesquisa em relação ao estudo de Trindade (2017)	86
Figura 4.9 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	88
Figura 4.10 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	88
Figura 4.11 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5	89
Figura 4.12 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	90
Figura 4.13 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	90
Figura 4.14 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5	91
Figura 4.15 – Curvas tensão cisalhante <i>versus</i> deformação da armadura transversal para o CPn 3 40-2-50-0,5	92
Figura 4.16 – Curvas tensão cisalhante <i>versus</i> deformação da armadura transversal para o CPn 3 40-2-50-1,5.....	92
Figura 4.17 – Curva tensão cisalhante <i>versus</i> deformação da armadura transversal para o CPn 4-2-0-0,5.....	93

Figura 4.18 – Curvas tensão cisalhante <i>versus</i> deformação da armadura transversal para o CPn 4-2-0-1,5.....	93
Figura 4.19 – Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo I na resistência ao cisalhamento	95
Figura 4.20 – Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo II na resistência ao cisalhamento	97
Figura 4.21 – Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado dos Grupos I e II em relação ao estudo de Gao <i>et al.</i> (2017)	99
Figura 4.22 – Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo II, com armadura transversal, na resistência ao cisalhamento.....	100
Figura 4.23 – Comparação das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal dos concretos do Grupo I	102
Figura 4.24 – Comparação das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal dos concretos do Grupo II	103
Figura 4.25 – Gráfico comparativo entre os resultados experimentais deste trabalho e os obtidos por diferentes pesquisadores.....	107
Figura 4.26 – Detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova da série CPn 1-20-0-50-0,5.....	117
Figura 4.27 – Detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova da série CPn 1-20-0-50-1,5.....	117
Figura A.1 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	126
Figura A.2 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	126
Figura A.3 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5	127
Figura A.4 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	128
Figura A.5 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	128
Figura A.6 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5	129
Figura A.7 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-0,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	130

Figura A.8 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-0,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	130
Figura A.9 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 3 40-0-50-0,5	131
Figura A.10 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-1,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	132
Figura A.11 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-1,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	132
Figura A.12 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 3 40-2-50-1,5	133
Figura A.13 – Corpos de prova CPn 4-0-0-0,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	134
Figura A.14 – Corpos de prova CPn 4-0-0-0,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	134
Figura A.15 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-0-0-0,5	135
Figura A.16 – Corpos de prova CPn 4-0-0-1,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	136
Figura A.17 – Corpos de prova CPn 4-0-0-1,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	136
Figura A.18 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-0-0-1,5	137
Figura A.19 – Corpos de prova CPn 4-2-0-0,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	137
Figura A.20 – Corpos de prova CPn 4-2-0-0,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	138
Figura A.21 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-2-0-0,5	139
Figura A.22 – Corpos de prova CPn 4-2-0-1,5 antes da realização do ensaio <i>push-off</i>	139
Figura A.23 – Corpos de prova CPn 4-2-0-1,5 após a realização do ensaio <i>push-off</i>	140
Figura A.24 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-2-0-1,5	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações para transferência de cisalhamento (adaptado de Fonteboa <i>et al.</i> , 2010)	17
Tabela 2.2 – Coeficiente de atrito e tensão última de cisalhamento para diferentes interfaces.....	18
Tabela 2.3 – Requisitos especificados para fibras de aço (Figueiredo, 2008).....	28
Tabela 2.4 – Determinação do comprimento equivalente (Figueiredo, 2008).....	29
Tabela 2.5 – Requisitos de fator de forma mínimo das fibras de aço (Figueiredo, 2008)	30
Tabela 2.6 – Resumo das prescrições da ABNT NBR 15530 (2007) para um lote de fibras que deve ser submetido ao controle de recebimento	31
Tabela 2.7 – Resumo das dosagens dos corpos de prova <i>push-off</i> de Fonteboa <i>et al.</i> (2010).....	33
Tabela 2.8 – Resultados de força cortante última (Fonteboa <i>et al.</i> , 2010).....	33
Tabela 2.9 – Detalhe das dosagens avaliadas por Xiao <i>et al.</i> (2012).....	34
Tabela 2.10 – Resumo dos resultados dos ensaios <i>push-off</i> (Trindade, 2017)...	38
Tabela 2.11 – Propriedades e resultados dos ensaios de amostras não-fissuradas (UC) e pré-fissuradas (CR) – adaptada de Ahmed <i>et al.</i> (2010)	43
Tabela 2.12 – Propriedades das fibras de aço (adaptada de Khanlou <i>et al.</i> , 2012)	46
Tabela 2.13 – Composição das dosagens e propriedades do concreto (adaptada de Khanlou <i>et al.</i> , 2012)	47
Tabela 2.14 – Resistência à compressão e resultados dos ensaios de cisalhamento (adaptada de Khanlou <i>et al.</i> , 2012)	49
Tabela 2.15 – Proporções de mistura do concreto (adaptada de Gao <i>et al.</i> , 2017)	50
Tabela 2.16 – Resistência, <i>slump</i> e módulo de elasticidade (adaptada de Gao <i>et al.</i> , 2017)	52
Tabela 3.1 – Grupos de corpos de prova com agregados reciclados.....	54
Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas da armadura longitudinal e estribos.	57
Tabela 3.3 – Propriedades físicas das fibras de aço.	58
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas das fibras de aço.	58

Tabela 3.5 – Quantidade de amostra requerida para ensaios (NBR NM 26, 2009).	62
Tabela 3.6 – Detalhes dos corpos de prova de cada série.	66
Tabela 3.7 – Resumo da quantidade de corpos de prova para os ensaios <i>push-off</i>	68
Tabela 3.8 – Especificação dos materiais utilizados nas dosagens do concreto.	69
Tabela 3.9 – Ensaio para caracterização dos concretos no estado endurecido.	72
Tabela 4.1 – Massa específica real e massa unitária dos agregados graúdos....	77
Tabela 4.2 – Absorção de água dos agregados graúdos.	77
Tabela 4.3 – Abração Los Angeles dos agregados graúdos.	78
Tabela 4.4 – Argamassa residual presente nos agregados graúdos.....	78
Tabela 4.5 – Massa específica e absorção de água dos agregados graúdos reciclados após ataque ácido.	79
Tabela 4.6 – Caracterização do concreto no estado fresco.....	79
Tabela 4.7 – Resistência à compressão.	80
Tabela 4.8 – Resistência à compressão com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho.....	82
Tabela 4.9 – Resistência à tração por compressão diametral.	83
Tabela 4.10 – Resistência à tração por compressão diametral com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho.	85
Tabela 4.11 – Absorção de água e massa específica real.	87
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 2 40-0-50-0,5.....	89
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 2 40-0-50-1,5.....	90
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho	94
Tabela 4.15 – Valores dos deslocamentos vertical e horizontal das curvas médias dos concretos do Grupo I.	102
Tabela 4.16 – Valores dos deslocamentos vertical e horizontal das curvas médias dos concretos do Grupo II.	104
Tabela 4.17 – Comparação dos resultados experimentais dos corpos de prova sem estribos com os valores calculados por equações presentes na literatura.....	104

Tabela 4.18 – Comparação das resistências ao cisalhamento normalizadas pelo f_{cm} medidas e previstas dos corpos de prova com estribos com outras normas e autores.	105
Tabela 4.19 – Comparação das tensões máximas de cisalhamento experimentais dos corpos de prova sem estribos com equação proposta por <i>Gao et al.</i> (2017). 106	106
Tabela 4.20 – Análise quantitativa dos corpos de prova <i>push-off</i>	109
Tabela A.1 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 1 20-0-50-0,5.	127
Tabela A.2 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 1 20-0-50-1,5.	128
Tabela A.3 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 3 40-0-50-0,5.	130
Tabela A.4 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 3 40-0-50-1,5.	132
Tabela A.5 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 4-0-0-0,5.	134
Tabela A.6 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 4-0-0-1,5.	136
Tabela A.7 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 4-2-0-0,5.	138
Tabela A.8 – Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPn 4-2-0-1,5.	140

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS

Letras romanas maiúsculas

- A_c : área da interface do concreto;
- A_{sw} : área da armadura transversal;
- V : força cortante;
- V_f : porcentagem volumétrica de fibra de aço;
- V_u : força cortante última;
- F : 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 característica à compressão do concreto;
- $f_{ct,sp}$: resistência à tração indireta do concreto;
- f_y : tensão de escoamento da armadura;
- s : 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;
- τ_{max} : tensão de cisalhamento máxima;
- τ_{maxexp} : tensão de cisalhamento máxima experimental;
- τ_{maxcal} : tensão de cisalhamento máxima calculada;
- τ_u : tensão de cisalhamento última;
- τ_{cr} : tensão de cisalhamento crítica;
- μ : coeficiente de atrito;

ρ_y : constante que depende da massa específica do concreto;
 λ : fator de forma da fibra;
 σ_n : tensão normal externa 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 *versus* deformação;
 ε_u : deformação última da armadura na ruptura;
 ε_{st} : deformação da armadura longitudinal de tração;
 ϕ : diâmetro da armadura.

Abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;
LECIV: Laboratório de Engenharia Civil;
LMAV: Laboratório de Materiais Avançados;
UENF: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro;
RCD: Resíduo de Construção e Demolição;
CP: Corpo de prova;
NCA: Agregado natural;
RCA: Agregado reciclado;
SFRC: Concreto com fibras de aço;
SFRCAC: Concreto RCA com fibras de aço.

RESUMO

A sustentabilidade está presente em vários campos da construção civil, principalmente na utilização de materiais reciclados na produção de concretos estruturais como forma de minimizar os efeitos nocivos referentes à geração de resíduos sólidos na Indústria da Construção Civil. Nesse contexto, o estudo do comportamento mecânico de concretos produzidos com agregados reciclados tem sido tema de diversas pesquisas, com ênfase ao comportamento da transferência de tensões cisalhantes. Pesquisas anteriores demonstraram que a presença de agregados reciclados influencia na redução da resistência ao cisalhamento pela presença de argamassa antiga aderida à superfície desses agregados. Sendo assim, como meio de estudar o ciclo de aproveitamento desses materiais, o presente estudo teve como objetivo o estudo da adição de fibras de aço em concretos com agregados reciclados a fim de suprir a perda de resistência ao cisalhamento. Dessa forma, 30 corpos de prova do tipo *push-off* foram produzidos com teores de substituição de agregados reciclados de 50%. Além disso, variou-se as frações volumétricas de fibras de aço em 0,5 e 1,5% em relação ao volume de concreto. Foram estudadas duas classes de concretos que originaram os agregados reciclados, sendo elas 15 a 20 MPa e 35 a 40 MPa, assim como a taxa de armadura transversal com 0 e 2 estribos. Após a realização dos ensaios e análise dos resultados, conclui-se que as fibras de aço não aumentaram estatisticamente a resistência à compressão do concreto, porém, em relação à resistência à tração indireta, houve aumento de 106,5%. Os concretos com fibras de aço além de apresentarem comportamento menos frágil, apresentaram aumento da resistência ao cisalhamento dos concretos com agregados reciclados, superando os valores de referência para o Grupo II (35 a 40 MPa).

Palavras-chave: agregado reciclado, concreto, *push-off*, fibras de aço.

ABSTRACT

Sustainability is present in several fields of construction, especially when using recycled materials aiming to produce structural concrete as a way to minimize harmful effects from solid waste generated by the civil construction industry. In this context, the mechanical behavior of concretes produced with recycled aggregates has been the subject of several researches, emphasizing the shear stress transfer. Previous researches have shown that the presence of recycled aggregates affect the shear strength by the presence of old mortars adhered to the aggregate surface. Thus, as a means to study this material cycle of utilization, the present study aims to add steel fibers in order to retrieve the loss of shear strength. In this way, 30 push-off test specimens were produced with 50% of recycled aggregate replacement. In addition, the volumetric fraction of steel fibers varied by 0.5 and 1.5% in volume of concrete. Two original concretes classes were studied, being 15 to 20 MPa and 35 to 40 MPa, as well as the transverse reinforcement ratio with 0 and 2 stirrups. After the results analysis, it was concluded that the steel fibers did not statistically increase the compressive strength of the tested concretes, however, regarding the indirect tensile strength, there was an increase of 106.5%. Concrete with steel fibers, besides having a ductile behavior, showed an increase in shear strength when recycled aggregates, were used exceeding the reference values of Group II (35 to 40 MPa).

Keywords: recycled aggregate, concrete, push-off, steel fiber.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

Uma das atividades mais antigas que se tem conhecimento é a construção civil, que ainda hoje é executada de forma artesanal, gerando subprodutos em grandes quantidades e de diversas naturezas, sendo responsável pelo grande consumo de recursos naturais de fontes não renováveis (Boldrin *et al.*, 2006).

Com o reconhecimento de uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico, a Indústria da Construção Civil apresenta-se como grande geradora de impactos ambientais (Pinto, 2005). Cerca de 20 a 50% dos resíduos dos recursos naturais de todo o planeta são gerados pela construção civil (John, 2001).

Devido ao crescimento acelerado e crescente da urbanização, com alto adensamento nas cidades, expansão do setor construtivo, constante e crescente exploração de recursos naturais, a geração de resíduos da construção e demolição (RCD) atingiu índices extremos, como consequência de desperdícios nas obras de construções e reformas e demolições (Morais, 2006).

Diante desse crescente crescimento de resíduos da construção e demolição (RCD), sua representação, em relação ao fluxo de resíduos sólidos gerados pelas cidades dos países desenvolvidos, é de aproximadamente 20 a 30% superior à totalidade dos resíduos sólidos, sendo que esse número pode ser ainda maior quando se compara aos demais países (Chung e Lo, 2003; Costa *et al.*, 2007). Segundo Pinto (2005), nas cidades brasileiras o RCD representa de 41 a 70% da massa total de resíduos sólidos urbanos.

Dessa forma, evidencia-se que a demanda crescente por recursos naturais e o aumento exponencial de RCD, que são descartados frequentemente de forma a acarretar danos ambientais incalculáveis, buscam por uma forma de mitigar os efeitos nocivos que acarretam ao meio ambiente e que seja racional e econômica, minimizando com isso tanto a diminuição da exploração desses recursos naturais como descarte nocivo do RCD no meio ambiente.

Dentro desse contexto, segundo Trigueiro (2005), o conceito de sustentabilidade tem seu marco no início da década de 1980, introduzido por Lester Brown, fundador do Worldwatch Institute, definindo “comunidade sustentável” como sendo aquela capaz de satisfazer as próprias necessidades sem reduzir as oportunidades das gerações futuras. Dessa forma, sustentabilidade representa para Brown um processo que possui continuidade no tempo e que possui características de: (a) manter padrão positivo de qualidade; (b) apresentar, no menor espaço de tempo possível, autonomia de manutenção (contar com suas próprias forças); (c) pertencer simbioticamente a uma rede de coadjuvantes também sustentáveis e; (d) promover a dissipação de estratégias e resultados em detrimento de qualquer tipo de concentração e/ou centralidade, tendo em vista a harmonia das relações sociedade-natureza.

Segundo Manzini e Vezzolli (2005), sustentabilidade refere-se às condições sistêmicas, segundo as quais, em nível regional e planetário, as atividades humanas não devem interferir nos ciclos naturais em que se baseia tudo o que a resiliência do planeta permite e, ao mesmo tempo, não devem empobrecer seu capital, que será transmitido às gerações futuras.

Muitos passivos advindos da degradação ambiental oriunda de segmentos da construção civil destinam histórica e intensivamente a insumos de energia não renováveis e matéria-prima da natureza. Dessa forma, há necessidade de compensação desses passivos da degradação ambiental, além de conter seu aumento, que vem se acumulando de forma intensa nas últimas décadas. Com isso, por meio da ação de políticas, estratégias e práticas que permitam inserir parâmetros ecológicos e de inclusão social diferenciados em cada estágio da cadeia produtiva da Construção Civil, a sustentabilidade poderá ser alcançada e dessa forma suprir as demandas desse ramo que aumenta progressivamente, minimizando os efeitos nocivos proporcionados por desperdícios e má utilização de insumos de energia não renováveis e matéria-prima.

Atualmente, há a disponibilidade de tecnologias oriundas de institutos de pesquisa e desenvolvimento voltados para soluções alternativas, como a utilização de agregados reciclados como forma de substituições de insumos, com análises realizadas dentro do ciclo de vida dos produtos. Dessa forma, desde a concepção do projeto, passando por todos os ciclos de execução e

gestão das obras, deverá ser considerada a sustentabilidade em sua utilização (I Seminário Construção Civil e Sustentabilidade, RJ, 2008).

É possível verificar a grande variabilidade de vantagens com a utilização do processo de reciclagem ligada diretamente à grande disponibilidade de resíduos gerados em várias áreas da indústria da Construção Civil.

Dentro deste cenário, vem sendo observado um relativo crescimento dos estudos relacionados aos materiais descartados provenientes desse setor, sendo chamados de resíduos de construção e demolição (RCD). Segundo González *et al.* (2016), a utilização de concretos reciclados representa um fechamento no ciclo de produção dos materiais construtivos.

No que se referem aos agregados reciclados, quando estes são incorporados em argamassas de cimento, com utilização de agregados reciclados provenientes de estruturas de concretos demolidos, os agregados são revestidos por uma camada de argamassa velha e de pior resistência, a qual não pode ser facilmente removida durante o processo de reciclagem (Figura 1.1).

Com isso, para compensar essa ligação mais fraca entre a matriz e o agregado reciclado há a necessidade da utilização de um método de proporção, com o objetivo de se alcançar uma resistência comparável com a dos concretos convencionais, havendo, no entanto, a necessidade de estudos mais precisos ao se utilizar agregado reciclado em elementos estruturais (Xiao *et al.*, 2012).

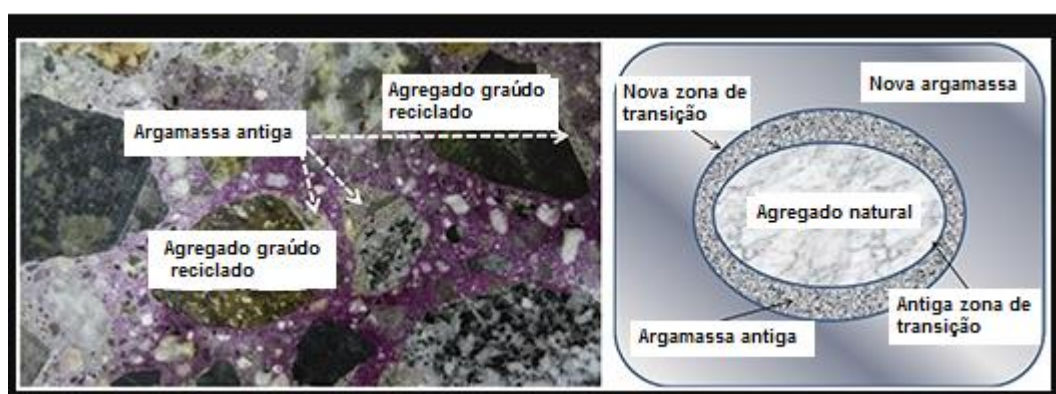


Figura 1.1 – Configuração do concreto com agregado reciclado (adaptado de González *et al.*, 2016).

Vários autores, como Zordan (1997), Bazuco (1999), Leite (2001), Trindade (2017), vem estudando o comportamento desses agregados reciclados, percebendo-se com isso que o estudo do comportamento das propriedades dos concretos reciclados é uma questão primordial no que tange à aplicação em elementos estruturais.

Além disso, outro assunto que vem sendo crescentemente estudado diz respeito à capacidade de transferência de tensões cisalhantes, mais conhecido como a teoria atrito-cisalhamento.

Alguns elementos de concreto armado ou partes deles, em seu dimensionamento, estão sujeitos a esse tipo de transferência de tensões cisalhantes, principalmente através de um plano particular onde se torna crítica. Determinadas condições, como a ligação de elementos de concreto pré-moldado com peças de concreto moldados *in loco*, dente Gerber, mísula entre outros, são exigidas o cálculo da quantidade de armadura necessária para resistir à transferência de cisalhamento na interface entre dois elementos (Figura 1.2).

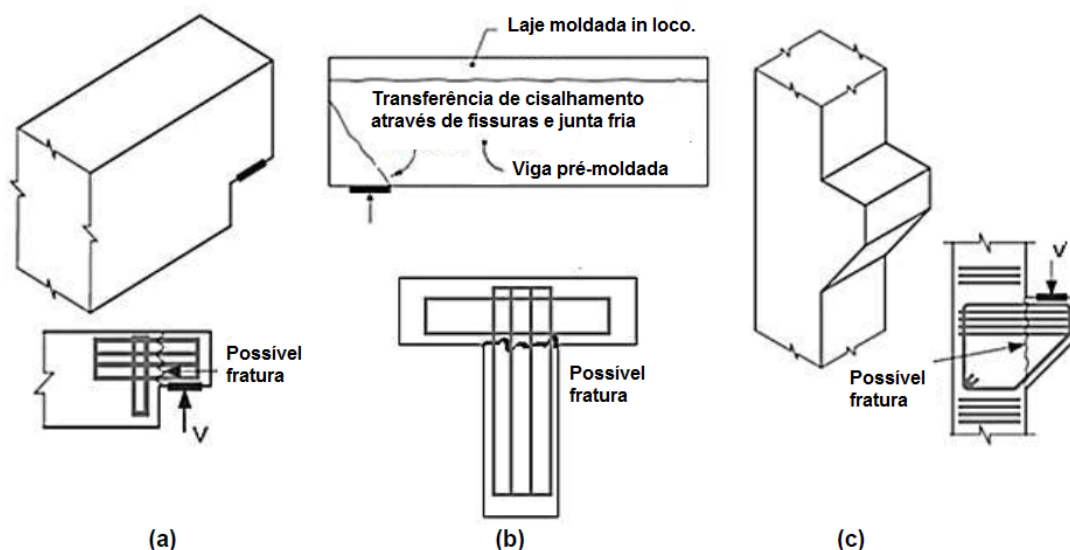


Figura 1.2 – Exemplos de transferência de cisalhamento: (a) dente Gerber; (b) viga composta; (c) mísula (adaptado de Rahal, 2010 e Ahmed e Ansell, 2010).

Segundo Mattock (2001), existem duas situações distintas em relação ao conceito da transferência de tensões cisalhantes que merecem um

destaque maior. Uma diz respeito a seções críticas não fissuradas nas quais microfissuras são produzidas em uma direção diagonal ao plano de corte, proporcionando o conceito das bielas inclinadas, que por sua vez agem em conjunto com a armadura do plano de cisalhamento, em que o escoamento da armadura leva à ruptura por cisalhamento, ocorrendo ruptura das bielas. A outra situação se verifica quando se proporciona um plano fissurado, onde, através desse plano, o cisalhamento atua ocasionando o deslizamento entre as faces. Essas faces geralmente são ásperas e irregulares, sendo o deslizamento, acompanhado pela separação das faces da fissura, suficiente para tensionar a armadura que atravessa a fissura até o limite de escoamento (efeito de pino).

Assim, têm-se três componentes que estão diretamente relacionados ao comportamento da transferência de tensões cisalhantes: irregularidades da superfície (coesão), atrito entre as faces que se deslocam e armadura que transpassa a interface. Considerando o caso de se ter um plano fissurado somente a parcela do atrito é avaliada e, em algumas vezes, considera-se também a parcela da coesão.

A Figura 1.3 representa um esquema desses três componentes responsáveis pela transferência de tensões cisalhantes.

Segundo Santos e Júlio (2012), a componente da coesão se dá por ligação química entre o antigo e o novo concreto, até se atingir a capacidade de pico de carga; a partir daí as tensões de cisalhamento são transferidas pelo mecanismo de engrenamento dos agregados. Ao se atingir a capacidade de pico de carga há o desprendimento na interface concreto-concreto, ocorrendo a transferência das tensões de cisalhamento pelo intertravamento mecânico. Se a interface for submetida a esforços de compressão, as tensões de cisalhamento serão transferidas por atrito-cisalhamento. A partir desse ponto, com o aumento das tensões de cisalhamento, ocorrerá maior deslocamento entre as partes do concreto, tensionando a armadura que atravessa a interface, que gerará compressão na interface, transferindo, assim, a carga de cisalhamento por atrito. Além disso, a armadura de cisalhamento também será submetida ao cisalhamento, ocorrendo o chamado efeito de pino, até o seu escoamento.

Evidencia-se com isso o surgimento da teoria do atrito-cisalhamento, em que atua simultaneamente tensões normais de compressão e tensões cisalhantes ao longo da interface concreto-concreto, sendo que essa teoria assegura apenas a componente do atrito e seu dimensionamento considera a influência da armadura que atravessa a interface da fissura e forças externas que atuam normal ao plano de cisalhamento (Trindade, 2017).

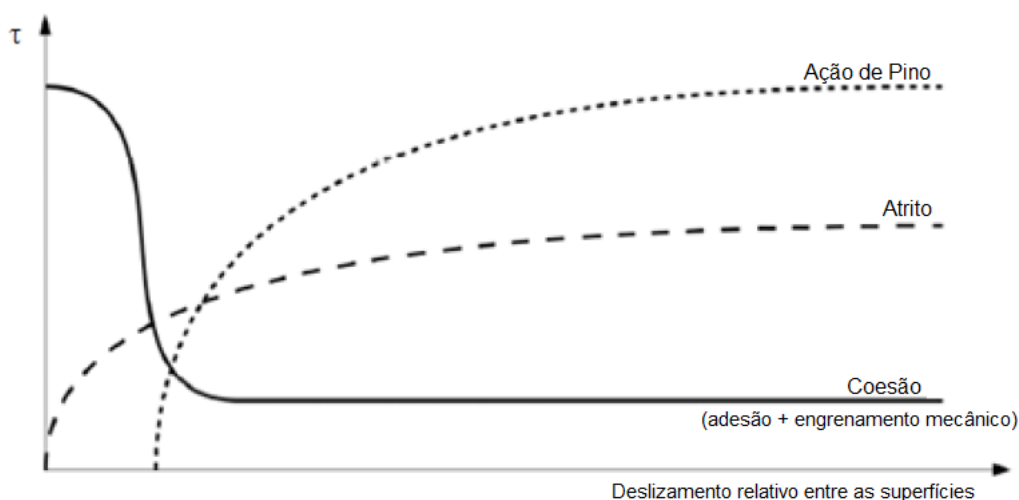


Figura 1.3 – Mecanismo de transferência de tensões cisalhantes (adaptado de Santos e Júlio, 2014).

Algumas pesquisas, como as de Rahal e Al-Khaleefi (2015), e Trindade (2017), foram desenvolvidas recentemente, no que diz respeito à influência do teor de agregados reciclados provenientes de concretos simples com diferentes resistências, no comportamento ao atrito-cisalhamento, verificando a ocorrência de queda na resistência ao cisalhamento do concreto com a utilização de agregados reciclados.

Diante do exposto, destaca-se a possibilidade de suprir as deficiências provocadas pelo agregado reciclado por meio da adição de fibras de aço (CRFA) ao concreto. Pode-se caracterizar esse material em duas fases distintas: uma delas a fase concreto e a outra a das fibras de aço, que podem ser definidas como elementos que possuem o comprimento muito superior em relação a maior dimensão da seção transversal. Dessa forma, quando surge o aparecimento de fissuras no concreto, as fibras começam a atuar na contenção da propagação dessas fissuras, melhorando as características de resistência à

tração e diminuindo os esforços dinâmicos, como a fadiga, do concreto (Figueiredo, 2011).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o tipo de fibra e a quantidade empregada nos concretos, influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibra de aço, classificando a fração volumétrica das fibras em três categorias:

- baixa fração volumétrica: menor que 1% do volume de concreto;
- moderada fração volumétrica: entre 1% e 2% do volume de concreto;
- alta fração volumétrica: maior que 2% do volume de concreto.

Uma das principais desvantagens da utilização das fibras de aço refere-se à diminuição da trabalhabilidade do concreto, ocorrendo, em alguns casos, a formação de novelos, causando não só redução do teor de fibras homogeneamente distribuídas, como também a formação de pontos porosos no local onde se encontrar cada novelo (Figueiredo, 2005).

A Figura 1.4 mostra um exemplo de novelo originado de concreto mal misturado, sendo a possível causa a adição das fibras à betoneira de forma errada, ou seja, virando o saco ou caixa de uma só vez.



Figura 1.4 – Novelos formados por fibras de aço mal misturadas ao concreto (Figueiredo, 2000).

Dessa forma, uma dosagem adequada faz-se necessária para que se possa atingir os resultados esperados com adição das fibras de aço. Além disso, estudos mais aprofundados deverão ser realizados, pois há literatura restrita de concretos com agregados reciclados com adição de fibras de aço.

1.2 – Objetivos

Esse trabalho teve como objetivo contribuir com pesquisas relacionadas ao atrito-cisalhamento e buscar, por meio da adição de fibras de aço, suprir a perda de resistência ao cisalhamento pela utilização do agregado reciclado. Os objetivos específicos foram:

- a) produzir agregados reciclados e promover a caracterização destes e dos agregados naturais, para permitir a comparação das propriedades entre ambos;
- b) confeccionar concretos convencionais e com agregados reciclados com adição de fibras de aço para avaliação das propriedades mecânicas e posterior comparação entre as mesmas e com resultados presentes na literatura;
- c) quantificar a capacidade última ao cisalhamento por meio do ensaio *push-off* em concretos com agregado reciclado e fibras de aço com diferentes resistências do concreto antigo para a produção de agregados reciclados;
- d) analisar qualitativamente e quantitativamente o comportamento da interface dos corpos de prova *push-off* fabricados com agregados reciclados e adição de fibras de aço;
- e) identificar o teor de fibras ideal para atingir a mesma resistência ao cisalhamento do concreto de referência;
- f) comparar os resultados experimentais deste trabalho com os resultados presente na literatura.

1.3 – Justificativas

Com o aumento da população no planeta, grandes quantidades de recursos naturais e de energia são consumidas. Mudanças de postura em relação ao meio ambiente precisam ser implantadas, pois há necessidade de grandes quantidades de recursos naturais necessários ao desenvolvimento da indústria da construção civil.

Algumas pesquisas recentes no que tange o conceito de transferência de tensões pelo atrito-cisalhamento com utilização de agregados reciclados, como forma de diminuir esses impactos ambientais, vêm sendo realizadas, tais

como a influência do teor de agregados reciclados no comportamento ao atrito-cisalhamento (Trindade, 2017), e o comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado reforçado com fibra de aço sob cisalhamento direto (Gao *et al.*, 2017), chegando à conclusão de que há diminuição da resistência ao atrito-cisalhamento do concreto com variação do teor de agregado reciclado em com alteração da resistência do concreto reciclado.

Dentro deste conceito, este trabalho visou contribuir com pesquisa sobre a teoria atrito-cisalhamento com utilização de materiais reciclados por meio da inserção de fibras de aço como forma de mitigar a perda de resistência ao atrito-cisalhamento devido à utilização do agregado reciclado, tendo como variáveis: taxa de armadura de confinamento, resistência do agregado reciclado e teor de fibra de aço.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi realizada a abordagem de assuntos importantes e alguns assuntos fundamentais para entender e embasar a pesquisa proposta neste trabalho.

2.1 – Transferência de tensões de cisalhamento entre interfaces de concreto

Quando tensões cisalhantes atuam em juntas formadas por ligações de concretos de diferentes idades, surgem tensões contrárias que tendem a equilibrar as ações. Essa junta pode ser formada pela ruptura de uma peça pré-moldada com concreto moldado no local ou pela ruptura de uma peça monolítica formada a partir de um plano de cisalhamento. O deslizamento na interface acontece quando é submetida a esforços de cisalhamento, resultando em um movimento de translação entre as duas superfícies. Caso a superfície da interface seja rugosa, o movimento de translação será acompanhado de um afastamento dessas peças. Dessa forma, são mobilizados dois mecanismos de transferência de esforços, sendo estes: a transferência pela superfície de contato e a transferência pela armadura transversal à interface (Araújo, 1997). A descrição desse mecanismo encontra-se na Figura 2.1.

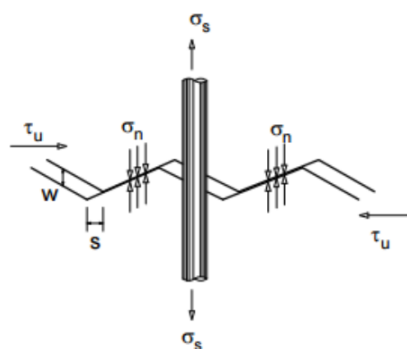


Figura 2.1 – Mecanismo de transferência de esforços de cisalhamento em uma interface de concreto com superfície rugosa (Araújo, 1997).

onde:

σ_s : é a tensão de tração na armadura;

σ_n : é a tensão normal à interface de concreto;

w : é a separação transversal entre as superfícies (abertura de fissura);

s : é o deslizamento relativo entre as superfícies (*slip*);

τ_u : é a tensão de cisalhamento transmitida pela interface.

2.2 – Transferência de cisalhamento pela superfície de contato

De acordo com Araújo (1997), o mecanismo de transferência dos esforços de cisalhamento pela superfície de contato assemelha-se ao conceito de transferência de esforços da armadura para concreto por meio de tensões de aderência e pode ser dividido em três parcelas:

a) transferência por adesão ou aderência

O primeiro mecanismo a ser mobilizado ao se aplicar esforços de cisalhamento, a aderência depende principalmente da rugosidade e da limpeza das partes. Esses esforços são resistidos pela adesão entre as partículas internas do aglomerante quando as solicitações são pequenas. Esse primeiro mecanismo, sozinho, sobre efeito de pequenos deslocamentos é destruído facilmente, não sendo suficiente para uma boa transferência;

b) transferência por atrito

Caso a adesão seja rompida, surgirá uma resistência por atrito entre as superfícies de contato, para um deslizamento relativamente pequeno, desde que se garanta que nas superfícies de contato existam tensões normais à interface. Essas tensões podem ser garantidas por ações de forças externas ou pela reação da armadura normal à interface quando esta é solicitada à tração. Essa parcela de resistência é diretamente influenciada pela rugosidade da superfície e possui um importante papel na transferência dos esforços de cisalhamento, após o deslocamento entre as partes em contato;

c) transferência por ação mecânica

Esse último tipo de aderência ocorre a partir do engrenamento mecânico entre as duas superfícies de contato, formando “dentes de concreto” que são solicitados ao cisalhamento, ocorrendo o deslizamento relativo entre as superfícies.

No caso de superfícies rugosas, esse tipo de transferência pode ser garantido pela atuação do agregado graúdo que atravessa a interface de

deslizamento, ocorrendo dessa forma um mecanismo de engrenamento entre esses agregados em lados opostos da interface. Caso os esforços cisalhantes continuem aumentando, fissuras começarão a surgir na superfície até que aconteça o deslizamento entre as partes, deixando de existir a partir desse ponto a parcela de adesão, sendo apenas o atrito e a ação mecânica responsáveis pela transferência de esforços.

2.3 – Transferência de cisalhamento pela armadura transversal à interface

De acordo com Araújo e Debs (2001), existe uma contribuição da armadura transversal à interface no que se refere à transferência de esforços de cisalhamento, dado pelos seguintes parâmetros:

a) efeito de pino

Em relação à superfície de contato, o deslizamento relativo entre as partes gera um efeito de corte na armadura transversal à interface; dessa forma essa armadura cria uma parcela de resistência que é adicionada à resistência fornecida pela superfície de contato;

b) tensão normal à interface

Há uma tendência à separação entre as partes da superfície de contato caso essa seja rugosa, em conjunto ao deslizamento relativo tendendo a alongar a armadura. Nesse caso, haverá aplicação de uma tensão normal à interface pela reação da armadura, que aumentará a resistência por atrito entre as superfícies de contato.

2.4 – Teoria atrito-cisalhamento

O atrito-cisalhamento é normalmente conhecido como um importante mecanismo de transferência de carga ao longo da interface concreto-concreto, que se encontra sujeita simultaneamente à ação do cisalhamento e da compressão normal.

Buscando a avaliação da resistência ao cisalhamento em interfaces de concreto atravessadas por armaduras, foi proposto inicialmente por Birkeland e Bikerland (1966) um estudo conhecido como teoria atrito-cisalhamento (*shear-friction*). Segundo Santos e Júlio (2014), esse modelo tem como objetivo

principal analisar a resistência ao cisalhamento longitudinal entre duas partes de concreto que constituem uma interface.

Segundo Santos e Júlio (2012), a teoria atrito-cisalhamento decorre de determinadas considerações assumidas, sendo que, caso não haja perda de aderência em uma interface, havendo apenas transferência de tensão de cisalhamento, não se aplica a teoria do atrito-cisalhamento; porém, caso essa transferência de tensões de cisalhamento na interface gere um deslizamento relativo nessa interface e, além disso, se nesse comportamento mecânico estiver atuando a coesão, o atrito e o efeito de pino, aplica-se o conceito dessa teoria.

Conforme Santos e Júlio (2014), o dimensionamento da teoria do atrito-cisalhamento em decorrência ao deslizamento relativo na interface concreto-concreto tem as seguintes considerações:

- a) tensões de tração na armadura (σ_n) e de compressão na interface (σ) são geradas quando se tem uma tendência ao aumento da largura da fissura existente;
- b) a transferência de tensões de cisalhamento (τ) na interface é realizada apenas por atrito.

A Figura 2.2 representa de forma esquemática esse modelo da teoria.

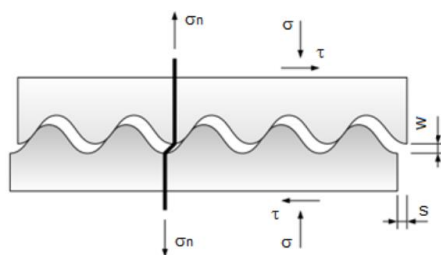


Figura 2.2 – Modelo atrito-cisalhamento (Santos e Júlio, 2014).

Segundo Wernager (2015), há um deslizamento entre as superfícies devido à força de cisalhamento. Os mecanismos de intertravamento do agregado, a interface de atrito-cisalhamento, a ação de pino da armadura e a coesão existente nas superfícies de contato atuam em união para resistir ao cisalhamento aplicado.

Segundo Fonteboa *et al.* (2010), são considerados os seguintes parâmetros que afetam a capacidade do atrito-cisalhamento:

- engrenamento do agregado e o atrito: resultado da rugosidade da face fissurada. Existem dois tipos de classificação, uma denominada local e outra global. A primeira refere-se quando o deslizamento ocorre em um comprimento menor que o tamanho médio do agregado; já o segundo se dá quando esse deslizamento passa a ocorrer em uma escala maior. Ressalta-se que devem ser levados em consideração do ponto de vista macroscópico três parâmetros relacionados ao engrenamento entre os agregados: largura da fissura, resistência do concreto e rigidez da restrição lateral; já em consideração ao aspecto microscópico esse mecanismo leva em conta o contato existente entre os agregados graúdos em uma face da fissura e a argamassa localizada no lado oposto da fissura. Conclui-se, com isso, a importância das propriedades mecânicas da argamassa e da densidade volumétrica do agregado graúdo e a transferência de tensões cisalhantes em um plano inicialmente fissurado (Trindade, 2017);
- força de compressão aplicada normal à interface: contribui para o aumento do mecanismo de engrenamento do agregado e do atrito;
- armadura que atravessa a interface: gera tensões de compressão na interface devido ao alongamento da armadura entre as fissuras, contribuindo para a força externa. Outro importante mecanismo produzido pela armadura é o chamado “efeito de pino”, devido à flexão e cisalhamento que ocorrem simultaneamente pela abertura da fissura.
- resistência à compressão do concreto: a ruptura da interface responsável pela transmissão das forças de cisalhamento é provocada pela perda de contato entre as faces da fissura, que por sua vez ocorre devido ao esmagamento dos agregados e da matriz de cimento quando a capacidade total desses componentes é atingida. Dessa forma, observa-se que a

transferência de tensões cisalhantes é diretamente influenciada pela resistência à compressão do concreto, uma vez que essa resistência correlaciona-se com a capacidade última, que acarreta o esmagamento do agregado graúdo.

Segundo Araújo (1997), a teoria atrito-cisalhamento recomenda a substituição da interface rugosa por dentes de serra sem atrito com inclinação igual a $tg\phi$. Com aplicação de uma força horizontal, há deslizamento de uma parte sobre a outra, além da separação entre elas, em decorrência dos dentes de serra. Nesse momento surgem tensões de tração na armadura transversal, que por sua vez inicia a aplicação da força F à interface. Dessa forma, de acordo com a Figura 2.3, para que seja necessário atingir o equilíbrio das forças horizontais, tem-se a seguinte correlação descrita pela Equação 2.1:

$$F \cdot tg\phi = \mu \cdot N \quad (2.1)$$

A aplicação da força F sobre a interface causa um efeito semelhante a uma força normal externa de compressão N . Dessa forma, tem-se que a tensão normal de compressão à interface é dada pela taxa de armadura multiplicada pela resistência de escoamento do aço ($\rho_w \cdot f_y$), considerando que a armadura transversal à interface atinja sua resistência de escoamento f_y . A força de cisalhamento acarreta a ruptura da interface, conduzindo toda a armadura transversal ao escoamento. As Equações 2.2 e 2.3 representam o cálculo da resistência da interface.

$$R = F \cdot tg\phi = A_{sw} \cdot f_y \cdot tg\phi \quad (2.2)$$

$$\tau_u = \rho_y \cdot f_y \cdot tg\phi \quad (2.3)$$

onde,

$tg\phi = \mu$ é o coeficiente de atrito;

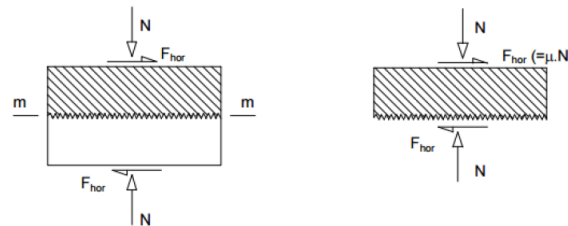
R é a força de cisalhamento resistente;

τ_u é a tensão última de cisalhamento resistente;

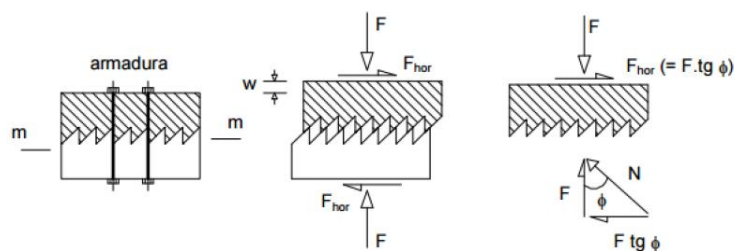
ρ_y é a taxa geométrica de armadura transversal à interface.

Segundo Birkeland e Birkeland (1966), essas equações devem ter as seguintes condições de limitação:

- $\rho_y \leq 1,5\%$;
- $\tau_u \leq 5,52 \text{ MPa}$;
- $f_c \geq 27,0 \text{ MPa}$;
- $f_y \leq 414,0 \text{ MPa}$;



(a) Força de atrito entre duas superfícies em contato;



(b) Aplicação de força pela armadura normal à interface.

Figura 2.3 – Teoria atrito-cisalhamento (Patnaik, 1992, adaptado por Araújo,1977).

O coeficiente de atrito sofre variações, dependendo dos tipos de interface, sejam superfícies artificialmente rugosas ou superfícies concreto-aço, tendo os seguintes valores:

- $\mu = 1,7$ – para concreto monolítico;
- $\mu = 1,4$ – para superfícies artificialmente rugosas;
- $\mu = 0,8 \text{ a } 1,0$ – para superfícies lisas e conexões concreto-aço.

Outros pesquisadores, como Mast (1968), Mattock (1974) e Mansur *et al.* (2008), contribuíram para o aperfeiçoamento da teoria atrito-cisalhamento. Dentre essas contribuições, uma que merece destaque foi a inclusão do efeito da tensão normal externa (σ_n) e da parcela de coesão (c) por Mattock (1974), conforme Equação 2.4.

$$\tau_u = c + (\rho_y \cdot f_y + \sigma_n) \cdot tg\phi \quad (2.4)$$

Com o passar dos anos, vários pesquisadores contribuíram significativamente sobre a teoria do atrito cisalhamento, permitindo o desenvolvimento de equações sobre a resistência ao cisalhamento entre as interfaces de concreto. A Tabela 2.1 exemplifica as principais equações.

Tabela 2.1 - Equações para transferência de cisalhamento (adaptado de Fonteboa *et al.*, 2010).

Birkeland e Birkeland (1966)	$V_u = \rho_y f_y tg\phi$ <p>$tg\phi$: 1,7 para concreto monolítico, 1,4 para rugosidade artificial e 0,8 e 1,0 para juntas.</p>
Raths (1977)	$V_u = 3,11 \cdot \sqrt{\rho_y f_y}$ <p>λ: 1,0 para concreto convencional, 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve.</p>
Shaikh (1978)	$V_u = \lambda \sqrt{6,90 \mu} \cdot \sqrt{\rho_y f_y}$ <p>λ: 1,0 para concreto convencional, 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve. μ: 1,4 para concreto monolítico, 1,0 para um concreto moldado sobre o outro concreto endurecido, 0,4 para juntas rugosas e 0,6 para concreto com armadura passante.</p>
Mattock (1974)	$V_u = 0,8 \frac{A_s}{A_c} f_y + K_1$ <p>K_1: 2,8 para concreto convencional, 1,7 para concreto com agregado miúdo leve e 1,5 para concreto leve.</p>
Walraven <i>et al.</i> (1987)	$V_u = C_1 (\rho_y f_y)^{C_2} \quad C_1 = 0,822 f_{cc}^{0,406} \quad C_2 = 0,159 f_{cc}^{0,203}$ <p>f_{cc}: resistência à compressão de um corpo de prova cúbico com 150 mm de aresta ($f_{ck} = 0,85 f_{cc}$)</p>
Mattock (1988)	$V_u = 0,467 f_c^{0,545} + 0,8 (\rho_y f_y + \sigma_n)$ <p>σ_n: tensão normal externa ao plano da junta.</p>
Mau. Hsu (1988)	$\frac{V_u}{f_c} = 0,66 \sqrt{\omega} < 0,3 \quad \omega = \frac{\rho_y f_y}{f_c}$
Loov e Patnaik (1994)	$V_u = k \lambda \cdot \sqrt{(0,1 + \rho_y f_y) f_c} < 0,25 f_c$ <p>k: 0,6 para concreto monolítico, 0,5 para concreto moldado sobre outro concreto endurecido com superfície rugosa. λ: fator que considera o efeito do agregado leve.</p>

2.5 – Recomendações práticas normativas para atrito-cisalhamento

As principais recomendações normativas referentes à teoria atrito-cisalhamento são as da ACI 318 (2014) e do manual de projeto PCI (2010), que se assemelham em suas abordagens. Verifica-se que a resistência última de cisalhamento (V_u) é calculada tendo as seguintes variáveis: coeficiente de atrito μ , área de armadura no plano de cisalhamento (A_{sw}) e tensão de escoamento da armadura f_y , Equação 2.5.

$$V_u = \mu \cdot A_{sw} \cdot f_y \quad (2.5)$$

A Equação 2.6 descreve a tensão última ao cisalhamento.

$$\tau_u = \mu \cdot \rho_y \cdot f_y \quad (2.6)$$

onde,

ρ_y : é a taxa de armadura de cisalhamento dada por $\frac{A_{sw}}{A_c}$ e A_c é a área do plano de cisalhamento.

A Tabela 2.2 descreve as principais condições de interface, coeficientes de atrito e limites para resistência última ao cisalhamento do ACI 318 (2014) e do manual de projeto PCI (2010), no que refere ao atrito-cisalhamento.

Tabela 2.2: Coeficiente de atrito e tensão última de cisalhamento para diferentes interfaces.

Características da interface	μ	$\tau_u - ACI\ 318\ (2014)$	$\tau_u - PCI\ (2010)$
Concreto monolítico	$1,4\lambda$	Concreto de peso normal: $\leq \left[\begin{array}{c} 0,2f_c \\ 3,3 + 0,08f_c\ MPa \\ 11\ MPa \end{array} \right]$	$\leq \left[\begin{array}{c} 0,3\lambda f_c \\ 6,89\lambda\ MPa \end{array} \right]$
Concreto sobre concreto com superfície intencionalmente rugosa	$1,0\lambda$	Para outros casos: $\leq \left[\begin{array}{c} 0,2f_c \\ 5,5\ MPa \end{array} \right]$	$\leq \left[\begin{array}{c} 0,25\lambda f_c \\ 6,89\lambda\ MPa \end{array} \right]$
Concreto sobre concreto com superfície não intencionalmente rugosa	$0,6\lambda$	$\leq \left[\begin{array}{c} 0,2f_c \\ 5,5\ MPa \end{array} \right]$	$\leq \left[\begin{array}{c} 0,2f_c \\ 5,5\ MPa \end{array} \right]$
Concreto e aço	$0,7\lambda$		

$\lambda = 1$ para concreto com agregado normal;

$\lambda = 0,85$ para concreto de agregado graúdo leve;

$\lambda = 0,75$ para concreto todo leve.

2.6 – Ensaio *push-off*

De acordo com Araújo (1997), várias pesquisas voltadas ao estudo da resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto foram desenvolvidas ao longo de vários anos, buscando aprimorar o conhecimento desse comportamento. Nos estudos iniciais utilizavam os ensaios de cisalhamento direto e ensaios em vigas biapoiadas para determinação da resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto.

Dessa forma, o ensaio de *push-off* é um ensaio de cisalhamento direto normalmente adotado para avaliar a resistência da união de interfaces de concreto-concreto quando a armadura de aço que atravessa a interface é considerada (Santos e Júlio, 2009).

Basicamente, o ensaio é composto por duas partes de concreto, ambas em forma de “L”, conectadas através da interface, apresentando abertura em suas extremidades, permitindo com isso a continuidade do teste após a ruptura da interface por cisalhamento.

A Figura 2.4 mostra o ensaio *push-off* para análise da resistência ao cisalhamento direto em interfaces concreto-concreto.

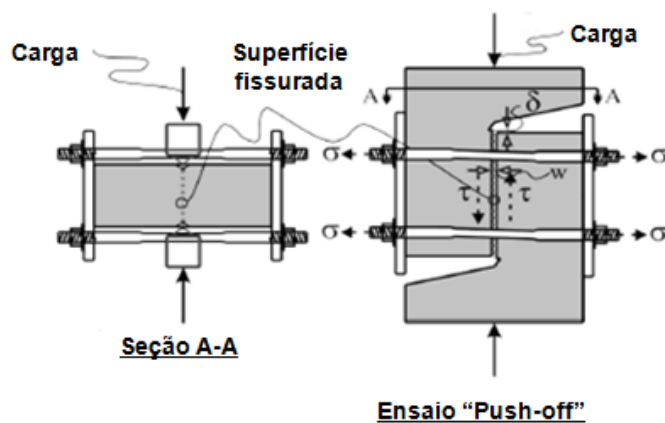


Figura 2.4 – Ensaio *push-off* (Kim, Trejo e Hueste, 2007).

2.7 – Agregado reciclado

Várias propriedades do concreto sofrem influência com o tipo de agregado graúdo, tais como densidade e módulo de elasticidade (responsável

pelo condicionamento dessa fase), entre outras. No que se refere à resistência à compressão do concreto, não há uma colaboração acentuada para menores resistências. Porém, quando se trata de concretos de alta resistência, as características dos agregados graúdos devem ser levadas em consideração (Gonçalves, 2001).

Algumas características importantes em relação ao agregado estão listadas abaixo (Mehta e Monteiro, 1994):

- se relacionam com a porosidade: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza e módulos de deformação;
- se relacionam com o processo de fabricação: tamanho, forma e textura;
- se relacionam com a composição química e mineralógica: resistência mecânica, dureza, módulo de deformação e presença de substâncias deletérias.

Os agregados reciclados têm inúmeras aplicações após sua britagem, peneiramento e descontaminação, tais como: utilização em projetos de pavimentação rodoviária em camadas de sub-base, base e até mesmo em revestimento, como materiais de enchimento e até mesmo na confecção de concretos novos. Dentro desse contexto, merece maior cuidado os agregados reciclados usados na confecção de novos concretos, uma vez que o agregado possui uma grande influência nas propriedades do produto final. Além disso, as propriedades do concreto com agregados reciclados divergem das propriedades do concreto convencional, alterando com isso seu desempenho, que está diretamente relacionado ao tipo de material usado em sua produção (Hansen, 1992).

Diversos pesquisadores analisaram as propriedades dos agregados reciclados, tais como Zordan (1997), Bazuco (1999), Leite (2001), Trindade (2017), entre outros, e que possuem conclusões semelhantes no geral, porém divergentes em pontos específicos, que merecem cuidados especiais para o presente estudo.

Segundo Leite (2001), quanto mais rugosidade tiver a textura do agregado, assim como maior angulosidade, melhor será a adesão da pasta ao agregado, interferindo diretamente na trabalhabilidade do concreto. Para a

produção desse tipo de agregado podem ser utilizados tipos diferentes de britadores, sendo que para atingir formas angulares o britador do tipo mandíbula é o mais indicado; já para formas arredondadas os britadores giratórios tornam-se mais eficientes.

Em relação à composição granulométrica dos agregados reciclados, observa-se que se assemelha muito com a dos agregados naturais, sendo um pouco mais grossa, resultando, de acordo com Bazuco (1999), em um maior módulo de finura.

Segundo Leite (2001), a massa específica é uma importante propriedade, pois quanto menor a densidade do concreto antigo, menor será a massa específica do agregado reciclado. Segundo Trindade (2017), essa redução pode chegar entre 12 a 20%.

Uma das propriedades mais importantes do agregado reciclado é a absorção de água, pois esta propriedade pode resultar em reduções na relação água/cimento interna, sendo mais acentuado em zonas próximas ao do agregado graúdo, acarretando melhora da região de transição e das propriedades do concreto (Gonçalves, 2001). Essa redução da relação água/cimento pode gerar pastas mais secas, o que prejudica a trabalhabilidade do concreto (Leite, 2001), afetando também o processo de hidratação do cimento. Dessa forma, a argamassa velha que permanece retida ao agregado é o principal fator pelo aumento da absorção de água (Hansen, 1992).

A resistência à abrasão dos agregados reciclados é menor quando comparada a dos agregados naturais. Dessa forma, essa propriedade influencia a resistência dos agregados, conforme pesquisas apontadas por Bazuco (1999), Trindade (2017), entre outras.

2.8 – Dosagem de agregados reciclados

Um ponto relevante quando se fala em dosagem de agregado reciclado refere-se ao alto nível da taxa de absorção de água pelos agregados, devido a sua elevada porosidade (Leite, 2001). Segundo Omary *et al.* (2015), a não hidratação completa do cimento presente no agregado reciclado e o seu formato angular diminuem a trabalhabilidade do concreto.

Segundo Bazuco (1999), os poros do agregado reciclado, quando não estão saturados, podem absorver a água da pasta ou da nata de cimento, influenciando negativamente a dosagem. Dessa forma, a quantificação da água disponível para o processo de hidratação do cimento torna-se difícil de mensurar.

Segundo Hansen (1992), o processo de pré-saturação pode ser usado como forma de eliminar a influência da porosidade dos agregados reciclados na relação água/cimento, evitando que o agregado reciclado absorva parte da água de hidratação do cimento. Além disso, podem ser usados em conjunto aditivos superplastificantes, reduzindo a migração da água da pasta de cimento para o agregado.

De acordo com Leite (2001), outro ponto que deve ser levado em consideração diz respeito ao conhecimento da massa específica e massa unitária dos agregados reciclados, pois essas propriedades são baixas, o que gera a necessidade de compensação de material reciclado a ser utilizado em mistura de concretos convencionais aos concretos com agregados reciclados.

No que se refere à utilização de aditivos, os mesmos procedimentos adotados pelos concretos usuais podem ser seguidos pelos concretos com agregados reciclados.

De acordo com Wagih (2013), os principais cuidados que devem ser tomados em relação à dosagem do concreto com agregados reciclados são:

- aumentar o desvio-padrão quando estiver estudando a resistência à compressão do concreto;
- ajustar a relação água/cimento caso as resistências à compressão do concreto com agregados reciclados sejam baixas, assumindo inicialmente a mesma relação água/cimento para os dois tipos de concretos (convencionais e reciclados), que utilizam a mesma composição dos agregados miúdos;
- considerar um acréscimo na água de amassamento dos concretos com agregado reciclado para atingir a mesma trabalhabilidade dos convencionais;
- limitar o tamanho do agregado reciclado entre 16 a 20 mm para se garantir a mesma durabilidade do concretos convencionais;

- para garantir a mesma relação água/cimento deverá ser acrescida à mistura uma maior quantidade de cimento;
- quantificar a densidade dos agregados reciclados, baseando-se nesse parâmetro seu estudo de dosagem;
- assumir a mesma granulometria ótima do agregado convencional para o agregado miúdo.

2.9 – Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado

Uma das propriedades do concreto endurecido que causa algumas divergências em relação aos estudos realizados por diversos autores como Hansen (1992), Leite (2001), entre outros, é a absorção de água. Segundo Trindade (2017), os valores encontram-se em torno de 10 a 20% maiores que o concreto com agregados usuais. Já para outros autores, como Hansen (1992), esses valores giram em torno de 5 a 10%, e se a fração mais fina do agregado reciclado for utilizada no processo, esses valores podem ser ainda maiores. Outros autores, como Moreira (2010), Lovato (2007) e Leite (2001), correlacionam a absorção de água com o agregado graúdo reciclado.

Já em relação à retração por secagem, essa é mais acentuada quando se trabalha com agregados mistos (reciclados e convencionais), girando em torno de 70%, sendo mais reduzida quando essa retração se associa apenas ao concreto com agregado reciclado (Hansen, 1992). Esse mesmo autor considera também que a fluência em concretos com agregado reciclado apresenta valores maiores que nos convencionais, sendo a pasta antiga a responsável por esse comportamento.

No que se refere à propriedade de resistência à tração, alguns resultados apresentados por Hansen (1992) Leite (2001), Lovato (2007), entre outros, divergem entre si, porém ressalta que há uma variação em torno de 20% menor nesta propriedade quando se compara concretos com agregados reciclados e concretos usuais, fato que, segundo Trindade (2017), pode ser explicado pelo enfraquecimento na zona de transição devido à presença do agregado reciclado. Em relação à resistência à compressão, é relatado que há redução em torno de 5 a 10% em concretos com agregados reciclados em

relação aos concretos usuais (Balista, 2003). Já para Trindade (2017), não houve alteração nesta propriedade quando foi utilizado concreto com agregado reciclado. Bazuco (1999) afirma que a redução nesta propriedade é resultado da resistência e desempenho dos agregados reciclados, porém ele considera outras variáveis ligadas a essa redução, tais como a qualidade do agregado reciclado, o teor de substituição e as faixas de resistência em que se trabalha. Já Balista (2003) encontrou valores superiores para concretos com agregados reciclados, atribuindo esse fato a alguns fatores, tais como a qualidade do agregado ao aumento de hidratação do cimento na zona de interface, e a não hidratação completa do cimento. Outros pesquisadores, como Leite e Monteiro (2016), chegaram à conclusão que para concretos de alta resistência, a condição saturada superfície seca é a mais adequada para a utilização de concreto com agregado reciclado, aproximando mais das propriedades físicas e mecânicas do concreto de referência.

Em relação ao módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado houve redução de 15 a 40% em comparação aos concretos usuais, fato explicado por Hansen (1992) em função da argamassa antiga da pasta ligada ao agregado.

Dessa forma, mais estudos devem ser realizados para que as propriedades físicas e mecânicas sejam melhores explicadas de forma a se ter conclusões mais precisas na elaboração de concretos estruturais com agregados reciclados, minimizando a possibilidade de falhas de concepção de projetos pela ausência de conhecimento sobre o assunto (Xiao *et al.*, 2012).

2.10 – Concreto com fibras

O concreto é um dos materiais mais utilizados em elementos estruturais atualmente, devido à facilidade de fabricação e execução e sua excelente resistência à compressão. Porém, devido a limitações em relação a sua resistência à tração e sua reduzida deformação antes da ruptura faz-se necessária a utilização de compósitos para suprir essa deficiência, como, por exemplo, a utilização de fibras (Figueiredo, 2011).

No Brasil, houve um aumento na utilização de um tipo de material no reforço de argamassas e concretos: as fibras sintéticas (polipropileno e nylon),

onde se observou ganho considerável de desempenho no controle de fissuração por retração plástica para argamassas de reparo (Figueiredo,1998), já que não há necessidade de alto módulo de elasticidade dessas fibras para minimizar a propagação das fissuras. Porém, essas fibras possuem limitação quando adicionadas em matrizes que apresentam módulo de elasticidade superior ao das fibras (Armelin e Hamassaki, 1990). Este fato se deve à atuação dos cimentos com aditivos aceleradores de pega e redutores de água, que possuem elevado ganho de resistência inicial e, conseqüentemente, módulo de elasticidade elevado; dessa forma, as fibras que possuem reduzido módulo atuam apenas como reforço em um pequeno intervalo de tempo, logo após o lançamento do concreto, quando a cura realizada de forma correta já garante os resultados adequados, limitando a utilização de fibras de polipropileno como reforço de fissuração por retração a concretos e algumas obras como, por exemplo, concreto projetado via úmida e produção de defensas em rodovias por meio de fôrmas deslizantes (Rle, 1997).

Já as fibras de aço podem ser classificadas como fibras de alto módulo de elasticidade e se destinam ao reforço primário do concreto, ou seja, não se limitam apenas ao controle da fissuração (Bentur *et al.*, 1990).

De acordo com Mindess (1995), são inúmeras as vantagens do emprego do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), apresentando grande interesse tecnológico e alta competitividade econômica, principalmente quando se utilizam agregados reciclados em substituição aos agregados convencionais.

Em 1874, de acordo com Velasco (2008) foi registrada a primeira patente dos compósitos reforçados com fibras. Posteriormente, em 1910, a conceituação do concreto como material estrutural reforçado com pequenas adições de pedaços de aço foi considerada por Porter (1910). Graham (1911) sugeriu a adição de compósitos de fibras de aço como alternativa para reforço do concreto no intuito de melhorar as propriedades ligadas à resistência e estabilidade. Segundo Swamy (1975), uma das características das fibras que melhora as propriedades de aderência refere-se ao seu formato.

Segundo Balaguru e Shah (1992), um dos problemas relacionados a utilização das fibras de aço no reforço de concretos se relacionava com a diminuição da trabalhabilidade e, além disso, durante o processo de mistura

dos componentes do concreto, as fibras poderiam se agrupar formando “ouriço” de fibras, causando defeitos como diminuição da resistência no ponto de localização do “ouriço” de fibras e má distribuição das fibras no concreto, diminuindo a eficiência da fibra como reforço. Logo, com a finalidade de minimizar esse efeito, procuraram restringir o tamanho do agregado graúdo usado no processo de fabricação dos concretos com fibras.

Atualmente existe no mercado grande diversidade de fibras de aço usadas no reforço de concretos. De acordo com a NBR 15530 (2007), essas fibras podem variar em sua geometria, podendo ser ancorada nas extremidades, ser corrugada ou reta; além disso, podem variar segundo ao tipo de aço que as originou em três classes, resultando em diferentes propriedades mecânicas. Os diâmetros variam entre 0,10 e 1,0 mm, e o comprimento entre 5 e 65 mm, com módulo de elasticidade entre 200 a 210 GPa e tensões de ruptura podendo chegar a 2100 MPa, sendo materiais dúcteis (Velasco, 2008).

2.11 – Fibras de aço

Segundo Nunes (2008), dois fatores primordiais na utilização das fibras de aço são: geometria da fibra e resistência do aço que lhe deu origem. A geometria da fibra é um dos principais aspectos definidores do desempenho do material no concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

De acordo com a NBR 15530 (2007), as fibras de aço são classificadas de acordo com sua conformação geométrica em três tipos básicos:

- tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- tipo C: fibra de aço corrugada;
- tipo R: fibra de aço reta.

De acordo com Figueiredo (2008), essa configuração geométrica não relaciona o formato da seção transversal, mas apenas o perfil da fibra. O formato da seção transversal depende do tipo de aço utilizado na produção da fibra, que pode ser aço trefilado ou laminado. Conforme a NBR 15530 (2007), existem três tipos de classes de fibras, que estão associadas ao tipo de aço que as deu origem:

- classe I: fibra originada de arame trefilado a frio;

- classe II: fibra originada de chapa laminada cortada a frio;
- classe III: fibra originada de arame trefilado e escarificado.

A Figura 2.5 mostra um esquema dessa configuração geométrica e classes de fibras disponíveis no mercado (Figueiredo, 2008).


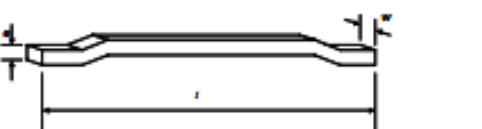
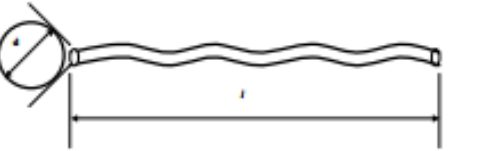
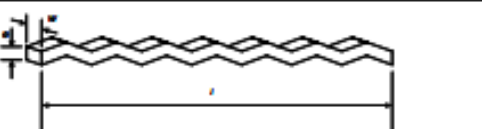
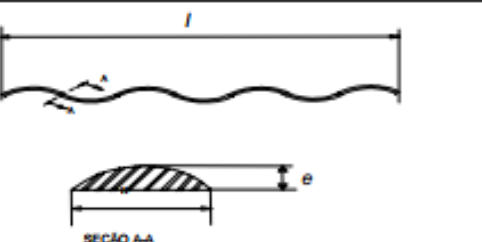
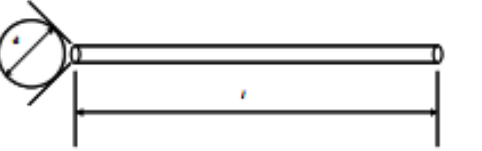
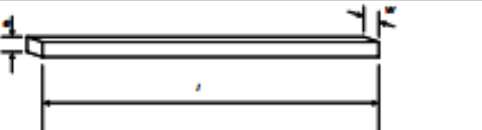
Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Figura 2.5 – Classificação e geometria das fibras de aço (Figueiredo, 2008).

Segundo Figueiredo (2008), as fibras também se classificam segundo sua resistência. No Brasil, a menor resistência prevista para o aço da fibra é de

500 MPa, o que chega a ser superior quando comparado a algumas normalizações internacionais, como a ASTM A 820 (2016) que é de 350 MPa.

A Tabela 2.3 apresenta os limites de resistência das fibras de aço de acordo com sua classe.

Tabela 2.3: Requisitos para fibras de aço (Figueiredo, 2008).

Fibra	Limite de resistência à tração do aço, MPa (*) f_u
AI	1000
AII	500
CI	800
CII	500
CIII	800
RI	1000
RII	500

(*) Esta determinação deve ser feita no aço no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

De acordo com Figueiredo (2005), para garantir uma ductilidade mínima das fibras de aço, a fim de evitar a fragilização do compósito, existe o ensaio de dobramento da fibra, sendo executado em uma amostragem de 10 exemplares, sendo retirados aleatoriamente de cada lote. Verifica-se nesse ensaio o dobramento da fibra sobre um pino de 3,2 mm de diâmetro em temperatura acima de 16°C, sendo esse ensaio realizado manualmente. No mínimo 90% das fibras ensaiadas deverão formar um ângulo de 90° sem quebrarem. A Figura 2.6 mostra o procedimento esquemático da realização desse ensaio.

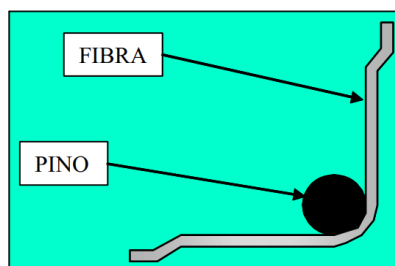


Figura 2.6 – Esquema adotado para ensaio de dobramento da fibra de aço (Figueiredo, 2008).

As fibras de aço possuem relação geométrica obtida pela relação entre o comprimento da fibra (l) e seu diâmetro equivalente (d_e) não alongado das fibras definida como fator de forma (λ) (NBR 15530, 2007). Segundo a American Concrete Institute (ACI 544.1R, 1996), essa faixa do fator de forma varia de 20 a 100. O diâmetro é o definido na NBR 15530 (2007), como sendo o diâmetro equivalente (d_e). O fator de forma pode ser calculado conforme a Equação 2.7.

$$\lambda = \frac{l}{d_e} \quad (2.7)$$

onde:

λ = fator de forma da fibra;

l = comprimento da fibra (mm);

d_e = diâmetro equivalente da fibra (mm).

A determinação do comprimento equivalente varia de acordo com o tipo de fibra e tipo de aço da fibra. A Tabela 2.4 detalha as equações para a determinação do comprimento equivalente para cada tipo de fibra (Figueiredo, 2008).

Tabela 2.4: Determinação do comprimento equivalente (Figueiredo, 2008).

Classe da fibra	Comprimento equivalente(d_e)
AI, CI e RI	$d_e = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$ <p>Onde: d_1 e d_2 são medidas em milímetros da região central da fibra em duas direções ortogonais entre si.</p>
AII, CII e RII	$d_e = \frac{\sqrt{(4 \cdot e \cdot w)}}{\pi}$ <p>Onde: e: é a menor dimensão da seção transversal; w: é a maior dimensão da seção transversal</p>
CIII	$d_e = \sqrt{\frac{2(3 \cdot e^3 + 4 \cdot e \cdot w^2)}{3 \cdot w \cdot \pi}}$ <p>Onde: e: é a menor dimensão da seção transversal; w: é a maior dimensão da seção transversal</p>

Além disso, de acordo com a NBR 15530 (2007), é necessário correlacionar o fator de forma com a classe da fibra e com o tipo de aço que derivou a fibra, conforme Tabela 2.5. De acordo com Figueiredo (2008), a definição de um fator de forma independe da composição geométrica da fibra, pois o fator de forma depende do diâmetro equivalente, e este muitas vezes pode ser reduzido no processo de trefilação do aço, o que não ocorre com as chapas de aço.

Tabela 2.5: Requisitos de fator de forma mínimo das fibras de aço (Figueiredo, 2008).

Classe da fibra	Tipo de aço	Fator de forma mínimo λ
I	Fio de aço trefilado	40
II	Chapa de aço cortada	30
III	Fio de aço trefilado e escarificado	30

Segundo a NBR 15530 (2007), alguns defeitos podem ocorrer nas fibras de aço, e sua verificação pode ser analisada em cada lote de no mínimo 200 gramas de material. No máximo 5% da massa das fibras podem apresentar defeitos, sendo considerado defeitos quaisquer emendas, que podem gerar entupimento do mangote durante a execução do concreto projetado, por exemplo (Figueiredo, 2008). Defeitos como corte da ancoragem nas fibras do tipo A podem aparecer e se apresentado em quantidade muito elevada de fibras poderá prejudicar a tenacidade do concreto, que é a principal contribuição da fibra para o CRFA (Figueiredo, 2005).

As Figuras 2.7 e 2.8 mostram o defeito das fibras emendadas pelo topo e o defeito das fibras sem ancoragem, respectivamente.

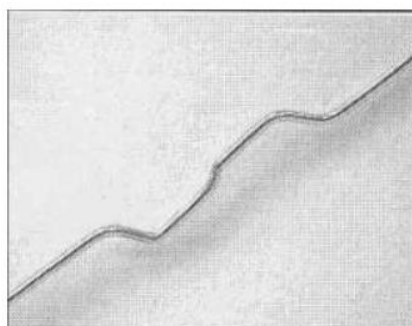


Figura 2.7 – Fibras emendadas pelo topo (Figueiredo, 2008).

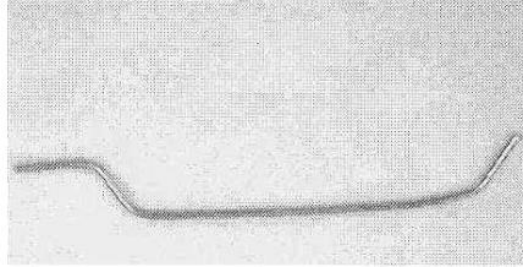


Figura 2.8 – Fibras sem ancoragem completa (Figueiredo, 2008).

A norma ABNT NBR 15530 (2007) apresenta controles de aceitação em relação às fibras, em relação aos ensaios e verificações quanto à resistência ao dobramento, à variação dimensional e atendimento às quantidades mínimas de fibras defeituosas. A Tabela 2.6 mostra um resumo dessas prescrições.

Tabela 2.6: Resumo das prescrições da ABNT NBR 15530 (2007) para um lote de fibras que deve ser submetido ao controle de recebimento.

Ensaio	Amostra mínima	Porcentagem mínima de fibras em conformidade com os requisitos
Dobramento	10 fibras	90
Verificação dimensional	60 fibras	90
Verificação de defeitos	200 g	95

2.12 – Interação fibra-matriz

De acordo com Figueiredo (2000), a formação de uma fissura no concreto proporcionará uma barreira à propagação de tensões de tração, que são representadas, conforme a Figura 2.9a, por linhas de tensão, sendo que desvios nessas linhas indicam concentração de tensões nas extremidades da fissura e, caso essa tensão supere o valor da tensão crítica, ocorrerá a ruptura abrupta do material. Se esse efeito do esforço for cíclico, a ruptura poderá ser explicada como uma ruptura por fadiga, ou seja, para cada ciclo uma propagação das microfissuras se forma, ocasionando aumento progressivo na concentração das tensões em sua extremidade, até a ruptura completa do material. Esse comportamento pode ser caracterizado como tipicamente frágil e a capacidade resistente residual à tração do concreto não pode ser considerada.

Ao se adicionar fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados ao concreto, e em quantidade apropriada, o concreto passa a ter

um comportamento diferente do comportamento frágil, devido ao fato de que as fibras proporcionam uma ponte de transferência de tensões através das fissuras, minimizando as tensões aplicadas em suas extremidades (Figueiredo, 2011). A Figura 2.9b mostra esse comportamento.

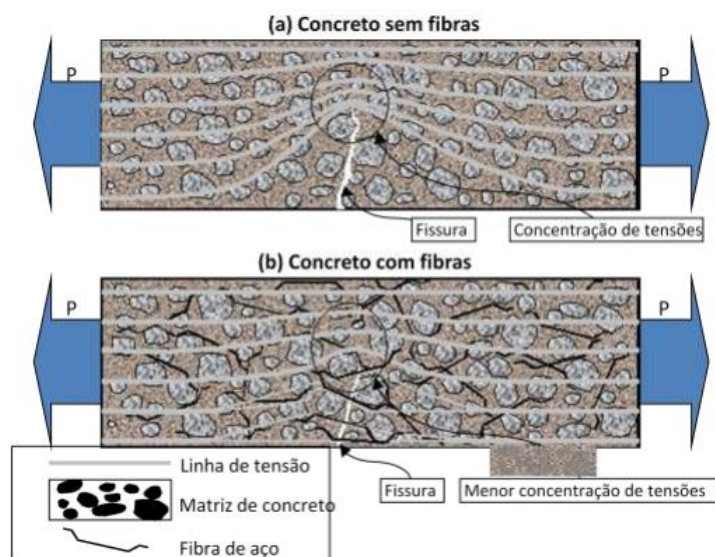


Figura 2.9 – Concentração de tensões para: (a) concreto sem fibras e (b) concreto com fibras (Figueiredo, 2000).

Com a adição de fibras há redução na velocidade de propagação das fissuras e o concreto passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, ele apresenta certa capacidade resistente após a fissuração (Figueiredo, 2011). Segundo Li (1992), já é de conhecimento clássico que as fibras quando inseridas ao concreto asseguram redução de sua fissuração.

2.13 – Pesquisas relacionadas à transferência de tensões de cisalhamento em concretos com agregados reciclados

Este item aborda algumas pesquisas recentes sobre o estudo da transferência de tensões cisalhantes e suas principais conclusões.

- Fonteboa et al. (2010)

Estudou-se a capacidade de atrito-cisalhamento em concretos com agregados reciclados com adição de sílica ativa. Foram produzidas quatro dosagens diferentes para realização dos corpos de prova do tipo *push-off*, conforme Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Resumo das dosagens dos corpos de prova *push-off* de Fonteboa et al. (2010).

Dosagem	Corpo de prova	% de agregado natural	% de agregado reciclado	% de agregado com sílica
1	CC	100	-	-
2	RC	50	50	-
3	CCS	100		8
4	RCS	50	50	8

De forma a manter a mesma resistência mecânica, foi especificada a mesma relação a/c para todas as dosagens, acrescentando para isso, a quantidade de 6,2% de cimento. As variáveis foram:

- influência do agregado reciclado;
- influência do material pozolânico;
- taxa da armadura transversal.

Todos os corpos de prova *push-off* sofreram pré-fissuração. Assim, os resultados referentes a todas as taxas de armaduras indicaram diminuição considerável na resistência ao atrito-cisalhamento no concreto reciclado sem pozolana, sendo que essa diminuição se acentuou em corpos de prova que não possuíam armadura transversal. Esse fato foi justificado pela presença de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado. O aspecto positivo da adição de sílica ativa foi que ela agiu como compensação do efeito negativo produzido pela presença do agregado reciclado, aumentando a capacidade resistente da matriz, ou seja, o concreto com agregado reciclado com sílica ativa apresentou maior resistência ao atrito-cisalhamento do que a referência, conforme pode ser observado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Resultados de força cortante última (Fonteboa et al., 2010).

Corpo de prova	$\rho_y = 0,00\%$	$\rho_y = 0,39\%$	$\rho_y = 0,57\%$
CC	62,18 kN	88,00 kN	93,26 kN
CCS	64,26 kN	95,22 kN	93,54 kN
RC	49,32 kN	78,68 kN	78,13 kN
RCS	65,92 kN	84,71 kN	98,38 kN

Além disso, foram comparados os resultados experimentais com valores previstos em equações da literatura sobre concretos convencionais. Foi encontrado um coeficiente de segurança maior do que a unidade em todos os casos. Porém, quando não se utilizou sílica ativa nos concretos com 50% de agregados reciclados, a carga máxima prevista por algumas equações se aproximou dos valores encontrados experimentalmente, sendo proposto um

coeficiente de correção de 0,85 nas equações para atingir as margens de segurança dos concretos convencionais.

- Xiao et al. (2012) e Xiao et al. (2016)

Foram confeccionados 32 corpos de prova *push-off* pré-fissurados de concreto com agregado reciclado, com 10 tipos de dosagens diferentes com o objetivo de avaliar o desempenho da transferência de cisalhamento através de fissuras. Essas misturas diferiram na relação a/c e na porcentagem de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, conforme mostra a Tabela 2.9. Além disso, a taxa de armadura transversal também foi uma variável.

Entre as conclusões pode-se ressaltar que corpos de prova com a mesma dosagem e com maiores taxas de armadura transversal resultaram em maior capacidade de transferência de cisalhamento.

Outra análise realizada foi a comparação entre corpos de prova com a mesma porcentagem de substituição de agregados reciclados e mesma taxa de armadura transversal, variando apenas a resistência à compressão do concreto. Concluiu-se que, quanto maior a resistência do concreto, maior a capacidade de transferência de cisalhamento através das fissuras.

Tabela 2.9 – Detalhe das dosagens avaliadas por Xiao et al. (2012).

Dosagem	(%) Agregado reciclado	Cimento (kg)	Areia (kg)	Agregado natural (kg)	Agregado Reciclado (kg)	Água (kg)	Relação a/c
1a	0	373	730	1120	0	182	0,488
1b	50	373	730	560	560	182	0,488
1c	100	373	730	0	1120	182	0,488
2	0	370	730	1100	0	200	0,540
3	0	440	720	1050	0	190	0,430
4	100	430	700	0	950	185	0,430
5	100	430	700	0	1000	165	0,380
6	30	400	710	742	318	185	0,463
7	50	406	730	510	510	185	0,456
8	70	415	720	300	700	185	0,466

A última análise realizada foi em relação ao concreto com variação apenas das porcentagens dos agregados reciclados, concluindo que para a

substituição de 50% ocorreu perda de 15% na capacidade de atrito-cisalhamento em comparação ao concreto de referência, sendo que para as substituições de 70 e 100% houve perda de 85% em relação ao concreto de referência, não havendo perdas consideráveis para a substituição de 30%. Essas perdas foram em decorrência da argamassa antiga presente no agregado graúdo, provocando enfraquecimento da zona de transição. Os resultados foram comparados com os presentes na literatura para concretos convencionais (Figura 2.10).

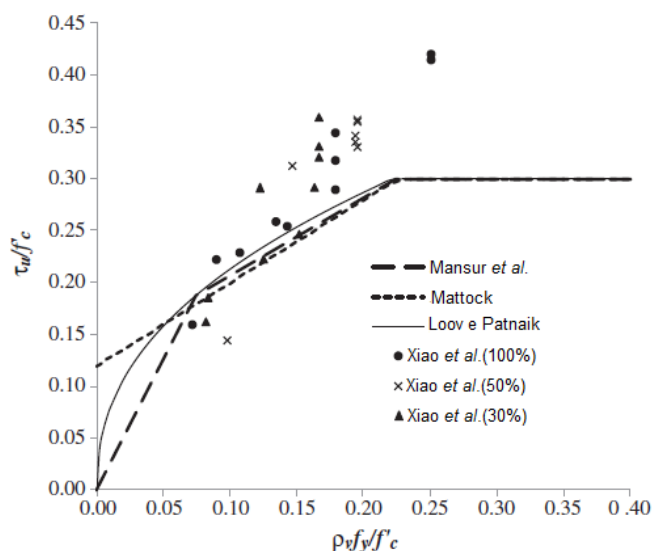


Figura 2.10 – Comparação entre os resultados experimentais de Xiao *et al.* (2012) e equações da literatura de outros pesquisadores (adaptado de Xiao *et al.*, 2012).

As equações da Figura 2.10 podem ser usadas para definir a capacidade de transferência de cisalhamento através de fissuras em concretos com agregados reciclados.

No estudo de Xiao *et al.* (2016) foram refeitas 7 das 10 dosagens realizadas por Xiao *et al.* (2012), com porcentagens de substituição de agregado reciclado de 0, 30, 50, 70 e 100%. Outra variável estudada foi a influência da interface de ligações do concreto com agregado reciclado no comportamento sob cisalhamento, comparando os resultados de Xiao *et al.* (2012) com concretos pré-fissurados com corpos de prova que não foram pré-fissurados e que apresentavam junta fria, mantendo constante a taxa de armadura transversal.

Os novos resultados mostraram que, para mesma porcentagem de agregado reciclado e taxa de armadura transversal, os corpos de prova sem fissuração inicial apresentaram maiores resistências ao cisalhamento e os corpos de prova com junta fria apresentaram os menores valores, devido ao engrenamento entre os agregados, que não foi efetivo com a presença de juntas frias.

- Rahal e Al-Khaleefi (2015)

Foram produzidos 18 corpos de prova *push-off* a partir de 5 dosagens diferentes, variando a porcentagem de substituição de agregado natural pelo reciclado e a relação a/c. Nenhuma compensação na quantidade de cimento foi utilizada para se atingir resistências comparáveis; porém, relações a/c menores foram necessárias em concreto com agregado reciclado para se alcançar resistências à compressão mais elevadas. A taxa de armadura transversal também foi uma variável de estudo e a principal diferença encontrada estava no fato de que os corpos de prova *push-off* não foram pré-fissurados.

De acordo com a Figura 2.11, os pesquisadores dividiram as curvas em três partes:

- 1ª parte – ascendente, geralmente linear, em que há o surgimento das fissuras na face da transferência de cisalhamento;
- 2ª parte – descendente, em que ocorre a resistência máxima, após o escoamento da armadura transversal;
- 3ª parte – resistência estável, em que há níveis de deslizamento elevados e maiores fissurações na superfície do concreto.

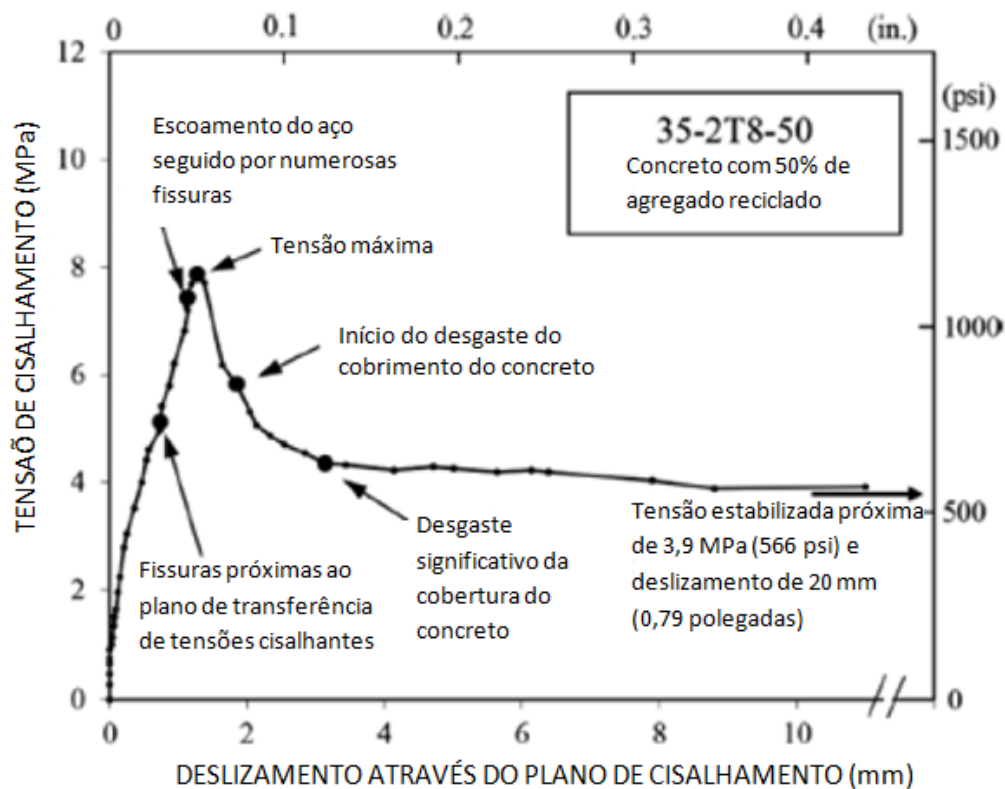


Figura 2.11 – Curva representativa da transferência de tensões cisalhantes de concretos com agregados reciclados (adaptada de Rahal e Al-Khaleefi, 2015).

- Trindade (2017)

Foram produzidos 30 corpos de prova do tipo *push-off* com teores de 30, 50 e 100% de agregados naturais substituídos pelos reciclados. Além disso, duas classes distintas de resistências à compressão dos concretos, que originaram os agregados reciclados, foram estudadas, definidas como Grupo 1 (15 a 20 MPa) e Grupo 2 (35 a 40 MPa). Outra variável envolvida na pesquisa foi a tensão de confinamento fornecida pela armadura transversal.

A Tabela 2.10 mostra o resumo dos resultados dos ensaios *push-off* encontrados por Trindade (2017), descrevendo a média e o desvio-padrão da tensão máxima de cisalhamento de três corpos de prova de cada série. Não foi realizada normalização da tensão máxima de cisalhamento, ou seja, não foi dividido pelo valor de resistência à compressão do concreto, pois, segundo a pesquisadora, as resistências à compressão dos concretos foram estatisticamente iguais.

Tabela 2.10 – Resumo dos resultados dos ensaios *push-off* (Trindade, 2017).

Corpo de prova	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
CP1 1-20-0-30	4,4	4,29	0,18
CP2 1-20-0-30	4,0		
CP3 1-20-0-30	4,3		
CP1 1-20-0-50	3,4	3,51	0,05
CP2 1-20-0-50	3,5		
CP3 1-20-0-50	3,5		
CP1 1-20-0-100	3,1	3,21	0,24
CP2 1-20-0-100	2,9		
CP3 1-20-0-100	3,4		
CP1 2-40-0-30	4,5	4,90	0,35
CP2 2-40-0-30	5,0		
CP3 2-40-0-30	5,1		
CP1 2-40-0-50	5,5	5,13	0,61
CP2 2-40-0-50	5,4		
CP3 2-40-0-50	4,4		
CP1 2-40-0-100	5,0	4,73	0,43
CP2 2-40-0-100	4,2		
CP3 2-40-0-100	4,9		
CP1 3-40-2-50	6,4	6,69	0,23
CP2 3-40-2-50	6,7		
CP3 3-40-2-50	6,9		
CP1 3-40-3-50	8,1	8,40	0,79
CP2 3-40-3-50	7,8		
CP3 3-40-3-50	9,3		
CP1 4-0-0	5,4	5,22	0,68
CP2 4-0-0	4,4		
CP3 4-0-0	5,7		
CP1 4-2-0	7,8	7,76	0,36
CP2 4-2-0	8,1		
CP3 4-2-0	7,3		

A Figura 2.12 mostra a influência da presença e da porcentagem de agregados reciclados empregados em concretos sem armadura transversal, separados pelos grupos de resistência do concreto original (Grupo 1 e Grupo 2)

Uma redução da resistência ao cisalhamento dos concretos do Grupo 1 (sem armadura e com 50% de agregados reciclados) em relação aos concretos com 30% de substituição foi de 18%, e uma redução dos concretos com 100% em relação aos com 50% foi de 8,5%, concluindo que, para corpos de prova com agregado reciclado de menor resistência do concreto original, a influência do percentual de agregados reciclados é mais significativa.

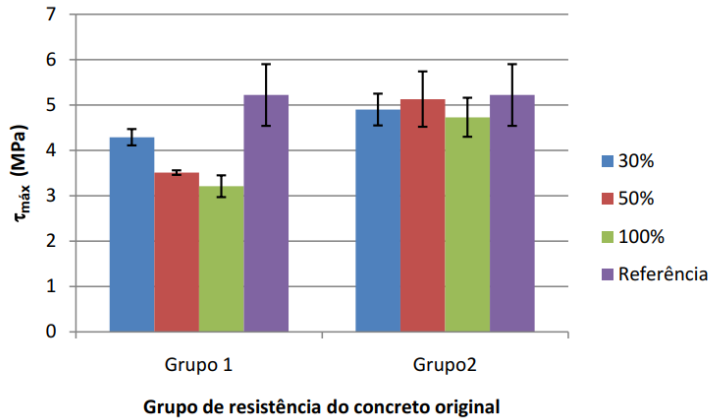


Figura 2.12 – Influência da porcentagem de agregados reciclados na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017)

Foi analisada ainda a presença dos agregados reciclados do Grupo 1 em concretos sem armadura transversal em relação ao concreto de referência, apresentando redução da resistência ao cisalhamento de 18% para concretos com 30% de agregados reciclados, 33% para concretos com 50% e 38,5% para 100%. O estudo estatístico mostrou que os corpos de prova da série com 50% e 100% de agregados reciclados da Série 1 são iguais entre si, concluindo que a influência da porcentagem dos agregados reciclados é mais significativa até o teor de 50% e, estatisticamente, a partir desse valor a resistência ao cisalhamento é igual.

Em relação aos resultados dos corpos de prova da Série 2, com resistência do concreto original de 40 MPa, o concreto com 50% de agregados reciclados apresentou resistência ao cisalhamento superior ao concreto com 30%. Em relação ao concreto de referência, a média do concreto com 30% de agregados reciclados apresentou redução de 6%, já do concreto com 50% reduziu apenas 1,7% e o concreto com 100% reduziu 9,4%. O estudo estatístico mostrou que todas as médias dos concretos da Série 2 são iguais entre si e iguais ao concreto de referência, ou seja, nenhuma diferença foi verificada, independentemente da porcentagem de agregado reciclado.

A Figura 2.13 mostra um gráfico comparando as resistências do concreto original para todas as porcentagens de agregado reciclado.

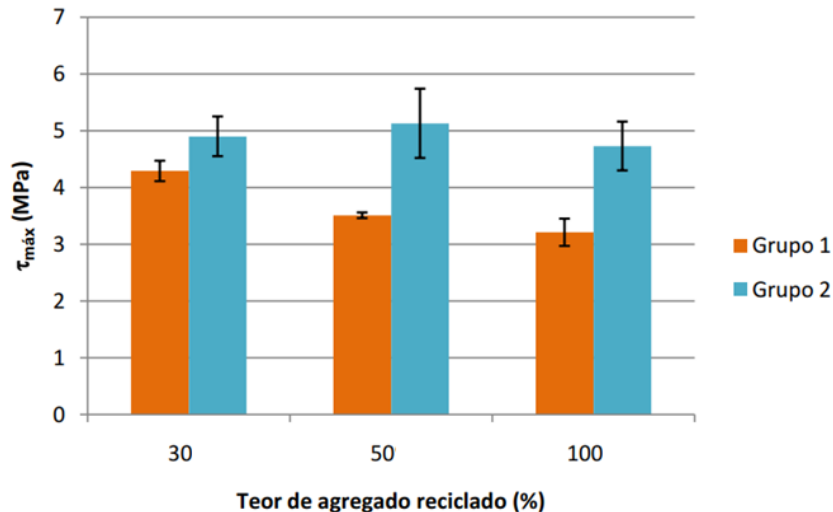


Figura 2.13 - Influência da resistência à compressão do concreto original na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017).

Em relação à porcentagem de 30% de substituição, foi verificada redução de 12,5% em relação à média quando um concreto de resistência original inferior foi utilizado. Já em relação ao teor de substituição de 50% do agregado natural pelo reciclado, houve maior diferença nos resultados, com redução de 31,6%, sendo que os resultados estatísticos também mostraram diferenças significativas entre eles, mostrando que a porcentagem de 50% de agregado reciclado é uma variável bastante influente. Em relação às colunas referentes a 100% de agregado reciclado, a mesma diferença foi notada, com valor de redução de 32,1% para o agregado proveniente do concreto de resistência inferior, sendo estatisticamente diferentes entre si.

Outra análise feita foi a influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armaduras transversal, (Figura 2.14), em que w e s significam deslocamento horizontal e vertical, respectivamente. Foi comparado os concretos da Série 3 com 2 estribos e as Séries 4 (de referência) com a mesma quantidade de estribos, sendo que no gráfico mostrado foram plotadas apenas as curvas médias de cada grupo de corpo de prova, pois não foi possível gerar as curvas médias entre elas.

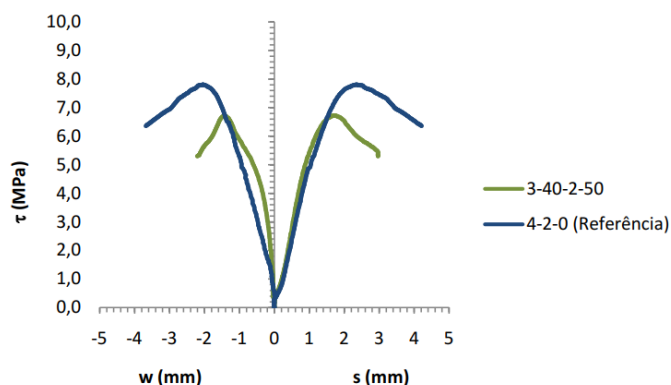


Figura 2.14 – Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal (Trindade, 2017).

Os resultados mostraram que, quando utilizado 50% de agregado reciclado com resistência do concreto original de 40 MPa, houve redução de 13,8% em relação ao concreto com agregado natural, sendo que estatisticamente foi identificado que as médias não são iguais entre si, diferenciando dos resultados para os concretos sem armadura. Os estribos aumentaram a pressão de contato entre as faces do concreto em decorrência do maior confinamento, o que gerou separação dessas faces quando foram submetidas ao cisalhamento, aumentando o efeito de engrenamento entre os agregados.

Além disso, foi verificada a influência da taxa de armadura transversal de (Figura 2.15) para corpos de prova com 50% de agregado reciclado, com resistência original de 40 MPa (Grupo 2), e com tensões de confinamento de 4,79 MPa para concretos com dois estribos e 7,64 MPa para concretos com três estribos.

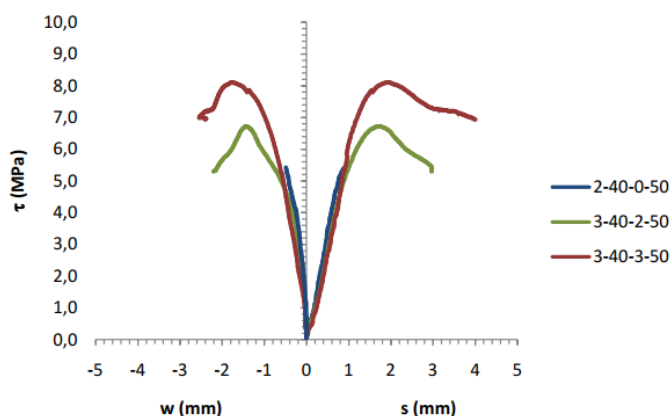


Figura 2.15 – Influência da taxa de armadura transversal na resistência ao cisalhamento (Trindade, 2017).

Esse aumento na resistência ao cisalhamento para dois estribos foi de 30,4% em relação ao corpo de prova sem estribos e de 63,7% para três estribos, sendo que o estudo estatístico mostrou que as médias entre eles são diferentes, evidenciando a influência da taxa de armadura transversal. Conclui-se que a maior tensão de confinamento proporcionada pelos estribos permite maior efeito de pino. Outro ponto observado é que, quando nenhuma taxa de armadura foi utilizada, a curva apresentou apenas o ramo ascendente, ou seja, a tensão máxima se iguala à tensão última, típico de rupturas frágeis. Já nas curvas pertencentes a corpos de prova com estribos, apresentaram ramo descendente. Após atingir a tensão máxima ela se estende horizontalmente caracterizando maiores valores de deformação, comportamento de ruptura dúctil.

Além disso, foi realizada uma comparação dos resultados experimentais dos corpos de prova sem armadura transversal com as equações de Mattock (1974) e Mattock (1988), verificando que ambas as equações apresentaram valores conservadores em comparação aos dados experimentais. Esses dados experimentais foram o dobro ou o triplo dos calculados pelas equações, dependendo da porcentagem de agregado reciclado empregada.

2.14 – Pesquisas relacionadas a concretos reforçados com fibras de aço

Devido ao fato de o concreto com agregado reciclado ser um material relativamente novo, a literatura envolvendo a transferência de tensões cisalhantes neste tipo de concreto reforçado com fibras de aço ainda é alvo de poucos estudos. Além da escassez de informações sobre este assunto, é também importante destacar o quanto as pesquisas existentes são recentes. Ao longo deste item serão apresentados estudos com abordagem voltada para o tema em questão e suas principais conclusões serão destacadas.

- Ahmed *et al.* (2010)

Ahmed *et al.* (2010) estudaram a transferência do esforço de cisalhamento por meio de ensaios *push-off* em concretos de alta resistência com e sem adição de fibras de aço. Foram moldados vinte e sete corpos de provas com as seguintes variáveis: resistência à compressão do concreto entre

56,4 MPa e 67,1 MPa, teor de fibra de aço de 0, 0,5, 1,0 e 1,5%, além da variação da taxa de armadura transversal ρf_y , de 4,4 a 8,8 MPa. Além disso, os corpos de prova foram divididos em duas séries: UC1 que se refere aos corpos de prova que não sofreram pré-fissuração e CR1 com corpos de prova pré-fissurados antes da realização dos ensaios. A Tabela 2.11 mostra as propriedades e os resultados dos ensaios.

Tabela 2.11 – Propriedades e resultados dos ensaios de amostras não-fissuradas (UC) e pré-fissuradas (CR) – adaptada de Ahmed *et al.* (2010).

Séries	Corpo de prova	f_{cm} ; (MPa)	V_f ; (%)	$\rho \cdot f_y'$; (MPa)	τ_{Cr} ; (MPa)	τ_u ; (MPa)
UC1	UC1-1	56,4	0,0	0	4,0	4,1
	UC1-2	56,4	0,0	4,4	6,7	9,6
	UC1-3	57,2	0,0	6,9	7,0	12,1
UC-2	UC2-2	58,2	0,5	0	4,8	6,4
	UC2-3	59,4	0,5	4,4	8,0	12,0
	UC2-4	-	0,5	6,9	-	-
	UC3-1	58,2	0,5	8,8	10,1	17,1
	UC3-2	60,3	1,0	0	6,4	8,6
	UC3-3	64,0	1,0	4,4	9,0	14,1
	UC3-4	63,6	1,0	6,9	9,5	16,7
UC4	UC4-1	67,1	1,0	8,8	11,0	19,6
	UC4-2	66,5	1,5	0	6,7	9,7
	UC4-3	67,1	1,5	4,4	9,2	16,2
	UC4-4	66,1	1,5	6,9	9,0	18,8
CR1	CR1-1	-	1,5	8,8	-	-
	CR1-1	57,2	0,0	0	-	2,2
	CR1-3	57,2	0,0	4,4	-	6,7
	CR1-4	57,4	0,0	6,9	-	8,9
CR3	CR3-1	57,4	0,0	8,8	-	11,7
	CR3-2	60,3	1,0	0	-	4,8
	CR3-3	64,0	1,0	4,4	-	10,5
	CR3-4	61,3	1,0	6,9	-	13,6
CR4	CR4-1	67,8	1,0	8,8	-	16,8
	CR4-2	65,9	1,5	0	-	6,9
	CR4-3	65,9	1,5	4,4	-	12,6
	CR4-4	66,4	1,5	8,8	-	15,4

Os corpos de prova de referência da série UC1 mostraram diminuição do deslocamento vertical com o aumento da taxa de armadura transversal, conforme mostrado na Figura 2.16. Os corpos de prova de referência UC1-1 sem taxa de armadura transversal ($\rho=0$) apresentaram um comportamento linear até a ruptura, que ocorreu imediatamente após o surgimento da primeira

fissura. O tipo de ruptura foi caracterizado como frágil, com a separação do corpo de prova em dois pedaços.

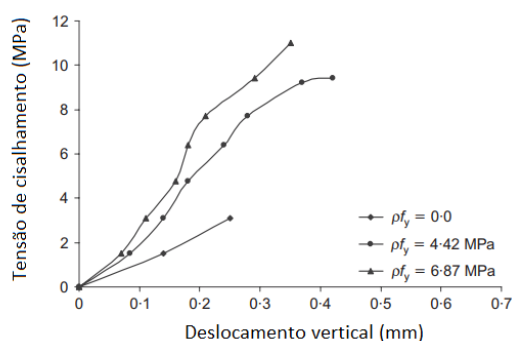


Figura 2.16 – Tensão de cisalhamento versus deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados sem fibras (Série UC1) (adaptada de Ahmed *et al.*, 2010).

O comportamento do deslocamento vertical dos corpos de prova com adição de fibras de aço sem estribos (UC1-1, UC2-1, UC3-1 e UC4-1) são mostrados na Figura 2.17.

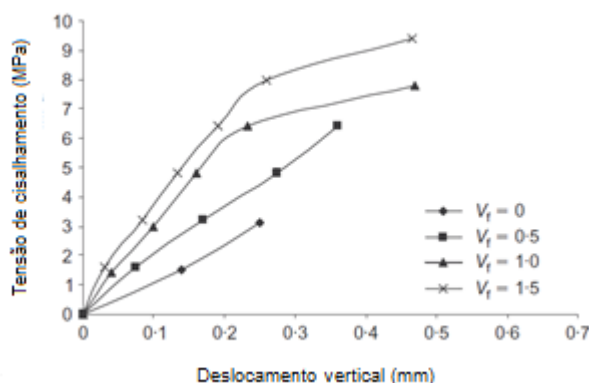


Figura 2.17 – Tensão de cisalhamento versus deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados com fibras (UC1-1, UC2-1, UC3-1 e UC4-1) (adaptada de Ahmed *et al.*, 2010).

O tipo de ruptura foi dúctil devido ao efeito das fibras de aço na matriz. O efeito do reforço das fibras de aço em corpos de prova com estribos é mostrado na Figura 2.18.

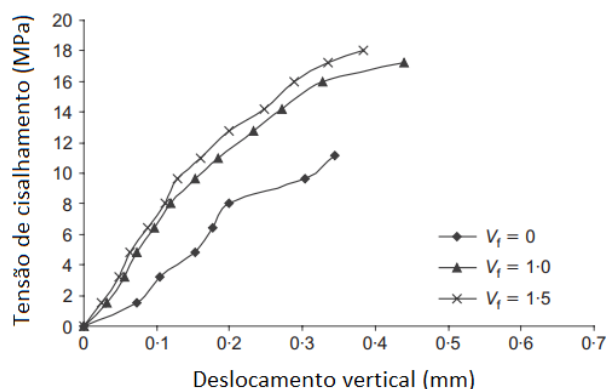


Figura 2.18 – Tensão de cisalhamento versus deslocamento vertical para corpos de prova não fissurados com estribos (UC1-3, UC3-3, e UC4-3 com $\rho f_y = 6,9$ MPa) (adaptada de Ahmed *et al.*, 2010).

Os corpos de prova UC1-3, UC3-3 e UC4-3 com $\rho f_y = 6,9$ MPa mostraram comportamento mais dúctil do que as amostras somente com estribos. A influência de ρf_y na tensão de cisalhamento última para diferentes volumes de fibras (V_f) é mostrada na Figura 2.19. A contribuição das fibras de aço à resistência ao cisalhamento é praticamente independente do conteúdo de estribo e pode ser visto que o aumento da resistência é quase proporcional ao aumento de ρf_y .

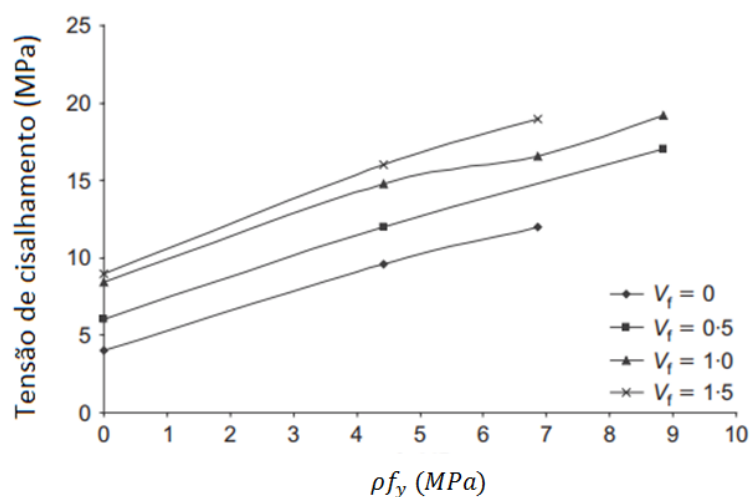


Figura 2.19 – Tensão de cisalhamento versus taxa de armadura transversal para corpos de prova não fissurados (série UC, exceto UC2-3 e UC4-4) (adaptada de Ahmed *et al.*, 2010).

Para os corpos de prova pré-fissurados CR, as tensões de cisalhamento últimas foram menores em comparação aos corpos de prova não fissurados UC, atingindo apenas 55 a 75% dessas tensões últimas, enquanto o deslocamento vertical apresentou valor de duas a três vezes maior.

A presença de pré-fissuras nos corpos de provas é algo, também, bastante relevante, pois isso faz com que seja criada uma zona de fragilidade no concreto e, conseqüentemente, as fissuras surjam pelo plano de corte definido. Com a introdução destas pré-fissuras é notório, por comparação dos corpos de prova UC (não fissurada) e CR (pré-fissurada), que os corpos de prova que não têm pré-fissuras têm resistência ao cisalhamento maior do que os que têm pré-fissuras.

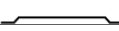
Foi constatado que, principalmente nos corpos de provas com pré-fissuras, uma maior porcentagem de fibras faz com que o concreto consiga suportar um valor de tensão aproximadamente constante com um deslocamento vertical crescente, o que não acontece para dosagens de fibras mais baixas, em que após se atingir o valor máximo da tensão de cisalhamento o ensaio termina (inexistência de confinamento).

- Khanlou *et al.* (2012)

Khanlou *et al.* (2012) estudaram a transferência do esforço de cisalhamento por meio do ensaio de cisalhamento padrão *FIP* com adição de fibras de aço, com objetivo de avaliar o desempenho de cisalhamento do concreto reforçado com fibras de aço (*SFRC*). Foram consideradas como variáveis a resistência à compressão do concreto e o teor de fibra de aço.

Foram utilizadas duas classes de resistências de concretos (35 e 60 MPa). Foram consideradas as seguintes dosagens de fibras de aço: 20 (0,25%), 40 (0,5%), 60 (0,75%) e 80 kg/m³ (1,0%). As fibras de aço utilizada foram as de alta resistência, Dramix RC-80/60-BN com gancho. As propriedades das fibras de aço estão na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Propriedades das fibras de aço (adaptada de Khanlou *et al.*, 2012).

Comprimento l_f (mm)	Diâmetro d_f (mm)	Fator de forma	Resistência à tração do aço (MPa)	Forma da fibra
60	0,75	80	1050	

Como as fibras de aço afetam significativamente as propriedades de trabalhabilidade do concreto fresco, foram realizados ensaios reológicos em um viscosímetro BML, de forma a alcançar uma mistura ideal para cada dosagem

de fibra. Dessa forma, foram desenvolvidas oito dosagens distintas, conforme Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Composição das dosagens e propriedades do concreto (adaptada de Khanlou et al., 2012).

Dosagem	Fibra (kg/m ³)	Fibra (%)	a/c	Água (kg/m ³)	Cimento (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)
C3520	20	0,25	0,6	172	287	1040	906
C3540	40	0,50	0,6	175	292	920	1007
C3560	60	0,75	0,6	185	308	750	1129
C3580	80	1,0	0,6	190	317	600	1252
C6020	20	0,25	0,4	172	410	1040	802
C6040	40	0,50	0,4	175	417	920	901
C6060	60	0,75	0,4	180	429	750	1041
C6080	80	1,0	0,4	185	440	600	1161

Os corpos de prova foram identificados por meio da resistência à compressão do concreto e da quantidade de fibras, como, por exemplo, C3540 significa dosagem de concreto com resistência de 35 MPa (C35) e fibras de aço com 40 kg/m³ (0,5%). Além dos corpos de prova, para avaliar a resistência ao cisalhamento dos concretos com fibras, designados por C3520 C3540, C3580, C6020, C6040 e C6080, corpos de provas de referência (sem fibras) foram moldados, acrescentando na nomenclatura o W (C3520W, C3540W, C3580W, C6020W, C6040W e C6080W).

Os ensaios de cisalhamento foram realizados por meio do ensaio padrão de Cisalhamento *FIP* com corpos de prova instrumentados com transdutores diferenciais variáveis lineares (*LVDTs*) para medir os deslocamentos horizontal e vertical.

Os resultados (Figuras 2.20 e 2.21), assim como a Tabela 2.14 para as séries C35 e C60, mostraram que a adição de fibras leva a uma ruptura dúctil e melhorias na resposta pós-pico. As melhorias no desempenho do cisalhamento do concreto *SFRC* foram mais significativas para adições de fibras acima de 40 kg/m³ (0,5%) em concreto normal e de alta resistência.

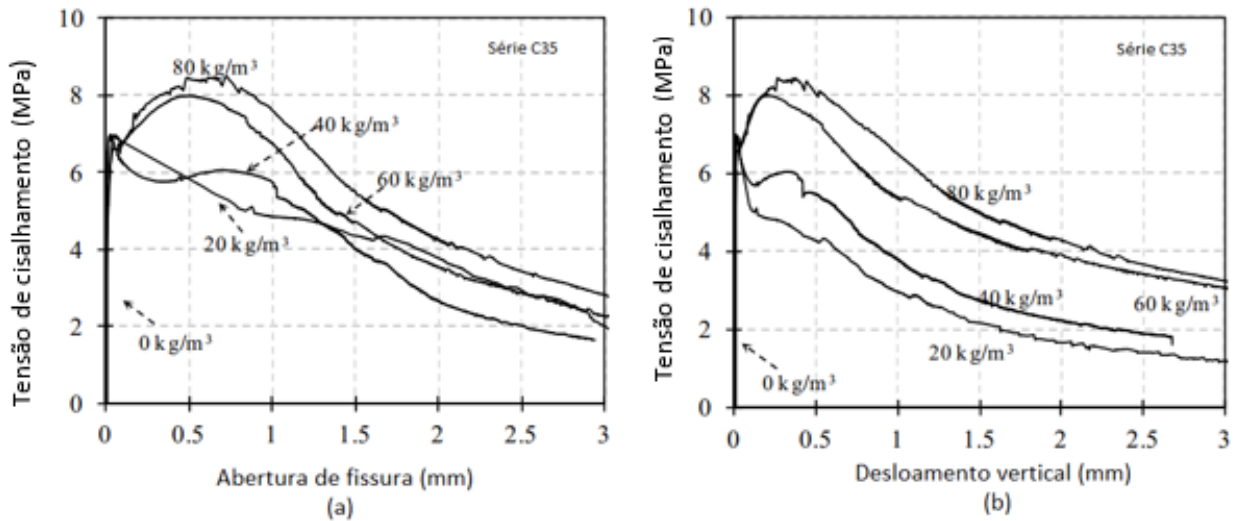


Figura 2.20 – Curvas de tensões cisalhantes de concretos SCRC C35: (a) abertura da fissura; (b) deslocamento vertical (adaptada de Khanlou *et al.*, 2010).

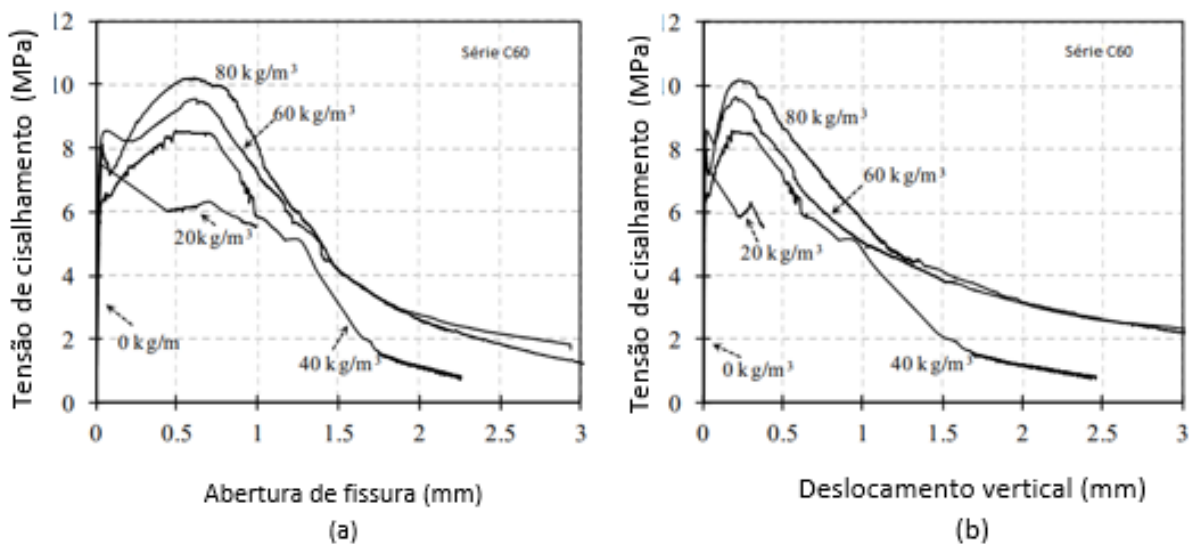


Figura 2.21 – Curvas de tensões cisalhantes de concretos SCRC C60: (a) abertura da fissura; (b) deslocamento vertical (Adaptada de Khanlou *et al.*, 2012).

Um modelo empírico de transferência de cisalhamento, baseado na análise de regressão, foi desenvolvido para prever a tensão última de cisalhamento do SFRC, onde esse modelo é função da resistência à compressão do concreto com fibras e da quantidade de fibra, expressa pela Equação 2.8.

$$\tau_{max} = 0,75 \sqrt{f'_c} + 4V_f^{0,9} \quad (2.8)$$

onde:

f'_c = resistência à compressão do concreto com fibras;

V_f = volume de fibra, em porcentagem.

Tabela 2.14 – Resistência à compressão e resultados dos ensaios de cisalhamento (adaptada de Khanlou *et al.*, 2012).

ID	f_c' 28 dias (MPa)	τ_{cr} (MPa)	τ_u (MPa)	$\left(\frac{\tau_u - \tau_{cr}}{\tau_u}\right) \times 100$ (%)
C3520	40,4	6,59	6,59	0,00
C3520W	40,2	5,10	5,10	0,00
C3540	40,0	6,95	6,95	0,00
C3540W	42,1	5,28	5,28	0,00
C3560	40,7	6,47	8,01	19,22
C3580	38,7	6,52	8,64	24,53
C3580W	36,8	4,70	4,70	0,00
C6020	65,4	7,52	7,52	0,00
C6020W	62,5	5,70	5,70	0,00
C6040	63,0	7,65	8,54	10,42
C6040W	64,4	6,20	6,20	0,00
C6060	60,1	8,30	9,40	11,70
C6080	65,3	7,90	10,2	22,54
C6080W	60,4	6,40	6,40	0,00

A Figura 2.22 mostra comparação dos resultados dos testes e as previsões do modelo proposto para a resistência última de cisalhamento do SFRC.

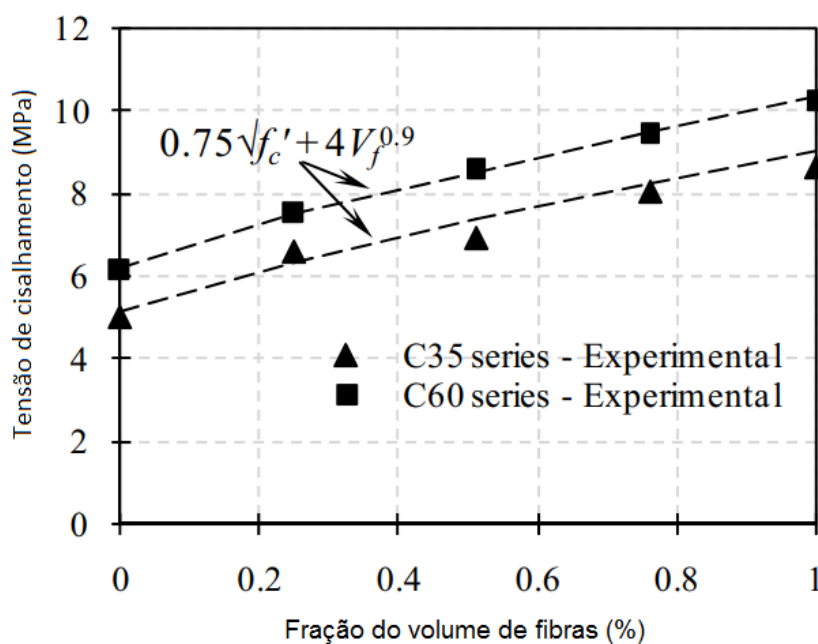


Figura 2.22 – Comparação dos dados experimentais para um modelo de tensão última de cisalhamento do SFRC (adaptada de Khanlou *et al.*, 2012).

- Gao et al. (2017)

Foram produzidas 100 amostras para analisar as propriedades mecânicas e o modo de ruptura do concreto com diferentes volumes de fibras de aço (0, 0,5, 1, 1,5 e 2%) e diferentes porcentagens de substituição de agregado natural (NCA) por agregado reciclado (RCA) (0, 30, 50 e 100%), por meio do ensaio de cisalhamento direto.

As fibras de aço utilizadas foram fibras com ganchos, com resistência à tração do aço maior do que 1000 MPa, diâmetro médio (d_f) de 0,559 mm, comprimento médio (l_f) de 30,5 mm e fator de forma $\left(\frac{l_f}{d_f}\right) = 54,6$.

A Tabela 2.15 mostra as composições dos 10 grupos, para resistência à compressão de 30, 45 e 60 MPa.

Tabela 2.15 – Proporções de mistura do concreto (adaptada de Gao et al., 2017).

Grupos	a/c	Água (kg/m³)	Consumo de cimento (kg/m³)	NCA (kg/m³)	RCA (kg/m³)	Agreg. fino (kg/m³)	Fibra de aço (kg/m³)	Fibra de aço (%)	Superplastificante (kg/m³)
C45R50F0	0,39	158	406,0	553,0	553,0	768,8	0	0	4,06
C45R50F0,5	0,39	164	420,5	527,3	527,3	749,0	39	0,5	4,21
C45R50F1	0,39	170	437,0	506,0	506,4	737,0	78	1,0	4,37
C45R50F1,5	0,39	177	453,5	506,0	506,0	753,6	117	1,5	4,54
C45R50F2,0	0,39	183	469,2	472,5	472,5	724,7	156	2,0	4,69
C45R0F1	0,41	166	405,0	1121,4	0,0	739,8	78	1,0	4,05
C45R30F1	0,40	169	422,0	735,0	315,0	736,6	78	1,0	4,22
C45R100F1	0,37	175	479,4	0,0	938,0	746,5	78	1,0	4,79
C30R50F1	0,54	170	315,0	534,0	534,0	775,8	78	1,0	3,15
C60R50F1	0,31	170	548,4	476,0	476,0	695,3	78	1,0	5,48

As curvas força de cisalhamento *versus* deslocamento são mostradas na Figura 2.23a, em que a porcentagem de agregado reciclado é igual a 50% e a resistência do concreto é de aproximadamente 45 MPa. Observa-se que tanto a carga de pico quanto a deformação crítica aumentam significativamente com o aumento do teor de fibras de aço. As zonas de transição próximas às cargas de pico são mais amplas com o aumento do teor de fibras, devido ao efeito da ponte de transferência de tensões que evitam a propagação das fissuras. A Figura 2.23b evidencia que o pico de carga e a deformação crítica aumentam com o aumento da resistência à compressão do concreto. Além disso, para

cargas abaixo de 40 kN a deformação do concreto com resistência à compressão de 60 MPa é maior do que para os concretos de menor resistência. Na Figura 2.22c as quatro curvas apresentam pico de carga muito próximas, o que mostra que o reforço com fibras de aço no concreto foi muito próximo ao concreto sem fibras.

Uma das conclusões foi que a adição de fibras de aço pode melhorar a resistência ao cisalhamento do concreto com agregado reciclado. À medida que o teor de fibras de aço aumenta de 0 a 2%, a resistência ao cisalhamento aumenta em até 135%. A resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da resistência à compressão do concreto. Para substituição de agregado reciclado de até 30%, o efeito da adição das fibras pode ser desprezado.

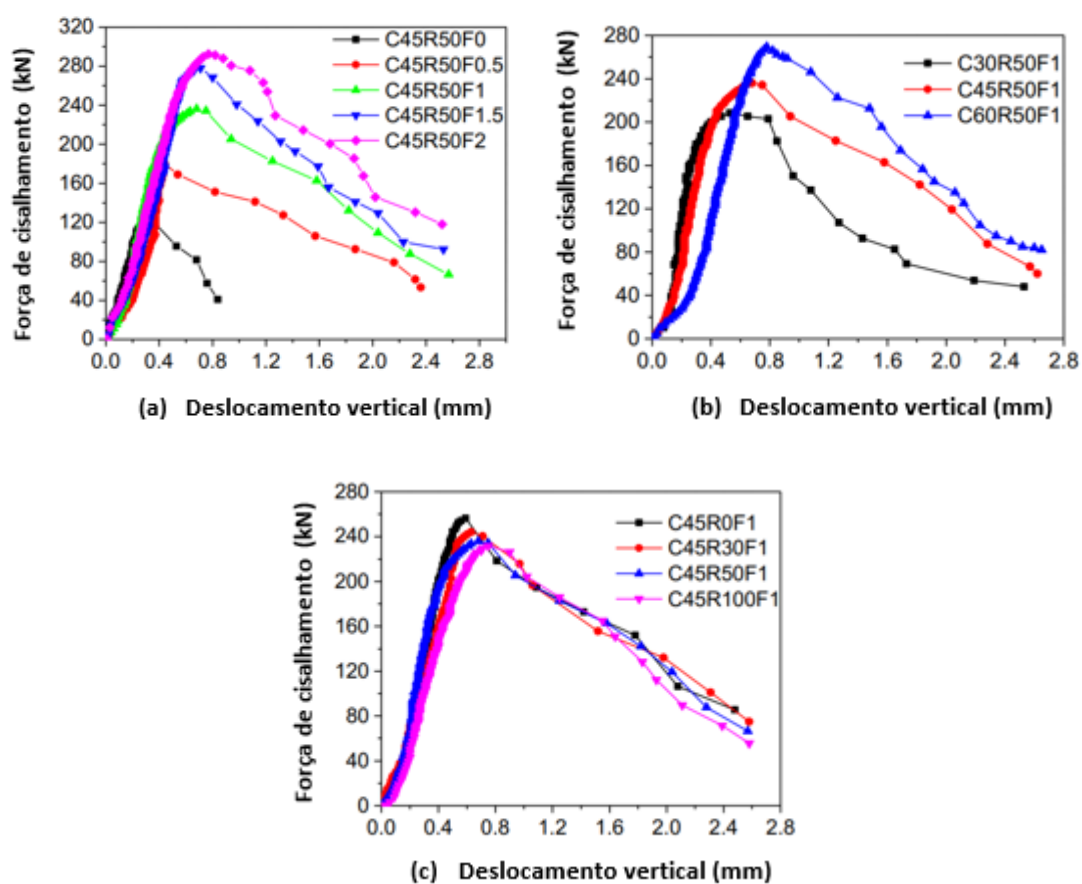


Figura 2.23 – Curvas força cisalhante *versus* deslocamento vertical: (a) teor de fibras de aço; (b) resistência à compressão; (c) relação de substituição de RCA (adaptado de Gao *et al.*, 2017).

A resistência à compressão (f_{cu}), resistência à tração (f_{ts}) e resistência ao cisalhamento (f_{tv}) dos SFRCAC's estão mostradas na Tabela 2.16.

Com a porcentagem de agregado reciclado $r_g = 50\%$ e volume de fibras de aço $V_f = 1\%$ a resistência ao cisalhamento e a resistência à tração aumentam com o aumento de f_{cu} . À medida que a relação de substituição do agregado reciclado aumenta de 0 a 100%, para um $V_f = 1\%$, a resistência ao cisalhamento f_{fv} diminui de 12,8 para 11,7 MPa. Quando a porcentagem de agregado reciclado é igual a 50% e V_f aumenta de 0 para 2%, a tensão de cisalhamento f_{fv} aumenta de 6,2 para 14,6 MPa, ou seja, 135%, mostrando que a fibra de aço tem um efeito significativo na resistência ao cisalhamento do SFRCAC. Além disso, a relação f_{fv}/f_{cu} aumenta com a relação do fator de forma da fibra de aço (l_f/d_f). Isso ocorre porque, quanto maior for o fator de forma, maior é a força de união entre a fibra de aço e o concreto, o que pode prevenir de forma mais eficiente a propagação de fissuras de cisalhamento. Logo, o coeficiente característico da fibra de aço $\lambda_f = (V_f \cdot l_f) / d_f$ é considerado como uma variável capaz de representar o efeito de reforço das fibras de aço na mistura.

Tabela 2.16 – Resistência, *slump* e módulo de elasticidade – (adaptada de Gao et al., 2017).

Corpo de prova	<i>Slump</i> (mm)	E (GPa)	f_{cu} (MPa)	f_{ts} (MPa)	f_{fv} Experimental (MPa)	f_{fv} (calculado) (MPa)
C45R50F0	55	29,7	44,9	2,77	6,2	6,5
C45R50F0,5	60	34	45,6	4,11	9,0	9,0
C45R50F1	54	38,4	46,8	5,57	11,8	11,3
C45R50F1,5	50	41,9	48,1	7,02	13,9	13,9
C45R50F2,0	48	42,9	49,9	7,61	14,6	16,6
C45R0F1	62	33	45,4	5,60	12,8	11,2
C45R30F1	60	34,6	46,0	5,53	12,2	11,2
C45R100F1	52	37,8	47,2	5,35	11,7	11,4
C30R50F1	65	28,8	34,7	4,79	10,4	9,6
C60R50F1	52	44,2	62,3	6,72	13,5	13,3

Com base nos resultados experimentais foram sugeridas equações empíricas para prever a resistência ao cisalhamento do SFRCAC (Equações 2.9 e 2.10).

$$f_{fv}/f_v = 1 + 1,3\lambda_f \quad (2.9)$$

$$f_{fv}/f_v = f_{fv} = 0,85f_{cu}^{0,55} (1 + 1,3\lambda_f) \quad (2.10)$$

2.15 – Considerações gerais

De acordo com o que foi apresentado neste capítulo, evidencia-se a necessidade de estudos em relação ao comportamento de concretos com agregados reciclados e fibras de aço, principalmente no que se refere à transferência de tensões de cisalhamento.

As pesquisas mostram os efeitos negativos referentes à presença dos agregados reciclados, no concreto, causados pela argamassa antiga aderida ao agregado após o processo de reciclagem. Outra variável que também possui grande importância e que não é muito discutida na literatura, mas que produz mudanças nas propriedades do concreto, é a resistência do concreto original a ser reciclado.

As variáveis consideradas nessa pesquisa referem-se aos principais parâmetros encontrados na literatura como: resistência original do agregado reciclado, encontrada apenas no estudo de Trindade (2017); variação do teor de fibras de aço a ser adicionada ao concreto de forma a determinar o aumento da resistência ao cisalhamento do concreto; porcentagem de substituição do agregado reciclado no teor de 50%; variação da tensão de confinamento proporcionada pela armadura transversal.

Assim, acredita-se que a adição de fibras de aço possa suprir a redução da capacidade máxima de cisalhamento em concretos com agregados reciclados, buscando-se, ao final desse estudo, identificar, se foi atingido o teor ideal de fibras capaz de suprir essa perda de resistência.

CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 – Considerações gerais

No decorrer deste capítulo serão apresentados os detalhes do programa experimental visando atender os objetivos desta pesquisa.

As variáveis envolvidas são:

- resistência à compressão do concreto residual: de acordo com conclusões de Trindade (2017), foi analisada a influência da resistência à compressão do concreto antigo (agregado reciclado) e a contribuição das fibras de aço nessa propriedade. A produção dos agregados reciclados foi originada de corpos de prova de concreto simples, com conhecimento prévio de sua resistência à compressão, sendo dividido em dois grupos, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Grupos de corpos de prova com agregados reciclados.

Grupo	Resistência à compressão (MPa)
I	15 - 20
II	35 - 40

- porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado: de acordo com Trindade (2017), a redução da resistência ao cisalhamento para concretos com o teores de 50% e 100% foram estatisticamente iguais para ambos os grupos de resistência do concreto original. Assim, optou-se na presente pesquisa por trabalhar com concretos fabricados com porcentagem de agregados reciclados de 50%.
- tensão de confinamento: vários estudos como: Fonteboa *et al.* (2010), Xiao *et al.* (2012), Ahmed *et al.* (2010), Gao *et al.* (2017), entre outros, mostraram que a influência da taxa de armadura transversal é uma variável significativa no estudo de transferência de cisalhamento. Nesse trabalho, para o estudo das tensões de confinamento foram utilizadas $2\phi 8$ mm ($\rho_y = 0,84\%$) e também

corpos de prova sem nenhum confinamento visando a comparação dos resultados com Trindade (2017).

- Teor de fibras de aço adicionado ao concreto: de acordo com Gao *et al.* (2017), a adição de fibras de aço ao concreto influencia várias propriedades do concreto com agregado reciclado, melhorando a resistência ao cisalhamento, servindo de base comparativa nessa pesquisa.

Os agregados reciclados foram caracterizados e comparados com os agregados naturais, e serviram na dosagem dos concretos reciclados conforme Trindade (2017).

Foi fixada a resistência à compressão do concreto em 30 MPa, para os dois grupos Tabela 3.1. Os concretos fabricados nesse estudo tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas por dois ensaios distintos:

- Resistência à compressão (f_{cm});
- Resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$);

Os ensaios *push-off* foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento de alta resistência inicial

O tipo de cimento utilizado para fabricação dos corpos de prova foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) da empresa Mizu.

3.2.2 Agregados

3.2.2.1 Agregado miúdo

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

3.2.2.2 Agregado graúdo

Os agregados graúdos foram os mesmos utilizados por Trindade (2017), sendo uma brita granítica tipo 0 e outra reciclada proveniente de resíduos de concreto puro com granulometria semelhante ao tipo 0.

3.2.3 Água

A água utilizada foi fornecida pela empresa Águas do Paraíba, responsável pela rede de abastecimento do Município de Campos do Goytacazes/RJ.

3.2.4 Aditivo químico

Foi utilizado um aditivo superplastificante com base em cadeia de éter carboxílico, ADVA CAST 585, com pH entre 5,00 e 7,00 e massa específica entre 1,060 a 1,080 g/cm³ na confecção dos corpos de prova das séries 1, 2 e 3.

3.2.5 Armadura

Foram utilizadas barras nervuradas de 8 mm de diâmetro, CA-50 da GERDAU, para confecção das armaduras de confinamento e para armadura longitudinal e 4,2 mm para a armadura auxiliar.

As armaduras de 8 mm de diâmetro foram ensaiadas conforme a ABNT NBR ISSO 6892-1 (2015), Figura 3.1, no Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF).

As principais propriedades físicas e mecânicas das barras estão listadas na Tabela 3.2, sendo que a curva tensão *versus* deformação é mostrada na Figura 3.2.



Figura 3.1 – Ensaio de tração realizado na barra de aço de 8 mm.

Tabela 3.2 – Propriedades físicas e mecânicas da armadura longitudinal e estribos.

Aço	Área (mm ²)	ϕ (mm)	f_y (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_y (‰)	E_{st} (‰)	f_{st} (MPa)
CA-50	50,24	8	575	151,3	3,75	23,3	667

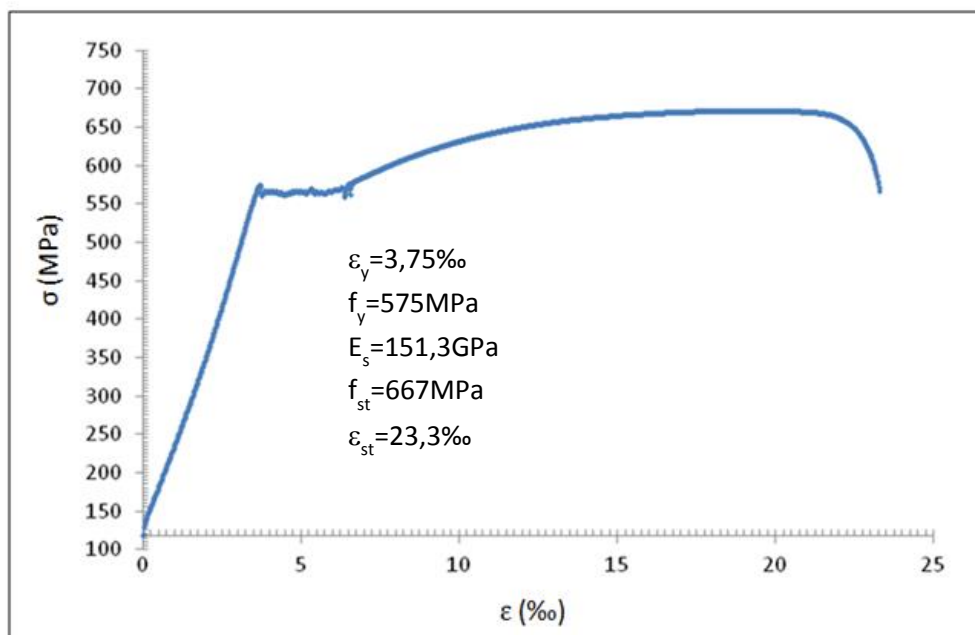


Figura 3.2 – Curva tensão *versus* deformação para a armadura longitudinal e estribos de diâmetro de 8 mm.

3.2.6 Fibras de aço

As fibras de aço foram escolhidas de forma que pudessem ter suas principais propriedades compatíveis com o estudo realizado por Gao *et al.* (2017). Foram utilizadas fibras Wirand da empresa MACCAFERRI, produzidas a partir de aço de baixo teor de carbono, trefilado a frio. As propriedades físicas e mecânicas estão nas Tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente. A Figura 3.3 mostra a configuração das fibras de aço utilizadas nesse estudo.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas das fibras de aço.

Característica	Unidade	Fibra FS7
Relação L/d (comprimento / diâmetro)	-	60
Tolerância do valor individual da relação L/d	%	15
Tolerância do valor médio da relação L/d	%	7,5
Diâmetro	mm	0,55
Tolerância do valor individual do diâmetro	%	10
Tolerância do valor médio do diâmetro	%	5
Comprimento	mm	33
Tolerância do valor individual do comprimento	%	10
Tolerância do valor médio do comprimento	%	5

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas das fibras de aço.

Propriedades Mecânicas	Unidade	Fibra FS7
Resistência à tração	MPa	> 1.100
Deformação na ruptura	%	< 4
Módulo de elasticidade	GPa	210



Figura 3.3 – Fibras de aço utilizadas na pesquisa.

3.3 Produção do agregado reciclado

3.3.1 Coleta dos corpos de prova de concreto utilizados como agregado reciclado:

Os corpos de prova foram coletados no laboratório da empresa CONCREVIT na cidade de Macaé, pois se optou-se pela produção de agregados reciclados de composição pura e que apresentassem distinções entre os grupos de resistência (15 a 20 MPa e 35 a 40 MPa).

Os corpos de prova coletados eram cilíndricos com dimensões 100 mm x 200 mm.

A quantidade de corpos de prova coletados foi de 350 exemplares, que foram identificados em relação ao tipo de resistência à compressão, ou seja, Grupo I (15 a 20 MPa) e Grupo II (35 a 40 MPa), conforme Figura 3.4. Posteriormente eles foram transportados e armazenados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF), para que pudessem ser britados e peneirados de forma igual para ambos os grupos.



Figura 3.4 – Corpos de prova armazenados e identificados para produção do agregado reciclado.

3.3.2 Britagem

Foi utilizado um britador de mandíbulas para a confecção dos agregados reciclados. Esse britador possui as seguintes vantagens (Hansen, 1992):

- distribuição granulométrica dos agregados mais apropriada para fabricação de concreto;
- não produz grandes alterações na estrutura do agregado original do concreto a ser reciclado;
- produz em torno de 20% de finos abaixo de 4,8 mm.

De acordo com Figueira (2004), o britador tipo mandíbula é mais indicado para materiais abrasivos e de difícil fragmentação, possuindo como desvantagem a largura relativamente pequena quando comparada com o círculo de saída de uma máquina giratória, limitando a capacidade de produção. A Figura 3.5 mostra um desenho esquemático desse tipo de britador.

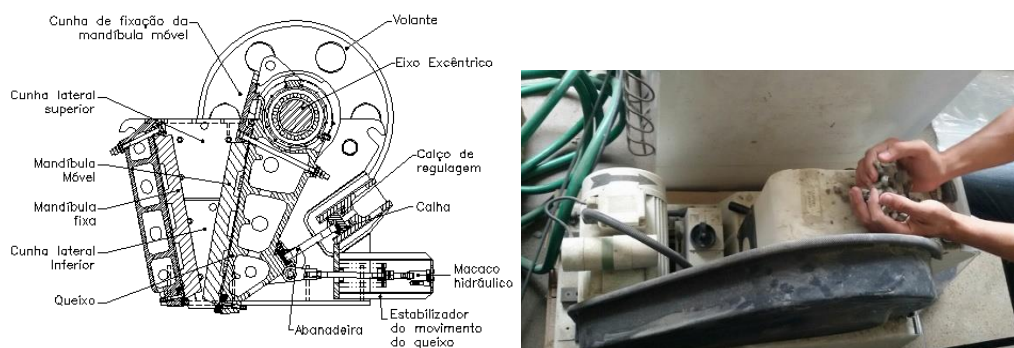


Figura 3.5 - Britador de mandíbula: (a) representação esquemática do britador de mandíbula (Figueira *et al.*, 2004); (b) britador de mandíbula utilizado nessa pesquisa.

Dessa forma, optou-se nesta pesquisa pela fabricação de brita 0, pois durante o processo de fragmentação dos corpos de prova houve grande quantidade de fragmentos de pequenas dimensões, próximas às dimensões da brita 0. A Figura 3.6a mostra a fragmentação dos corpos de prova antes de entrar no britador; a Figura 3.6b mostra um fragmento de material na entrada do britador; e a Figura 3.6c mostra o material na saída do britador.

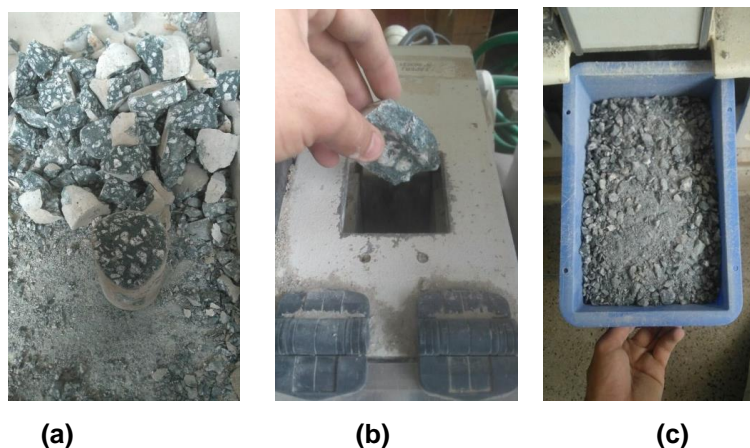


Figura 3.6 - Processo de fabricação e britagem (a) quebra dos corpos de prova para produção do agregado graúdo; (b) entrada no britador; (c) material na saída do britador.

3.3.3 Peneiramento, pesagem e armazenamento

O peneiramento foi realizado com o intuito de produzir brita 0, por meio de um peneirador elétrico da marca Pavitest, com auxílio de perneiras granulométricas quadradas de dimensões 50 cm x 50 cm x 10 cm e aberturas de 12,5 e 4,75 mm. Após o peneiramento, o material que passou na peneira 12,5 mm e ficou retido na peneira 4,75 mm foi utilizado na produção do concreto com agregado graúdo reciclado. Já a fração que ficou retida na peneira 12,5 mm foi novamente britada para a produção do agregado na faixa granulométrica preestabelecida. A Figura 3.7a mostra o material retido na peneira 4,75 mm e a 3.7b o material retido na peneira de 12,5 mm.

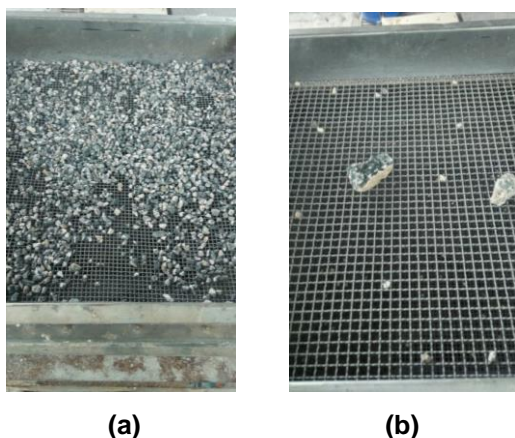


Figura 3.7 - Processo de peneiramento: (a) material retido na peneira 4,75 mm; (b) material retido na peneira 12,5 mm.

Após o peneiramento, todo o agregado peneirado foi pesado, identificado e armazenado em sacos plásticos segundo sua classe de resistência, como brita de resistência 15 a 20 MPa (Grupo I) e de 35 a 40 MPa (Grupo II).

3.4 Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados reciclados foi realizada com o objetivo de determinar as propriedades físicas essenciais desses agregados, de modo que essas propriedades fossem comparadas com os dados obtidos por Trindade (2017)

Inicialmente foi realizado o método de quarteamento, de acordo com a ABNT NBR NM 27 (2001). O procedimento consiste em dividir a amostra em quatro partes iguais, eliminando duas em sentido diagonal. Esse processo se repete até reduzir a amostra à quantidade necessária para ensaio. A Tabela 3.5 mostra a quantidade de amostra requerida para a caracterização física e química de agregados, de acordo com a NBR NM 26 (2009).

Tabela 3.5 – Quantidade de amostra requerida para ensaios (NBR NM 26, 2009).

Dimensão característica do agregado (mm)	Número mínimo de amostras parciais	Quantidade total da amostra de campo	
		Em massa (kg)	Em volume (litros)
$\leq 9,5$	3	25	40
$> 9,5 \leq 19$		25	40
$> 19 \leq 37,5$		50	75
$> 37,5 \leq 75$		100	150
$> 75 \leq 125$		150	225

3.4.1 Composição granulométrica

O ensaio de granulometria foi executado conforme a ABNT NBR NM 248 (2003), sendo separada uma amostra seca de 1 kg. Para o agregado graúdo foram separados 2 kg secos. Posteriormente, foram determinadas as curvas granulométricas dos agregados miúdo e graúdo, assim como o módulo de finura da areia.

3.4.2 Massa específica real e unitária

O ensaio de massa específica real do agregado miúdo foi realizado por meio do frasco de Chapman, conforme Figuras 3.8a e 3.8b. Já para o agregado graúdo foi realizado conforme a ABNT NBR NM 53 (2009).

A determinação da massa específica unitária foi realizada conforme a ABNT NBR NM 45 (2006).

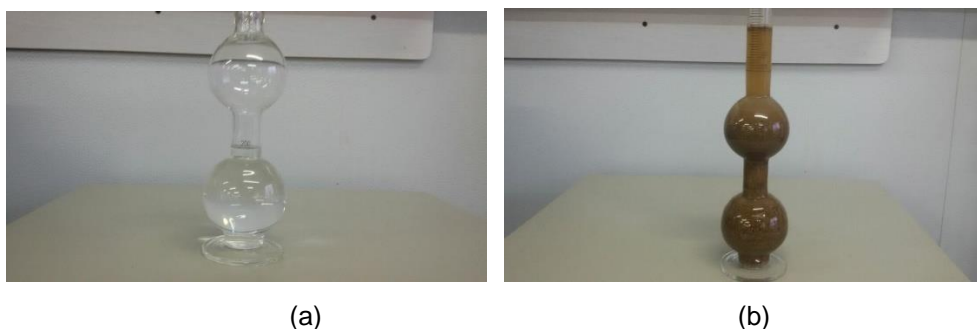


Figura 3.8 - Determinação da massa específica real do agregado miúdo: a) início do ensaio; b) final do ensaio.

3.4.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água em agregado graúdo foi realizado conforme a ABNT NBR NM 53 (2009), por meio de uma balança hidrostática, em que os agregados foram secos em estufa e posteriormente foram submersos em água durante um período de 24 horas. Em seguida, foi pesada e correlacionada sua absorção. As figuras 3.9a e 3.9b mostram detalhe da pesagem da brita submersa.



Figura 3.9 - Pesagem do agregado graúdo submerso: a) início do ensaio; b) término do ensaio.

3.4.4 Abrasão Los Angeles

O desgaste da superfície dos agregados graúdos foi verificado por meio do ensaio de abrasão Los Angeles (ABNT NBR NM 51, 2001), sendo que o ensaio granulométrico classificou os agregados graúdos na faixa “C”. Dessa forma, a ABNT NBR 51 (2001) recomenda que seja pesada uma amostra com 5 kg e utilizadas 8 esferas com um total de 500 rotações. A determinação da perda de massa por abrasão é obtida pela diferença entre a massa antes e após a realização do ensaio. A carga abrasiva do ensaio foi de $3330 \pm 20\text{g}$.

3.4.5 Quantidade de argamassa antiga aderida no agregado reciclado

De acordo com Bazuco (1999), citado por Trindade (2017), o procedimento para quantificação de argamassa antiga é feito com a utilização de ataque com ácido clorídrico na concentração de 10% m/v . O ensaio consiste na imersão da amostra nessa solução por um período de 24 horas. Pela diferença de massa determina-se a porcentagem de argamassa antiga existente no agregado graúdo. As Figuras 3.10a e 3.10b mostram a realização do ensaio nos dois grupos de agregados reciclados, com grande quantidade de material fino no fundo do recipiente, caracterizando grande perda de massa. Já as Figuras 3.11a e 3.11b mostram o antes e o depois do ataque químico nos agregados reciclados do Grupo I (15 a 20 MPa) e do Grupo II (35 a 40 MPa), respectivamente.



Figura 3.10 – Ácido agindo no agregado reciclado: a) Grupo I – 15 a 20 MPa; b) Grupo II – 35 a 40 MPa.

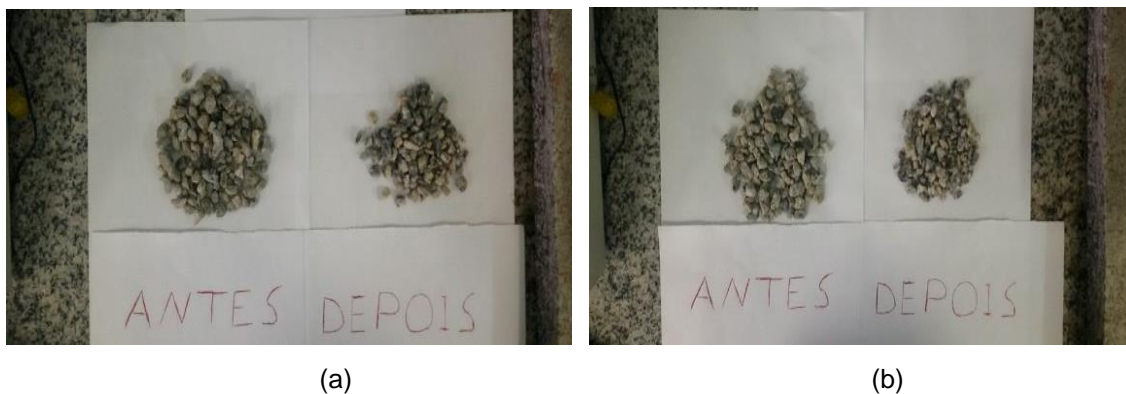


Figura 3.11 – Realização do ensaio de ataque químico nos agregados reciclados: a) antes e depois do ataque químico no Grupo I; b) antes e depois do ataque químico no Grupo II.

3.4.6 Massa específica real e absorção de água do agregado após o ataque químico

Foi realizada a caracterização do agregado graúdo reciclado após o ataque químico, para ser comparado ao utilizado por Trindade (2017). Dois tipos de ensaios foram realizados:

- massa específica real;
- absorção de água.

3.5 Descrição dos corpos de prova

O programa experimental consistiu na divisão dos corpos de prova em quatro séries, que possuíam dois tipos de corpos de prova distintos, com diferentes teores de fibras de aço adicionadas ao concreto, conforme descrito na Tabela 3.6. Foram produzidos 30 corpos de prova do tipo *push-off*, sendo 10 tipos diferentes, com 3 réplicas para cada tipo, variando a porcentagem de agregado reciclado em 50% de substituição.

As séries foram divididas conforme Figura 3.12.

Tabela 3.6 – Detalhes dos corpos de prova de cada série.

Série	Resistência do concreto antigo (MPa)	Estribos de 8 mm	(%) Substituição	(%) Fibra	Corpo de prova
1	15 a 20 MPa	0	50	0,5	CPn 1-20-0-50%-0,5%
				1,5	CPn 1-20-0-50%-1,5%
2	35 a 40 MPa	0	50	0,5	CPn 2-40-0-50%-0,5%
				1,5	CPn 2-40-0-50%-1,5%
3	35 a 40 MPa	2	50	0,5	CPn 3-40-2-50%-0,5%
				1,5	CPn 3-40-2-50%-1,5%
4	-	0	0	0,5	CPn 4-0-0%-0,5%
	-		0	1,5	CPn 4-0-0%-1,5%
	-	2	0	0,5	CPn 4-2-0%-0,5%
	-		0	1,5	CPn 4-2-0%-1,5%

Série 1	Série 2	Série 3	Série 4
- Concreto antigo de 15 a 20 MPa; - Taxa de armadura transversal 0% ($\rho_y f_y = 0$ MPa); - Substituição de agregado reciclado de 50%; Teor de fibras de aço 0,5% e 1,5%.	- Concreto antigo de 35 a 40 MPa; - Taxa de armadura transversal 0% ($\rho_y f_y = 0$ MPa); - Substituição de agregado reciclado de 50%; Teor de fibras de aço 0,5% e 1,5%.	- Concreto antigo de 35 a 40 MPa; - Taxa de armadura transversal 2 ϕ 8 ($\rho_y f_y = 4,79$ MPa); - Substituição de agregado reciclado de 50%; Teor de fibras de aço 0,5% e 1,5%.	- Agregado natural; - Taxa de armadura 2 ϕ 8 ($\rho_y f_y = 4,79$ MPa) e sem armadura ($\rho_y f_y = 0$ MPa); - Substituição de agregado reciclado de 0%; Teor de fibras de aço 0,5% e 1,5%.

Figura 3.12 – Distribuição esquemática dos corpos de prova.

A nomenclatura utilizada para os corpos de prova é mostrada a seguir:

CPn 1-20-0-50%-0,5%

onde,

n – número do corpo de prova (1, 2 ou 3);

1 – número da série do corpo de prova,

20 – resistência do concreto antigo de 20 MPa;

0 – número de estribos;

50% - porcentagem de substituição de agregado reciclado;

0,5% - fração volumétrica de fibras de aço em função do volume de concreto;

3.5.1 Corpos de prova *push-off*

Os corpos de prova *push-off* seguiram os padrões adotados por Trindade (2017), 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. Os esquemas dos corpos de prova estão nas Figuras 3.13 e 3.14.

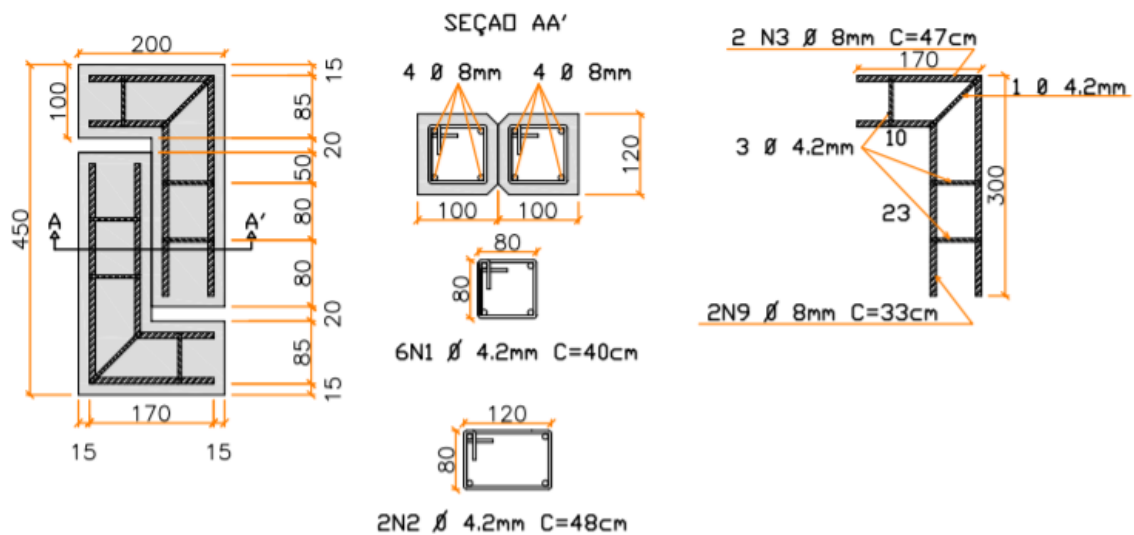


Figura 3.13 – Detalhamento dos corpos de prova sem estribos.

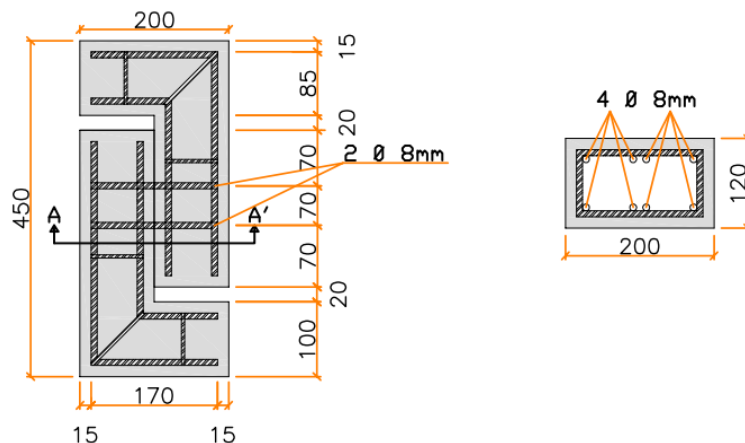


Figura 3.14 – Detalhamento dos corpos de prova com 2 estribos de 8 mm.

A Tabela 3.7 mostra as quantidades dos corpos de provas *push-off*, conforme classificação das séries e respectiva nomenclatura.

Tabela 3.7 - Resumo da quantidade de corpos de prova para os ensaios *push-off*.

Série	Corpo de prova	Quantidade
1	1-20-0-50%-0,5%	3
	1-20-0-50%-1,5%	3
2	2-40-0-50%-0,5%	3
	2-40-0-50%-1,5%	3
3	3-40-2-50%-0,5%	3
	3-40-2-50%-1,5%	3
4	4-0-0%-0,5%	3
	4-0-0%-1,5%	3
	4-2-0%-0,5%	3
	4-2-0%-1,5%	3
Total		30

3.6 Dosagem dos concretos

O processo de dosagem dos concretos foi baseado no estudo realizado por Trindade (2017), que seguiu as recomendações do método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), fixando a resistência característica à compressão do concreto em 30 MPa, aos 28 dias, para todas as dosagens.

Foram seguidas as mesmas recomendações de Trindade (2017) em relação ao processo de pré-saturação dos agregados reciclados, com acréscimo de cimento de 3%, para o percentual de 50% de agregado reciclado. Foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 15116 (2004), que especifica 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado, elevando-se assim a relação *a/c* de algumas dosagens, conforme na Tabela 3.8.

O uso de aditivo superplastificante foi para se atingir a mesma trabalhabilidade de Trindade (2017), verificada pelos ensaios de *slump* e tempo VeBe, já que, conforme Figueiredo (2015), a utilização de fibras de aço diminui a trabalhabilidade do concreto. O aditivo superplastificante foi diluído na água de amassamento, pois a quantidade era menor do que 2g/Kg de cimento, conforme recomenda a NBR 12655 (2015). A porcentagem de substituição por

agregado reciclado foi de 50% da brita natural, tanto no Grupo I como no Grupo II.

As fibras de aço foram dosadas com teores de 0,5 e 1,5% do volume de concreto.

Tabela 3.8 – Especificação dos materiais utilizados nas dosagens de concreto.

Material	Dosagem					
	1	2	3	4	5	6
Dosagem						
Séries	4	4	1	1	2 e 3	2 e 3
Cimento (kg/m ³)	410,00	410,00	422,33	422,33	422,33	422,33
Água (kg/m ³)	230,00	230,00	236,50	236,50	236,50	236,50
Brita natural (kg/m ³)	833,75	833,75	416,88	416,88	416,88	416,88
Brita 15-20 MPa (kg/m ³)	-		339,25	339,25		
Brita 35-40 MPa (kg/m ³)	-				330,63	330,63
Areia (kg/m ³)	911,50	911,50	913,13	913,13	926,70	926,7
Aditivo (kg/m ³)	-		0,21	0,31	0,21	0,31
Fibra de aço (kg/m ³)	39,25	78,50	39,25	78,50	39,25	78,50
Pré-saturação (kg/m ³)	-	-	16,74	16,74	13,81	13,81
Relação a/c	0,560	0,560	0,560	0,560	0,560	0,560
Relação a/c (total)	0,560	0,560	0,599	0,599	0,592	0,592

3.7 Fôrmas

Foram fabricadas seis fôrmas metálicas para a realização dos ensaios *push-off* com a finalidade de otimizar a concretagem, uma vez que foram produzidos três corpos de prova para cada dosagem. Conforme demonstrado na Figura 3.15a, existe uma saliência na parte superior e inferior da fôrma com o objetivo de delimitar o plano de cisalhamento. Além disso, foram utilizados isopores para delimitar as aberturas nas extremidades. A Figura 3.15b mostra as fôrmas com as armaduras em seu interior.



(a)

(b)

Figuras 3.15 - Fôrmas metálicas para os corpos de prova *push-off*. (a) detalhe da fôrma sem a armadura; (b) detalhe da fôrma com a armadura disposta em seu interior.

3.8 Fabricação e cura dos concretos

Para a fabricação dos concretos foram seguidas as etapas:

- umedecer a betoneira com água;
- misturar os agregados reciclados com água de pré-saturação durante 1 minuto;
- repousar por 10 minutos, com a betoneira desligada, para que seja absorvida parte da água pelos agregados;
- adicionar os agregados graúdos naturais e metade da água e misturar durante 1 minuto;
- adicionar o cimento e o restante da água e misturar durante 30 segundos;
- adicionar a areia e a fibra de aço e misturar durante 2 minutos.

A disposição dos materiais seguiu a mesma sequência de Trindade (2017). Além disso, conforme recomendações de Figueiredo (2015), as fibras de aço foram polvilhadas ao concreto em pequenas quantidades para evitar a formação de “novelos”.

O adensamento do concreto foi realizado em uma mesa vibratória, sendo que todo o processo, desde a moldagem até a cura dos corpos de prova, seguiu as recomendações da NBR 5738 (2015). A cura foi realizada durante um período de 28 dias em tanque de água saturada com cal.

Os procedimentos de produção e adensamento dos concretos estão nas Figuras 3.16 e 3.17.



(a)

(b)

Figuras 3.16 – Produção dos concretos: (a) detalhe do polvilhamento das fibras de aço; (b) detalhe da mistura dos materiais.



(a)

(b)

Figuras 3.17 – Lançamento dos concretos: (a) detalhe da moldagem dos corpos de prova; (b) detalhe do adensamento do concreto na mesa vibratória.

3.9 Caracterização dos concretos no estado fresco

Para caracterização dos concretos no estado fresco, foi realizado o ensaio de *slump* de acordo com a ABNT NBR NM 67 (1998), assim como o ensaio de tempo VeBe, conforme a BS 1881 (1983) e DNIT 064/2004. A Figura 3.18a e 3.18b mostra a realização desses ensaios.



(a)

(b)

Figura 3.18 – Ensaio do concreto no estado Fresco: (a) detalhe do ensaio de *slump*; (b) detalhe do ensaio de tempo VeBe.

3.10 Caracterização dos concretos no estado endurecido

Foram realizados ensaios para avaliar as seguintes propriedades mecânicas dos concretos: resistência à compressão (f_c), resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), absorção de água e massa específica.

Foram produzidos corpos de prova com 450 mm x 150 mm x 150 mm, que foram cortados em três partes iguais de 150 mm x 150 mm x 150 mm para realização do ensaio de absorção e massa específica. Os ensaios foram realizados conforme as normas brasileiras (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 – Ensaios para caracterização dos concretos no estado endurecido.

Ensaio	Norma
Resistência à compressão	ABNT NBR 5739 (2007)
Resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222 (2011)
Absorção de água e massa específica	ABNT NBR 9778 (2009)

A Figura 3.19 mostra o ensaio de resistência à compressão (f_c). A Figura 3.20 mostra o ensaio de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$), e a Figura 3.21 a produção dos corpos de prova para realização dos ensaios de absorção de água e massa específica.



Figuras 3.19 – Ensaio de resistência à compressão do concreto.



Figuras 3.20 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral do concreto.



Figura 3.21 – Produção de corpos de prova: a) moldagem; b) corpos de prova para a realização do ensaio de absorção e massa específica.

3.11 Procedimentos do ensaio *push-off* e instrumentação

Os ensaios *push-off* foram realizados em um pórtico metálico com atuador hidráulico modelo 244.41 acoplado a uma célula de carga com capacidade de 500 kN da marca MTS, com velocidade de 5,9 mm/s. Conforme já informado, foram realizados três corpos de prova para cada série, de modo a garantir maior confiabilidade dos resultados.

O ensaio *push-off* foi instrumentado com transdutores diferencial variável linear (*LVDTs*), distribuídos de forma que dois deles faziam a medição do deslocamento horizontal e os outros dois faziam a medição do deslocamento vertical. A Figura 3.22 mostra o posicionamento dos *LVDTs* no corpo de prova

e a Figura 3.23 mostra os *LVDTs* posicionados no corpo de prova no ensaio de cisalhamento direto.

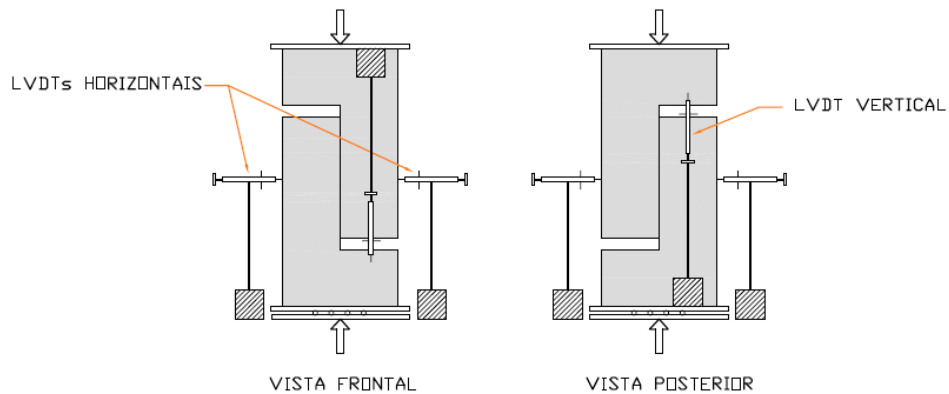


Figura 3.22 – Esquema dos *LVDTs* no ensaio *push-off*.



Figura 3.23 – Posicionamento dos *LVDTs* nos corpos de prova.

Nos corpos de prova com dois estribos foi colocado um *strain gage* em um dos estribos, no plano de cisalhamento, de forma a realizar a medida da deformação da armadura. A Figura 3.24 mostra os *strain gages* nos estribos das armaduras.



Figura 3.24 – Posicionamento dos *strain gages* nos estribos das armaduras.

CAPÍTULO IV – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados nessa pesquisa.

4.1 – Caracterização dos agregados

4.1.1 – Composição granulométrica do agregado miúdo

A Figura 4.1 mostra a curva granulométrica do agregado miúdo que, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2009), possui módulo de finura igual a 2,15, valor compreendido dentro da zona utilizável inferior.

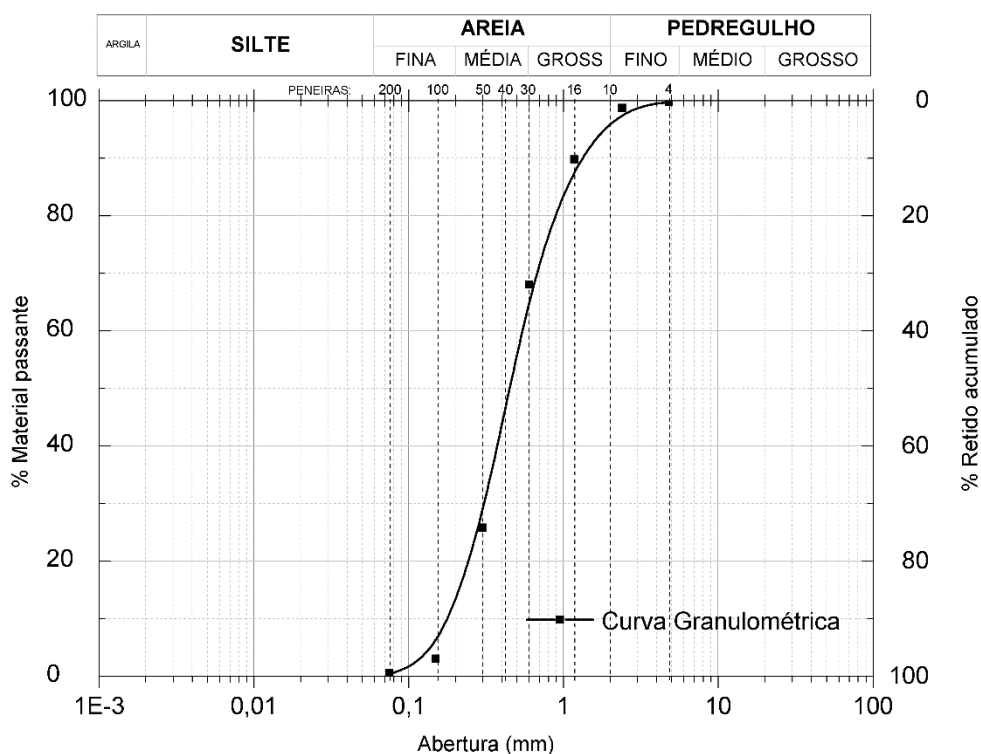


Figura 4.1 – Curva granulométrica do agregado miúdo.

4.1.2 – Composição granulométrica dos agregados graúdos

A Figura 4.2 mostra as curvas granulométrica dos agregados graúdos referentes ao Grupo I (agregados provenientes de concretos de resistência de 15 a 20 MPa), ao Grupo II (agregados provenientes de concretos de resistência de 35 a 40 MPa) e brita natural. De acordo com as curvas, verifica-se que elas

se encontram bem próximas umas das outras e próximas às do estudo de Trindade (2017).

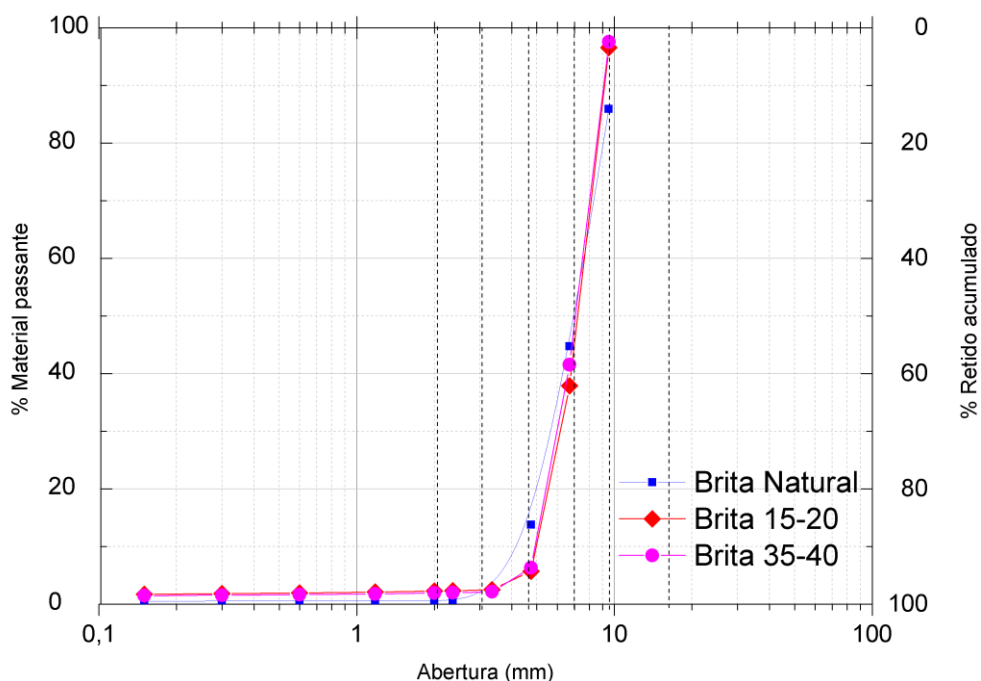


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos.

Verifica-se que todos os agregados graúdos possuem valores dentro dos limites aceitáveis recomendados pela ABNT NBR 7211 (2009).

4.1.3 – Massa específica real do agregado miúdo

De acordo com a ABNT NBR NM 45 (2006), procedimento do frasco de Chapman, encontrou-se um valor de $2,62 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica real do agregado miúdo, similar ao de Trindade (2017).

4.1.4 – Massa específica real e unitária dos agregados graúdos

Na Tabela 4.1 são mostradas as massas específicas dos agregados reciclados do Grupo I, do Grupo II e da brita natural.

Tabela 4.1 – Massa específica real e massa unitária dos agregados graúdos.

Agregado	Massa específica real (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)
Brita Natural	2,75	1,42
Brita Grupo 1	2,62	1,13
Brita Grupo 2	2,64	1,11

Os resultados mostram redução da massa específica real de aproximadamente 5% dos agregados reciclados de ambos os Grupos em relação à brita natural. Verificam-se esses valores próximos aos encontrados na literatura.

Em relação aos resultados encontrados de massa unitária, verificou-se redução de 20% em comparação dos Grupos I e II em relação ao agregado natural. Este resultado é devido à geometria angulosa do agregado reciclado, aumentando o número de vazios ao serem colocados no recipiente, diminuindo a massa por unidade de volume (Trindade, 2017).

4.1.5 – Absorção de água dos agregados graúdos

Os resultados encontrados nos ensaios de absorção de água dos agregados graúdos estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Absorção de água dos agregados graúdos.

Agregado	Massa seca (g)	Massa saturada superfície seca (g)	Absorção (%)
Brita natural	2000	2008,2	0,41
Brita Grupo 1	2000	2123,0	6,15
Brita Grupo 2	2000	2104,5	5,23

Os resultados de absorção de água para o agregado reciclado do Grupo I foi 15 vezes maior do que a absorção da brita natural. Já para o agregado reciclado do Grupo II foi aproximadamente 13 vezes maior. Assim como encontrado por Trindade (2017), esses valores discrepantes em relação ao agregado natural são encontrados na literatura, sendo esse aumento na absorção da água explicado pela presença da argamassa antiga existente no agregado reciclado.

4.1.6 – Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos

Na Tabela 4.3 são mostrados os resultados do ensaio de abrasão Los Angeles dos agregados reciclados do Grupo I e II, assim como do agregado natural.

Tabela 4.3 – Abrasão Los Angeles dos agregados graúdos.

Agregado	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda por abrasão (%)
Brita natural	5000	2443,60	51,1
Brita Grupo I	5000	2266,65	54,7
Brita Grupo II	5000	2357,48	52,9

Os resultados não apresentam diferenças significativas entre si, fato que pode ser explicado devido à produção desses materiais serem obtidos de resíduos unicamente de concretos com características e resistências superiores aos agregados reciclados mistos. Ressalta-se que esses resultados também estão de acordo com o estudo realizado por Trindade (2017).

4.1.7 – Argamassa residual presente nos agregados graúdos reciclados

A quantidade de argamassa residual presente no agregado reciclado está na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Argamassa residual presente nos agregados graúdos.

Agregado	Massa antes do ataque (g)	Massa após o ataque (g)	Perda de massa (%)
Grupo I	100	64,44	35,6
Grupo II	100	54,90	45,1

Os resultados mostram que os agregados reciclados do Grupo II (concretos com agregados de resistência de 35 a 40 MPa) possuem 9,5% a mais de argamassa residual do que os agregados do Grupo I (concretos com agregados de resistência de 15 a 20 MPa). Essa diferença também foi verificada no estudo de Trindade (2017), e pode ser explicado pelo fato de o Grupo II possuir resistência maior, com maior consumo de cimento na produção do concreto e maior quantidade de pasta aderida ao agregado.

4.1.8 – Massa específica real e absorção de água dos agregados graúdos reciclados após ataque ácido

Os resultados da absorção de água e de massa específica referentes aos dois grupos de agregados reciclados estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Massa específica e absorção de água dos agregados graúdos reciclados após ataque de ácido.

Agregado	Massa específica (g/cm³)	Absorção de água (%)
Grupo I	2,69	0,47
Grupo II	2,68	0,46

Os resultados referentes à absorção de água dos agregados reciclados mostraram que houve acréscimo de aproximadamente 15% para o agregado do Grupo I e de aproximadamente 13% para o agregado do Grupo II. Como o acréscimo de absorção dos agregados reciclados antes do ataque ácido foram de 13 a 15 vezes maiores do que o agregado natural, conclui-se que a única variável responsável por essa variação de absorção é a argamassa antiga presente no agregado reciclado, corroborando os resultados de Trindade (2017).

4.2 – Caracterização do concreto no estado fresco

Os resultados referentes à caracterização dos concretos no estado fresco estão na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Caracterização do concreto no estado fresco.

Dosagem	Série	Grupo	(%) Agregado reciclado	(%) Fibra de aço	Relação a/c total	Slump (cm)	Tempo VeBe (s)
1	4	-	0	0,5	0,560	3,2	6,48
2	4	-	0	1,5	0,560	3,1	6,41
3	1	1	50	0,5	0,599	4,6	6,07
4	1	1	50	1,5	0,599	4,5	6,14
5	2 e 3	2	50	0,5	0,592	4,4	6,21
6	2 e 3	2	50	1,5	0,592	4,3	6,28

As composições dos concretos foram realizadas de modo que os valores atingissem os mesmos do estudo de Trindade (2017).

4.3 – Caracterização do concreto no estado endurecido

4.3.1 – Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resistência à compressão.

Corpos de prova	Compressão			Desvio-padrão (MPa)
	Carga (kN)	f_{cm} (MPa)	Média (MPa)	
CP1 1-20-0-50-0,5	246,4	31,4	31,5	0,1
CP2 1-20-0-50-0,5	247,2	31,5		
CP3 1-20-0-50-0,5	248,3	31,6		
CP4 1-20-0-50-0,5	248,1	31,6		
CP1 1-20-0-50-1,5	248,7	31,7	31,9	0,2
CP2 1-20-0-50-1,5	250,9	31,9		
CP3 1-20-0-50-1,5	250,6	31,9		
CP4 1-20-0-50-1,5	252,8	32,2		
CP1 2-40-0-50-0,5	252,6	32,2	31,8	0,4
CP2 2-40-0-50-0,5	251,8	32,1		
CP3 2-40-0-50-0,5	246,1	31,3		
CP4 2-40-0-50-0,5	248,9	31,7		
CP1 2-40-0-50-1,5	253,9	32,3	32,1	0,8
CP2 2-40-0-50-1,5	260,1	33,1		
CP3 2-40-0-50-1,5	247,6	31,5		
CP4 2-40-0-50-1,5	247,5	31,5		
CP1 4-0-0-0,5	265,5	33,8	32,5	1,1
CP2 4-0-0-0,5	258,9	33,0		
CP3 4-0-0-0,5	249,5	31,8		
CP4 4-0-0-0,5	247,4	31,5		
CP1 4-0-0-1,5	251,4	32,0	32,9	1,4
CP2 4-0-0-1,5	271,4	34,6		
CP3 4-0-0-1,5	265,4	33,8		
CP4 4-0-0-1,5	247,6	31,5		

Assim como no estudo de Trindade (2017), os corpos de prova que possuíam agregados reciclados tiveram compensação na quantidade de cimento de 3% para os concretos com 50% de substituição, de modo a atingir a resistência mecânica de 30 MPa.

O estudo estatístico para avaliar as médias foi o teste de Tukey, sendo as resistências de todas as dosagens iguais entre si para um nível de significância de 5%. Logo, as resistências à compressão dos concretos reciclados podem ser comparáveis entre si e entre os concretos de agregado natural.

A Figura 4.3 mostra a média comparativa das resistências à compressão dos agregados do Grupo I e II em relação ao agregado natural.

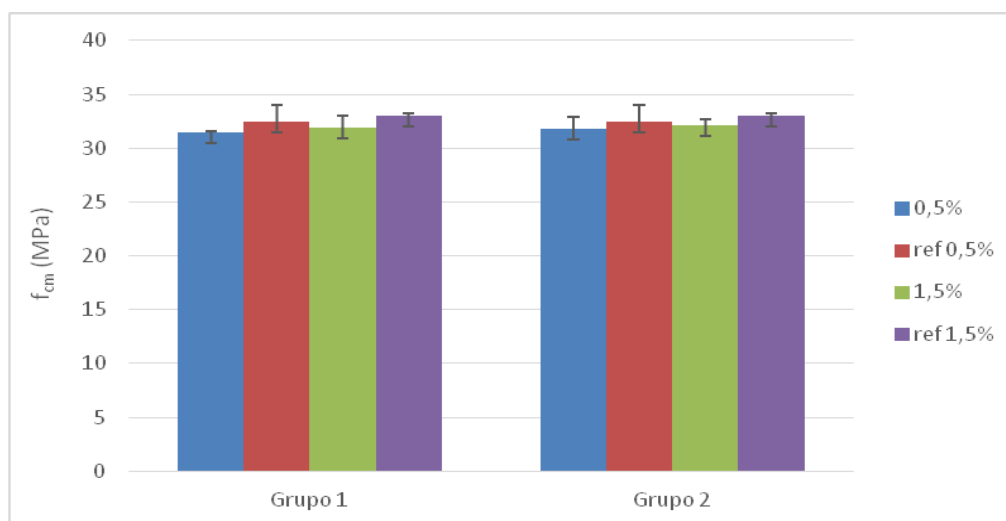


Figura 4.3 – Resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados em função do teor de fibras de aço.

A Tabela 4.8 considera os valores do estudo de Trindade (2017). Os resultados encontrados não apresentaram nenhum aumento da resistência à compressão do concreto de referência realizado por Trindade (2017) e a presente pesquisa, segundo o estudo estatístico realizado pelo Teste de Tukey com 5% de significância.

A Figura 4.4 mostra a média comparativa das resistências à compressão dos agregados dos Grupos I e II em relação ao concreto de agregado natural de Trindade (2017). O estudo estatístico (Teste de Tukey) com 5% de significância também apresentou equivalência em todas as médias comparativas.

Já a Figura 4.5 mostra um comparativo entre a resistência à compressão do concreto de referência (concreto com agregados naturais sem fibras de aço, concreto do Grupo I e II sem adição de fibra de aço) e os concretos naturais e dos grupos I e II com fibras de aço desta pesquisa. Verifica-se também que não houve nenhum acréscimo das médias da resistência à compressão do concreto com fibras de aço através do estudo estatístico (Teste de Tukey).

Tabela 4.8 – Resistência à compressão com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho.

Corpos de prova	Compressão			
	Carga (kN)	f_{cm} (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
CP1 1-20-0-50	253,8	32,3	31,2	0,8
CP2 1-20-0-50	220,0	33,4		
CP3 1-20-0-50	239,0	28,0		
CP1 1-20-0-50-0,5	246,4	31,4	31,5	0,1
CP2 1-20-0-50-0,5	247,2	31,5		
CP3 1-20-0-50-0,5	248,3	31,6		
CP4 1-20-0-50-0,5	248,1	31,6		
CP1 1-20-0-50-1,5	248,7	31,7	31,9	0,2
CP2 1-20-0-50-1,5	250,9	31,9		
CP3 1-20-0-50-1,5	250,6	31,9		
CP4 1-20-0-50-1,5	252,8	32,2		
CP1 2-40-0-50	246,7	31,4	32,0	1,2
CP2 2-40-0-50	259,8	33,1		
CP3 2-40-0-50	250,9	32,0		
CP1 2-40-0-50-0,5	252,6	32,2	31,8	0,4
CP2 2-40-0-50-0,5	251,8	32,1		
CP3 2-40-0-50-0,5	246,1	31,3		
CP4 2-40-0-50-0,5	248,9	31,7		
CP1 2-40-0-50-1,5	253,9	32,3	32,1	0,8
CP2 2-40-0-50-1,5	260,1	33,1		
CP3 2-40-0-50-1,5	247,6	31,5		
CP4 2-40-0-50-1,5	247,5	31,5		
CP1- 4-0-0	266,3	33,9	31,7	2,4
CP2- 4-0-0	250,9	32,0		
CP3- 4-0-0	228,1	29,1		
CP1 4-0-0-0,5	265,5	33,8	32,5	1,1
CP2 4-0-0-0,5	258,9	33,0		
CP3 4-0-0-0,5	249,5	31,8		
CP4 4-0-0-0,5	247,4	31,5		
CP1 4-0-0-1,5	251,4	32,0	32,9	1,4
CP2 4-0-0-1,5	271,4	34,6		
CP3 4-0-0-1,5	265,4	33,8		
CP4 4-0-0-1,5	247,6	31,5		

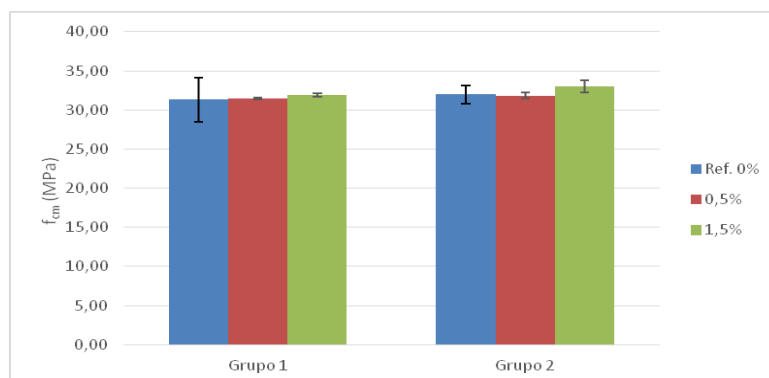


Figura 4.4 – Resistência à compressão do concreto com agregado reciclado com adição de fibras de aço em relação ao sem fibras de Trindade (2017).

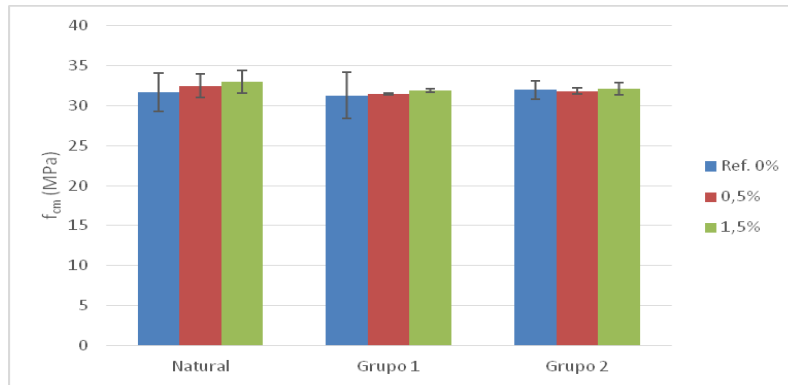


Figura 4.5 – Resistência à compressão dos concretos com agregados naturais e reciclados com fibras em relação ao de Trindade (2017), sem fibras.

4.3.2 – Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resistência à tração por compressão diametral.

Corpos de prova	Tração por compressão diametral			
	Carga (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
CP1 1-20-0-50-0,5	114,7	3,7	3,6	0,1
CP2 1-20-0-50-0,5	110,1	3,5		
CP3 1-20-0-50-0,5	112,1	3,6		
CP4 1-20-0-50-0,5	113,2	3,6		
CP1 1-20-0-50-1,5	174,1	5,5	5,5	0,3
CP2 1-20-0-50-1,5	175,8	5,6		
CP3 1-20-0-50-1,5	158,3	5,0		
CP4 1-20-0-50-1,5	180,7	5,8		
CP1 2-40-0-50-0,5	134,2	4,3	4,6	0,9
CP2 2-40-0-50-0,5	136,7	4,4		
CP3 2-40-0-50-0,5	183,7	5,8		
CP4 2-40-0-50-0,5	117,9	3,8		
CP1 2-40-0-50-1,5	181,0	5,8	5,7	0,1
CP2 2-40-0-50-1,5	180,9	5,8		
CP3 2-40-0-50-1,5	179,3	5,7		
CP4 2-40-0-50-1,5	178,4	5,7		
CP1 4-0-0-0,5	132,1	4,2	4,9	0,7
CP2 4-0-0-0,5	136,4	4,3		
CP3 4-0-0-0,5	163,6	5,2		
CP4 4-0-0-0,5	181,5	5,8		
CP1 4-0-0-1,5	167,9	5,3	6,0	0,6
CP2 4-0-0-1,5	177,4	5,6		
CP3 4-0-0-1,5	194,7	6,2		
CP4 4-0-0-1,5	208,2	6,6		

A Tabela 4.8 mostra aumento significativo na resistência à tração por compressão diametral dos concretos com fibras de aço. Esse ganho de resistência é mais acentuado quando se aumenta o teor de fibra de aço, em conformidade com a literatura. O estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de 5% de significância identificou que as médias das resistências à tração por compressão diametral, quando se varia o teor de fibras de aço, não são estatisticamente iguais entre si. Além disso, pelo estudo de Trindade (2017), verificou-se que a influência do agregado reciclado é mais acentuada na resistência à tração por compressão diametral, pois esta propriedade está intimamente ligada à zona de transição entre a argamassa antiga do agregado reciclado e a nova. A Figura 4.6 mostra os resultados da resistência à tração por compressão diametral comparando-se os teores de fibras de aço dos Grupos I e II com dos teores de fibras de aço do concreto com agregado natural.

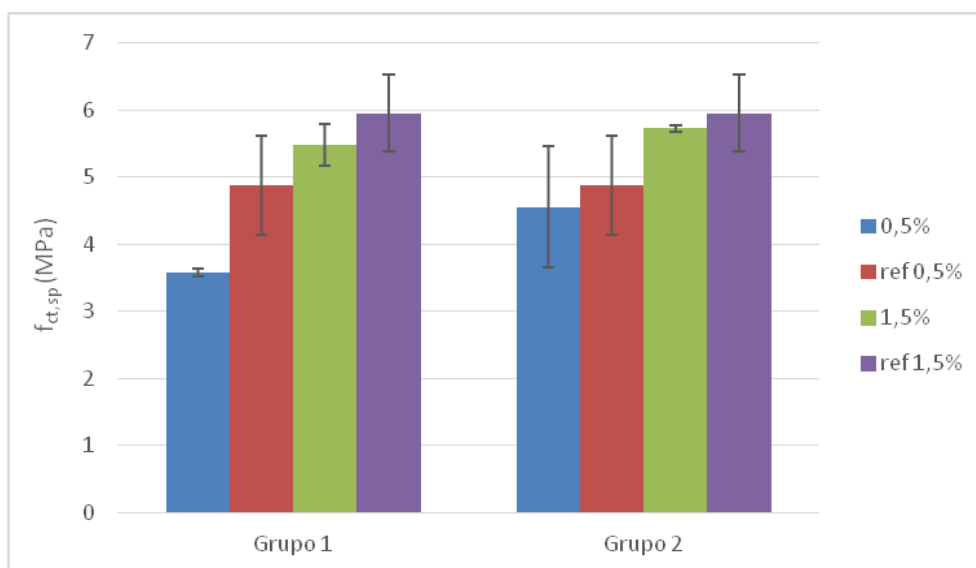


Figura 4.6 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados em função do teor de fibras de aço.

Na Tabela 4.10 foram inseridos os dados de Trindade (2017), a fim de efetuar comparações referentes à porcentagem de fibras e a variação do teor de agregado reciclado.

Observa-se que os resultados de resistência à tração por compressão diametral do Grupo I, com adição de fibras de aço no teor de 1,5%, com os resultados de Trindade (2017), obtiveram um acréscimo de 96,4%, e no Grupo

II esse acréscimo foi de 103,5%. Conclui-se que a adição de fibras de aço possui atuação significativa na resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados reciclados de maior resistência (Grupo II).

Tabela 4.10 – Resistência à tração por compressão diametral com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho.

Corpos de prova	Tração por compressão diametral			
	Carga (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
CP1 1-20-0-50	92,3	2,7	2,8	0,07
CP2 1-20-0-50	94,3	2,9		
CP3 1-20-0-50	91,44	2,8		
CP1 1-20-0-50-0,5	114,7	3,7	3,6	0,1
CP2 1-20-0-50-0,5	110,1	3,5		
CP3 1-20-0-50-0,5	112,1	3,6		
CP4 1-20-0-50-0,5	113,2	3,6		
CP1 1-20-0-50-1,5	174,1	5,5	5,5	0,3
CP2 1-20-0-50-1,5	175,8	5,6		
CP3 1-20-0-50-1,5	158,3	5,0		
CP4 1-20-0-50-1,5	180,7	5,8		
CP1 2-40-0-50	84,3	2,7	2,8	0,1
CP2 2-40-0-50	90,1	2,9		
CP3 2-40-0-50	87,7	2,8		
CP1 2-40-0-50-0,5	134,2	4,3	4,6	0,9
CP2 2-40-0-50-0,5	136,7	4,4		
CP3 2-40-0-50-0,5	183,7	5,8		
CP4 2-40-0-50-0,5	117,9	3,8		
CP1 2-40-0-50-1,5	181,0	5,8	5,7	0,1
CP2 2-40-0-50-1,5	180,9	5,8		
CP3 2-40-0-50-1,5	179,3	5,7		
CP4 2-40-0-50-1,5	178,4	5,7		
CP1- 4-0-0	109,8	3,5	3,3	0,4
CP2- 4-0-0	110,1	3,5		
CP3- 4-0-0	87,4	2,8		
CP1 4-0-0-0,5	132,1	4,2	4,9	0,7
CP2 4-0-0-0,5	136,4	4,3		
CP3 4-0-0-0,5	163,6	5,2		
CP4 4-0-0-0,5	181,5	5,8		
CP1 4-0-0-1,5	167,9	5,3	6,0	0,6
CP2 4-0-0-1,5	177,4	5,6		
CP3 4-0-0-1,5	194,7	6,2		
CP4 4-0-0-1,5	208,2	6,6		

A Figura 4.7 mostra a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova sem e com fibras de aço.

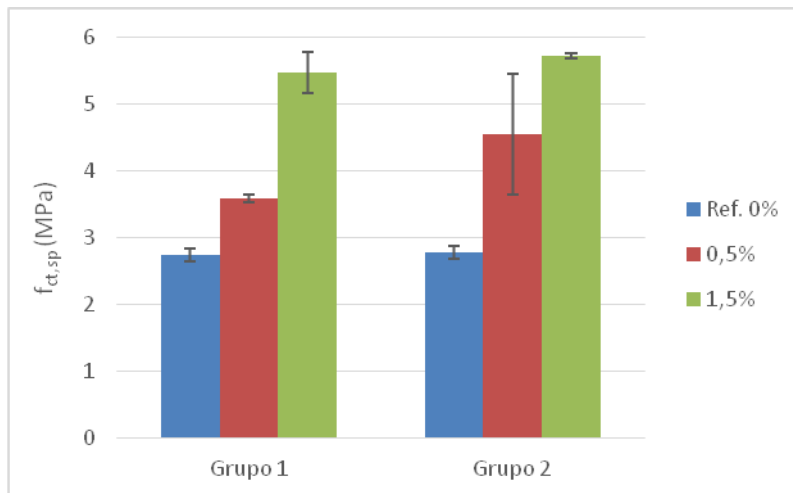


Figura 4.7 – Resistência à tração por compressão diametral do concreto com agregado reciclado com adição de fibras de aço em relação aos resultados de Trindade (2017), sem fibras.

Já a Figura 4.8 mostra o comparativo entre a resistência à tração por compressão diametral do concreto com agregado natural, dos concretos dos Grupo I e II sem adição de fibra de aço de Trindade (2017) e dos concretos com agregados naturais e dos Grupos I e II com fibras de aço dessa pesquisa. Verifica-se acréscimo significativo de aproximadamente 84% do concreto natural sem fibras de aço para aquele com 1,5% de fibras, de aproximadamente 96% para o concreto do Grupo I e de 105% para o concreto do Grupo II. Conclui-se que a fibra de aço tem maior influência nos concretos com agregados reciclados, sendo essa variação maior quanto maior for a resistência do agregado reciclado.

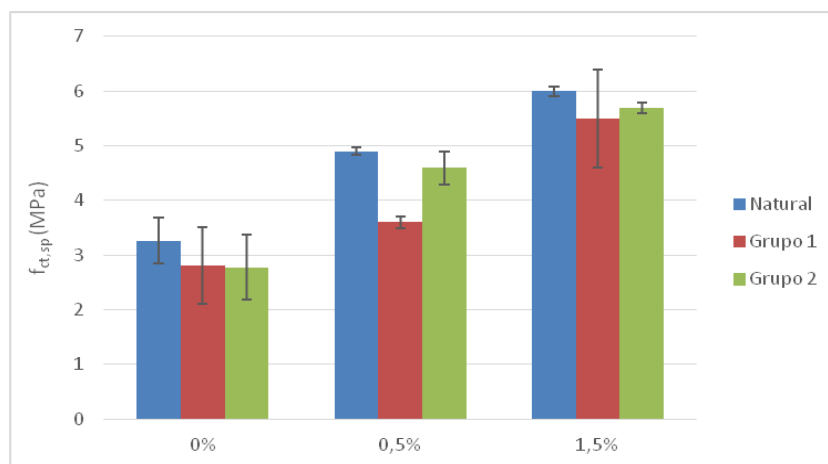


Figura 4.8 – Resistência à tração por compressão diametral dos concretos com agregados naturais e reciclados com adição de fibras de aço dessa pesquisa em relação ao estudo de Trindade (2017).

4.3.3 – Absorção de água e massa específica real

Os resultados dos ensaios de absorção de água e massa específica real dos concretos estão na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Absorção de água e massa específica real.

Dosagem	Série	Grupo	% de agregado reciclado	Resistência do concreto original	% de fibra	Massa específica real (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	4	-	0	-	0,5	2,44	3,64
2	4	-	0	-	1,5	2,46	3,37
3	1	1	50	20	0,5	2,33	5,23
4	1	1	50	20	1,5	2,42	4,94
5	2 e 3	2	50	40	0,5	2,36	4,98
6	2 e 3	2	50	40	1,5	2,44	4,58

Os concretos com agregados reciclados tiveram valor maior de absorção de água em relação aos concretos com agregado natural, porém isso não foi um parâmetro significativo no comportamento desses concretos.

Verifica-se que, quanto maior o teor de fibras de aço, menor é o valor de absorção de água, sendo que a absorção de água é mais significativa nos concretos com agregados reciclados.

As massas específicas reais dos concretos não apresentaram diferenças significativas, ressaltando que, um maior teor de fibras de aço, eleva o valor da massa específica real do concreto.

4.4 – Ensaio de *push-off*

Os resultados dos ensaios *push-off* para a série 2 (Grupo II com adição de 0,5 e 1,5% de fibras de aço) estão neste tópico. Os resultados das demais dosagens encontram-se no Anexo deste estudo. Neste item são mostrados os corpos de prova da série 2, antes da realização do ensaio e após o término dele, assim como os resultados de cada corpo de prova.

Foi feita a distinção entre os valores dos deslocamentos últimos horizontal e vertical entre os corpos de prova com e sem armadura transversal, sendo **x** e **y** a denominação para deslocamentos horizontal e vertical dos corpos de prova sem armadura transversal, respectivamente, e **w** e **s**, para os

corpos de prova com armadura transversal, deslocamentos e separação das faces do concreto, respectivamente.

4.4.1 – Ensaios *push-off* para os corpos de prova da série 2

- CPn 2-40-0-50-0,5

Os ensaios, assim como a forma de ruptura dos corpos de prova *push-off* da série 2, ou seja, concreto com agregado reciclado (resistência à compressão de 35 a 40 MPa) com adição de 0,5% de fibras de aço são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, sendo que o número da série dos corpos de prova (2) foi suprimido nas figuras para que pudesse aumentar a letra da legenda.



Figura 4.9 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura 4.10 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados obtidos estão na Tabela 4.12, sendo a Figura 4.11 gerada a partir desses resultados.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 2 40-0-50-0,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}/f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 2 40-0-50-0,5	110,1	5,8	0,18	0,253	0,655
CP2 2 40-0-50-0,5	96,3	5,1	0,16	0,170	0,638
CP3 2 40-0-50-0,5	115,9	6,1	0,19	0,230	0,848

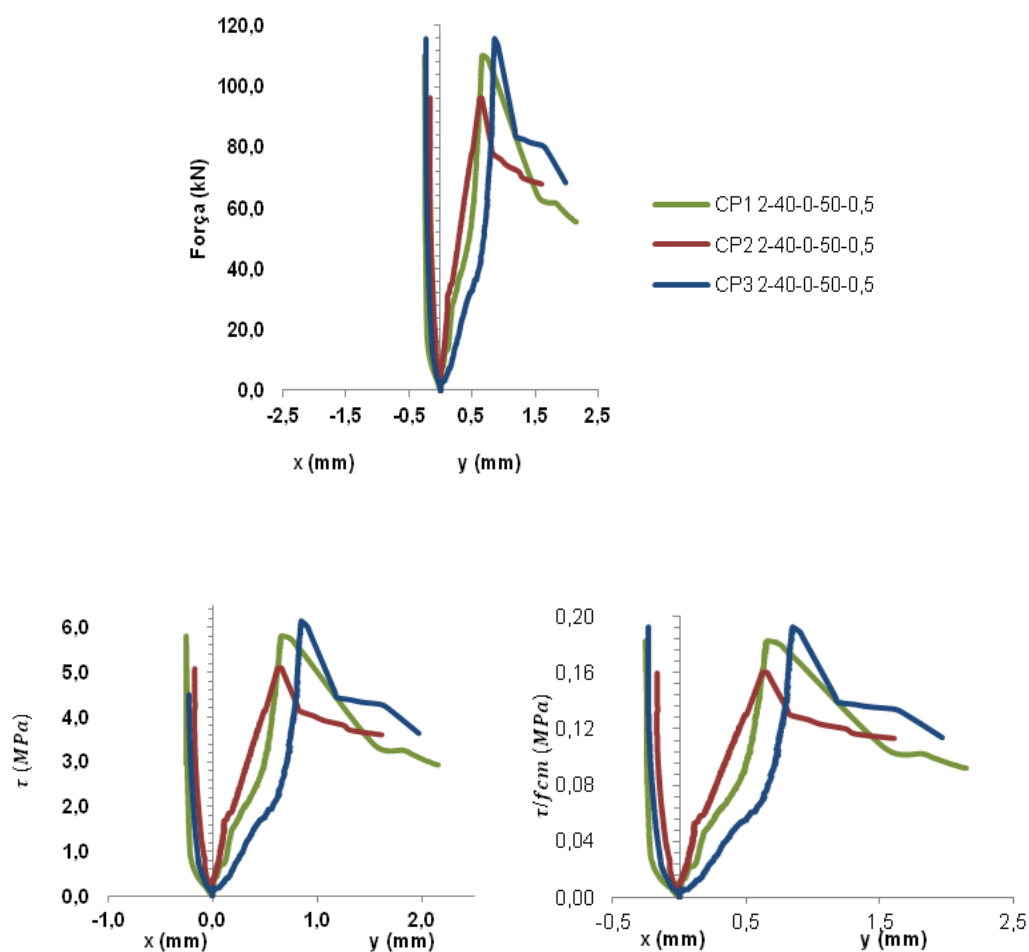


Figura 4.11 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 2 40-0-50-0,5.

- CPn 2-40-0-50-1,5

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os ensaios e a forma de ruptura dos corpos de prova *push-off* da série 2 com adição de 1,5% de fibras de aço.



Figura 4.12 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura 4.13 – Corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5 após da realização do ensaio *push-off*.

A Tabela 4.13 mostra os resultados encontrados dos três corpos de prova. A Figura 4.14, foi gerada a partir desses resultados.

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 2 40-0-50-1,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}/f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 2-40-0-50-1,5	116,5	6,2	0,19	0,139	0,399
CP2 2-40-0-50-1,5	104,0	5,5	0,17	0,224	0,302
CP3 2-40-0-50-1,5	118,5	6,3	0,20	0,084	0,426

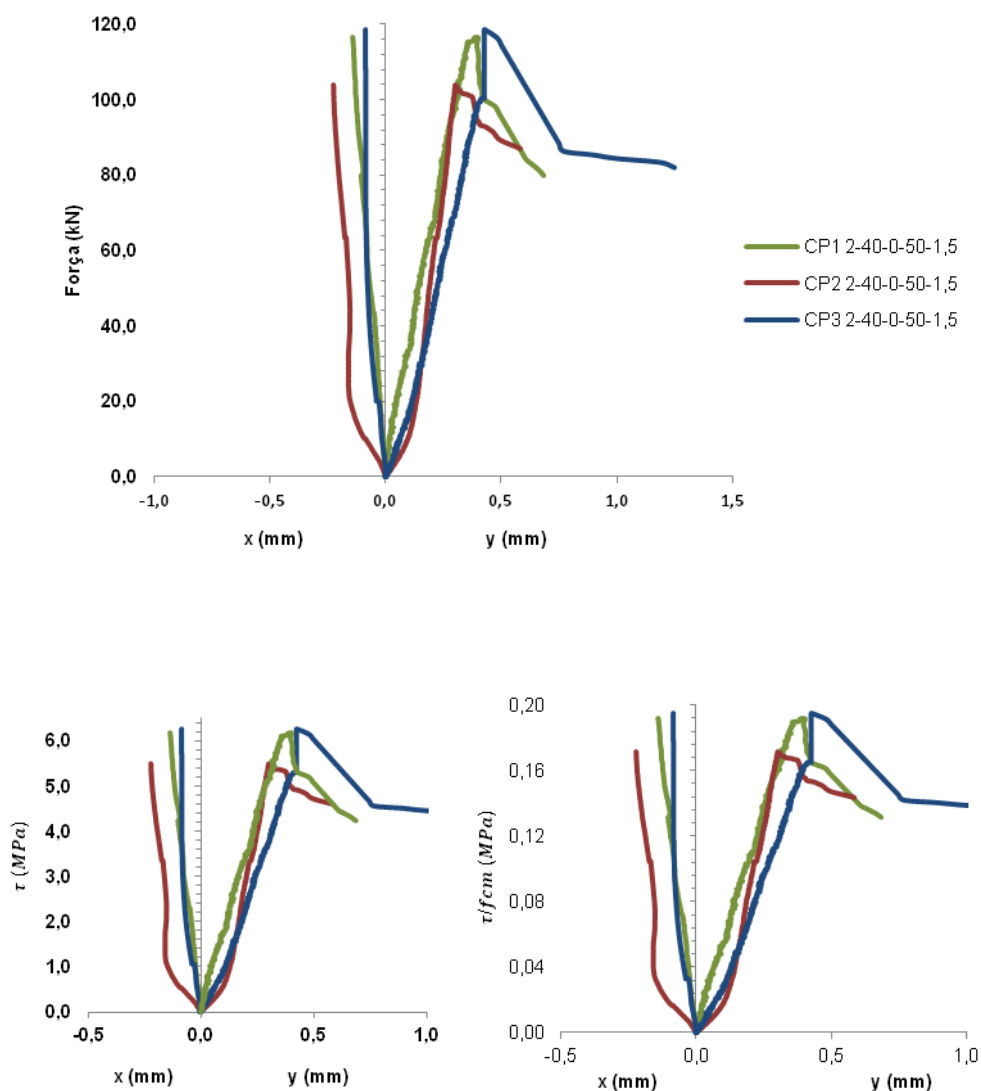


Figura 4.14 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 2 40-0-50-1,5.

4.5 – Deformação da armadura transversal

Durante a realização dos ensaios apenas os *strain gages* da série CPn 3-40-2-50-1,5 não apresentaram problemas na realização das leituras. Já nas séries CPn 3-40-50-0,5 e CPn 4-2-0-1,5 apenas um *strain gage* apresentou problemas, e na série CPn 4-2-0-0,5 dois *strain gages* apresentaram problemas de leitura.

As curvas de tensão cisalhante *versus* deformação estão nas Figuras 4.15 a 4.18. Verificou-se que não houve escoamento da armadura transversal em nenhum dos ensaios realizados, uma vez que as deformações não ultrapassaram 3,75‰ (deformação de escoamento obtida experimentalmente).

Esse fato pode ser explicado por um possível escorregamento da armadura transversal devido à falha de ancoragem.

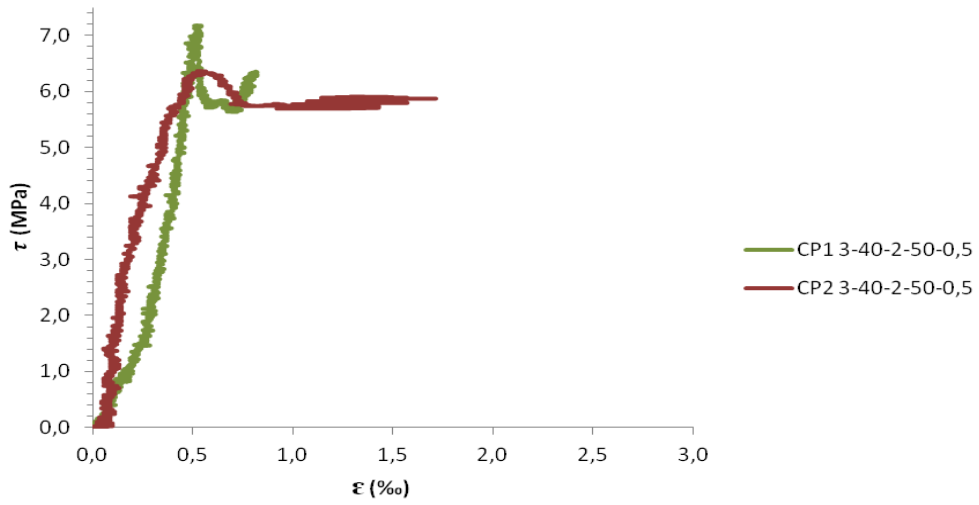


Figura 4.15 Curvas tensão cisalhante *versus* deformação da armadura transversal para o CPn 3 40-2-50-0,5.

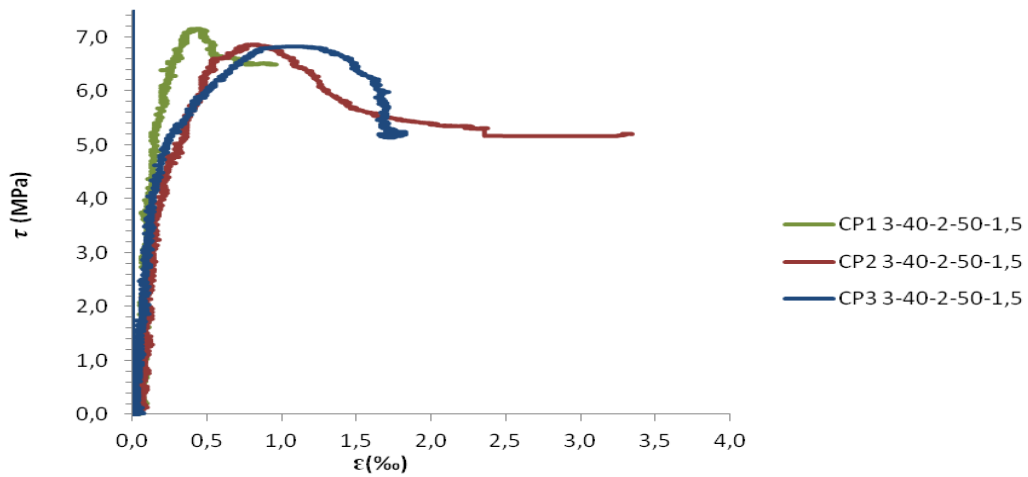


Figura 4.16 Curvas tensão cisalhante *versus* deformação da armadura transversal para o CPn 3 40-2-50-1,5.

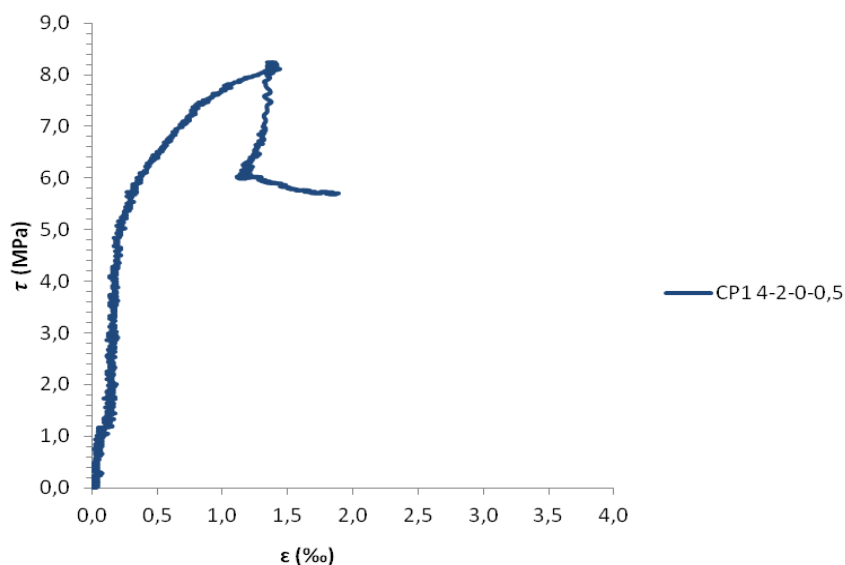


Figura 4.17 Curva tensão cisalhante *versus* deformação da armadura transversal para o CPn 4-2-0-0,5.

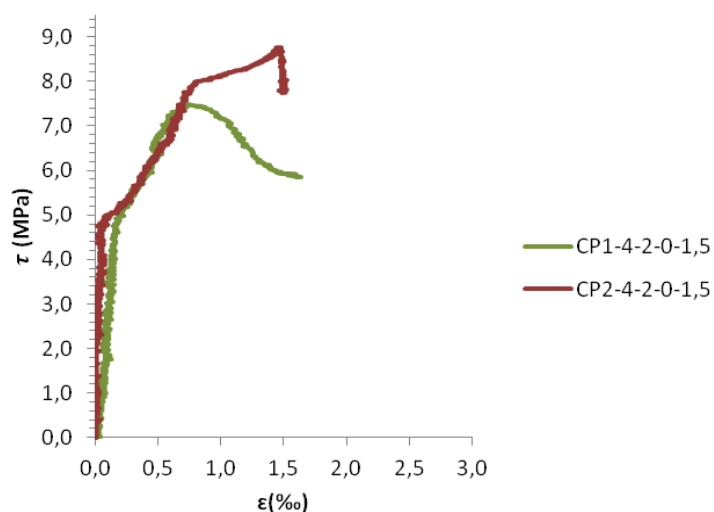


Figura 4.18 Curvas tensão cisalhante *versus* deformação da armadura transversal para o CPn 4-2-0-1,5.

4.6 – Discussão dos resultados dos ensaios *push-off*

A Tabela 4.14 mostra os resultados referentes à tensão máxima de cisalhamento. Os resultados em vermelho foram retirados de Trindade (2017), servindo de referência para essa pesquisa.

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios *push-off* com inclusão dos dados de Trindade (2017), em vermelho.

Corpo de prova	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio-padrão (MPa)
CP1 1-20-0-50	3,47	3,51	0,05
CP2 1-20-0-50	3,50		
CP3 1-20-0-50	3,57		
CP1-1-20-0-50-0,5	4,10	3,87	0,27
CP2-1-20-0-50-0,5	3,91		
CP3-1-20-0-50-0,5	3,58		
CP1-1-20-0-50-1,5	4,96	4,32	0,63
CP2-1-20-0-50-1,5	4,31		
CP3-1-20-0-50-1,5	3,70		
CP1 2-40-0-50	5,50	5,13	0,60
CP2 2-40-0-50	5,45		
CP3 2-40-0-50	4,43		
CP1-2-40-0-50-0,5	5,82	5,68	0,53
CP2-2-40-0-50-0,5	5,09		
CP3-2-40-0-50-0,5	6,13		
CP1-2-40-0-50-1,5	6,16	5,98	0,42
CP2-2-40-0-50-1,5	5,50		
CP3-2-40-0-50-1,5	6,27		
CP1 3-40-2-50	6,44	6,69	0,23
CP2 3-40-2-50	6,72		
CP3 3-40-2-50	6,90		
CP1-3-40-2-50-0,5	7,18	6,73	0,42
CP2-3-40-2-50-0,5	6,36		
CP3-3-40-2-50-0,5	6,64		
CP1-3-40-2-50-1,5	7,15	6,94	0,18
CP2-3-40-2-50-1,5	6,86		
CP3-3-40-2-50-1,5	6,82		
CP1 -4-0-0	5,43	5,21	0,68
CP2 4-0-0	4,45		
CP3 4-0-0	5,75		
CP1-4-0-0-0,5	5,70	5,49	0,75
CP2-4-0-0-0,5	4,66		
CP3-4-0-0-0,5	6,11		
CP1-4-0-0-1,5	6,13	5,98	0,21
CP2-4-0-0-1,5	5,83		
CP3-4-0-0-1,5	-		
CP1-4-2-0	7,80	7,76	0,36
CP2-4-2-0	8,10		
CP3-4-2-0	7,38		
CP1-4-2-0-0,5	7,72	7,84	0,35
CP2-4-2-0-0,5	7,57		
CP3-4-2-0-0,5	8,24		
CP1-4-2-0-1,5	7,48	8,12	0,91
CP2-4-2-0-1,5	8,76		
CP3-4-2-0-1,5	-		

4.6.1 – Influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados empregados em concretos sem armadura transversal

A análise referente à influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados para o Grupo I é mostrada na Figura 4.19. Os resultados são referentes a todos os concretos sem armadura transversal, para diferentes teores de fibras de aço, tendo como referência o estudo de Trindade (2017).

Nesta comparação foi realizada a divisão da resistência ao cisalhamento pela resistência à compressão do concreto, de forma a normalizar os resultados, eliminando a influência da resistência à compressão dos concretos.

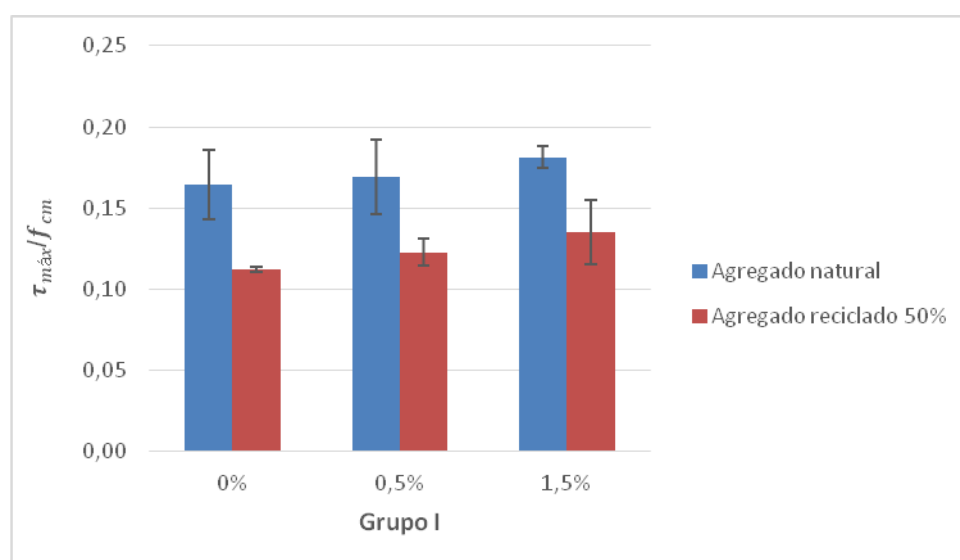


Figura 4.19 - Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo I na resistência ao cisalhamento.

Para o Grupo I, ou seja, resistência do agregado gráudo do concreto original de 15 a 20 MPa, em concretos sem armadura transversal, observou-se dois pontos importantes: o aumento do teor de fibras de aço aumenta a resistência ao cisalhamento dos concretos e a substituição do agregado natural pelo reciclado influencia na diminuição dessa resistência, conforme também apontado por Trindade (2017).

O concreto com agregado reciclado sem fibras de aço em relação ao concreto com agregado natural teve diminuição da resistência ao cisalhamento

de 31,7%. Porém, ao se adicionar fibras de aço para $V_f = 0,5\%$ essa diferença diminuiu para 27,3%, e para $V_f = 1,5\%$ a diferença foi de 24,7%.

Quando se compara a influência das fibras nos concretos com agregados naturais, tem-se aumentos da resistência ao cisalhamento de 3,1 e 9,4% para teores de fibras de 0,5 e 1,5%, respectivamente, em relação ao concreto de referência (concreto com agregado natural sem fibra –Trindade, 2017). Além disso, verifica-se que houve aumento da resistência ao cisalhamento do concreto com agregados naturais de 6,4% quando o teor de fibras passou de 0,5% para 1,5%.

Comparando-se agora a influência das fibras de aço entre os concretos com agregados reciclados, verifica-se aumento da resistência ao cisalhamento de 9,3 e 20,6% para teores de fibras de 0,5 e 1,5%, respectivamente, em relação ao concreto de referência (concreto com agregado natural sem fibras - Trindade, 2017). O aumento no teor de fibras de aço de 0,5 para 1,5% é acompanhado por um aumento de 20,6% na resistência ao cisalhamento do concreto.

Conclui-se que a influência das fibras de aço é mais significativa nos concretos com agregados reciclados do Grupo I, com aumentos de 59,3 e de 117,9% na resistência ao cisalhamento em relação aos concretos com agregados naturais, para teores de fibras de aço de 0,5 e 1,5%, respectivamente. Isso demonstra que, com a adição de fibras de aço, a resistência ao cisalhamento não segue um aumento linearmente proporcional à quantidade de fibras de aço adicionadas ao concreto, o que vai ao encontro ao citado por Figueiredo (2015).

Outro ponto importante que deve ser levado em consideração é que, quando se adicionou 1,5% de fibras de aço ao concreto com agregado reciclado do Grupo I, a resistência ao cisalhamento passou de um decréscimo de 32% para apenas 17%, ou seja, houve ganho de 18% de resistência ao cisalhamento.

O estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de significância de 5% identificou que as médias dos corpos de prova do Grupo I, para os diferentes teores de fibras de aço, são estatisticamente diferentes, o que confirma a influência significativa das fibras de aço no aumento de resistência ao cisalhamento dos concretos.

A análise referente à influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados para o Grupo II é mostrada na Figura 4.20. Os resultados são referentes a todos os concretos sem armadura transversal para diferentes teores de fibras de aço, incluso também os dados de Trindade (2017).

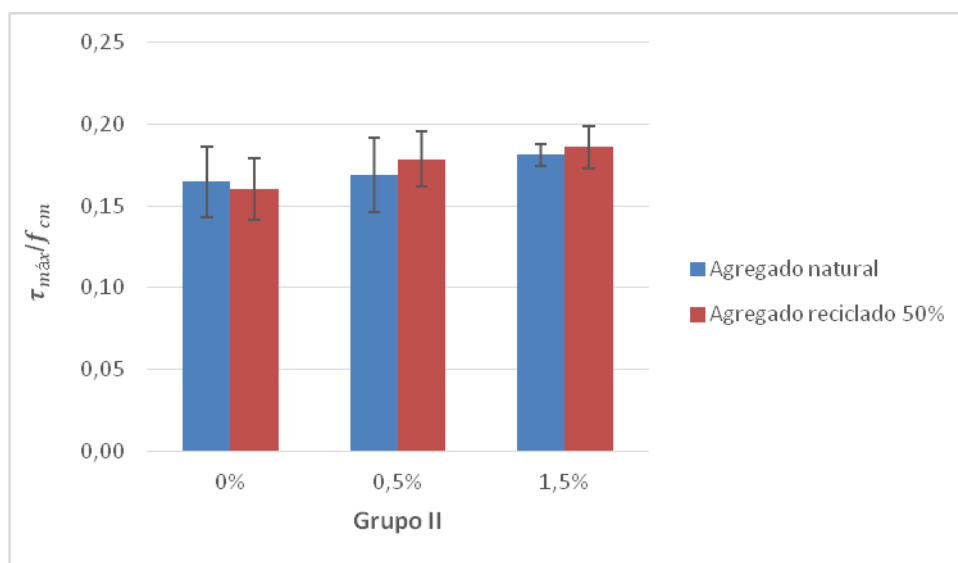


Figura 4.20 - Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo II na resistência ao cisalhamento.

Já para o Grupo II, ou seja, resistência do agregado graúdo do concreto original de 35 a 40 MPa, em concretos sem armadura transversal, dois pontos importantes citados para o Grupo I também foram constatados no Grupo II. O aumento do teor de fibras de aço aumenta a resistência ao cisalhamento dos concretos e a substituição do agregado natural pelo reciclado diminui essa resistência, resultado também obtido por Trindade (2017).

O concreto com agregado reciclado sem fibras de aço em relação ao concreto com agregado natural apresentou diminuição da resistência ao cisalhamento de 2,5%, ou seja, menos significativa do que a encontrada no Grupo I. Ao se adicionar fibras de aço observa-se que, para o teor de 0,5%, essa diferença aumentou de 27%, e para 1,5% o concreto com agregado reciclado superou a resistência do concreto natural com fibras de aço em 3,5%. Logo, verifica-se um comportamento totalmente diferente do Grupo I, em que a influência das fibras de aço nos concretos do Grupo II foi mais significativa no

aumento da resistência ao cisalhamento, sendo que a adição de fibras de aço diminui a diferença de resistência ao cisalhamento entre os concretos com agregados reciclados e os com agregados naturais. Observa-se também que a adição de 0,5% de fibras já foi responsável por suprir a perda de resistência ao cisalhamento do concreto do Grupo II. Porém, para os concretos do Grupo I (Figura 4.19), verifica que mesmo com a adição de 1,5% de fibras não foi possível suprir a perda da resistência ao cisalhamento do concreto.

Quando se compara a adição de fibras de aço, somente entre os concretos com agregados reciclados do Grupo II, observa-se aumento da resistência ao cisalhamento de 11,5% do concreto com $V_f = 0,5\%$ em relação ao sem fibras, 4,2% de aumento do concreto com $V_f = 1,5\%$ em relação ao $V_f = 0,5\%$, e aumento de 16,2% na resistência ao cisalhamento quando comparados os concretos sem fibras e o com 1,5% de fibras de aço.

Também deve ser levada em consideração, para os concretos com agregados reciclados do Grupo II, que o teor de 1,5% de fibras de aço proporcionou aumento da resistência ao cisalhamento, em relação ao concreto com agregado natural, de 13,2%. Conclui-se que o concreto com agregado reciclado do Grupo II, com $V_f = 1,5\%$ supre a necessidade da diminuição da resistência ao cisalhamento do concreto devido aos agregados reciclados.

O estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de significância de 5 % identificou que as médias dos corpos de prova do Grupo II, para os diferentes teores de fibras de aço, são estatisticamente iguais entre si, apresentando diferença estatística quando comparada à média do concreto com agregado reciclado com $V_f = 1,5\%$ em relação ao concreto com agregado natural, o que demonstra a influência significativa das fibras de aço em relação à perda de resistência ao cisalhamento provocada pela presença de agregado reciclado no Grupo II.

Outra análise realizada está na Figura 4.21, comparação entre os concretos dos Grupo I e II com os resultados de Gao *et al.* (2017). Já que esses autores realizaram estudo com agregados reciclados, porém não especificaram a resistência do concreto original. Além disso, a resistência do concreto foi de 45 MPa, pois para a resistência de 30 MPa não foram realizadas variação nos teores de fibras de aço.

Ressalta-se que nesse estudo comparativo também foi realizada a divisão da resistência ao cisalhamento pela resistência à compressão do concreto, de forma a normalizar os dados.

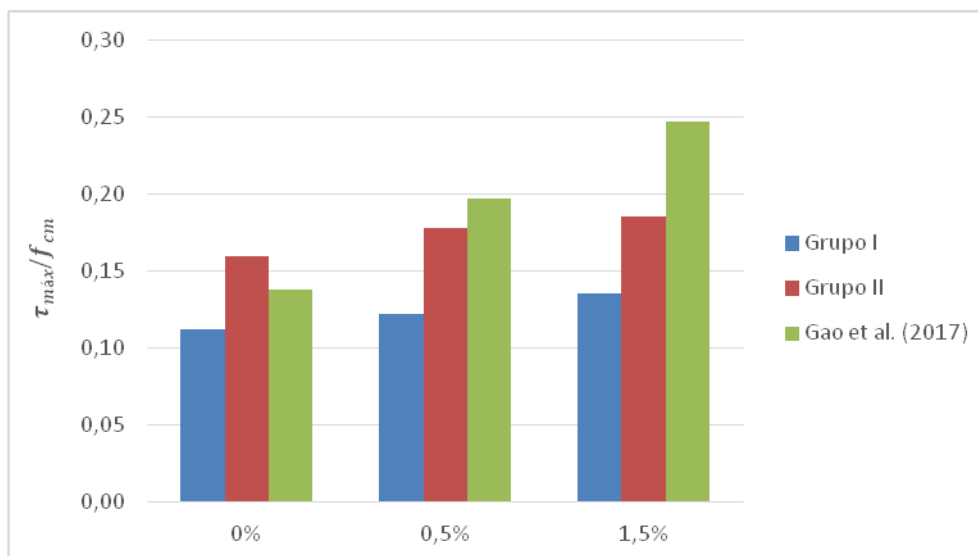


Figura 4.21 - Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado dos Grupos I e II na resistência ao cisalhamento em relação ao estudo de Gao et al. (2017).

Observa-se que, sem a adição das fibras de aço, há diferença na resistência ao cisalhamento de 18,7% do Grupo I e 16% do Grupo II em relação ao estudo de Gao et al. (2017). Quando $V_f = 0,5\%$ observou-se diferença de 37,8% do Grupo I e 9,4% do Grupo II em relação ao estudo de Gao et al. (2017). Já com $V_f = 1,5\%$ as diferenças nas resistências ao cisalhamento dos Grupos I e II foram de 45,3% e de 24,7% respectivamente.

Além disso, o estudo de Gao et al. (2017) mostra que houve aumento na resistência ao cisalhamento do concreto com adição de fibras de aço nos teores de 0,5 e 1,5% de 42,9% e 79% respectivamente. Já para o Grupo I, do presente trabalho, essa variação foi de 9,3% e 20,5% para teores de fibras de aço de 0,5% e 1,5%, respectivamente, e para o Grupo II a variação foi de 11,5% e 16,2% para teores de fibras de aço de 0,5% e 1,5%, respectivamente.

Conclui-se que as fibras de aço têm influência mais significativa no aumento da resistência ao cisalhamento do concreto quanto maior for a resistência à compressão do concreto.

4.6.2 – Influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados empregados em concretos com armadura transversal

A influência do teor de fibras de aço e da presença de agregados reciclados no Grupo II (com armadura transversal) é mostrada na Figura 4.22. No gráfico estão todos os concretos com armadura transversal para diferentes teores de fibra de aço, bem como os dados de Trindade (2017).

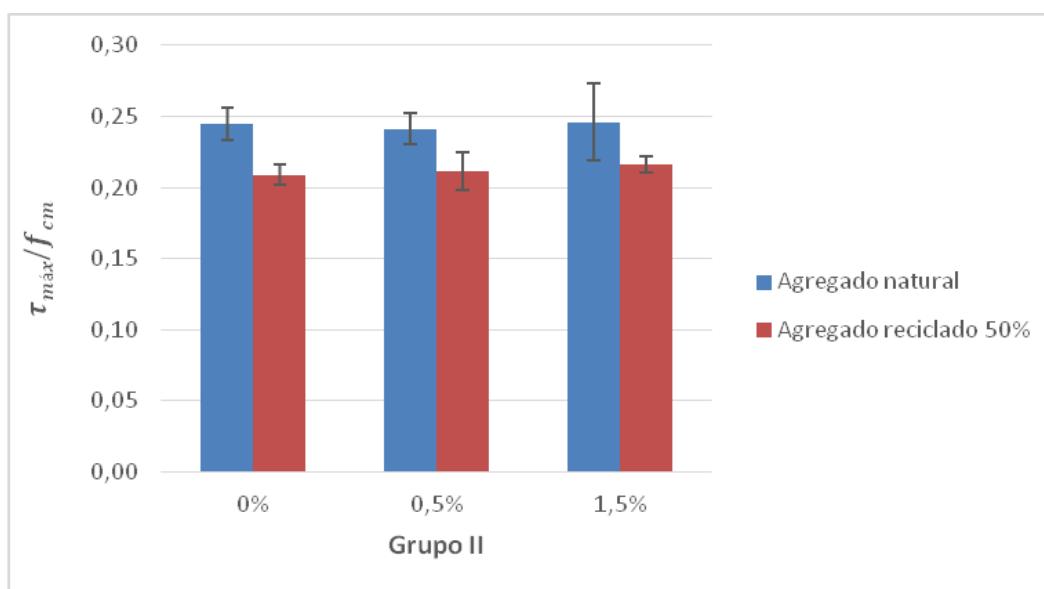


Figura 4.22 - Influência do teor de fibras e presença de agregado reciclado do Grupo II, com armadura transversal, na resistência ao cisalhamento.

O concreto com agregado reciclado, e sem fibras de aço sofreu, em relação ao concreto com agregado natural, diminuição da resistência ao cisalhamento de 14,6%. Ao se adicionar as fibras de aço, observa-se que para $V_f = 0,5\%$ essa diferença diminuiu para 12,3%, e para $V_f = 1,5\%$ aumentou para 14,4%.

Analisando somente os concretos com agregado natural, verifica-se que a adição de fibras de aço não alterou significativamente a resistência ao cisalhamento do concreto com armadura transversal, havendo diminuição de 1,4% para $V_f = 0,5\%$ em relação ao concreto de referência, e acréscimo de 3,2% na resistência ao cisalhamento para $V_f = 1,5\%$ em relação ao concreto de referência.

Quando se analisa somente os concretos do Grupo II, verifica-se acréscimo de resistência de 1,1% para $V_f = 0,5\%$ fibra e de 3,4% para $V_f = 1,5\%$ em relação ao concreto sem fibras de aço. Já o concreto com $V_f = 1,5\%$ teve aumento na resistência ao cisalhamento do concreto de apenas 2,2% em relação ao $V_f = 0,5\%$.

O estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de significância de 5 % identificou que as médias dos concretos com armadura transversal do Grupo II, para os diferentes teores de fibras de aço, são estatisticamente iguais entre si e entre os concretos de referência também.

Identificou-se que a utilização de fibras de aço para o concreto com armadura transversal (2 estribos) e 50% de agregado reciclado do Grupo II não possui influência significativa no que se refere à resistência ao cisalhamento. O confinamento que é gerado a partir da utilização de armadura transversal aumenta significativamente a pressão de contato entre as faces do concreto, aumentando o mecanismo de engrenamento entre os agregados, o que pode ser observado por meio do elevado valor da resistência ao cisalhamento quando se utiliza estribos nos corpos de prova. Além disso, o efeito das fibras de aço não foi significativo quando se utilizou armadura transversal, seja com agregado reciclado seja com agregado natural.

Isso pode ter ocorrido pelo escorregamento da armadura transversal, devido à falha de ancoragem, fato que pôde ser observado no item 4.5 deste estudo.

4.6.3 – Influência das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal

A Figura 4.23 mostra os resultados dos deslocamentos vertical e horizontal dos corpos de prova de Trindade (2017) e deste trabalho, em que foram adicionados os teores de 0,5 e 1,5% de fibras de aço em concretos com agregado reciclado do Grupo I (agregado reciclado originado de concreto de resistência à compressão de 15 a 20 MPa).

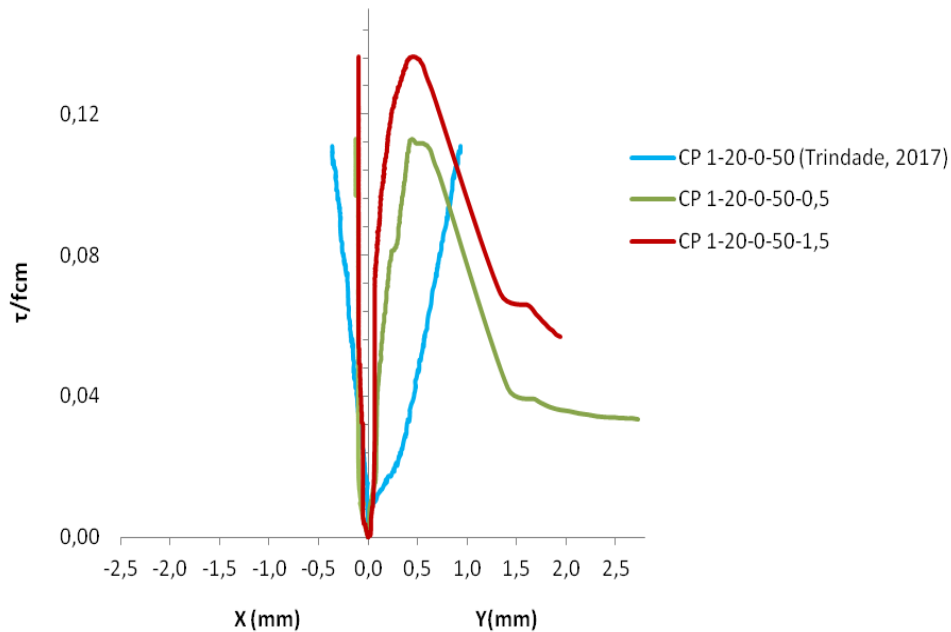


Figura 4.23 – Comparação das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal dos concretos do Grupo I.

As curvas plotadas foram referentes aos valores intermediários de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova, pois não houve possibilidade de gerar uma curva média entre eles. Observa-se que a adição de fibras de aço influencia o modo de ruptura do concreto, passando de comportamento frágil para comportamento menos frágil, fato explicado pelo efeito da ponte de transferência de tensões provocado pelas fibras de aço nas zonas fissuradas do concreto o que retarda a tenacidade à ruptura.

A Tabela 4.15 mostra os valores dos deslocamentos vertical e horizontal, referentes à tensão máxima de resistência ao cisalhamento.

Tabela 4.15 – Valores dos deslocamentos vertical e horizontal das curvas médias dos concretos do Grupo I

Corpo de Prova	Deslocamento horizontal x (mm)	Deslocamento vertical y (mm)
CP 1-20-0-50	0,368	0,931
CP 1-20-0-50-0,5	0,112	0,404
CP 1-20-0-50-1,5	0,100	0,439

Houve diminuição do deslocamento vertical devido às fibras de aço iguais a 52,3% ($V_f = 0,5\%$) e 56,6% ($V_f = 1,5\%$) em relação ao corpo de prova

de referência. Já para o deslocamento horizontal houve redução de 69,6% e 72,8% para $V_f = 0,5\%$ e $V_f = 1,5\%$, respectivamente.

Além disso, o estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de 5% de significância mostrou que as médias dos deslocamentos vertical e horizontal, quando se varia o teor de fibras de aço, não são estatisticamente iguais entre si.

Já a Figura 4.24 mostra os resultados dos deslocamentos vertical e horizontal dos corpos de prova de Trindade (2017) e desta pesquisa com V_f iguais a 0,5 e 1,5% de fibras de aço com agregado reciclado do Grupo II (agregado reciclado originado de concreto de resistência à compressão de 15 a 20 MPa).

De acordo com a Tabela 4.16, houve diminuição do deslocamento vertical devido à adição de fibras de aço, sendo de 27,3% ($V_f = 0,5\%$) e 55,7% ($V_f = 1,5\%$) em relação à referência, mostrando a eficiência das fibras. Já para o deslocamento horizontal houve redução de 52,8% ($V_f = 0,5\%$) e 71,5% ($V_f = 1,5\%$).

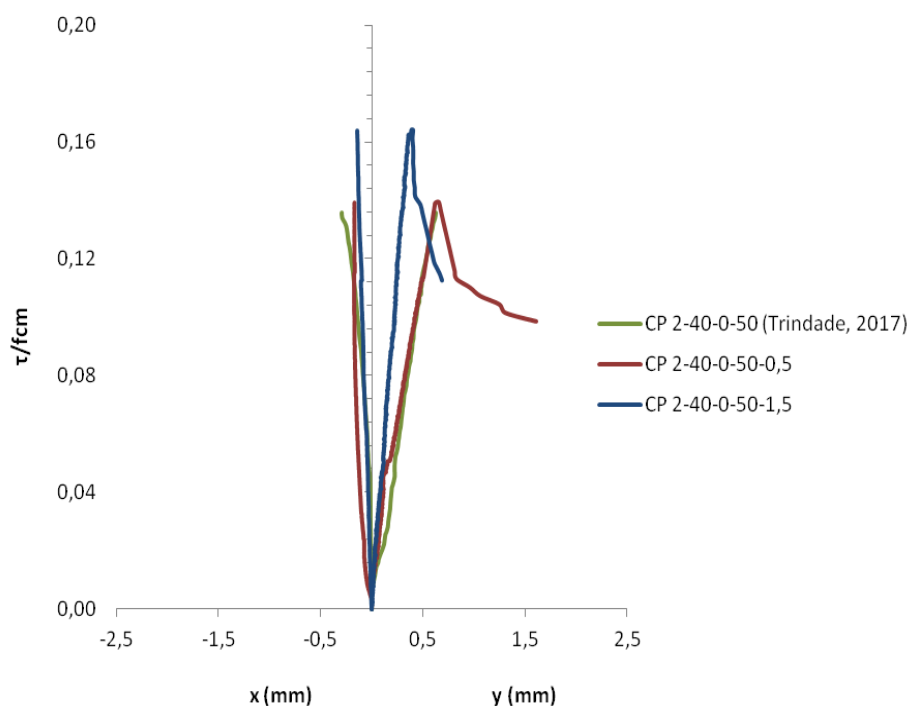


Figura 4.24 – Comparação das fibras de aço nos deslocamentos vertical e horizontal dos concretos do Grupo II.

Assim como aconteceu no Grupo I, o estudo estatístico (Teste de Tukey) ao nível de 5% de significância também mostrou que as médias dos deslocamentos vertical e horizontal em função do teor de fibras de aço não são estatisticamente iguais entre si.

Tabela 4.16 – Valores dos deslocamentos vertical e horizontal das curvas médias dos concretos do Grupo II.

Corpo de Prova	Deslocamento horizontal x (mm)	Deslocamento vertical y (mm)
CP 1-40-0-50	0,488	0,901
CP 1-40-0-50-0,5	0,230	0,655
CP 1-40-0-50-1,5	0,139	0,399

4.6.4 – Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com resultados provenientes de equações propostas por outros autores e normas

A comparação dos corpos de prova sem armadura transversal foi realizada utilizando as equações propostas por Mattock (1974) e Mattock (1988), pois essas equações levavam em consideração os efeitos da coesão do concreto. A Tabela 4.17 mostra os resultados calculados por essas equações, assim como os resultados experimentais dessa pesquisa e de Trindade (2017), em vermelho.

Tabela 4.17 – Comparação dos resultados experimentais dos corpos de prova sem estribos com os valores calculados por equações presentes na literatura.

Corpos de prova	$\tau_{m\acute{a}x} (MPa)$			Relação $\tau_{m\acute{a}x\text{exp}} / \tau_{m\acute{a}x\text{cal}}$	
	Mattock (1974)	Mattock (1988)	Experimental	Mattock (1974)	Mattock (1988)
1-20-0-50	1,48	1,61	3,49	2,36	2,17
1-20-0-50-0,5	1,48	1,62	3,87	2,61	2,39
1-20-0-50-1,5	1,48	1,63	4,32	2,92	2,65
2-40-0-50	1,48	1,63	5,09	3,44	3,12
2-40-0-50-0,5	1,48	1,63	5,68	3,84	3,49
2-40-0-50-1,5	1,48	1,64	5,98	4,04	3,65
4-0-0	1,48	1,62	5,21	3,52	3,21
4-0-0-0,5	1,48	1,65	5,49	3,71	3,33
4-0-0-1,5	1,48	1,66	5,98	4,04	3,60

Verifica-se que os valores de Mattock (1974) apresentam valores fixos de 1,48 kN, pois são independentes das propriedades mecânicas do concreto. Mattock (1988), por sua vez, também possui valores muito próximos, uma vez que, mesmo dependendo da resistência à compressão do concreto, esta propriedade permaneceu praticante constante naquele estudo (em torno de 30 MPa).

Além disso, verifica-se que as equações propostas, mesmo sendo referentes a concretos convencionais, apresentaram-se muito conservadoras em relação aos valores experimentais com agregados reciclados, sendo que a presença das fibras de aço elevou ainda mais essa diferença.

A Tabela 4.18 mostra os resultados de resistência ao cisalhamento para corpos de prova com estribos, segundo diferentes normas, assim como os resultados de Trindade (2017), em vermelho, e os do presente estudo.

Tabela 4.18 – Comparação das resistências ao cisalhamento normalizadas pelo f_{cm} , medidas e previstas dos corpos de prova com estribos segundo diferentes normas e autores.

Corpo de prova	Exp. τ/f_{cm}	ACI ^(*) τ/f_{cm}	PCI ^(**) τ/f_{cm}	CSA ^(***) τ/f_{cm}	Mattock (2001) τ/f_{cm}	Mansur (2008) τ/f_{cm}	Loov e Patnaik (1974) τ/f_{cm}
CP1 1-40-2-50	0,20	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,23
CP2 1-40-2-50	0,21	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,23
CP2 1-40-2-50	0,22	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,23
CP1 1-40-2-50-0,5	0,25	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,25
CP1 2-40-2-50-0,5	0,25	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,25
CP1 3-20-2-50-0,5	0,28	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,25
CP1 1-40-2-50-1,5	0,25	0,17	0,19	0,16	0,22	0,23	0,23
CP1 2-40-2-50-1,5	0,26	0,17	0,19	0,16	0,22	0,23	0,23
CP1 3-20-2-50-1,5	0,23	0,17	0,19	0,16	0,22	0,23	0,23
CP1 4-0-0	0,25	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,24
CP2 4-0-0	0,26	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,24
CP3 4-0-0	0,23	0,17	0,20	0,16	0,22	0,23	0,24
CP1 4-2-0-0,5	0,25	0,17	0,19	0,15	0,22	0,23	0,23
CP2 4-0-0-0,5	0,26	0,17	0,19	0,15	0,22	0,23	0,23
CP3 4-0-0-0,5	0,23	0,17	0,19	0,15	0,22	0,23	0,23
CP1 4-0-0-1,5	0,25	0,17	0,19	0,15	0,22	0,23	0,23
CP2 4-0-0-1,5	0,26	0,17	0,19	0,15	0,22	0,23	0,23

(*) American Concrete Institute;

(**) Precast/Prestressed Concrete Institute;

(***) Canadian Standards Association.

As normas apresentaram valores conservadores em comparação com os experimentais, mesmo adotando coeficiente de atrito igual a 1,4, recomendado para concreto convencional. A norma que apresentou os valores mais próximos aos experimentais foi a PCI. Em relação às equações propostas por diferentes pesquisadores, houve semelhança entre os valores obtidos experimentalmente e os calculados, sendo que os valores calculados para os concretos com agregados reciclados com adição de fibras de aço mostraram-se bem satisfatórios. Observa-se que a adição de fibras de aço influencia significativamente quando comparadas com as equações presentes na literatura, não havendo necessidade de serem ajustadas caso seja utilizada um teor mínimo de fibras de 0,5%.

A Tabela 4.19 mostra o comparativo realizado entre os resultados da tensão máxima de cisalhamento desta pesquisa para os corpos de prova sem armadura transversal e os resultados calculados pela equação proposta por Gao *et al.* (2017).

Tabela 4.19 – Comparação das tensões máximas de cisalhamento experimentais dos corpos de prova sem estribos com equação proposta por Gao *et al.* (2017).

Corpo de prova	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa) Experimental	$\tau_{\text{máx}}$ calculado (MPa) Gao <i>et al.</i> (2017)
CP1-1-20-0-50-0,5	4,1	4,2
CP2-1-20-0-50-0,5	3,9	4,2
CP3-1-20-0-50-0,5	3,6	4,2
CP1-1-20-0-50-1,5	3,0	4,5
CP1-1-20-0-50-1,5	4,3	4,3
CP1-1-20-0-50-1,5	4,4	4,2
CP1-2-40-0-50-0,5	5,8	4,5
CP2-2-40-0-50-0,5	5,1	4,5
CP3-2-40-0-50-0,5	6,1	4,5
CP1-2-40-0-50-1,5	6,2	4,5
CP2-2-40-0-50-1,5	5,5	4,5
CP3-2-40-0-50-1,5	6,3	4,6

Os valores encontrados mostram que a equação proposta por Gao *et al.* (2017) apresenta-se conservadora para $V_f = 1,5\%$ dos Grupos I e II e para $V_f = 0,5$ do Grupo II.

4.6.5 – Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com valores experimentais presentes na literatura

A Figura 4.25 mostra os resultados experimentais dos corpos de prova com 50% de agregado reciclado do Grupo II com pesquisadores citados no item 2.13 do Capítulo 2, já que esses autores também possuíam corpos de prova com 50% de agregado reciclado, variando a tensão de confinamento, sendo os valores da tensão de cisalhamento normalizada pela resistência à compressão, conforme recomendado pelo ACI 318 (2014).

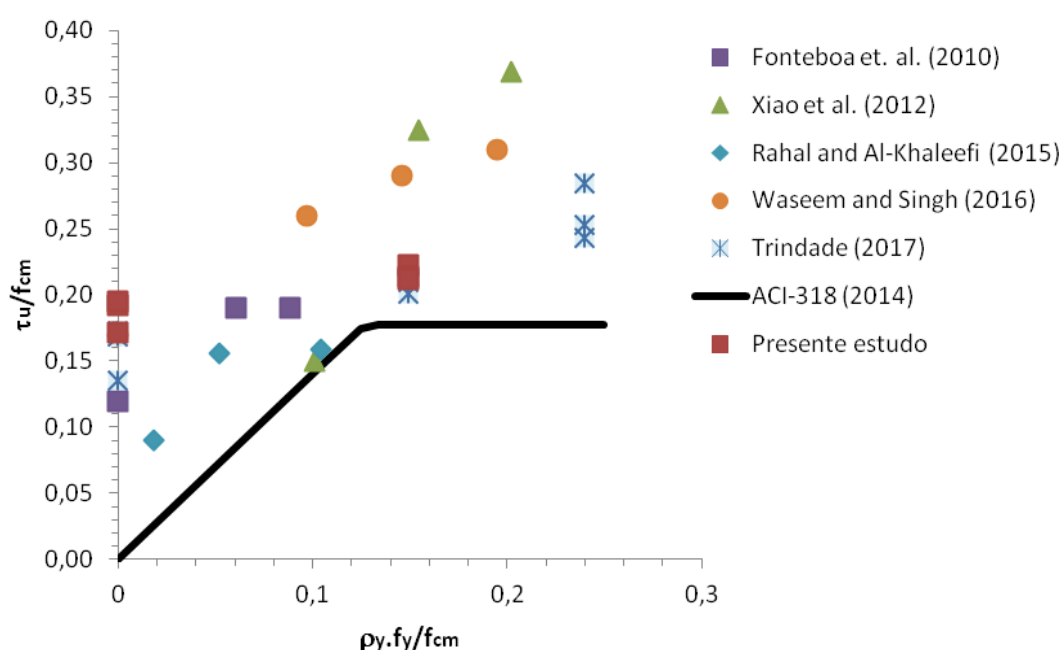


Figura 4.25 – Gráfico comparativo dos resultados experimentais deste trabalho e os obtidos por diferentes pesquisadores.

Observa-se que os resultados experimentais deste estudo, assim como de todos os outros pesquisadores, apresentaram valores superiores aos calculados pela equação do ACI 318 (2014). Conclui-se, portanto, que essa equação pode ser usada para concretos com agregados reciclados com fibras de aço, no que se refere a concretos convencionais.

Além disso, conforme já observada, a adição de fibras em concretos com agregados reciclados com armadura transversal não representa aumento

significativo na resistência ao cisalhamento (Figura 4.25), pois o confinamento proporcionado pelos estribos é bem superior ao das fibras de aço.

4.7 – Análise quantitativa das fibras de aço na superfície de ruptura dos corpos de prova *push-off*

As Figuras 4.26 e 4.27 mostram a superfície de ruptura dos corpos de prova das séries CPn 1-20-0-50-0,5 e CPn 1-20-0-50-1,5, respectivamente.



Figura 4.26 – Detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova da série CPn 1-20-0-50-0,5.



Figura 4.27 – Detalhe da superfície de ruptura do corpo de prova da série CPn 1-20-0-50-1,5.

A análise quantitativa das fibras de aço nas superfícies de ruptura foi realizada em todos os corpos de provas sem armadura transversal (Tabela 4.20), pois os corpos de prova com estribos apresentaram maior dificuldade de serem cortados para análise da superfície.

Tabela 4.20 – Análise quantitativa dos corpos de prova *push-off*.

Corpo de prova	Quantidade (un)	Quantidade média (un)	Desvio-padrão
CP1 1-20-0-50-0,5	70	82,3	11,2
CP2 1-20-0-50-0,5	92		
CP3 1-20-0-50-0,5	85		
CP1 1-20-0-50-1,5	264	260,7	16,3
CP2 1-20-0-50-1,5	243		
CP3 1-20-0-50-1,5	275		
CP1 2-40-0-50-0,5	102	89,7	14,3
CP2 2-40-0-50-0,5	74		
CP3 2-40-0-50-0,5	93		
CP1 2-40-0-50-1,5	235	252,0	15,4
CP2 2-40-0-50-1,5	256		
CP3 2-40-0-50-1,5	265		
CP1 4-0-0-0,5	78	84,0	6,6
CP2 4-0-0-0,5	83		
CP3 4-0-0-0,5	91		
CP1 4-0-0-1,5	253	248,3	15,5
CP2 4-0-0-1,5	231		
CP3 4-0-0-1,5	261		

Observa-se que a distribuição de fibras de aço ao longo da superfície de ruptura foi homogênea, ou seja, não ocorreram “novelos” de fibras e também nenhum defeito de concretagem, concluindo que o sistema de dosagem e mistura dos materiais adotados nesta pesquisa foi adequado.

Além disso, verifica-se que a distribuição quantitativa das fibras de aço na superfície de ruptura dos corpos de prova *push-off* sem armadura transversal seguiu um padrão; para o teor de 0,5% de fibras de aço tem-se em média 85,3 fibras e para o teor de 1,5% a média é de 253,7 fibras, ou seja, o triplo.

Conclui-se que a variação do teor de fibras de aço na mistura é diretamente proporcional à quantidade de fibras distribuídas ao longo da superfície de ruptura, aumentando o efeito da ponte de transferência de tensões, diminuindo a propagação de fissuras e aumentando assim, a tensão de cisalhamento máxima.

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 – Conclusões

Abaixo seguem as conclusões deste estudo:

- não houve diferenças relevantes em relação às propriedades físicas analisadas (granulometria, massa específica, absorção de água e perda de massa por abrasão Los Angeles), mesmo para agregados reciclados com diferentes resistências originais;
- houve redução de 5% na massa específica e 20% na massa unitária dos agregados reciclados em relação ao agregado natural;
- um aumento de 13 vezes foi verificado na absorção de água dos concretos com agregados reciclados em relação ao com agregado natural;
- não houve alteração considerável na perda de massa por Abrasão Los Angeles dos agregados reciclados em relação ao agregado natural;
- houve uniformidade das granulometrias dos agregados reciclados quando comparadas entre si, porém houve pequeno aumento da granulometria quando comparadas com o agregado natural;
- o ensaio de ataque químico mostrou uma quantidade de argamassa antiga aderida à superfície de 35 a 45%, mostrando que essa é a maior responsável pelas propriedades físicas dos agregados reciclados;
- o consumo de cimento dos concretos com agregados reciclados corrigido em 3% mostrou-se adequado, uma vez que foi atingida a resistência à compressão esperada;
- a adição de 0,05 ($V_f = 0,5\%$) e 0,075% ($V_f = 1,5\%$) de superplastificante mostrou-se eficiente, utilizando tanto o ensaio do *slump* como o do Tempo de VeBe para efeito de comparação com os valores requeridos.
- o processo de pré-saturação mostrou-se ineficiente, pois o valor do *slump* diminuiu à medida que se reduziu a porcentagem de agregados reciclados;
- mesmo com a adição de fibras de aço, as propriedades mecânicas foram próximas (concretos convencionais em relação aos com

agregados reciclados), sendo que todas resistências à compressão foram consideradas iguais estatisticamente entre si, mostrando que as fibras de aço não influenciam nessa propriedade do concreto;

- em relação às resistências à tração por compressão diametral, houve aumento significativo de 96,4 e 103,5% referentes aos Grupos I e II, respectivamente, em relação à referência. Logo a adição de fibras de aço interfere significativamente na resistência à tração indireta do concreto, devido ao efeito da ponte de transferência de tensões proporcionado pelas fibras de aço;
- em relação aos concretos com agregados reciclados, com resistência original de 15 a 20 MPa, as fibras de aço aumentaram a resistência ao cisalhamento dos concretos, porém não atingiram o valor de referência para o teor de 1,5% de fibras de aço;
- os concretos com agregados reciclados com resistência original de 35 a 40 MPa superaram o valor de referência em relação à resistência ao cisalhamento quando se utilizou teor de fibras de aço de 0,5%;
- a tensão de confinamento gerada pela armadura transversal aumenta a resistência aos esforços cortantes;
- a adição de fibras de aço não apresenta influência significativa no comportamento ao atrito-cisalhamento de corpos de prova com armadura transversal;
- a distribuição de fibras de aço na superfície de ruptura foi homogênea, mostrando a eficiência do processo de dosagem;
- os corpos de prova apresentaram ruptura menos frágil na presença das fibras de aço, sendo que o deslocamento vertical diminuiu quando se aumentou o teor de fibras.

5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

- analisar a influência das fibras de aço em concretos com teores de agregados reciclados de 30, 75 e 100%;
- variar o teor de fibras de aço para teores de 1 e 2 %;
- utilizar resistência do agregado original igual a 60 MPa;

- estudar a teoria atrito-cisalhamento em concretos pré-fissurados, para todas essas variáveis.

CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5739:2007. Concreto- Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos.

ABNT NBR 7222:2011. Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico.

ABNT NBR 7809:2008. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.

ABNT NBR 9776:1988. Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco chapman - Método de ensaio.

ABNT NBR 9778:2009. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

ABNT NBR 12655:2015. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento.

ABNT NBR 15530:2007. Fibras de aço para concreto – Especificação.

ABNT NBR NM 248:2003. Agregados- Determinação da composição granulométrica.

ABNT NBR NM 26:2009. Agregados – Amostragem.

ABNT NBR NM 27:2001. Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.

ABNT NBR NM 51:2001. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles".

ABNT NBR NM 53:2009. **Agregado graúdo- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.**

ABNT NBR ISO 6892-1:2015. **Materiais metálicos- Ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.**

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.

AHMED. L.; ANSELL, A. Direct shear strength of high-strength fibre concrete. **Magazine of concrete research**, v. 62, Maio, 2010. 379-390

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2014. **Building Code Requirements for Reinforced Concrete.** (ACI 318-2014), USA.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1997.

ARAÚJO, D. L.; EL DEBS, M. K. **Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão,** Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, n. 17, 2001 p. 1-27.

ARMELIN, H.S.; HAMASSAKI, L.T. Avaliação do concreto, projetado reforçado com fibras de aço e polipropileno na construção de túneis – NATM. 32ª Reunião Anual do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON). 1990. **Anais.** 12p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2016 A820/A820M, **Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete.**

BALAGURU, P. N., SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites,** International Edition, 1992.

BALLISTA, L. P. Z. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno.** Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** United Kingdom. Barking, Elsevier. 1990.

BIRKELAND, P. W.; BIRKELAND, H. W. Connections in precast concrete construction. **Journal of American Concrete Institute,** v. 63, p. 345-367, Março 1966. ISSN 3.

BOLDRIN, A. J.; MACHADO, R. L.; CAMPOS, M. A.; LINTZ, R. C. C. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Concreto com Resíduos de Construção e Demolição Empregados na Produção de Blocos de Concreto.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 48º, Rio de Janeiro, 2006, Anais, 48CBC0237

Canadian Standards Association (CSA), Design of Concrete Structures, A23.3- 04, **Canadian Standards Association,** Ottawa, Canada, 2004.

Chung, S. S., Lo, C. W. H. (2003). **Evaluating sustainability in waste management: the case of construction and demolition, chemical and clinical wastes in Hong Kong.** Resources, Conservation and Recycling, 37 (2), 119-145.

Costa, N. da; JUNIOR, N. da C.; LUNA, M.; SELIG, P.; ROCHA, J. (2007). **Planejamento de programas de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: uma análise multivariada.** Engenharia Sanitária Ambiental, 12, 446-456.

FONTEBOA, B. G. E. A. Cortante- fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, A Coruña, 2010 p. 53-67.

FONTEBOA, B. G.; MARTÍNEZ, F.; CARRO, D. e EIRAS, J. Cortante-fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, A Coruña, Jul-Set 2010. 53-67.

FONTEBOA, B. G. E. A. Cortante- fricción de los hormigones reciclados. **Materiales de Construcción**, A Coruña, Jul-Set 2010. 53-67.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço.** Boletim Técnico (BT/PCC/260). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

FIGUEIREDO, A.D. Capítulo: **Concreto com fibras.** In: Concreto Projetado: Ensino, Pesquisa e Realizações São Paulo: IBRACOM, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto.** Concreto Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON., 2008.

FIGUEIREDO, A.D., CHAMA NETO, P. J. **Avaliação de desempenho mecânico de tubos de concreto reforçados com fibras de aço.** Revista DAE., v.178. p.34-39, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras**. Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON. Volume 2, 2011.

FIGUEIREDO, A. D., TORNERI, P. Efeitos da ancoragem em gancho de fibras na tenacidade dos concretos In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, **Anais**. São Paulo, 2006.

FIGUEIREDO, C. R. **Contribuição ao estudo da capacidade de proteção de argamassas com sílica ativa para reparos estruturais**. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM009A/98, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1998. 157p

Gao Danying, Lijuan Zhang, Michelle Nokken (2017). **Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear**. Cement and Concrete Composites, 79 1-8.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – Um novo material para dosagens estruturais**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

Gonzalez-Taboada, B. González-Fonteboa (2016). **Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis**. Materiales de Construcción, Vol 66, no 323.

GRAHAM, G. M., 1911, **Suspension steel concrete**, U.S. Patent No. 983, 274, 7.

HANSEN, T. C. **Recycled of demolished concrete and masonry**. London: Chapman & Hall, 1992. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, pp. 1-160.

HELENE, P.R.I.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI Editora. São Paulo, 1992.

John, V. M. (2001) **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: Carneiro, A. P., Brum, I. A. S., Cassa, J. C.S. (ORG). Reciclagem de resíduo para produção de materiais de construção. Projeto resíduo bom. Salvador: Caixa Econômica Federal.

Khanlou, G. A. MacRae, A. N. Scott, S. J. Hicks and G. C. Clifton. **Shear Performance of Steel Fibre-Reinforced Concrete**. Australasian Structural Engineering Conference, Perth, Australia, July 11-13th 2012, p.8.

KIM, Y.H.; TREJO, D.; HUESTE, M.D., Shear characteristics of self-consolidating concrete for precast prestressed concrete members, **ACI SP-247**, 2007, p.53-65.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

LEITE, M. B. e MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, 2016. pp 38-48.

Levy, S. M., Helene, P. R. L. (1997). **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LI, V. C.; MATSUMOTO, T. **Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation**. *Cement & Concrete Composites*, v.20, 1998., p351.

LI, V.c. Performance driven design of fiber reinforced cementitious composites. In: SWAMY, R. N. Fourth Rilem International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete. RILEM Symposium FRC 92. **Proceedings**. 1992.

Lintz, R. C. C., Jacintho A. E. P. G. A., Pimentel, L. L., Gachet-Barbosa, L. A. (2012). **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos**. Revista IBRACONde Estruturas e Materiais. 5, 166-181.

LOOV, R. E. e PATNAIK A. K. Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface. **PCI Journal**.1994. pp. 48–69.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para a utilização em concreto**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007.

MANSUR, M. A.; VINAYAGAN, T. e TAN, K. Shear transfer across a crack in reinforced high-strength concrete. **Jounal of Materials in Civil Engineering**, April 2008. pp. 294-302.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo: Edusp, 2005.

MAST, R. F. Auxiliary reinforcement in precast concrete connections. **ASCE**, 1968. pp. 1495-1504.

MATTOCK, A. H. Shear friction and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, February 2001. pp. 50-59.

MATTOCK, C. H. Shear transfer in lightweight reinforced concrete. **PCI Journal**, 1974. Vol. 21, nº 1, pp.20-39.

MATTOCK, A. H. Shear friction and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, Fevereiro, 2001. pp.50-59.

MATTOCK, A. H.: Reader Comments on Influence of concrete strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members, by J. C. MAU, S. T. e HSU, T. T. C.: Reader comments on “Influence of concrete strength and Load History on the Shear Friction Capacity of Concrete Members”, by J. C. Walraven, J. Frenay & A. Pruijssers, **PCI Journal**, vol. 33, Janeiro 1988, pp. 166-168.

Walraven, J. Frenay & A. Pruijssers, **PCI Journal**, vol. 33, Janeiro 1988, pp. 165-166.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de Doutorado, PUC – RJ: 201p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2012.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; e Monteiro, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada, 1995. **Proceedings**. P. 1-12.

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C. e CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**. Porto Alegre. Março – 2009. pp. 57-71.

MORAIS, G. M. D. (2006). **Diagnóstico da deposição clandestina de Resíduos de Construção e Demolição em bairros periféricos de**

Uberlândia: Subsídios para uma gestão sustentável. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.

NORMA DNIT 064/2004 – ME. **Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistêmetro VeBe – Método de ensaio.**

Nunes, K. R. A. (2004). **Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição.** Tese de Ph.D da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

NUNES, N.L. **Estudo da influência da geometria da fibra de aço na tenacidade à flexão dos compósitos de matriz de concreto.** São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

NUNES, N. L., FIGUEIREDO, A. D., AGOPYAN, Vahan. The influence of fiber geometry on flexural toughness of steel fiber reinforced concrete In: International Conference Composites in Construction – CCC2001, 2001, Porto. **Composites in Constructions.** Lisse: A.A. Balkema Publisher, 2001. P.27 – 32.

OMARY, S., GHORBEL, E., WARDEH, G e GOMART, H. Effects of demolition concrete waste aggregates on the properties of a structural. **International Conference on Sustainable Structural Concrete**, September 2015, La Plata, Argentina.

PATNAIK, A.H. (1994). **Comments of “Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface.** Ph.D Thesis, University of Calgary, Calgary, Canada.

Pinto, T. P. (2005). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do SINDUSCON-SP.**(1ª Ed.). São Paulo: SINDUSCON-SP, (Capítulo 1).

Portal Brasil, 2018. Disponível em: http://www.portalbrasil.net/historiageral_revolucaoindustrial.htm acesso em 04 de outubro de 2018.

PORTER, H. F., 1910, “**Preparation of concrete from selection of materials to final disposition**”, Journal of the American Concrete Institute, v. 6, p. 296.

PCI DESIGN HANDBOOK. **Preressed Concrete Institute.** Chicago, 2010.

RAHAL K. N. e AL-KHALEEFI, A. Shear-Friction Behavior of Recycled and Natural Aggregate Concrete – Na Experimental Investigation. ACI Structural Journal, November-December 2015. Pp. 725 – 734.

RAHAL, K. N. Shear transfer strength of reinforced concrete. **ACI Structural Journal**, Julho-Agosto 2010. V. 107.

RATHS, C. H.: Reader Comments on “Designs Proposals for Reinforced Concrete Corbels” by A.H. Mattock; **PCI Journal**, vol. 22, Março 1977, pp. 93-98

RLE- Rail Link Engineering. Fire performance of concrete for tunnel linings. **Channel tunnelrail link**, technical report nº 000-RUG-RLEEX-00005-AB.

SANTOS, P. M. D. **Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers.** Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra. Coimbra. 2009.

SANTOS, P. M. D. e JÚLIO, E. N. B. S. A state of the art review on shear friction. **Engineering Structures**, 2012. 435-448.

SANTOS, P. M. D. e JÚLIO, E. N. B. S. Interface Shear Transfer on Composite Concrete Members. **ACI Structural Journal**, January-February 2014. pp. 113-121.

SWAMY, R. N., 1975, "Evaluation of fibre reinforced cement based composites", **Matériaux et Constructions**, v.8, v. 45.

SHAIKH, A. F.: "Proposed Revisions to Shear-Friction Provisions", **PCI Journal**, vol. 23, Março 1978, pp. 12-21.

I Seminário Construção Civil e Sustentabilidade – 2008 disponível em <http://www.iclei.org/fileadmin/user_upload/documents/LACS/Portugues/Noticias_e_Eventos/Arquivos_de_Noticias/Construcao_Sustentavel_RJ/Programa-RJ.pdf> acessado em setembro/2018.

TANESI, J., FIGUEIREDO, A. D. Polypropylene fiber reinforced concrete: shrinkage crackin In: International Conference Composites in Constructions – CCCS2001, 2001, Porto. **Composites in Construction**. Lisse: A.A.Balkema Publishers. P.39 – 42.2001.

TRIGUEIRO, Andre. Meio ambiente no século 21, Autores Associados LTDA, Autores Associados LTDA, Campinas, 2005.

<http://www.sustentabilidade.org.br/antigo/doku.php?id=port:redesustent:conceitos:conceitos>, acessado em setembro/2018.

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.

VELASCO, R. V. **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas,**

mecânica e térmicas. Tese de Doutorado, UFRJ – RJ: 349 p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2008.

VIERA, G. L. e Dal Molin, D. C. C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído.** Porto Alegre. Dezembro – 2004. pp. 47-63.

WAGIH, A. M.; EL-KARMOTY, H. Z.; MAGDA, E.; SAMIR, H. O. Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. **HBRC Journal**, p. 193–200, 2013.

WALRAVEN J., FRÉNEY J. e PRUIJSSERS A. Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members. **PCI Journal.** 1987. pp. 6

WERMAGER L. S. “Shear-friction of sand-lightweight clay and slate aggregate concretes with varied reinforcement ratios” (2015). **Masters Theses.** 7485. Disponível em: http://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7485

XIAO, J.; SUN, C. e LANGE, D. A. Effect of joint interface conditions on shear transfer behavior of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, 2016. pp 343-455.

XIAO, j.; XIE, H. e YANG, Z. Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research.** February – 2012. Pp. 700-709.

ZORDAN S. E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 1997.

ANEXO

Resultados dos corpos de prova da série 1

- CPn 1-20-0-50-0,5

As Figuras A.1 e A.2 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.1 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.2 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão na Tabela A.1, sendo a Figura A.3, gerada a partir desses resultados.

Tabela A.1 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 1 20-0-50-0,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}/f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 1-20-0-50-0,5	77,6	4,1	0,13	0,085	0,664
CP2 1-20-0-50-0,5	73,9	3,9	0,12	0,123	0,444
CP3 1-20-0-50-0,5	67,7	3,6	0,11	0,113	0,308

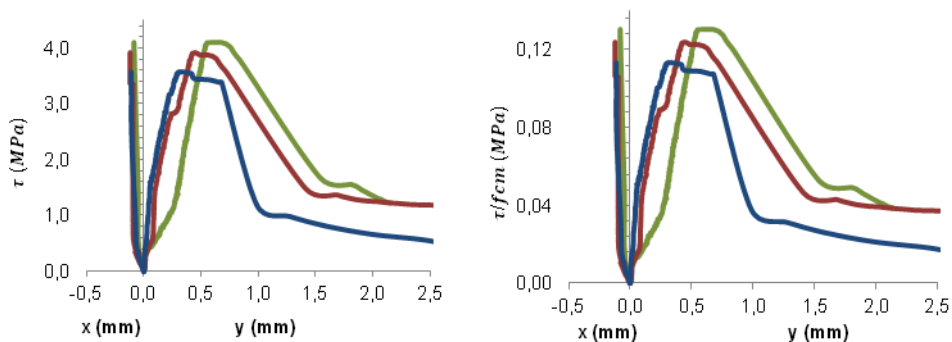
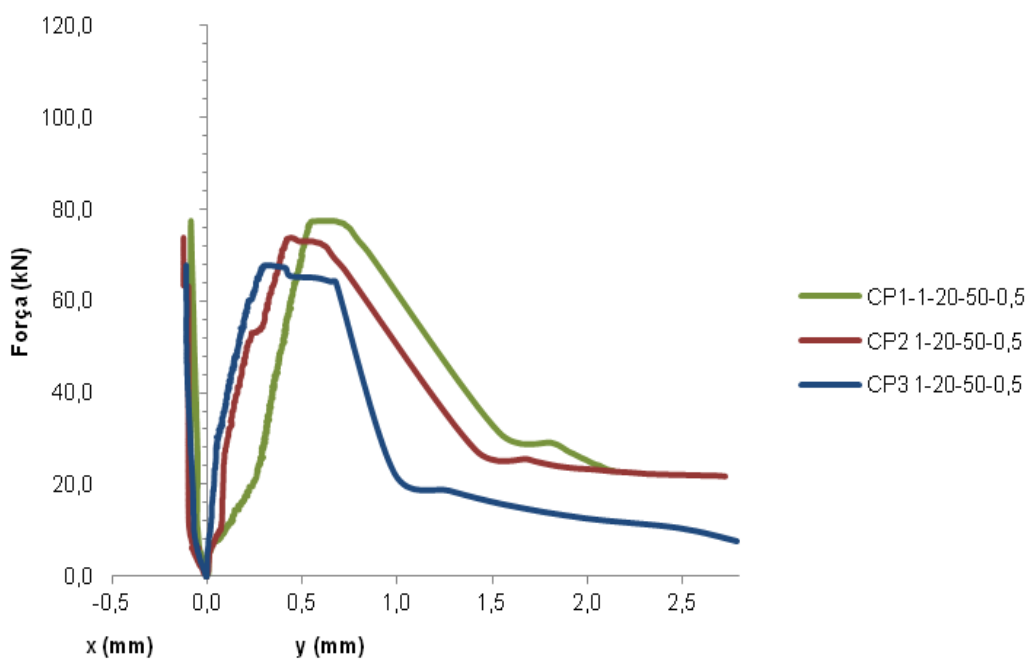


Figura A.3 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 1 20-0-50-0,5.

- **CPn 1-20-0-50-1,5**

As Figuras A.4 e A.5 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.4 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.5 – Corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão na Tabela A.2, sendo a Figura A.6, gerada a partir desses resultados.

Tabela A.2 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 1 20-0-50-1,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x} / f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 1-20-0-50-1,5	93,7	4,9	0,16	0,100	0,449
CP2 1-20-0-50-1,5	81,5	4,3	0,14	0,074	0,404
CP3 1-20-0-50-1,5	69,9	3,7	0,12	0,344	0,403

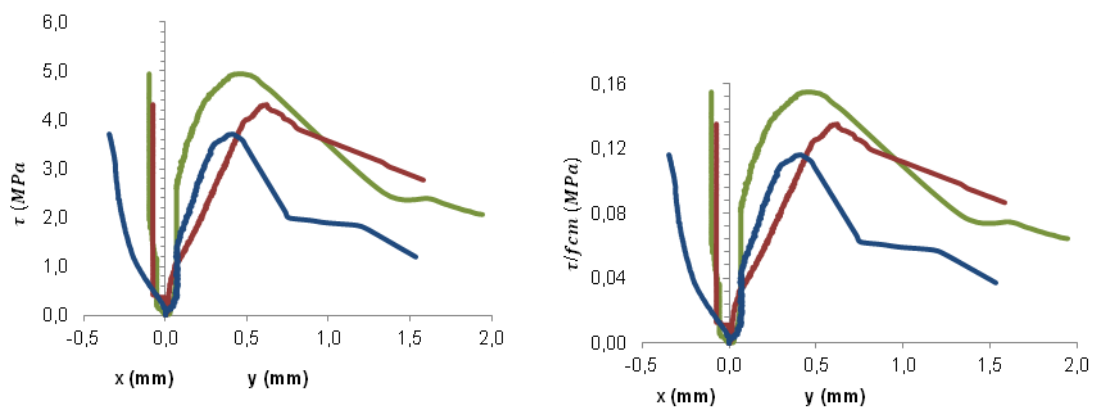
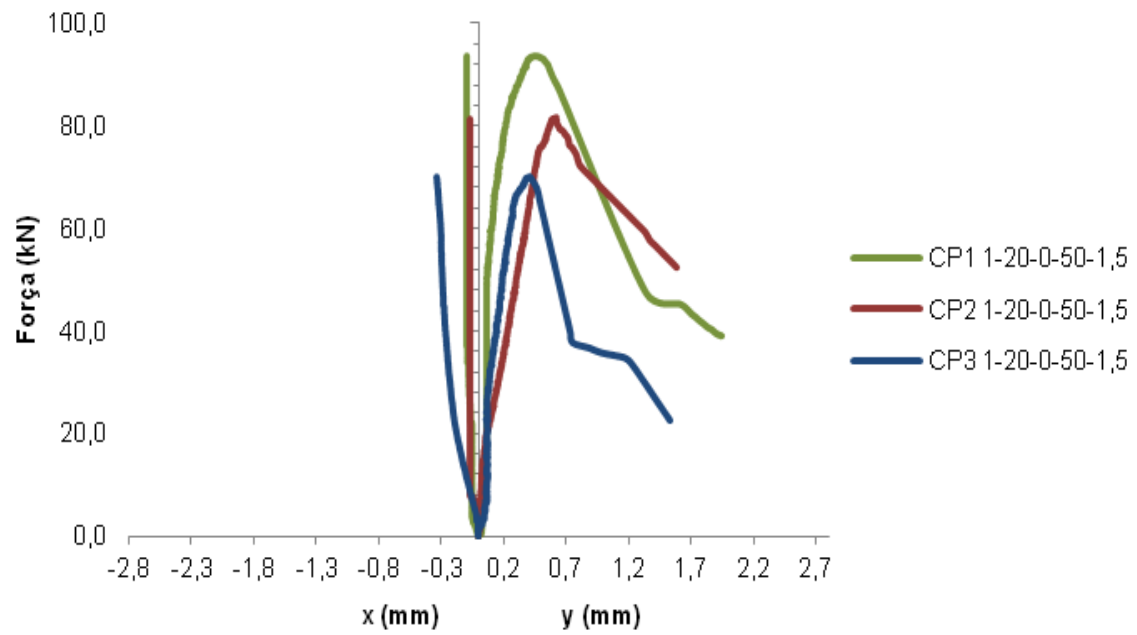


Figura A.6 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 1 20-0-50-1,5.

Resultados dos corpos de prova da série 3

- CPn 3-40-2-50-0,5

As Figuras A.7 e A.8 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.7 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-0,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.8 – Corpos de prova CPn 3 40-2-50-0,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.3, sendo a Figura A.9 gerada a partir desses resultados.

Tabela A.3 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 3 40-0-50-0,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x} / f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 3-40-0-50-0,5	135,7	7,2	0,23	0,225	1,082
CP2 3-40-0-50-0,5	120,2	6,4	0,20	0,230	0,498
CP3 3-40-0-50-0,5	125,4	6,6	0,21	0,244	0,820

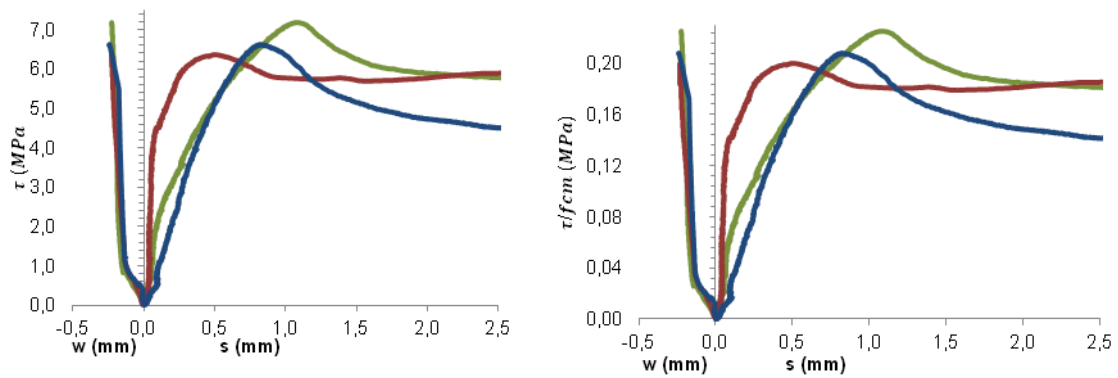
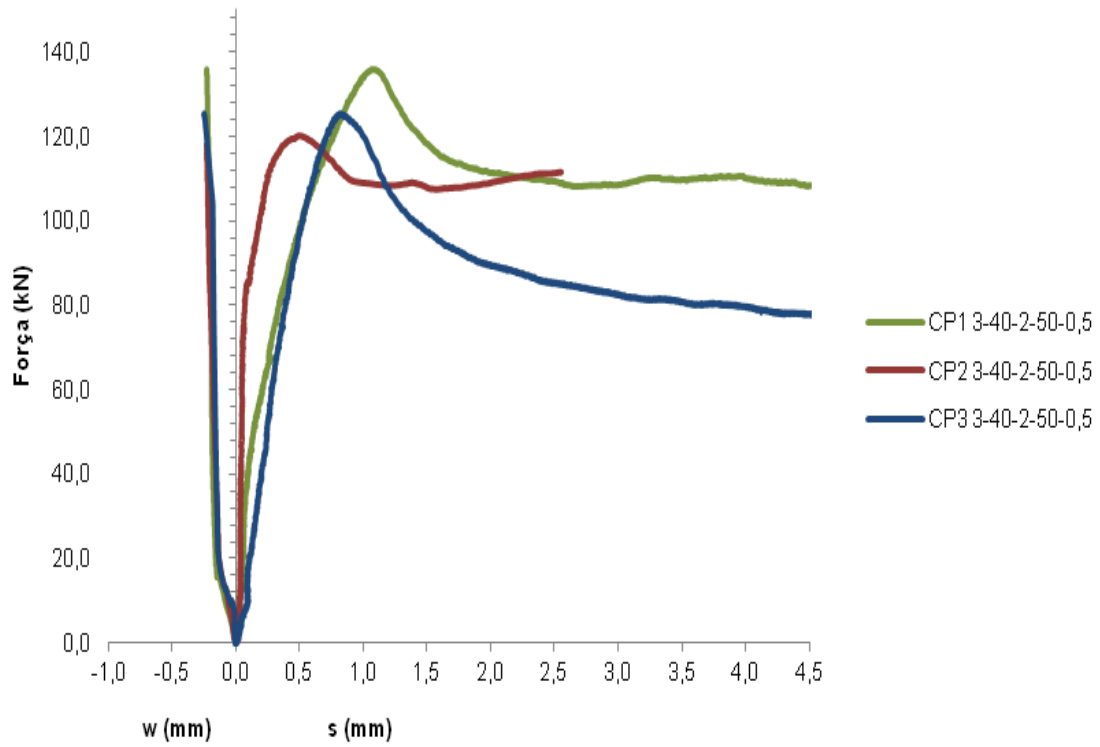


Figura A.9 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 3 40-2-50-0,5.

- CPn 3-40-2-50-1,5

As Figuras A.10 e A.11 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.10 – Corpos de prova CPn 3 40-0-50-1,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.11 – Corpos de prova CPn 3 40-0-50-1,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.4, sendo a Figura A.12 gerada a partir desses resultados.

Tabela A.4 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 3 40-0-50-1,5.

Corpos de prova	Força (kN)	τ_{\max} (MPa)	τ_{\max} / f_{cm}	x (mm)	y (mm)
CP1 3-40-0-50-1,5	135,2	7,2	0,22	0,114	1,929
CP2 3-40-0-50-1,5	129,6	6,9	0,21	0,230	2,648
CP3 3-40-0-50-1,5	128,9	6,8	0,21	0,210	3,031

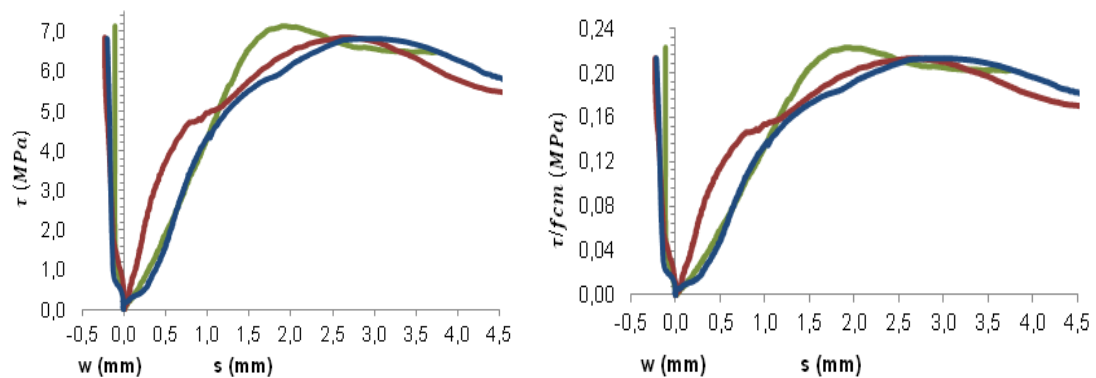
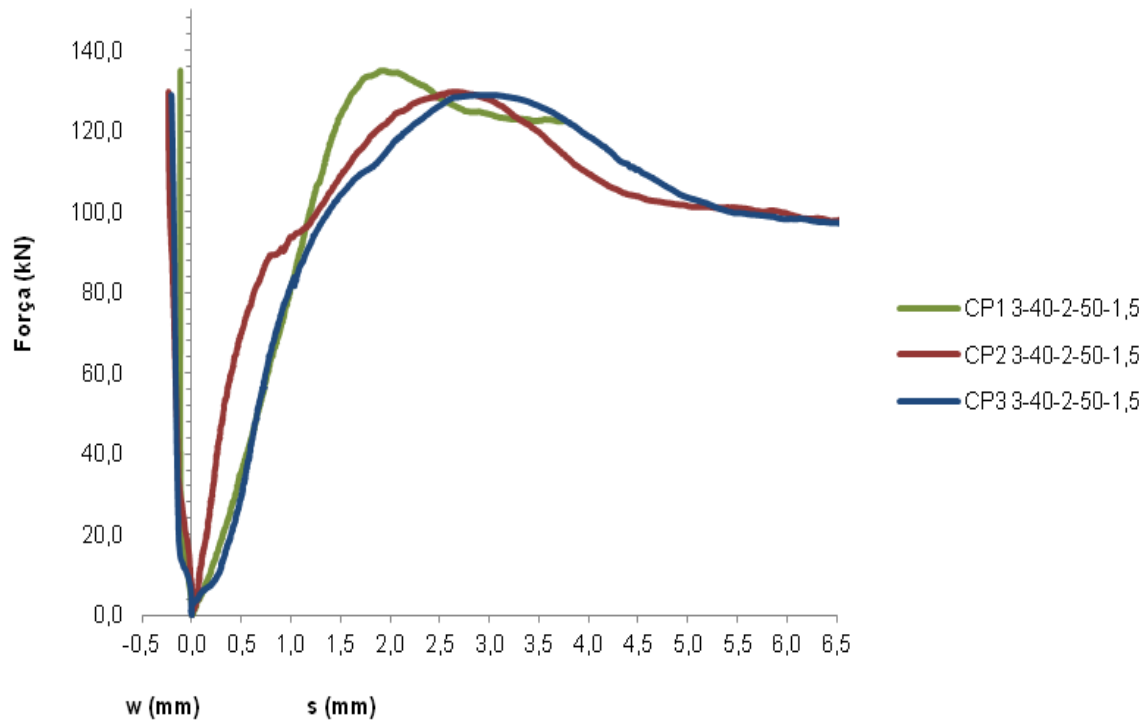


Figura A.12 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 3 40-2-50-1,5.

Resultados dos corpos de prova da série 4

- CPn 4-0-0-0,5

As Figuras A.13 e A.14 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.13 – Corpos de prova CPn 4-0-0-0,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.14 – Corpos de prova CPn 4-0-0-0,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.5, sendo a Figura A.15, gerada a partir desses resultados.

Tabela A.5 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 4-0-0-0,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x} / f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 4-0-0-0,5	107,8	5,7	0,18	0,213	0,557
CP2 4-0-0-0,5	88,1	4,7	0,14	0,109	0,430
CP3 4-0-0-0,5	115,5	6,1	0,19	0,205	0,621

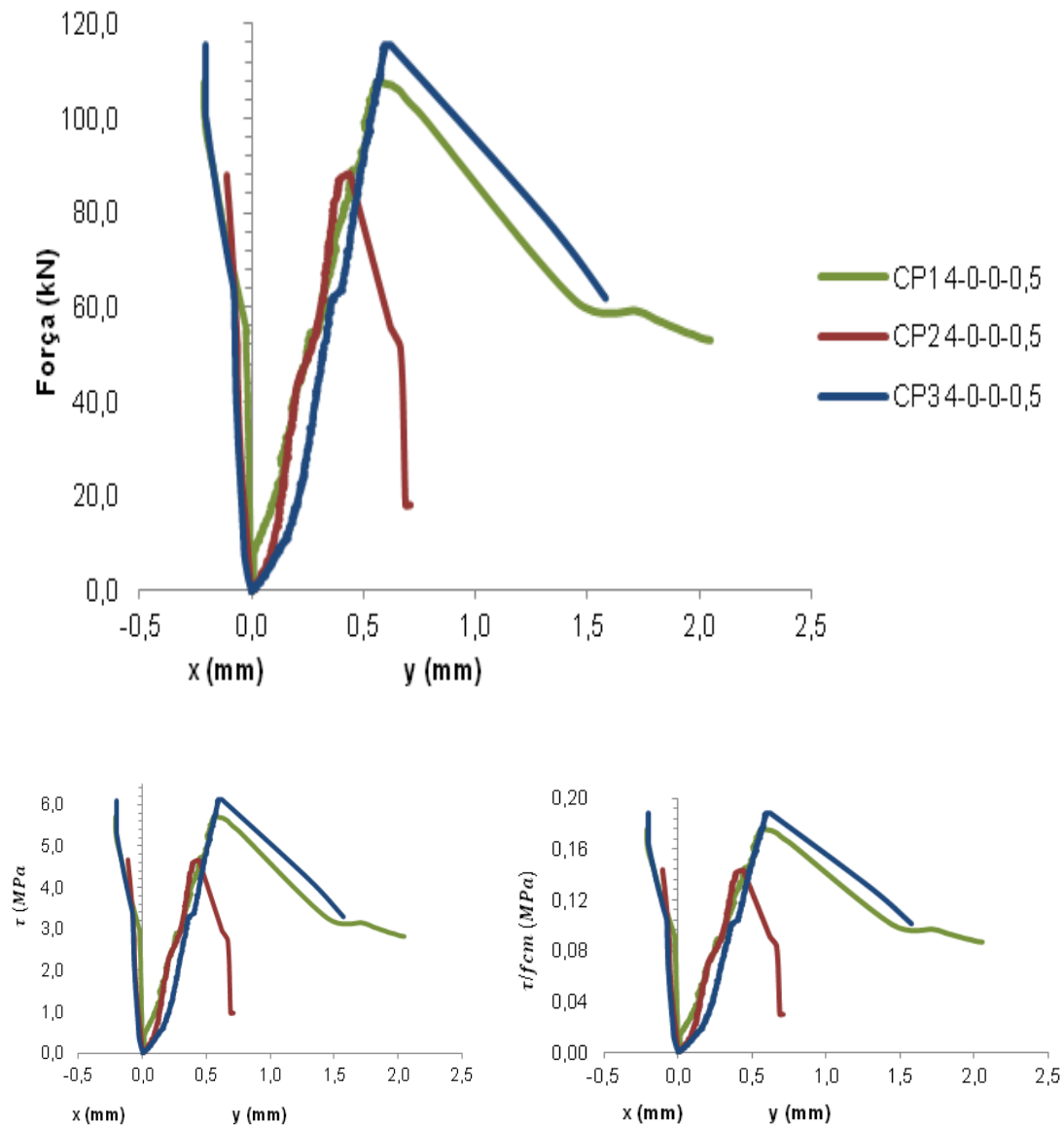


Figura A.15 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-0-0-0,5.

- **CPn 4-0-0-1,5**

As Figuras A.16 e A.17 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios. Em relação a essa série houve perda de um corpo de prova na confecção durante a desforma.



Figura A.16 – Corpos de prova CPn 4-0-0-1,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.17 – Corpos de prova CPn 4-0-0-1,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.6 sendo a Figura A.18 gerada a partir desses resultados.

Tabela A.6 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 4-0-0-1,5.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x} / f_{cm}$	x (mm)	y (mm)
CP1 4-0-0-1,5	115,9	6,1	0,19	0,172	0,392
CP2 4-0-0-1,5	110,2	5,8	0,18	0,259	0,477

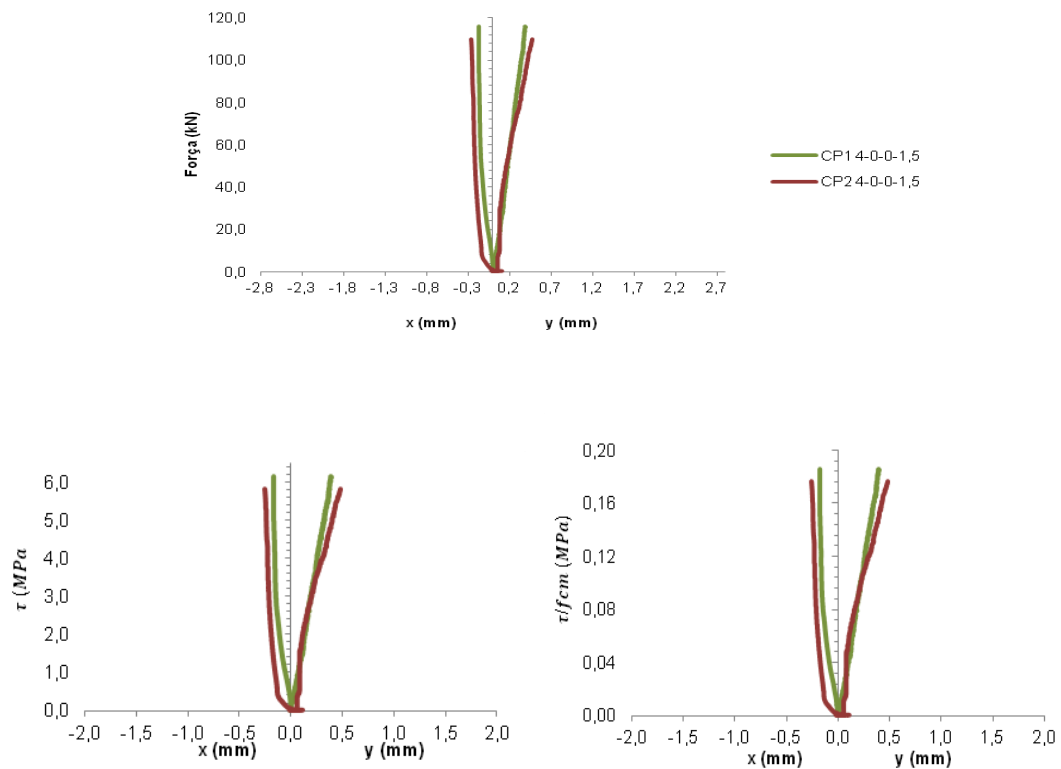


Figura A.18 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-0-0-1,5.

- CPn 4-2-0-0,5

As Figuras A.19 e A.20 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios.



Figura A.19 – Corpos de prova CPn 4-2-0-0,5 antes da realização do ensaio *push-off*.

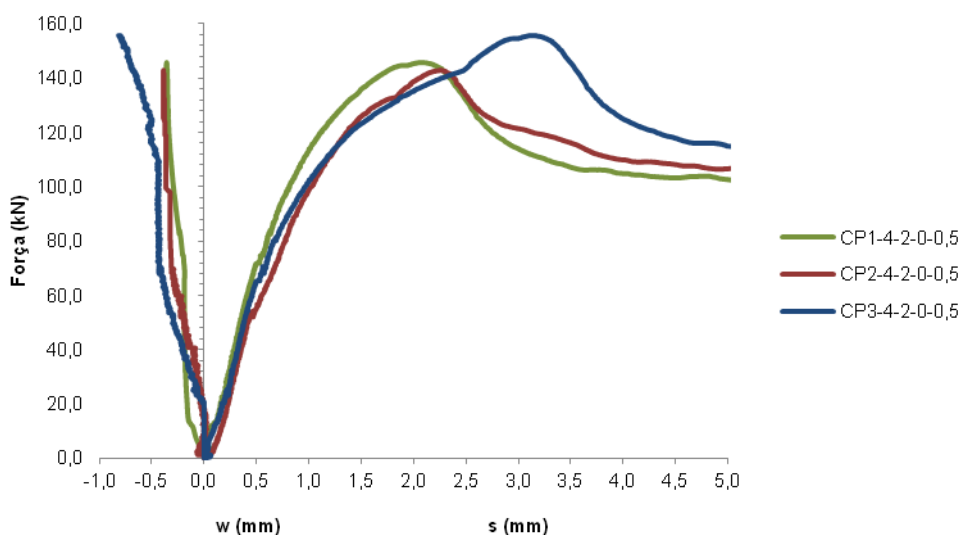


Figura A.20 – Corpos de prova CPn 4-2-0-0,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.7, sendo a Figura A.21 gerada a partir desses resultados.

Tabela A.7 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 4-2-0-0,5.

Corpos de prova	Força (kN)	τ_{\max} (MPa)	τ_{\max}/f_{cm}	x (mm)	y (mm)
CP1 4-2-0-50-0,5	145,9	7,7	0,24	0,353	2,079
CP2 4-2-0-50-0,5	143,1	7,6	0,23	0,395	2,257
CP3 4-2-0-50-0,5	155,7	8,2	0,25	0,821	3,131



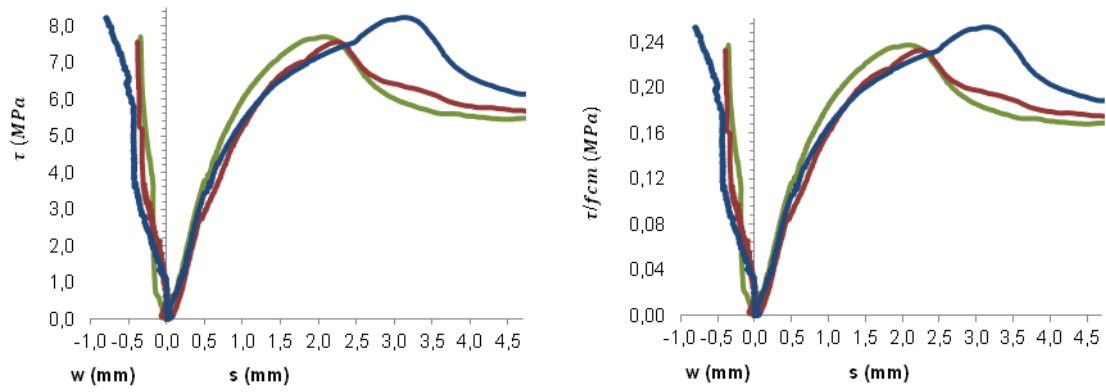


Figura A.21 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-2-0-0,5.

- CPn 4-2-0-1,5

As Figuras A.22 e A.23 mostram os corpos de prova antes e depois dos ensaios. Em relação a essa série houve uma perda de um corpo de prova na confecção durante a desforma.



Figura A.22 – Corpos de prova CPn 4-2-0-1,5 antes da realização do ensaio *push-off*.



Figura A.23 – Corpos de prova CPn 4-2-0-1,5 após a realização do ensaio *push-off*.

Os resultados estão descritos na Tabela A.8, sendo a Figura A.24 gerada a partir desses resultados.

Tabela A.8 – Resultados dos ensaios *push-off* para o CPn 4-0-0-1,5.

Corpos de prova	Força (kN)	τ_{\max} (MPa)	τ_{\max} / f_{cm}	x (mm)	y (mm)
CP1 4-2-0-15	141,3	7,5	0,23	0,353	1,989
CP2 4-2-0-15	165,5	8,8	0,27	0,299	2,000

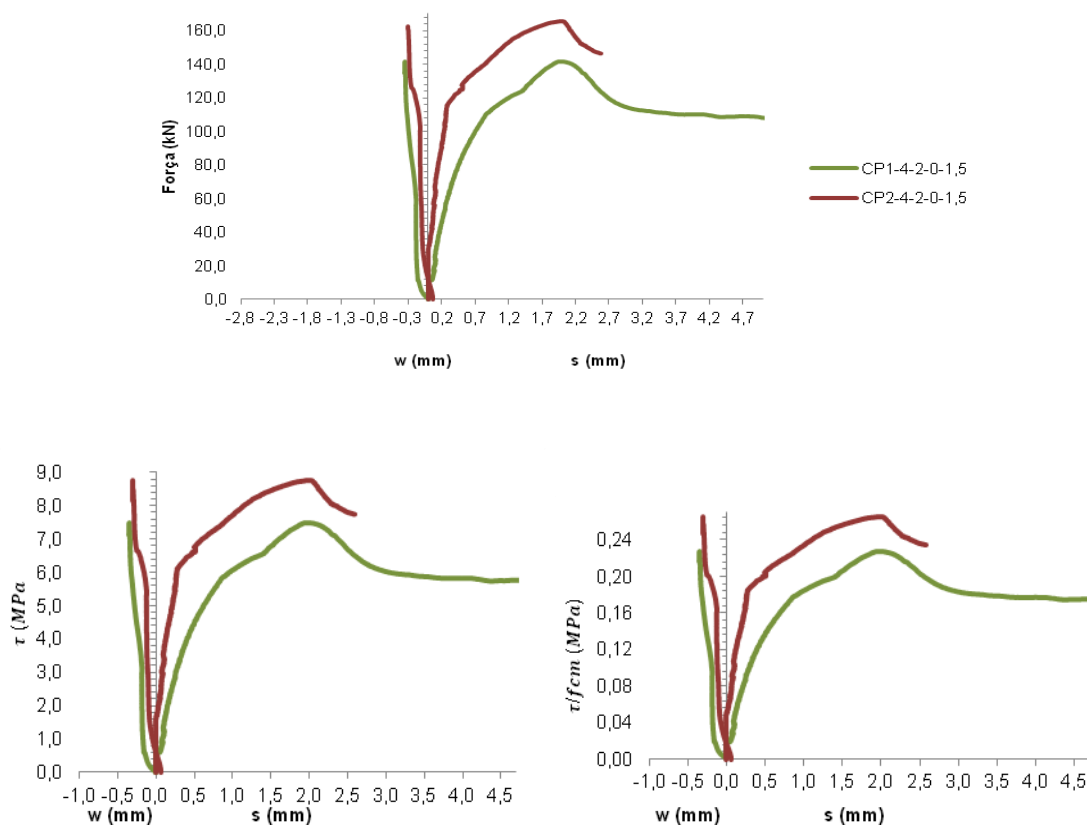


Figura A.24 – Gráficos relativos aos corpos de prova CPn 4-2-0-1,5.