

**A INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES  
DE CONCRETOS SIMPLES COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS NO  
COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO**

**JULIANA CORRÊA TRINDADE**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE (UENF)  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
MARÇO - 2017

**A INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES  
DE CONCRETOS SIMPLES COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS NO  
COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO**

**JULIANA CORRÊA TRINDADE**

“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

Coorientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE (UENF)  
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
MARÇO - 2017**

# **A INFLUÊNCIA DO TEOR DE AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DE CONCRETOS SIMPLES COM DIFERENTES RESISTÊNCIAS NO COMPORTAMENTO AO ATRITO-CISALHAMENTO**

**JULIANA CORRÊA TRINDADE**

“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<sup>a</sup> Maria Elizabeth da Nóbrega Tavares, D. Sc. - UERJ

---

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

---

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

---

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

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.” (Madre Teresa de Calcutá)*

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão de uma etapa traz consigo uma inevitável reflexão. Ao caminhar para o fim deste trabalho me recordo, quase que involuntariamente, do caminho que trilhei para alcançar o objetivo. Nestas recordações me deparo com diversas pessoas, que de alguma forma, contribuíram para que este projeto se concretizasse. Por isso, gostaria de agradecer a todos que se fizeram presentes no meu cotidiano e que conseguiram tornar os gestos mais simples grandiosos num momento de necessidade.

Agradeço à Deus pela força de vontade e pela persistência que me concedeu. Agradeço por seu zelo, por sua atenção minuciosa comigo e por sua bondade sem fim. Agradeço por ter dividido comigo esta responsabilidade e pela generosidade de me conceder o mérito, como se eu houvesse realizado algo sozinha, como se Ele não estivesse, o tempo todo, segurando-me em seus braços.

Aos meus pais e ao meu irmão Vinícius pela paciência, pela torcida e pelo interesse, ainda que forjado, pelas minhas histórias diárias envolvendo concreto reciclado e cisalhamento. Agradeço pela certeza que me transmitem de que o nosso amor é maior que o infinito, ainda que eu desconheça o tamanho deste último.

Ao meu namorado João Alberto pela fonte inesgotável de sorrisos. Pela admiração que tem por mim e que não procura esconder, fazendo-me sentir a pessoa mais especial que já passou por essa Terra. Obrigada pela tranquilidade, pelo respeito imenso e pelo amor, que me move, me transforma e, ao mesmo tempo, me estabiliza.

Ao meu orientador e professor Sergio Luis pelo poder de me motivar a fazer o melhor, sem ter usado nenhum artifício para tanto, a não ser o sorriso. Agradeço por suas aulas diárias e gratuitas de otimismo, alegria, persistência, coragem e portunhol. Ao meu coorientador Professor Dylmar pelas ideias e correções.

Aos meus inúmeros amigos que, com certeza, eu envolvi neste trabalho. Pryscila, Kíssila, Rafael, Valber, Thaís e tantos outros que não se importaram em dividir comigo, ainda que por um instante, este objetivo.

À Patricia, ao Kaique e ao Márcio por se dedicarem ao meu trabalho de uma forma diferenciada. Obrigada por estarem comigo nos momentos mais exaustivos.

À UENF pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal e à CAPES pela contribuição financeira para o desenvolvimento da pesquisa.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Considerações iniciais ..... 1
1.2	Objetivos ..... 6
1.3	Justificativas..... 6
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
2.1	Concreto com agregado reciclado..... 8
2.1.1	Resíduos de construção e demolição (RCD) ..... 8
2.1.2	Agregado reciclado ..... 11
2.1.3	Dosagem de concretos com agregados reciclados ..... 14
2.1.4	Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado ..... 16
2.2	Transferência de tensões cisalhantes entre interfaces de concreto ..... 19
2.2.1	Mecanismos de transferência de tensões cisalhantes entre interfaces de concreto..... 21
2.2.2	Teoria do atrito-cisalhamento ( <i>shear-friction</i> ) ..... 23
2.2.3	Recomendações normativas para atrito-cisalhamento..... 28
2.2.4	Ensaio de <i>push-off</i> ..... 29
2.3	Aplicação da teoria do atrito-cisalhamento em concretos com agregados reciclados..... 30
2.3.1	Pesquisas relacionadas à transferência de tensões de cisalhamento em concretos reciclados ..... 32
2.4	Considerações gerais ..... 37
<b>CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>39</b>
3.1	Considerações iniciais ..... 39
3.2	Materiais ..... 41
3.2.1	Cimento de alta resistência inicial ..... 41
3.2.2	Agregados ..... 41
3.2.3	Água ..... 41
3.2.4	Armaduras ..... 41
3.3	Produção dos agregados reciclados ..... 41

3.3.1	Coleta do concreto a ser reciclado .....	42
3.3.2	Britagem .....	42
3.3.3	Peneiramento .....	44
3.3.4	Pesagem e armazenamento .....	45
3.4	Caracterização dos agregados.....	46
3.4.1	Composição granulométrica .....	46
3.4.2	Massa específica real e unitária.....	46
3.4.3	Absorção de água.....	46
3.4.4	Abrasão Los Angeles .....	46
3.4.5	Quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado.....	47
3.4.6	Massa específica real e absorção de água do agregado após o ataque ácido.....	48
3.5	Detalhes dos corpos de prova.....	48
3.6	Dosagem dos concretos.....	52
3.7	Fôrmas.....	53
3.8	Produção e cura dos concretos.....	53
3.9	Caracterização dos concretos no estado fresco .....	55
3.10	Caracterização dos concretos no estado endurecido .....	56
3.11	Instrumentação e ensaios <i>push-off</i> .....	57
3.12	Análise da superfície de ruptura.....	59
	<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>61</b>
4.1	Resultados da caracterização do aço das armaduras .....	61
4.2	Resultados da caracterização dos agregados.....	61
4.2.1	Composição granulométrica .....	62
4.2.2	Massa específica real e unitária.....	63
4.2.3	Absorção de água.....	64
4.2.4	Abrasão Los Angeles .....	64
4.2.5	Quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado.....	65
4.2.6	Massa específica real e absorção de água do agregado após o ataque ácido.....	66
4.3	Resultados da caracterização do concreto fresco .....	66
4.4	Resultados da caracterização do concreto endurecido .....	67
4.5	Resultados dos ensaios <i>push-off</i> .....	73

4.5.1	Resultados dos corpos de prova da Série 4.....	74
4.6	Comportamento da armadura transversal .....	78
4.7	Discussão dos resultados dos ensaios <i>push-off</i> .....	79
4.7.1	Influência da presença e da porcentagem de agregados reciclados empregados em concretos sem armadura transversal.....	80
4.7.2	Influência da resistência do concreto original na resistência ao cisalhamento.....	82
4.7.3	Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal .....	83
4.7.4	Influência da taxa de armadura transversal .....	85
4.7.5	Comparação dos resultados experimentais com os calculados por equações propostas por diferentes autores .....	87
4.7.6	Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com valores experimentais de outros pesquisadores .....	89
4.8	Resultados da análise da superfície de ruptura.....	90

**CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS ..... 95**

5.1	Conclusões .....	95
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	96

**CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 97**

**APÊNDICE ..... 105**

	Resultados dos corpos de prova da Série 1.....	106
	Resultados dos corpos de prova da Série 2.....	112
	Resultados dos corpos de prova da Série 3.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Configuração do concreto com agregado reciclado (Cabral, 2007). .....	3
Figura 1.2: Exemplos de estruturas de concreto com transferência de tensões cisalhantes críticas (adaptado de Rahal, 2010). .....	4
Figura 1.3: Esquema da contribuição de cada componente responsável pela transferência de tensões cisalhantes (Adaptada de Santos e Júlio, 2014). .....	5
Figura 2.1: Geração de resíduos de construção no Brasil (ABRELPE, 2015). .....	9
Figura 2.2: Mecanismo de fissuração em concretos convencionais (Walraven <i>et al.</i> , 1987). .....	19
Figura 2.3: Modelo atrito-cisalhamento (Santos, 2009). .....	24
Figura 2.4: Teoria atrito-cisalhamento (Patnaik, 1992, adaptado por Araújo, 1997). .	27
Figura 2.5: Esquema de ensaio de <i>push-off</i> (adaptado de Sagaseta e Vollum, 2011). .....	30
Figura 2.6: Perfil de fissuração e deformação por atrito-cisalhamento de concretos convencional e de alta resistência (adaptado de Ali e White, 1999). .....	32
Figura 2.7: Comparação entre os resultados experimentais de Xiao <i>et al.</i> (2012) e as previsões de equações de diferentes pesquisadores (adaptado de Xiao <i>et al.</i> , 2012). .....	35
Figura 2.8: Curva típica de resposta à transferência de tensões cisalhantes de concretos com agregados reciclados (adaptado de Rahal e Al-Khaleefi, 2015). .....	37
Figura 3.1: Armazenamento do material a ser reciclado. ....	42
Figura 3.2: Britador de mandíbula (Figueira <i>et al.</i> , 2004). .....	43
Figura 3.3: Britagem: (a) inserção do material no equipamento; (b) saída do material. ....	44
Figura 3.4: (a) Peneiramento, (b) rebitagem do material. ....	45
Figura 3.5: Armazenamento do agregado reciclado. ....	45
Figura 3.6: Amostra e esferas utilizadas no ensaio de Abrasão Los Angeles. ....	47
Figura 3.7: Fundo do recipiente onde ocorreu o ataque ácido. ....	48
Figura 3.8: Esquema das séries dos corpos de prova. ....	49
Figura 3.9: Esquema do corpo de prova <i>push-off</i> sem armadura transversal. ....	51

Figura 3.10: Esquema do corpo de prova <i>push-off</i> com armadura transversal.....	51
Figura 3.11: Fôrma e armadura para a produção dos corpos de prova <i>push-off</i> . ....	53
Figura 3.12: Moldagem dos corpos de prova na mesa vibratória. ....	54
Figura 3.13: (a) <i>Slump test</i> , (b) Tempo VeBe.....	55
Figura 3.14: Ensaio de compressão.....	57
Figura 3.15: Ensaio de tração indireta.....	57
Figura 3.16: Ensaio de tração na flexão.....	57
Figura 3.17: Conjunto de placas e rolos utilizados no ensaio <i>push-off</i> . ....	58
Figura 3.18: Desenho esquemático do posicionamento dos LVDTs.....	59
Figura 3.19: Vista frontal e posterior do CP1 4-2-0 no momento do ensaio.....	59
Figura 3.20: <i>Setup</i> de medição das coordenadas: (a) vista frontal; (b) vista lateral. .	60
Figura 4.1: Gráfico tensão vs deformação do aço. ....	61
Figura 4.2: Curva granulométrica da areia. ....	62
Figura 4.3: Curva granulométrica das britas.....	63
Figura 4.4: Curva granulométrica das britas.....	65
Figura 4.5: Resultados de resistência à compressão comparando-se as percentagens de agregados reciclados.....	68
Figura 4.6: Resultados de resistência à compressão comparando-se os grupos de resistências do concreto original. ....	68
Figura 4.7: Resultados de resistência à tração indireta comparando-se as percentagens de agregados reciclados.....	69
Figura 4.9: Resultados da resistência à tração indireta comparando-se os grupos de resistências do concreto original. ....	70
Figura 4.10: Resultados da resistência à tração na flexão comparando-se as percentagens de agregados reciclados.....	72
Figura 4.11: Resultados da resistência à tração na flexão comparando-se os grupos de resistência do concreto original. ....	72
Figura 4.12: Corpos de prova CPx 4-0-0 no momento do ensaio <i>push-off</i> . ....	74

Figura 4.13: Corpos de prova CPx 4-0-0 após o ensaio <i>push-off</i> .	74
Figura 4.14: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 4-0-0.	75
Figura 4.15: Corpos de prova CPx 4-2-0 no momento do ensaio <i>push-off</i> .	76
Figura 4.16: Corpos de prova CPx 4-2-0 após o ensaio <i>push-off</i> .	76
Figura 4.17: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 4-2-0.	77
Figura 4.18: Gráfico tensão cisalhante <i>versus</i> deformação dos estribos para o CPx 3-40-3-50.	78
Figura 4.19: Gráfico tensão cisalhante <i>versus</i> deformação dos estribos para o CPx 3-40-3-50.	78
Figura 4.20: Influência da porcentagem de agregados reciclados na resistência ao cisalhamento.	80
Figura 4.21: Influência da resistência do concreto original na resistência ao cisalhamento.	83
Figura 4.22: Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal.	85
Figura 4.23: Influência da taxa de armadura transversal na resistência ao cisalhamento.	86
Figura 4.24: Comparação da resistência ao cisalhamento entre os corpos de prova com diferentes taxas de armadura transversal.	87
Figura 4.25: Gráfico comparativo entre os resultados experimentais dos corpos de prova com estribos e os valores calculados a partir de equações presentes na literatura.	88
Figura 4.26: Gráfico comparativo entre os resultados experimentais deste trabalho e os obtidos por pesquisadores.	89
Figura 4.27: Superfície 3D do concreto com 30% de agregados reciclados do Grupo 1.	91
Figura 4.28: Superfície 3D do concreto com 30% de agregados reciclados do Grupo 2.	91
Figura 4.29: Superfície 3D do concreto com 50% de agregado reciclado do Grupo 1.	91
Figura 4.30: Superfície 3D do concreto com 50% de agregado reciclado do Grupo 2.	92

Figura 4.31: Superfície 3D do concreto com 100% de agregado reciclado do Grupo 1.....	92
Figura 4.32: Superfície 3D do concreto com 100% de agregado reciclado do Grupo 2.....	93
Figura 4.33: Superfície 3D do concreto de referência. ....	93
Figura A.1: Corpos de prova CPx 1-20-0-30 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	106
Figura A.2: Corpos de prova CPx 1-20-0-30 após o ensaio <i>push-off</i> .....	106
Figura A.3: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-30. ....	107
Figura A.4: Corpos de prova CPx 1-20-0-50 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	108
Figura A.5: Corpos de prova CPx 1-20-0-50 após o ensaio <i>push-off</i> .....	108
Figura A.6: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-50. ....	109
Figura A.7: Corpos de prova CPx 1-20-0-100 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	110
Figura A.8: Corpos de prova CPx 1-20-0-100 após o ensaio <i>push-off</i> .....	110
Figura A.9: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-100. ....	111
Figura A.10: Corpos de prova CPx 2-40-0-30 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	112
Figura A.11: Corpos de prova CPx 2-40-0-30 após o ensaio <i>push-off</i> .....	112
Figura A.12: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-30. ....	113
Figura A.13: Corpos de prova CPx 2-40-0-50 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	114
Figura A.14: Corpos de prova CPx 2-40-0-50 após o ensaio <i>push-off</i> .....	114
Figura A.15: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-50. ....	115
Figura A.16: Corpos de prova CPx 2-40-0-100 no momento do ensaio <i>push-off</i> ....	116
Figura A.17: Corpos de prova CPx 2-40-0-100 após o ensaio <i>push-off</i> .....	116
Figura A.18: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-100. ....	117
Figura A.19: Corpos de prova CPx 3-40-2-50 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	118
Figura A.20: Corpos de prova CPx 3-40-2-50 após o ensaio <i>push-off</i> .....	118
Figura A.21: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 3-40-2-50. ....	119
Figura A.22: Corpos de prova CPx 3-40-3-50 no momento do ensaio <i>push-off</i> .....	120

Figura A.23: Corpos de prova CPx 3-40-3-50 após o ensaio <i>push-off</i> .....	120
Figura A.24: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 3-40-3-50. ....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Normas técnicas relativas à reciclagem de RCD. ....	10
Tabela 2.2: Classificação do resíduo de construção segundo o CONAMA. ....	10
Tabela 2.3: Composição média do RCD de diferentes pesquisadores. ....	11
Tabela 2.4: Equações para transferência de cisalhamento (adaptado de Fonteboa <i>et al.</i> , 2010). ....	28
Tabela 2.5: Considerações a respeito do tipo de interface (adaptado do ACI 318, 2014). ....	29
Tabela 2.6: Resultados da carga cortante última (Fonteboa <i>et al.</i> , 2010). ....	33
Tabela 2.7: Dosagens estudadas por Xiao <i>et al.</i> , 2012. ....	34
Tabela 3.1: Grupos de corpos de prova reciclados. ....	39
Tabela 3.2: Detalhes dos corpos de prova de cada série. ....	49
Tabela 3.3: Dimensões dos corpos de provas de estudos anteriores e do presente estudo. ....	50
Tabela 3.4: Resumo do aço utilizado na confecção dos corpos de prova <i>push-off</i> . ....	51
Tabela 3.5: Quantidade de cada material utilizado nas dosagens. ....	52
Tabela 3.6: Dosagem utilizada para a produção de cada corpo de prova <i>push-off</i> . ....	53
Tabela 3.7: Ensaio de caracterização dos concretos no estado endurecido. ....	56
Tabela 4.1: Propriedades do aço. ....	61
Tabela 4.2: Porcentagem passante acumulada da areia e seus limites. ....	62
Tabela 4.3: Porcentagem passante acumulada das britas e seus limites. ....	63
Tabela 4.4: Massa específica real e massa unitária dos agregados graúdos. ....	64
Tabela 4.5: Absorção de água dos agregados graúdos. ....	64
Tabela 4.6: Perda de massa por abrasão dos agregados graúdos. ....	64
Tabela 4.7: Quantidade de argamassa antiga aderida aos agregados reciclados. ....	65
Tabela 4.8: Características dos agregados reciclados após o ataque ácido. ....	66
Tabela 4.9: Resultados dos ensaios no estado fresco. ....	66

Tabela 4.10: Resultados da resistência à compressão. ....	67
Tabela 4.11: Resultados da resistência à tração indireta. ....	69
Tabela 4.12: Resultados da resistência à tração na flexão. ....	71
Tabela 4.13: Resultados da absorção de água e da massa específica real. ....	73
Tabela 4.14: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 4-0-0. ....	75
Tabela 4.15: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 4-2-0. ....	77
Tabela 4.16: Resumo dos resultados dos ensaios <i>push-off</i> . ....	79
Tabela 4.17: Comparação dos resultados experimentais dos corpos de prova sem estribos com os valores calculados por equações presentes na literatura. ....	87
Tabela 4.18: Área superficial de cada superfície 3D analisada. ....	94
Tabela A.1: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 1-20-0-30. ....	107
Tabela A.2: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 1-20-0-50. ....	109
Tabela A.3: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 1-20-0-100. ....	111
Tabela A.4: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 2-40-0-30. ....	113
Tabela A.5: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 2-40-0-50. ....	115
Tabela A.6: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 2-40-0-100. ....	117
Tabela A.7: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 3-40-2-50. ....	119
Tabela A.8: Resultados dos ensaios <i>push-off</i> para o CPx 3-40-3-50. ....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, SÍMBOLOS

- Letras romanas maiúsculas
  - $A_c$ : área da interface de concreto
  - $A_{sw}$ : área da armadura transversal
  - $N$ : força normal
  - $V$ : força cortante
  - $V_u$ : força cortante última
  - $F$ : força de tração
  - $R$ : força de cisalhamento resistente
  - $E$ : módulo de elasticidade
- Letras romanas minúsculas
  - $c$ : coesão;
  - $f_c$ : resistência à compressão do concreto
  - $f_{cm}$ : resistência média à compressão do concreto
  - $f_{ck}$ : resistência à compressão característica do concreto
  - $f_{ct,f}$ : resistência à tração na flexão do concreto
  - $f_{ct,sp}$ : resistência à tração indireta do concreto
  - $f_y$ : tensão de escoamento da armadura
  - $s$ : 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
  - $\tau$ : tensão de cisalhamento
  - $\tau_{máx}$ : tensão de cisalhamento máxima
  - $\tau_{máxexp}$ : tensão de cisalhamento máxima experimental
  - $\tau_{máxcal}$ : tensão de cisalhamento máxima calculada
  - $\mu$ : coeficiente de atrito
  - $\rho_y$ : taxa geométrica da armadura transversal
  - $\lambda$ : constante que depende da massa específica do concreto

$\sigma_n$ : tensão externa normal ao plano de cisalhamento

$\sigma_s$ : tensão de tração na armadura

$\varepsilon_y$ : deformação de escoamento convencional do aço

$\varepsilon_y^*$ : deformação de escoamento correspondente ao diagrama tensão vs. deformação

$\varepsilon_u$ : deformação última da armadura na ruptura

$\varepsilon_{st}$ : deformação da armadura longitudinal de tração

$\Phi$ : diâmetro da armadura

- Abreviaturas

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

LECIV: Laboratório de Engenharia Civil

LAMAV: Laboratório de Materiais Avançados

UENF: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

RCD: Resíduo de Construção e Demolição

CP: Corpo de prova

## RESUMO

A utilização de agregados reciclados na produção de novos concretos se tornou, nos últimos anos, uma interessante alternativa capaz de reduzir a exploração de recursos naturais e mitigar a geração de resíduos sólidos na Construção Civil. O comportamento mecânico dos concretos com agregados reciclados tem sido tema de diversas pesquisas, porém a capacidade de transferência de tensões cisalhantes em interfaces de concretos com agregados reciclados ainda é um assunto pouco explorado. Sendo assim, o presente trabalho teve por objetivo analisar a influência do teor de agregado graúdo reciclado e da resistência do concreto original no comportamento do concreto ao atrito-cisalhamento. Para tanto, 30 corpos de prova do tipo *push-off* foram produzidos e os teores de 30, 50 e 100% de agregados graúdos naturais foram substituídos pelos reciclados. Além disso, duas classes distintas de resistências à compressão dos concretos que originaram os agregados reciclados foram estudadas (15 a 20 MPa e 35 a 40 MPa). Outra variável envolvida na pesquisa foi a tensão de confinamento fornecida pela armadura transversal. Após a execução do programa experimental e a análise dos resultados obtidos, concluiu-se que os agregados produzidos com resistência do concreto original de 35 a 40 MPa forneceram concretos estatisticamente iguais ao convencional no que se refere à capacidade de cisalhamento, independentemente da porcentagem de agregado reciclado empregada. Por outro lado, agregados produzidos com resistência à compressão original de 15 a 20 MPa apresentaram valores inferiores ao convencional, com redução da capacidade de cisalhamento dependente da porcentagem de agregado reciclado utilizada. Em relação à tensão de confinamento, quanto maior o valor dessa variável, maior a tensão última de cisalhamento. A análise da superfície de ruptura apresentou estreita relação com a resistência ao cisalhamento, confirmando a importância da efetividade do mecanismo de engrenamento entre os agregados no desenvolvimento da capacidade resistente a esforços cortantes.

Palavras-chave: agregado graúdo reciclado, concreto, *push-off*, teoria atrito-cisalhamento.

## ABSTRACT

In recent years, the usage of recycled aggregates into the production of new concretes has become an interesting approach to reduce the exploration of natural resources and minimize the generation of solid residues in Civil Construction. The mechanical behavior of concretes with recycled aggregates has been subject of several researches, however shear stress transfer capacity in concrete with recycled aggregates interfaces is not deeply explored. Thus, this work aimed to analyse the influence of recycled aggregate content and original concrete strength on the behavior of the shear-friction subjected concrete. Therefore, 30 push-off specimens were produced and natural aggregate percentage of 30, 50 and 100% were replaced by recycled ones. Furthermore, two different compressive strength groups from the concretes that generated the recycled aggregates were studied (15 up to 20 MPa and 35 up to 40 MPa). Another variable in the research was the confinement stress provided by the transverse reinforcement. After experimental program execution and analysis of results, it was concluded that shear capacity from concretes made with original concrete strength of 15 up to 20 MPa provided statistically equal concretes in comparison with conventional ones, regardless recycled aggregate percentage. On the other hand, aggregates produced from original concrete strength of 15 up to 20 MPa showed lower values when compare to conventional ones, with a shear capacity reduction depending on amount of recycled aggregate. A direct relationship between confinement stress and ultimate shear stress was found. Analysis rupture surfaces showed a close relationship with shear stress, which confirm key role of the engagement mechanism between the aggregates development of shear strength.

Keywords: recycled aggregate, concrete, push-off, shear-friction theory.

# CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

A humanidade, embora capaz de elaborar complexos sistemas socioeconômicos para sua regência, deparou-se nos últimos anos com uma realidade convenientemente esquecida: o modelo de sociedade criado pelo homem não considerou a esgotabilidade dos recursos naturais e a capacidade de absorção da natureza. Desde séculos atrás, os seres humanos utilizam os recursos naturais de forma indiscriminada. O período da Revolução Industrial merece destaque neste quesito, quando a exploração tomou proporções jamais vistas (Ballista, 2003).

A exploração dos recursos naturais está sempre acompanhada de grande desenvolvimento e, para equilibrar essa equação, a sociedade passou a devolver aos ecossistemas grande quantidade de resíduos, cada vez mais difíceis de serem absorvidos pelo próprio meio ambiente. Dentre as toneladas diárias de resíduos produzidos, grande parcela é proveniente da indústria da Construção Civil. Essa atividade, caracterizada por modificar radicalmente as paisagens naturais, é uma das campeãs na extração de recursos naturais e na geração de resíduos (Ballista, 2003).

Neste contexto, surge o conceito de sustentabilidade e a necessidade de se buscar alternativas para reduzir a geração e o acúmulo de resíduos. Primeiramente, uma prática interessante seria a melhoria da qualidade dos processos da Construção Civil, o que reduziria o desperdício de materiais. A conscientização ambiental, com o intuito de minimizar os impactos causados pela intensa e mal planejada urbanização, juntamente com a cobrança de uma legislação que faça valer os direitos e deveres de cada indivíduo inserido nesse processo, também é uma ação necessária. Por fim, uma alternativa inteligente seria a reciclagem (Leite, 2001).

A reciclagem pode ser compreendida como a reutilização de materiais descartados como “lixo” para a produção de novos materiais, permitindo que estes sejam reintroduzidos no ciclo produtivo (Ballista, 2003). Essa prática está associada a muitas vantagens, uma vez que pode resultar na redução do volume de extração de matérias-primas, permitindo a preservação dos recursos

naturais, além de sanar grande parte do problema do descarte incorreto de resíduos nos vazios urbanos (Leite, 2001). Outro fator positivo da reciclagem a ser destacado relaciona-se aos benefícios para empresas e construtoras, no que se refere ao ponto de vista financeiro, uma vez que a reutilização de materiais pode desencadear na redução dos custos produtivos (Viera e Dal Molin, 2004).

Confirmada a viabilidade da reciclagem, mais uma vez a indústria da Construção Civil se apresenta como peça importante a ser ressaltada, pois atrelada à sua capacidade de geração de resíduos está a sua habilidade para absorção de novos materiais, sejam eles resíduos de outros setores ou seus próprios. Nas últimas décadas, os estudos relacionados aos materiais descartados por esse setor, intitulados resíduos de construção e demolição (RCD), obtiveram grandes avanços, principalmente no cenário da pavimentação. Todavia, sua aplicação na produção de concretos reciclados é considerada por muitos pesquisadores como a tentativa mais eficaz de fechamento do ciclo de vida dos materiais construtivos (Leite, 2001).

Em concretos com agregados reciclados, agregados provenientes de estruturas de concreto demolidas são incorporados em argamassa de cimento virgem. Uma vez que os agregados reciclados são envoltos por uma camada de argamassa antiga e fraca, que não pode ser completamente removida durante o processo de reciclagem (Figura 1.1), um método de proporção deve ser utilizado na mistura atualizada para compensar a ligação mais fraca entre os agregados e a matriz, de modo que uma resistência comparável à dos concretos convencionais seja alcançada. No entanto, melhor compreensão das propriedades mecânicas e dos mecanismos de ruptura de concretos com agregados reciclados é necessária antes que se possa utilizá-los com finalidade estrutural de forma segura (Xiao *et al.*, 2012).

Em vista disso, percebe-se que o estudo das propriedades de concretos reciclados é uma questão de grande relevância. Porém, apesar de existirem diversos trabalhos sobre este tema, envolvendo diferentes características e comportamentos do concreto reciclado, um aspecto é considerado pouco investigado: trata-se da capacidade de transferência de tensões cisalhantes, ou, mais precisamente, da abordagem da teoria atrito-cisalhamento.

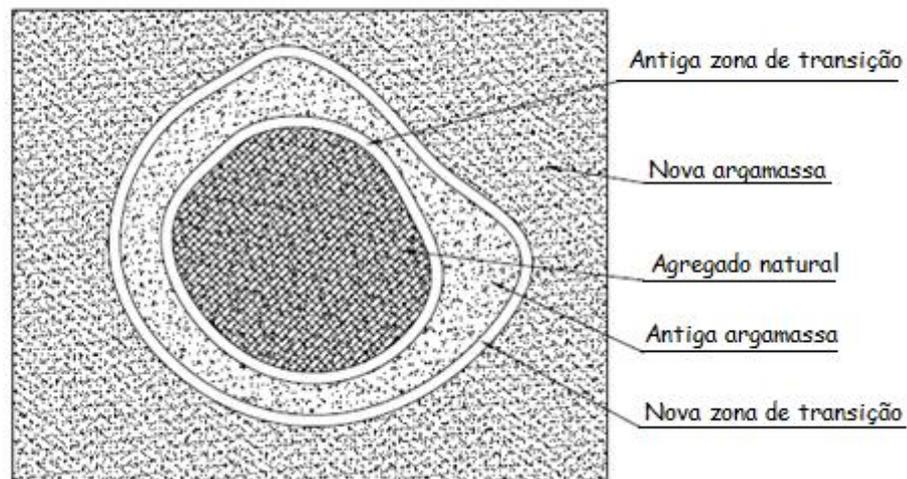
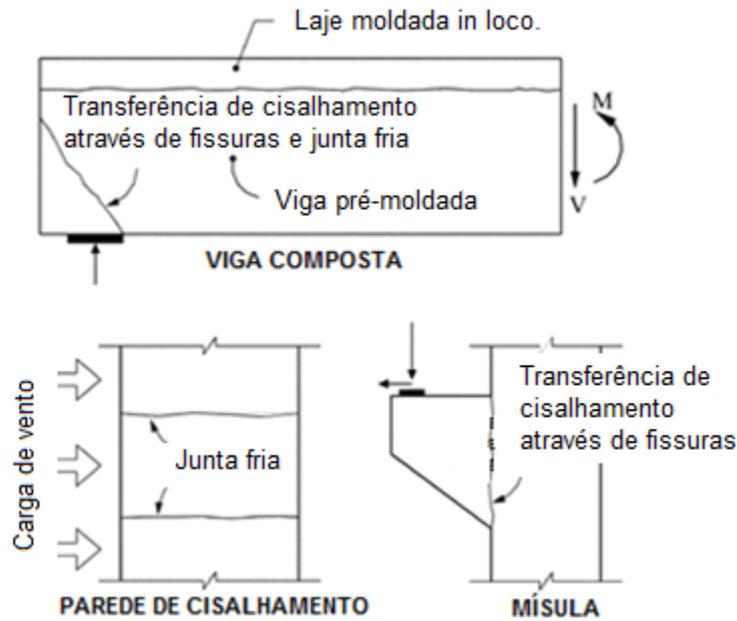


Figura 1.1: Configuração do concreto com agregado reciclado (Cabral, 2007).

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido dedicados à avaliação da resistência mecânica de interfaces de juntas de concreto. As contribuições mais significativas sobre o assunto datam de 1960. Desde então, a transferência de esforços de cisalhamento por meio de interfaces concreto-concreto tem sido objeto de numerosas pesquisas. Este assunto também é abordado por muitas organizações normativas, apresentando, entretanto, algumas divergências (Araújo, 1997).

A junção de elementos de concreto pré-moldado com peças de concreto moldadas *in loco* é um exemplo de interface onde a transferência de cisalhamento torna-se crítica devido à tendência de deslizamento relativo entre ambas as partes (Santos e Júlio, 2014). Esse fenômeno também ocorre num elemento constituído por camadas de concreto moldadas em diferentes momentos, como, por exemplo, um elemento que sofreu recuperação e criou-se uma interface entre o concreto novo e o antigo (Santos e Júlio, 2012). A Figura 1.2 contém exemplos de estruturas de concreto nas quais a transferência de tensões cisalhantes torna-se ainda mais complexa.



**Figura 1.2: Exemplos de estruturas de concreto com transferência de tensões cisalhantes críticas (adaptado de Rahal, 2010).**

De acordo com Mattock (2001), quando essas seções críticas de transferência de tensões cisalhantes não estão fissuradas, microfissuras são produzidas numa direção diagonal ao plano de corte, formando bielas inclinadas. Essas bielas agem juntamente com a armadura que atravessa o plano de cisalhamento, desenvolvendo um mecanismo do tipo treliça. A ruptura por cisalhamento ocorre quando a armadura escoar, provocando a falha das bielas. Porém, quando o esforço cisalhante é transferido através de um plano inicialmente fissurado, ocorre uma tendência ao deslizamento relativo entre as partes do concreto, que provoca tração na armadura transversal na interface e compressão nas faces da fissura. Dessa forma, a resistência ao corte se desenvolve pela combinação entre a coesão oferecida pelas protuberâncias na superfície, pelo atrito gerado entre as faces deslizantes e pela armadura que atravessa a interface (efeito de pino).

Essas três componentes responsáveis pela transferência de tensões cisalhantes num plano inicialmente fissurado têm motivado diversas pesquisas relacionadas ao assunto. Isso se deve ao fato de que, enquanto a parcela do atrito é considerada em todos os códigos de dimensionamento, a coesão nem sempre é considerada, e o efeito de pino é totalmente negligenciado (Santos e Júlio, 2014).

A componente de coesão é gerada a partir de ligações químicas entre partículas do antigo e do novo concreto. Quando se atinge a máxima capacidade de carga, a interface concreto-concreto desloca-se e as tensões de cisalhamento passam a ser transferidas pelo mecanismo de engrenamento entre os agregados. Uma vez que a interface está submetida a tensões de compressão, simultaneamente as de cisalhamento, a carga cisalhante será transferida por atrito-cisalhamento. À medida que o deslocamento relativo entre as partes do concreto aumenta, a armadura que atravessa a interface é tracionada e o escoamento pode ocorrer. A armadura de cisalhamento induz a compressão na interface e faz com que a carga de cisalhamento seja transferida por atrito (Santos e Júlio, 2012). A Figura 1.3 mostra um esquema da contribuição de cada uma dessas componentes.

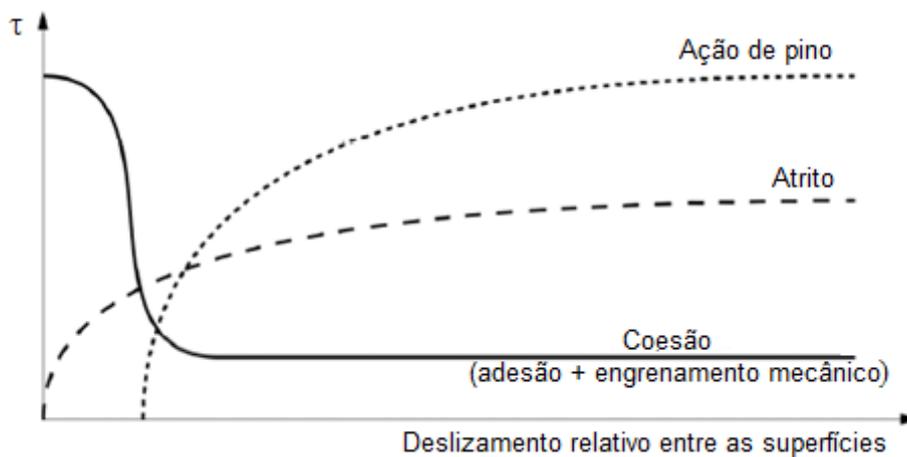


Figura 1.3: Esquema da contribuição de cada componente responsável pela transferência de tensões cisalhantes (Adaptada de Santos e Júlio, 2014).

Neste contexto surge a teoria de atrito-cisalhamento, utilizada para descrever a transferência de tensões cisalhantes ao longo de uma interface concreto-concreto submetida a tensões cisalhantes e tensões normais de compressão, simultaneamente (Fontebona *et al.*, 2010). De acordo com essa teoria, a transferência de tensões cisalhantes numa interface é assegurada somente pelo atrito e seu dimensionamento considera a influência da armadura que atravessa a interface da fissura e das forças externas que atuam normal ao plano de cisalhamento (Santos e Júlio, 2012).

## 1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se contribuir com as pesquisas sobre atrito-cisalhamento em concretos com agregados reciclados. Para isso deseja-se mostrar a influência do teor de substituição de agregados naturais por reciclados e da resistência à compressão do concreto original, ou seja, do concreto que origina o agregado reciclado.

Para isso, os objetivos específicos são:

- a) produzir agregados reciclados e promover a caracterização destes e dos agregados naturais utilizados na pesquisa para permitir a comparação entre as propriedades de ambos;
- b) confeccionar concretos convencionais e com agregados reciclados para avaliação de suas propriedades mecânicas e posterior comparação entre as mesmas;
- c) quantificar a capacidade última ao cisalhamento por meio do ensaio *push-off* em concretos com diferentes teores de agregados reciclados e diferentes resistências do concreto original;
- d) analisar qualitativamente o comportamento da interface dos corpos de prova *push-off*;
- e) avaliar o efeito da taxa de armadura transversal na capacidade última de cisalhamento;
- f) comparar os resultados experimentais a serem obtidos neste trabalho com os presentes na literatura.

## 1.3 Justificativas

O conceito de sustentabilidade surgiu nos últimos anos e tem motivado diversas pesquisas em diferentes setores. Na construção civil, determinados problemas, como por exemplo, a exploração de recursos naturais e a geração de resíduos sólidos, tem resultado numa necessidade cada vez maior da aplicação desse conceito. Além desses fatores, tem-se o problema da deposição desses resíduos, uma vez que as áreas urbanas destinadas a receber esse material estão cada vez mais escassas e a prática de descarte em local inapropriado se difunde como uma solução.

Diante desse contexto, uma alternativa sustentável encontrada no setor construtivo para mitigar os prejuízos e reduzir a exploração de recursos naturais é a reciclagem de entulho como agregado para concreto. Evangelista *et al.*(2010), ao estudar a prática da reciclagem em canteiros de obras, verificou que, no âmbito econômico, apesar do investimento e dos gastos diretos, o retorno financeiro decorrente da economia com bota-fora e aquisição de agregado natural é uma possibilidade real.

Por outro lado, tem-se o fato de que diversas construções, embora compostas por diversas interfaces, precisam manter a continuidade e a eficiência de uma construção monolítica; porém, esse comportamento monolítico é possível apenas se a transferência de tensões cisalhantes nessas interfaces ocorrer de maneira eficaz. Sendo assim, o estudo da transferência de tensões cisalhantes em concretos reciclados faz-se necessário para que seja possível a aplicação estrutural desse concreto de maneira segura, evitando erros na fase de dimensionamento.

## **CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Concreto com agregado reciclado**

As diferenças existentes entre as propriedades dos agregados naturais e dos reciclados evidenciam a tendência dos concretos com agregados reciclados a se comportarem de forma distinta quando comparados aos concretos convencionais. A quantificação dessa distinção é primordial para a aplicação desse novo material de maneira segura e viável.

O estudo do agregado reciclado e das propriedades mecânicas do concreto produzido a partir deste requer muita atenção no processo de compreensão dessa nova prática de reciclagem. Os itens seguintes irão tratar desses temas, além de abordar o procedimento de dosagem que também possui extrema importância.

#### **2.1.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)**

A reciclagem de RCD não é uma atividade tão recente. Na Alemanha, por volta de 1860, artefatos de concreto de cimento Portland foram produzidos com agregados reciclados. No entanto, o desenvolvimento desta prática se deu de forma mais relevante após a Segunda Guerra Mundial, quando imensa quantidade de resíduos ficou espalhada por toda a Alemanha. Diante da necessidade de reconstruir as cidades destruídas pela guerra, optou-se pela reciclagem do entulho proveniente da destruição dos edifícios, uma vez que a carência de materiais de construção foi mais um problema encontrado na época (Levy e Helene, 2002).

No Brasil, a primeira usina de reciclagem de entulho foi inaugurada em 1991, em São Paulo, sendo esta, também, a primeira do Hemisfério Sul (Zordan, 1997). A partir daí, a quantidade de usinas, tanto públicas quanto privadas, aumentou consideravelmente ao longo dos anos. Este aumento na quantidade de usinas está atrelado não somente ao maior incentivo que a reciclagem de RCD vem recebendo, mas também à grande quantidade de resíduos da construção civil gerada nas últimas décadas. A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECOM, 2015) estima que a geração de RCD gira entre 50 a 70% da

massa total dos resíduos sólidos urbanos. A Figura 2.1 mostra a estimativa da distribuição dessa geração de resíduos de construção no Brasil.

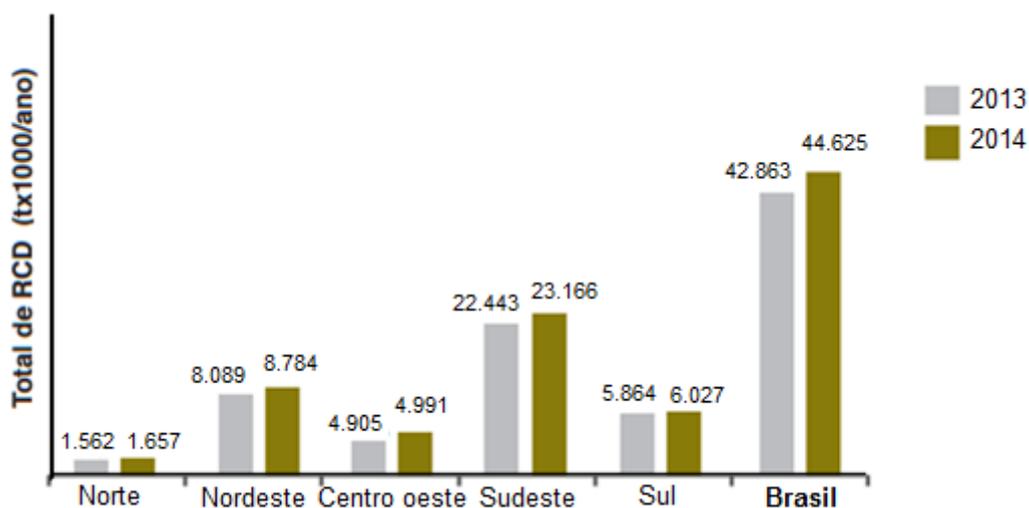


Figura 2.1: Geração de resíduos de construção no Brasil (ABRELPE, 2015).

É importante destacar que a reciclagem de RCD é uma excelente alternativa para reduzir a quantidade de resíduos depositados de forma inadequada. Os resíduos da Construção Civil, desde o século passado, foram depositados de forma indiscriminada em vales, depressões naturais, margens de rios e aterros desprovidos de qualquer tratamento adequado. Essa prática irresponsável, porém tão corriqueira, possui consequências negativas, das quais pode-se destacar: poluição visual gerada no ambiente urbano, contaminação e assoreamento das águas superficiais, entupimento de elementos de drenagem e surgimento de zoonoses que afetam diretamente a população (Ballista, 2003).

Diante desse inconveniente, em 2002, foi homologada a resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que define que grandes geradores de resíduos, sendo estes públicos ou privados, são obrigados a desenvolver e a implantar um plano de gestão de RCD, visando sua reutilização, reciclagem ou qualquer outra destinação ambientalmente correta (CONAMA, 2002). A partir daí, o processo de reciclagem de RCD se desenvolveu de forma mais intensa e consciente. Iniciaram-se as implantações de planos de gerenciamento de RCD em canteiros de obras e normas técnicas foram elaboradas e publicadas pela ABNT em 2004, mostradas na Tabela 2.1

(Miranda *et al.*, 2009). A Resolução 307 do CONAMA, além de exigir destinação correta aos RCD, classifica os resíduos da Construção Civil em categorias, como mostra a Tabela 2.2.

**Tabela 2.1: Normas técnicas relativas à reciclagem de RCD.**

<b>Norma</b>	<b>Nome</b>
NBR 15113:2004	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15114:2004	Resíduos sólidos da construção civil – áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15115:2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15116:2004	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

**Tabela 2.2: Classificação do resíduo de construção segundo o CONAMA.**

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

A partir da Tabela 2.2, pode-se perceber que o concreto reciclado é produzido com resíduos da Classe A. Existe, portanto, uma grande heterogeneidade de resíduos (madeira, argamassa, gesso, aço, papel e plástico, entre outros). Esse fato é um dos principais motivos pelo qual a utilização de agregados reciclados ainda é tão tímida (Viera e Dal Molin, 2004). No Brasil, os RCD são majoritariamente de origem mineral, porém essa composição mineral também possui diversidade, tais como concretos, argamassas, cerâmicas e rochas naturais, em que suas quantidades dependem da origem do resíduo (Angulo, 2005). De acordo com Leite (2001), a composição do RCD tem influência direta no comportamento do agregado reciclado no concreto. Por esse motivo, Hansen (1992) afirma que simples precauções durante o processo de demolição podem aumentar o potencial de reciclagem dos resíduos e a qualidade. Ressalta, também, que a qualidade e histórico do concreto original são informações valiosas na determinação do potencial de reciclagem de qualquer estrutura de concreto. A Tabela 2.3 mostra a estimativa dos principais componentes dos RCD encontrados na literatura brasileira.

**Tabela 2.3: Composição média do RCD de diferentes pesquisadores.**

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

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

Resíduos de demolição possuem, geralmente, maior volume de materiais indesejados, uma vez que já foram empregados em elementos estruturais. Já resíduos de construção são provenientes de sobras existentes nos canteiros de obras e, portanto, possuem menor probabilidade de contato irreversível com outros materiais (Leite, 2001). Ressalta-se ainda a existência de materiais ensaiados pelas empresas, tais como corpos de prova que, após serem submetidos à ruptura, não apresentam nenhuma aplicação inicialmente, mas possuem grande potencial de reutilização (Bazuco, 1999).

A reciclagem do RCD em agregado para concreto requer, geralmente, o processo de britagem, para posterior rastreio e remoção dos contaminantes. Porém, quando o concreto é britado ainda permanece certa quantidade de pasta antiga aderida, que não se pode remover com tratamentos convencionais (Marinkovic *et al.*, 2010). Contudo, Zordan (1997), primeiro pesquisador brasileiro a utilizar agregados reciclados em concreto, afirma que, embora se trate de um material extremamente heterogêneo, as propriedades mecânicas aferidas em sua pesquisa apresentaram valores muito positivos. Acrescenta, ainda, que um controle de qualidade dos resíduos pode gerar agregados com características ainda mais satisfatórias.

### **2.1.2 Agregado reciclado**

O agregado graúdo é a fase que mais influencia a densidade, o módulo de elasticidade e a estabilidade dimensional do concreto. As características físicas do agregado, tais como volume, tamanho, forma e granulometria, influenciam mais essas propriedades do que as características químicas. Quanto ao módulo de elasticidade, o agregado é a fase que condiciona essa propriedade, na maioria dos casos. Devido ao valor de seu módulo elevado, o agregado é responsável por restringir as movimentações da pasta. Em relação

à resistência mecânica do concreto, a fase agregado não possui tanta participação quando se trata de resistências baixas e médias, exceto quando o mesmo é muito frágil e poroso. Porém, uma vez que sejam analisados concretos de elevada resistência, a fase agregado merece mais atenção e suas características devem ser levadas em consideração (Gonçalves, 2001).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), as propriedades do agregado importantes para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e podem ser agrupadas da seguinte maneira:

- características que dependem da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza e módulo de deformação;
- características que dependem das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura do material;
- características que dependem da composição química e mineralógica: resistência mecânica, dureza, módulo de deformação e presença de substâncias deletérias.

De acordo com Hansen (1992), os agregados reciclados, após terem sido britados, peneirados e devidamente descontaminados, podem ser aplicados para enchimento em geral, enchimento em projetos de drenagem, sub-base ou material de base de construções rodoviárias e para a produção de novos concretos.

Dentre as finalidades citadas, a utilização de agregados reciclados em novos concretos, além de ser a mais interessante, é a que mais requer cuidados e estudos, tendo em vista o importante papel desempenhado pela fase agregado no comportamento do concreto. Dessa forma, sabe-se que devido à apresentação de propriedades distintas dos agregados naturais, os concretos com agregados reciclados também apresentarão propriedades diferentes de um concreto convencional e seu desempenho estará diretamente relacionado ao desempenho dos materiais utilizados em sua produção (Bazuco, 1999).

O estudo das propriedades dos agregados reciclados já foi realizado por diversos pesquisadores, como Zordan (1997), Bazuco (1999), Leite (2001) e muitos outros, e as conclusões, embora semelhantes em alguns aspectos,

mostram-se contrastantes em pontos extremamente importantes para a definição do comportamento desse material em concretos reciclados.

Quanto à textura e à forma dos agregados reciclados, Leite (2001) afirma que sua textura mais rugosa e sua maior angulosidade colaboram com a melhoria da aderência pasta/agregado. O tipo de equipamento utilizado para a britagem é determinante para essas características. Os britadores do tipo mandíbula, por exemplo, acentuam a forma angular, enquanto britadores giratórios tornam as partículas mais arredondadas (Bazuco, 1999). A textura e a forma dos agregados são relevantes, pois interferem na trabalhabilidade do concreto (Ballista, 2003).

Quanto à granulometria dos agregados reciclados, Leite (2001) afirma que devem ser tomados cuidados com esse parâmetro no que se refere à trabalhabilidade e ao grau de compacidade. Porém, a granulometria de agregados naturais e a de reciclados parece seguir uma mesma tendência, sendo esta última ligeiramente mais grossa, o que resulta num módulo de finura um pouco maior (Bazuco, 1999).

Em relação à massa específica, destaca-se a importância da composição dos resíduos, uma vez que quanto menos denso o material que compõe o resíduo, menor será a massa específica do agregado reciclado (Leite, 2001). De acordo com Hansen (1992), esse valor pode ser reduzido em cerca de 5 a 10%.

A absorção de água é uma propriedade de enorme importância, uma vez que se relaciona com a porosidade e com a resistência mecânica do material. Gonçalves (2001) menciona que agregados reciclados possuem maior absorção de água quando comparados a agregados naturais e acredita que essa maior absorção pode promover uma redução na relação água/cimento interna, principalmente em regiões próximas ao agregado gráudo, resultando numa “cura interna” na zona de transição capaz de melhorar as propriedades do concreto. Já Leite (2001) explica que a redução da relação água/cimento interna pode resultar em pastas excessivamente secas, prejudicando, portanto, a trabalhabilidade da mesma. Além disso, essa redução pode afetar o processo de hidratação do cimento, deixando uma elevada quantidade de partículas de cimento não hidratadas. O principal fator responsável pelo aumento da

absorção de água de agregados reciclados é a argamassa antiga que permanece aderida ao agregado (Hansen, 1992).

A resistência à abrasão dos agregados reciclados é comentada por Hansen (1992) e Bazuco (1999) como sendo inferior a dos agregados naturais. Desse modo, é possível inferir que os agregados reciclados apresentam menor dureza e, conseqüentemente, menor resistência quando comparados a agregados naturais.

### **2.1.3 Dosagem de concretos com agregados reciclados**

Se para a produção de concretos convencionais já é necessário um estudo de dosagem criterioso, de acordo com as finalidades pretendidas, para concretos com agregados reciclados essa necessidade é ainda maior, uma vez que muitas variáveis estão envolvidas nesse processo (Bazuco, 1999).

A questão mais preocupante no que se refere à dosagem de concretos com agregados reciclados é a alta taxa de absorção de água dos agregados, pois os agregados naturais não exercem influência nas misturas de concreto por apresentarem pouca, ou nenhuma, porosidade (Leite, 2001). Além disso, o formato angular do agregado reciclado e as partículas de cimento ainda não hidratadas que podem estar presentes neste agregado afetam diretamente a trabalhabilidade do concreto (Omary *et al.*, 2015).

Desta forma, a quantificação da água disponível para a hidratação do cimento torna-se uma incógnita, visto que, quando os poros dos agregados não estão saturados, eles podem extrair água da pasta ou absorver nata de cimento, principalmente nos instantes iniciais, prejudicando a precisão da dosagem (Bazuco, 1999).

Uma alternativa encontrada para se evitar a grande influência da porosidade dos agregados reciclados na relação água/cimento é o processo de pré-saturação. Esse procedimento é capaz de manter a qualidade uniforme durante a produção do concreto e evitar a perda rápida de trabalhabilidade e o endurecimento precoce (Hansen, 1992). Além da pré-saturação dos agregados, é interessante também a utilização de aditivos superplastificantes que permita a redução do transporte interno de água da pasta de cimento para os agregados (Leite, 2001).

Outro ponto importante é o conhecimento das massas específica e unitária dos agregados no estudo da dosagem do concreto. Uma vez que os valores dessas propriedades para agregados reciclados são menores, de acordo com a literatura, existe necessidade de compensação na quantidade do material reciclado a ser utilizada quando composições em massa de concretos convencionais são aplicados aos concretos com agregados reciclados (Leite, 2001).

Por fim, de acordo com Hansen (1992), a dosagem de concretos com agregados reciclados pode seguir o mesmo procedimento utilizado em concretos convencionais, considerando apenas pequenas modificações. O autor enumera essas modificações e as mesmas são:

- 1- a fim de se estimar uma determinada resistência à compressão, um maior desvio-padrão deve ser considerado quando se tratar de concreto reciclado, principalmente quando a qualidade e a uniformidade dos agregados reciclados não são garantidas;
- 2- nesse momento da dosagem, deve-se assumir que a relação água/cimento para se atingir uma determinada resistência à compressão é a mesma para concretos convencionais e reciclados que utilizam a fração miúda natural. Se as tentativas de dosagem apresentarem resistências menores do que as esperadas, ajustes na relação água/cimento devem ser realizados;
- 3- deve-se considerar que, visando a mesma trabalhabilidade, a quantidade de água requerida para concretos reciclados é de 10 l/m<sup>3</sup> a mais do que para concretos convencionais;
- 4- a dimensão máxima do agregado reciclado é em torno de 16 a 20 mm por questões de durabilidade do concreto;
- 5- devido à maior exigência de água nas misturas recicladas, maior quantidade de cimento também será necessária para se manter a relação água/cimento;
- 6- o estudo de dosagem deve ser feito baseado na densidade dos agregados reciclados, que deve ser previamente quantificada;
- 7- quanto à estimativa da quantidade de agregado miúdo em relação ao gráudo, pode se assumir que a granulometria ótima é a mesma para concretos convencionais e reciclados.

#### **2.1.4 Propriedades do concreto endurecido com agregado reciclado**

Quanto à absorção de água dos concretos reciclados, Hansen (1992) destaca que valores entre 5 a 10% maiores são geralmente encontrados quando comparados com concretos convencionais. O autor complementa dizendo que, quando a fração miúda reciclada é utilizada, essa porcentagem de aumento pode ser ainda maior. Já Moreira (2010), Lovato (2007) e Leite (2001) compartilham a ideia de que a absorção de água do concreto está condicionada à absorção do agregado graúdo. A última autora explica que ocorre a formação de produtos de hidratação na superfície porosa e rugosa do agregado devido à absorção da pasta de cimento antiga do material reciclado. Com isso, os agregados miúdos fecham seus poros e os agregados graúdos, devido à sua maior dimensão, não conseguem realizar o mesmo processo, tornando-se mais responsáveis pela taxa de absorção.

Hansen (1992) discute a retração por secagem de concretos reciclados e menciona que esta última aumenta em cerca de 50% em concretos com apenas agregados graúdos reciclados, enquanto que, em concretos com ambas as frações recicladas, o valor está em torno de 70%. A fluência é outro ponto abordado pelo autor, que atesta o fato de esta propriedade apresentar valores significativamente maiores em concretos reciclados. A pasta antiga presente nos agregados reciclados é a principal responsável por esse comportamento (Bazuco, 1999).

Quanto à resistência à tração de concretos com agregados reciclados, nenhuma diferença significativa é apresentada (Hansen, 1992). Alguns autores, como Gonçalves (2011), expõem valores maiores para essa propriedade, enquanto outros, como Lovato (2007), apresentam resultados inferiores.

Em relação à resistência à compressão, Hansen (1992) afirma que, geralmente, essa propriedade sofre uma redução de 5 a 10% para concretos com agregados graúdos reciclados e 30% para concretos onde a fração miúda reciclada também está presente. O autor ainda infere que cerca de 30% do agregado natural graúdo pode ser substituído pelo reciclado sem nenhum efeito negativo nas propriedades mecânicas.

Bazuco (1999), ao citar os efeitos na resistência à compressão, ressalta que a redução nesta propriedade é natural, uma vez que ela depende

diretamente da resistência e do desempenho dos agregados reciclados. Porém, segundo ele, existem diversos fatores que influenciam a resistência do concreto com agregado reciclado, como, por exemplo, a qualidade do agregado, o teor de substituição do mesmo e os níveis de resistências em que se está trabalhando, visto que para níveis de resistências inferiores, as reduções tendem a ser menores.

Já Ballista (2003) encontrou valores de resistência à compressão superiores para concretos com agregados reciclados e atribuiu este fato a três fatores: à qualidade do agregado que foi utilizado, ao aumento de hidratação do cimento na zona de interface do agregado com a pasta, promovido pela maior absorção de água dos agregados durante a mistura, e à presença de partículas não hidratadas de cimento nos resíduos de concreto, aumentando a quantidade de cimento no traço empregado. Gonçalves (2011) e Buttler (2003) também encontraram valores superiores de resistência à compressão.

Marinkovic *et al.* (2010) afirmam que o concreto com agregado reciclado apresenta valores de resistência à compressão inferiores a do concreto convencional e garante que uma quantidade maior de cimento (cerca de 5%) é necessária para se atingir valores comparáveis de resistência e trabalhabilidade. Os autores ainda alegam que concretos com ambas as frações de agregados reciclados não são recomendados e que, quando somente a fração graúda é utilizada, as resistências se limitam à baixa e média.

Nguyen *et al.* (2015), ao estudarem as propriedades mecânicas de concretos com agregados reciclados, utilizaram dosagens com pequenas alterações para compensar a presença do material reciclado e atingiram valores muito próximos de resistência à compressão. Os pesquisadores acrescentaram ainda que, não só a resistência final é comparável, mas o ganho de resistência até os 28 dias evolui de maneira semelhante.

Leite (2001), assim como outros autores, mencionam a questão da divergência de resultados encontrados na literatura e concluem que existe dificuldade em se determinar qual comportamento estudado é o mais correto. Eles afirmam que os parâmetros que foram adotados como constantes e os procedimentos utilizados tornam inviável uma comparação entre os dados disponíveis.

Uma questão de grande relevância para o presente trabalho foi apresentado por Troian (2010). A autora associa a resistência do agregado reciclado com a do concreto produzido com esses agregados. A autora infere que quanto menor a resistência do agregado reciclado menor a resistência do concreto. Contudo, segundo ela, existe um limite na resistência do agregado, que está em torno de 30 a 35 MPa, na qual essa relação não é mais válida, ficando a resistência do concreto reciclado constante. A partir desses resultados, a autora conclui que a reciclagem de estruturas mais antigas, com  $f_c$  na ordem de 15 MPa, deve ser considerada com cautela e seu emprego em novos concretos deve ser acompanhado de uma caracterização criteriosa. Outro aspecto importante apresentado por Troian (2010) refere-se à composição do agregado reciclado. De acordo com a autora, agregados reciclados exclusivamente de concretos puros permitem maior quantidade de substituição em novos concretos, sem prejudicar as propriedades do mesmo, do que agregados reciclados mistos.

Outros pesquisadores que abordaram diferentes resistências do concreto original foram Leite e Monteiro (2016). Os autores abordaram as resistências de 40 e 80 MPa para seus agregados reciclados e duas diferentes condições de umidade: seca e saturada com superfície seca. Com base nos resultados microestruturais, afirmaram que o uso do agregado proveniente de um concreto original de alta resistência ( $f_c = 80$  MPa) e usado na condição saturado com superfície seca foi a maneira mais adequada para a produção de concreto reciclado, pois as propriedades físicas e mecânicas alcançadas se aproximam das obtidas pelo concreto de referência. Outro ponto estudado foi a configuração da zona de transição dos concretos com agregados reciclados. Em seus resultados, os pesquisadores encontraram dimensões com pequenas diferenças entre as duas classes de resistência do concreto original, porém o concreto produzido com o agregado de resistência inferior apresentou maior porosidade da zona de transição.

Por fim, é importante discutir o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado. Hansen (1992) apresenta valores de 15 a 40% inferiores para esses concretos e atribui este fato à argamassa antiga presente nos agregados. Diversos outros autores, como Lovato (2007), Buttler (2003) e Angulo (2005), também compartilham dessa conclusão.

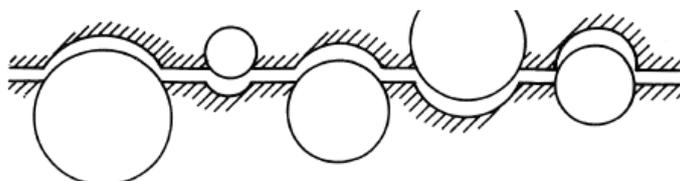
Já Nguyen *et al.* (2015) atribuíram a redução do módulo de elasticidade dos concretos com agregados reciclados não só à argamassa antiga, mas também à vulnerabilidade da zona de transição formada entre a nova pasta e o agregado reciclado.

Diante do exposto, fica clara a necessidade de mais estudos sobre as propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado, pois, embora muitos autores tenham se dedicado a este assunto, a falta de uniformidade nos resultados traz à tona questionamentos relacionados à viabilidade da utilização deste material, principalmente no que se refere a sua aplicação estrutural. Dessa forma, conclui-se que falta de compreensão plena de suas propriedades mecânicas e mecanismos de ruptura são fatores limitantes para sua funcionalidade estrutural com segurança (Xiao *et al.*, 2012).

## **2.2 Transferência de tensões cisalhantes entre interfaces de concreto**

O concreto pode ser compreendido como um sistema composto por duas fases. A primeira delas trata-se da matriz de cimento onde está inserida a segunda fase, as partículas de agregados. Geralmente, a resistência mecânica e a rigidez dos agregados são maiores do que as da matriz. No entanto, o contato entre as duas fases, a zona de transição, é o elo mais fraco do sistema. Conseqüentemente, a fissuração tende a ocorrer através da matriz, contornando os agregados, conforme mostra a Figura 2.2 (Walraven *et al.*, 1987).

A transferência de tensões cisalhantes entre interfaces no concreto é um mecanismo complexo, que envolve parâmetros como tensão de cisalhamento, tensão normal, largura da fissura e deslocamento da mesma (Walraven *et al.*, 1987).



**Figura 2.2: Mecanismo de fissuração em concretos convencionais (Walraven *et al.*, 1987).**

Embora muitos parâmetros sejam analisados para fins de dimensionamento, algumas informações importantes são desconsideradas na previsão da resistência ao cisalhamento entre interfaces no concreto. De acordo com Santos e Júlio (2014), a força de união de uma determinada interface concreto-concreto é influenciada por diversos parâmetros, tais como: rugosidade do substrato, condições de cura, resistência mecânica dos materiais envolvidos e rigidez das diferentes camadas de concreto.

Entretanto, uma característica comum a todos os códigos de dimensionamento é a ausência de qualquer disposição relacionada às condições de cura dos concretos que originam a interface crítica de transferência de tensões cisalhantes. As condições de cura do concreto são de extrema importância, uma vez que podem acarretar retração diferencial. Santos (2009) sugeriu a inclusão desse parâmetro nas expressões de dimensionamento, visando maior precisão nos cálculos. Outro ponto refere-se a interfaces formadas por concreto antigo e novo, onde as propriedades do concreto adicionado por último também são negligenciadas, ignorando-se, portanto, a rigidez diferencial. Esta última é determinada pela diferença entre o módulo de elasticidade de cada camada de concreto que compõe o elemento (Santos e Júlio, 2014).

De acordo com Araújo (1997), a resistência da interface aos esforços cisalhantes é influenciada por diversos parâmetros, sendo os principais:

- resistência mecânica do concreto: o aumento da resistência dos concretos, que estão em contato numa determinada interface, acarreta aumento da resistência ao cisalhamento nesta região. Quando as peças que compõem a interface possuem concretos com diferentes valores de resistência mecânica, a menor delas passa a controlar a resistência ao cisalhamento;
- aderência da superfície de contato: elementos com superfícies de contato aderentes possuem comportamento equivalente aos elementos monolíticos. Em contrapartida, superfícies que não apresentam aderência sofrem redução significativa na resistência ao cisalhamento devido aos efeitos de deslizamento e separação entre as partes do concreto;

- rugosidade da superfície de contato: a rugosidade da superfície de contato do concreto provoca aumento na resistência ao deslizamento; porém, a profundidade das irregularidades não apresenta muita influência. Tratando-se de comportamento último, a rugosidade possui efeito “somável” ao da adesão. Santos (2009), ao estudar diferentes tipos de preparação das superfícies, concluiu que se pode alcançar uma melhora de 100% na aderência das faces da fissura quando a preparação da superfície atinge uma rugosidade adequada;
- armadura transversal: quando se trata de pequenos valores de deslizamento, a armadura transversal não possui muita influência na resistência ao cisalhamento. Todavia, no estado limite último, a armadura transversal desempenha importante papel, que depende da sua quantidade e resistência. Neste último caso, a armadura apresenta função dupla, uma vez que resiste diretamente aos esforços cisalhantes (efeito de pino) e melhora a eficiência da transferência de cisalhamento por atrito devido às tensões normais à interface.

### **2.2.1 Mecanismos de transferência de tensões cisalhantes entre interfaces de concreto**

A ligação entre uma peça de concreto pré-moldado e uma peça de concreto moldado no local, assim como o surgimento de uma fissura numa peça monolítica para a formação de um plano de cisalhamento, são exemplos de interface concreto-concreto. Quando essa interface está submetida a tensões de cisalhamento que devem ser transferidas, tensões contrárias se desenvolvem em busca do equilíbrio. Além disso, uma tendência de deslizamento ocorre na interface, acarretando num movimento de translação entre ambas as superfícies. Uma vez que a superfície da interface possui rugosidade, este movimento de translação é acompanhado de um afastamento das peças. Neste caso, mobilizam-se dois mecanismos de transferência de esforços cisalhantes: a transferência pela superfície de contato e a transferência pela armadura transversal à interface (Araújo, 1997).

#### - Transferência de tensões através da superfície de contato

Conforme dito anteriormente, três componentes são responsáveis pela transferência de esforços de cisalhamento pela superfície de contato: coesão, atrito e ação mecânica.

De acordo com Araújo (1997), a coesão trata-se do primeiro mecanismo mobilizado ao aplicarem-se cargas cisalhantes numa interface de concreto. Quando a sollicitação é pequena, a adesão gerada entre as partículas internas do concreto é capaz de resistir aos esforços; porém, essa capacidade não é suficiente para uma boa transferência de esforços de cisalhamento, já que pequenos deslocamentos afetam sua eficiência.

A parcela do atrito entre as superfícies de contato aparece quando a adesão é rompida, desde que existam tensões normais à interface. Essas tensões normais surgem por meio de cargas externas aplicadas ou por meio da armadura normal à interface, quando tracionada. O atrito é uma importante componente de transferência de tensões cisalhantes, principalmente após o deslizamento entre as partes da interface, e a rugosidade da superfície é um parâmetro de extrema influência sobre seu desempenho (Araújo, 1997).

A transferência por ação mecânica pode ser compreendida pela formação de “dentes de concreto”, que são solicitados a esforços de cisalhamento quando ocorre o deslizamento relativo entre as superfícies. A ligação por “chave de cisalhamento” é a mais representativa para essa parcela da transferência; porém, para superfícies rugosas, a transferência é garantida pelo mecanismo de engrenamento entre os agregados graúdos do concreto fixados em ambos os lados da interface.

Esse mecanismo de engrenamento dos agregados é algo complexo, pois envolve interação entre tensões normais e cisalhantes. Fissuras preexistentes num plano de cisalhamento tendem a se dilatar em consequência do deslizamento relativo que ocorre na interface concreto-concreto. Uma vez que o alargamento dessa fissura é restringido por uma armadura atravessando a interface, tensões normais são introduzidas. Além disso, a transferência de cisalhamento se reduz à medida que a largura das fissuras é ampliada. Este fenômeno ocorre devido à perda de contato entre as faces da fissura (Sagasetta e Vollum, 2011).

O estudo do engrenamento dos agregados torna-se ainda mais complexo, uma vez que é preciso considerar a rugosidade do substrato, o

efeito das tensões localizadas em torno da armadura incorporada, as tensões normais e cisalhantes, a ação de pino e propriedades dependentes do tempo, como, por exemplo, a fluência (Sagaseta e Vollum, 2011).

Quando uma determinada interface de concreto é formada pela ligação entre peças de concreto com idades diferentes, a adesão entre as superfícies de contato é responsável por resistir à primeira parcela de sollicitação. A partir do momento em que surgem fissuras devido ao aumento dos esforços cisalhantes, as duas partes de concreto tendem a deslizar uma em relação à outra, anulando o efeito da adesão. Dessa forma, apenas o atrito e a ação mecânica contribuem para a transferência de tensões cisalhantes. Quando a interface é formada a partir da ruptura de uma peça monolítica para a formação de um plano de cisalhamento, a parcela de adesão não existe no mecanismo de transferência de tensões, sendo esta última assegurada somente pelas outras duas parcelas (Araújo, 1997).

#### - Transferência de tensões através da armadura transversal à interface

O deslizamento relativo que ocorre entre as partes componentes de uma interface de concreto ocorre quando esta está sujeita a esforços cisalhantes que tendem a “cortar” a armadura que atravessa a interface (Mattock, 2001). Essa armadura, por sua vez, fornecerá resistência ao corte, que será somada à resistência proporcionada pela superfície de contato. Esse efeito é conhecido como ação de pino da armadura (Araújo, 1997). A armadura transversal à interface também contribui, no caso de superfícies rugosas, garantindo a força normal à interface, que é fundamental para a eficiência da transferência por atrito entre as superfícies de contato (Araújo, 1997).

#### **2.2.2 Teoria do atrito-cisalhamento (*shear-friction*)**

A teoria do atrito-cisalhamento foi proposta inicialmente por Birkeland e Birkeland em 1966 e possui relevante aplicação, uma vez que é adotada em códigos de dimensionamento com o objetivo de prever a resistência ao cisalhamento longitudinal entre duas partes de concreto que constituem uma interface (Santos e Júlio, 2014).

A tensão de cisalhamento numa interface pode ocorrer sem que haja perda de aderência; nesse caso, a teoria do atrito-cisalhamento não é aplicável. Porém, para casos em que a tensão de cisalhamento na interface gera deslizamento relativo entre as partes do concreto e o comportamento interfacial é controlado pela coesão, pelo atrito e pelo efeito pino, a teoria é aplicada (Santos e Julio, 2012).

A filosofia de dimensionamento assumida pela teoria do atrito-cisalhamento afirma que, em decorrência do deslizamento relativo que ocorre numa interface concreto-concreto, a largura da fissura existente tende a aumentar, gerando tensões de tração na armadura ( $\sigma_n$ ) e de compressão na interface ( $\sigma$ ). Assume-se, também, que as tensões de cisalhamento ( $\tau$ ), as quais a interface está submetida, são transferidas somente por atrito (Santos e Júlio, 2014). A Figura 2.3 mostra um esquema geralmente utilizado para ilustrar o mecanismo da teoria.

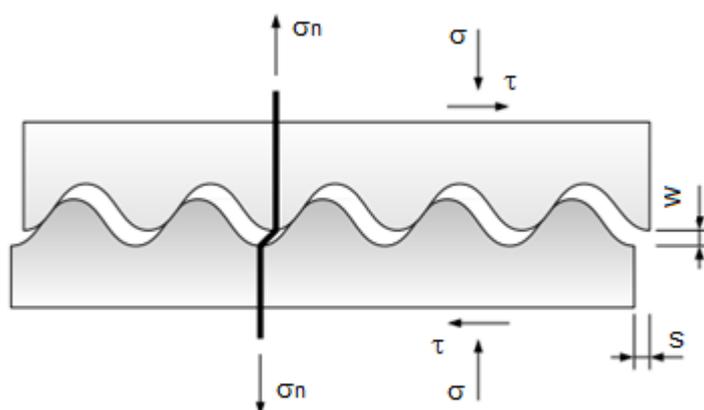


Figura 2.3: Modelo atrito-cisalhamento (Santos, 2009).

A capacidade de atrito-cisalhamento pode ser afetada por diversos parâmetros. Fonteboa *et al.* (2010) listou os principais, a saber:

- engrenamento entre os agregados e atrito: é resultante da rugosidade da face fissurada. Classifica-se como local quando o deslizamento ocorre num comprimento menor do que o tamanho médio do agregado, ou global quando o deslizamento ocorre numa escala maior. Do ponto de vista macroscópico, o mecanismo de engrenamento entre os agregados é afetado pela largura da fissura, pela resistência do concreto e pela rigidez da restrição lateral. A partir de uma perspectiva microscópica, o

engrenamento ocorre por meio do contato existente entre os agregados graúdos numa face da fissura e a argamassa presente no outro lado desta fissura. Dessa forma, pode-se afirmar que as propriedades mecânicas da argamassa e a densidade volumétrica do agregado graúdo são extremamente importantes no que se refere ao engrenamento entre os agregados e, conseqüentemente, na transferência de tensões cisalhantes num plano de concreto inicialmente fissurado (Xiao *et al.*, 2012);

- força de compressão aplicada normal à interface: contribui para o mecanismo de engrenamento entre os agregados e para o atrito;
- armadura que atravessa a interface: contribui para a força externa, uma vez que a armadura entre as fissuras, ao ser tracionada, gera tensões de compressão na interface. Além disso, a armadura promove o chamado “efeito de pino”, pois a abertura da fissura provoca flexão e cisalhamento simultâneos nesta;
- resistência do concreto: a ruptura da interface que transmite as forças de cisalhamento é consequência da perda de contato entre as faces da fissura. Essa perda ocorre devido ao esmagamento dos agregados graúdos e da argamassa, uma vez que a capacidade total desses componentes é atingida. A resistência à compressão do concreto está intimamente relacionada a essa capacidade última que acarreta o esmagamento e, portanto, interfere diretamente na transferência de tensões cisalhantes.

Segundo Araújo (1997), a teoria atrito-cisalhamento propõe um modelo em que a interface rugosa é substituída por dentes sem atrito com inclinação igual a  $tg\phi$ , conforme mostra a Figura 2.4. Com a aplicação de uma força horizontal, as partes componentes da interface sofrem deslizamento uma em relação à outra, acompanhado da separação entre ambas, promovida pelos pequenos dentes. A partir daí, solicitações de tração surgem na armadura transversal e esta última passa a aplicar uma força  $F$  à interface. Para se alcançar o equilíbrio de forças horizontais, de acordo com a Figura 2.4, é necessário se estabelecer a seguinte relação:

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

O efeito da força  $F$  sobre a interface é equivalente a uma força normal externa de compressão  $N$ . Assumindo que a armadura transversal à interface alcance sua resistência de escoamento  $f_y$ , a tensão normal de compressão à interface é igual ao produto da taxa de armadura pela resistência de escoamento do aço ( $\rho_w \cdot f_y$ ). A ruptura da interface é provocada pela força de cisalhamento que conduz toda a armadura transversal ao escoamento. Desse modo, a resistência ao cisalhamento da interface pode ser calculada por meio das seguintes equações:

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

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

onde,

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

$R$  é a força de cisalhamento resistente;

$\tau_u$  é a tensão última de cisalhamento resistente;

$\rho_y$  é a taxa geométrica de armadura transversal à interface.

De acordo com Birkeland e Birkeland (1966), as equações devem ser limitadas às seguintes condições:

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

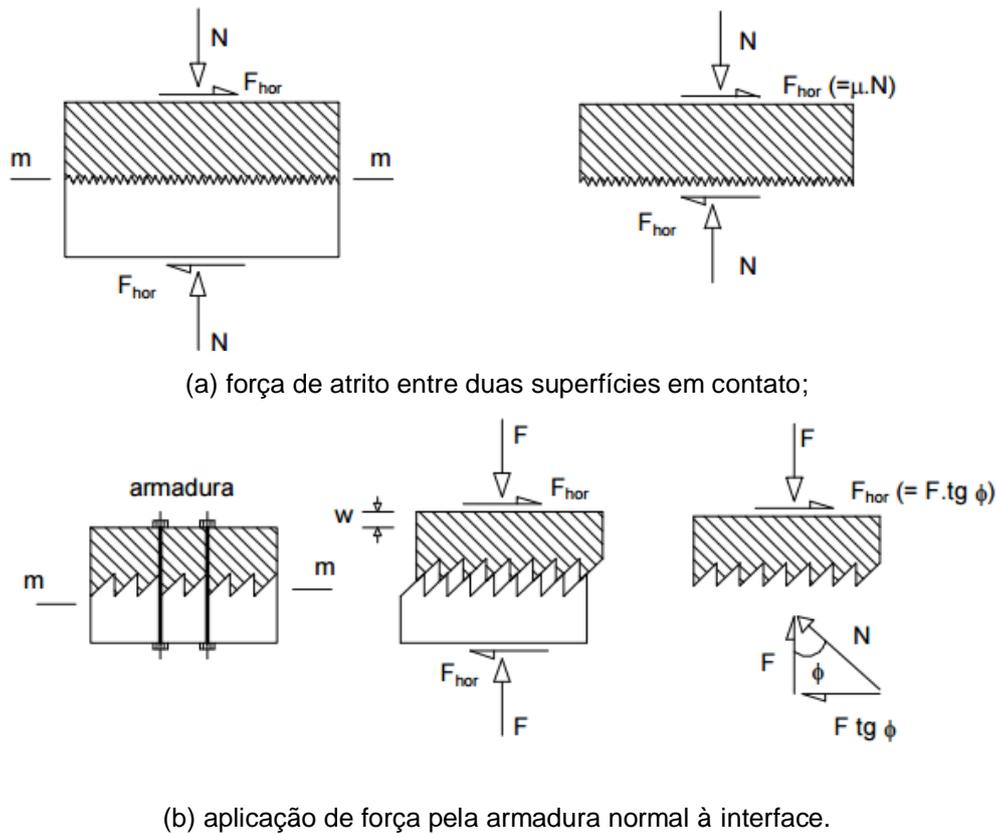


Figura 2.4: Teoria atrito-cisalhamento (Patnaik, 1992, adaptado por Araújo,1997).

Este conceito pode ser aplicado a interfaces com superfícies lisas, superfícies artificialmente rugosas e superfícies ou conexões concreto-aço. De acordo com a preparação da superfície, o coeficiente de atrito será:

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

Posteriormente, outros pesquisadores, como Mast (1968), Mattock (1974) e Mansur *et al.* (2008), ao estudarem a teoria do atrito-cisalhamento, contribuíram para a formulação da teoria, incluindo variáveis significativas no cálculo. Mattock (1974), principalmente, foi um dos pesquisadores que aperfeiçoou a teoria, propondo a inclusão do efeito da tensão normal externa ( $\sigma_n$ ) e da parcela de coesão ( $c$ ), que resultou na seguinte equação:

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

Ao longo dos anos, muitas outras pesquisas foram dedicadas a este tema e diversos pesquisadores chegaram a importantes conclusões, que permitiram a elaboração de equações para prever a resistência de cisalhamento entre interfaces de concreto. A Tabela 2.4 mostra as principais formulações elaboradas.

**Tabela 2.4: Equações para transferência de cisalhamento (adaptado de Fonteboa et al., 2010).**

<b>Birkeland e Birkeland (1966)</b>	$V_u = \rho_y f_y t g \emptyset$ <p><math>t g \emptyset</math>: 1,7 para concreto monolítico, 1,4 para rugosidade artificial e 0,8 e 1,0 para juntas.</p>
<b>Raths (1977)</b>	$V_u = 3,11 \lambda \cdot \sqrt{\rho_y f_y}$ <p><math>\lambda</math>: 1,0 para concreto convencional, 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve.</p>
<b>Shaikh (1978)</b>	$V_u = \lambda \sqrt{6,90 \mu} \cdot \sqrt{\rho_y f_y}$ <p><math>\lambda</math>: 1,0 para concreto convencional, 0,87 para concreto com agregado miúdo leve e 0,75 para concreto leve.  <math>\mu</math>: 1,4 para concreto monolítico, 1,0 para um concreto moldado sobre outro concreto endurecido, 0,4 para juntas rugosas e 0,6 para concreto com armadura passante.</p>
<b>Mattock (1974)</b>	$V_u = 0,8 \frac{A_s}{A_c} f_y + K_1$ <p><math>K_1</math>: 2,8 para concreto convencional, 1,7 para concreto com agregado miúdo leve e 1,5 para concreto leve.</p>
<b>Walraven et al. (1987)</b>	$V_u = C_1 (\rho_y f_y)^{C_2} \quad C_1 = 0,822 f_{cc}^{0,406} \quad C_2 = 0,159 f_{cc}^{0,303}$ <p><math>f_{cc}</math>: resistência à compressão de um corpo de prova cúbico com 150 mm de aresta (<math>f_{ck} = 0,85 f_{cc}</math>)</p>
<b>Mattock (1988)</b>	$V_u = 0,467 f_c^{0,545} + 0,8 (\rho_y f_y + \sigma_n)$ <p><math>\sigma_n</math>: tensão normal externa ao plano da junta.</p>
<b>Mau, Hsu (1988)</b>	$\frac{V_u}{f_c} = 0,66 \sqrt{\omega} < 0,3 \quad \omega = \frac{\rho_y f_y}{f_c}$
<b>Loov e Patnaik (1994)</b>	$V_u = k \lambda \cdot \sqrt{(0,1 + \rho_y f_y) f_c} < 0,25 f_c$ <p><math>k</math>: 0,6 para concreto monolítico, 0,5 para um concreto moldado sobre outro concreto endurecido com superfície rugosa.  <math>\lambda</math>: fator que considera o efeito do agregado leve.</p>

### 2.2.3 Recomendações normativas para atrito-cisalhamento

O ACI 318 (2014) e o manual de projeto PCI (2010) são as principais recomendações normativas que abordam atrito-cisalhamento. Ambos apresentam previsões em que a força última de cisalhamento ( $V_u$ ) é calculada

em função do coeficiente de atrito  $\mu$ , da área de armadura no plano de cisalhamento ( $A_{sw}$ ) e da tensão de escoamento da armadura  $f_y$ , sendo:

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

Já a tensão última ao cisalhamento pode ser calculada por:

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

onde  $\rho_y$  é a taxa de armadura de cisalhamento dada por  $A_{sw}/A_c$  e  $A_c$  é a área do plano de cisalhamento.

A Tabela 2.5 apresenta as diferentes condições de interface, os coeficientes de atrito e os limites para resistência última ao cisalhamento do ACI 318-14 e do manual de projeto PCI (2010), quando se trata de atrito-cisalhamento.

**Tabela 2.5: Considerações a respeito do tipo de interface (adaptado do ACI 318, 2014).**

Características da interface	$\mu$	$\tau_u$ -ACI 318 (2014)	$\tau_u$ -PCI (2010)
Concreto monolítico	1,4 $\lambda$	Concreto de peso normal: $\leq \begin{bmatrix} 0,2f_c \\ 3,3 + 0,08f_c \text{ MPa} \\ 11 \text{ MPa} \end{bmatrix}$	$\leq \begin{bmatrix} 0,3\lambda f_c \\ 6,89\lambda \text{ MPa} \end{bmatrix}$
Concreto sobre concreto com superfície intencionalmente rugosa	1,0 $\lambda$	Para outros casos: $\leq \begin{bmatrix} 0,2f_c \\ 5,5 \text{ MPa} \end{bmatrix}$	$\leq \begin{bmatrix} 0,25\lambda f_c \\ 6,89\lambda \text{ MPa} \end{bmatrix}$
Concreto sobre concreto com superfície não intencionalmente rugosa	0,6 $\lambda$	$\leq \begin{bmatrix} 0,2f_c \\ 5,5 \text{ MPa} \end{bmatrix}$	$\leq \begin{bmatrix} 0,2f_c \\ 5,5 \text{ MPa} \end{bmatrix}$
Concreto em 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.

#### 2.2.4 Ensaios de *push-off*

O ensaio de *push-off* é um ensaio de cisalhamento normalmente adotado para avaliar a resistência de união de interfaces concreto-concreto quando a armadura que atravessa a interface é considerada (Santos, 2009). A

Figura 2.5 exemplifica um ensaio de *push-off*, destacando a região denominada plano de cisalhamento.

A referência mais antiga encontrada para este tipo de ensaio apontou para Anderson (1960). Mais tarde, foi adotado e modificado por vários pesquisadores, como Mattock e Hawkins (1972), Mattock (1974) e Walraven *et al.* (1987).

O ensaio é composto por duas partes de concreto, cada uma com a forma de um L, ligadas por meio da interface e que apresentam uma abertura em ambas as extremidades, de maneira que é permitida a continuação do ensaio mesmo após a fissuração da interface de cisalhamento (Santos, 2009).

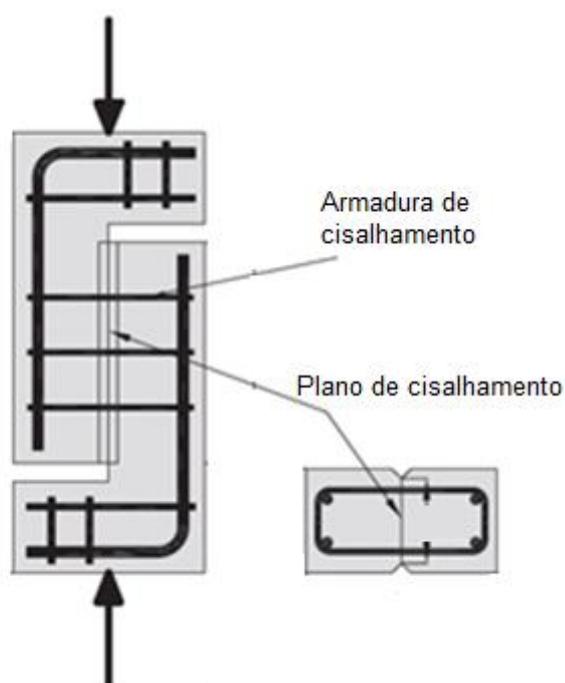


Figura 2.5: Esquema de ensaio de *push-off* (adaptado de Sagaseta e Vollum, 2011).

### 2.3 Aplicação da teoria do atrito-cisalhamento em concretos com agregados reciclados

Na concepção de elementos de concreto armado, o comportamento à flexão é controlado praticamente pela armadura de flexão e, portanto, a variação na resistência à compressão do concreto não tem grande importância em aplicações práticas. Por outro lado, o comportamento em relação ao cisalhamento de um elemento de concreto armado é regulado tanto pela

capacidade de cisalhamento da armadura, quanto pela capacidade de cisalhamento do concreto (Choi *et al.*, 2010). Dessa forma, quando se trata do estudo de resistência ao cisalhamento, as características do concreto devem ser consideradas com cautela, independentemente da taxa de armadura transversal a ser empregada.

Em concretos convencionais, as fissuras geradas atravessam a matriz de cimento e se propagam em torno dos agregados, que são relativamente mais resistentes. Este fato acarreta uma transmissão de forças, que é gerada nos numerosos pontos de contato existentes. Em outros tipos de concreto, tais como o de alta resistência e o leve, as fissuras também atravessam os agregados (Figura 2.6) e os pontos de contato que aumentam a capacidade de transferência de cisalhamento se reduzem (Fonteboa *et al.*, 2010). Dessa forma, a tendência do agregado reciclado em ser menos resistente mecanicamente do que o natural fará com que o concreto produzido com este agregado tenha maior probabilidade de apresentar comportamento semelhante a concretos leve e de alta resistência (Fonteboa *et al.*, 2010).

Como os agregados graúdos reciclados possuem uma camada de argamassa antiga aderida a sua superfície e mais agregado por unidade de volume deve ser utilizado em concretos com agregados reciclados, o mecanismo de engrenamento dos agregados e a capacidade de transferência de tensão de cisalhamento através das fissuras tende a ser diferente da apresentada pelos concretos convencionais. Além disso, as microfissuras e os danos internos existentes nos agregados reciclados continuam presentes no novo concreto e podem ter impacto adverso sobre diversas propriedades (Xiao *et al.*, 2012).

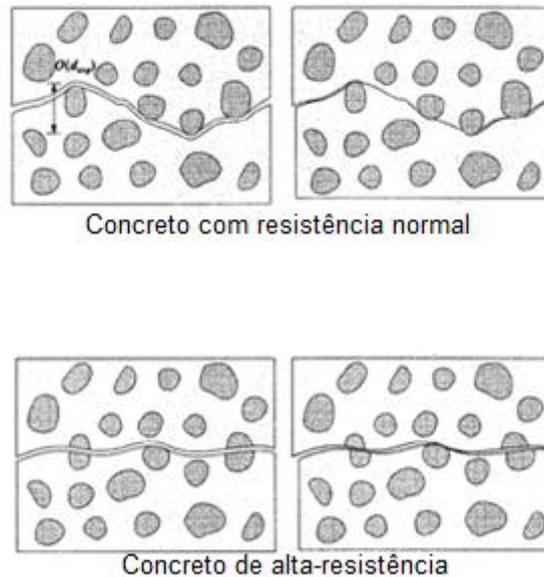


Figura 2.6: Perfil de fissuração e deformação por atrito-cisalhamento de concretos convencional e de alta resistência (adaptado de Ali e White, 1999).

### 2.3.1 Pesquisas relacionadas à transferência de tensões de cisalhamento em concretos reciclados

Devido ao fato de o concreto com agregado reciclado ser um material relativamente novo, a transferência de tensões cisalhantes neste tipo de material 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 três estudos com a abordagem voltada para o tema em questão e suas principais conclusões serão destacadas.

#### - Fonteboa *et al.* (2010)

Esta pesquisa teve como objetivo o estudo da capacidade de atrito-cisalhamento em concretos com agregados reciclados com adição de sílica ativa. Os corpos de prova para o ensaio de *push-off* produzidos foram provenientes de quatro dosagens distintas, a saber:

- dosagem 1 (CC): concreto de referência, com 100% de agregados naturais e sem sílica ativa;
- dosagem 2 (RC): concreto com 50% de agregado graúdo natural (em volume) substituído pelo reciclado e sem sílica ativa;

- dosagem 3 (CCS): concreto com 100% de agregados naturais e com 8% de sílica ativa adicionada em relação à quantidade de cimento;
- dosagem 4 (RCS): concreto com 50% de agregado graúdo natural (em volume) substituído pelo reciclado e com 8% de sílica ativa adicionada em relação à quantidade de cimento.

A relação a/c foi mantida a mesma para as quatro dosagens e a quantidade de cimento para os concretos com agregados reciclados foi ajustada em aproximadamente 6,2% a mais, para se alcançarem valores comparáveis de resistência mecânica. Além da influência do agregado reciclado e do material pozolânico, representado pela sílica ativa, variou-se a taxa de armadura transversal dos corpos de prova para se obter resultados relacionados a esse parâmetro. Todos os corpos de prova *push-off* foram pré-fissurados.

Os resultados mostraram que, para todas as taxas de armadura, houve diminuição substancial na capacidade de atrito-cisalhamento no concreto reciclado sem pozolana. Estas diminuições foram consideravelmente mais elevadas nos corpos de prova sem armadura transversal. A redução da capacidade de atrito-cisalhamento ocorre, segundo os pesquisadores, devido à presença de argamassa aderida ao agregado reciclado, que faz com que as fissuras se unam nas partículas agregadas, bem como na matriz. Este efeito possui maior importância na ausência de armadura, o que explica os valores obtidos. A adição de sílica ativa compensou o efeito negativo do agregado reciclado, aumentando a capacidade resistente da matriz. Assim, o concreto reciclado contendo sílica ativa mostrou resistência ao atrito-cisalhamento superior à referência (Tabela 2.6).

**Tabela 2.6: Resultados da carga cortante última (Fonte:Boaet al.,2010).**

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

Por fim, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os valores previstos a partir de equações de diversos trabalhos encontrados na literatura para concretos convencionais. Em todos os casos, o coeficiente de segurança encontrado foi maior do que a unidade. No entanto,

quando concretos reciclados com 50% de agregado graúdo reciclado e sem sílica ativa são utilizados, a máxima carga obtida com algumas das equações se aproximou dos obtidos experimentalmente. Desta forma, ao final do estudo, foi proposta a utilização de um coeficiente de correção de 0,85 nas equações para que as mesmas margens de segurança de concretos convencionais pudessem ser atingidas.

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

Em Xiao *et al.* (2012), 32 corpos de prova *push-off* pré-fissurados de concreto com agregado reciclado foram confeccionados a partir de 10 misturas, para avaliar o desempenho de transferência de cisalhamento através de fissuras. Nas 10 dosagens, variou-se a relação *a/c* e a porcentagem de substituição de agregados graúdos naturais por reciclados, conforme Tabela 2.7. A taxa de armadura transversal também foi um parâmetro de estudo.

Tabela 2.7: Dosagens estudadas por Xiao *et al.*, 2012.

Dosagem	(%) agregado reciclado	Cimento (kg)	Areia (kg)	Agregado natural (kg)	Agregado reciclado (kg)	Água (kg)	<i>a/c</i>
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	0,446

Primeiramente, ao compararem os resultados dos corpos de prova com a mesma dosagem e diferentes taxas de armadura transversal, concluíram que, quanto maior a restrição lateral proporcionada pelos estribos, maior a capacidade de transferência de cisalhamento.

Em seguida, compararam os resultados dos corpos de prova com a mesma porcentagem de substituição de agregados naturais por reciclados e mesma taxa de armadura transversal; porém, com diferentes resistências à compressão. A partir daí, concluíram que, quanto maior a resistência à compressão do concreto, maior a capacidade de transferência de cisalhamento através de fissuras.

Por fim, compararam os resultados dos concretos com a mesma resistência à compressão e mesma taxa de armadura transversal, porém com diferentes porcentagens de agregados reciclados. Dessa forma, puderam concluir que, para até 30% de agregado reciclado presente, nenhuma alteração significativa foi apresentada. Para valores de 50% de substituição, uma redução de 15% na capacidade de atrito-cisalhamento ocorreu em relação ao concreto de referência. Para porcentagens de substituição de 70% e 100%, uma estabilidade foi verificada, sendo a carga última de cisalhamento aproximadamente 85% menor em relação ao concreto convencional. Os pesquisadores afirmaram que a redução na capacidade de transferência de cisalhamento está atrelada à quantidade de argamassa antiga presente no agregado, acarretando enfraquecimento da zona de transição e menor engrenamento entre os agregados. Os resultados foram ainda comparados com os existentes na literatura para concretos convencionais (Figura 2.7).

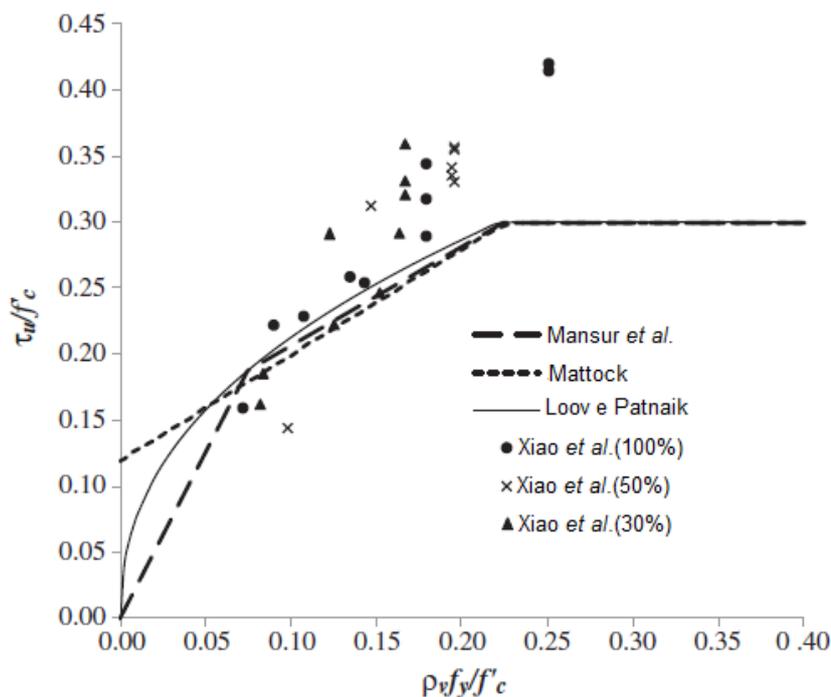


Figura 2.7: Comparação entre os resultados experimentais de Xiao *et al.* (2012) e as previsões de equações de diferentes pesquisadores (adaptado de Xiao *et al.*, 2012).

De acordo com a Figura 2.7, pode-se verificar que tais equações também podem ser utilizadas para prever a capacidade de transferência de cisalhamento através de fissuras em concretos com agregados reciclados.

Em Xiao *et al.* (2016), 7, das 10 dosagens feitas por Xiao *et al.* (2012) foram refeitas, utilizando porcentagens de substituição de 0, 30, 50, 70 e 100% de agregado reciclado. Além desta variável, os pesquisadores estudaram a influência das condições da interface de ligação do concreto com agregado reciclado em seu comportamento sob cisalhamento. Para isso, comparam os resultados de Xiao *et al.* (2012) que continham corpos de provas pré-fissurados com corpos de prova não fissurados inicialmente e com junta fria, confeccionados na nova pesquisa. Nesta última, a taxa de armadura transversal foi constante.

Em seus resultados, além das conclusões já citadas em Xiao *et al.* (2012), os autores afirmaram que para mesma porcentagem de agregado reciclado e taxa de armadura transversal, os corpos de prova sem fissuração inicial apresentaram maiores resistências ao cisalhamento, enquanto que o pior desempenho foi registrado para os corpos de prova com junta fria. Eles explicaram este fato baseando-se no engrenamento entre os agregados, que não se mostrou efetivo na presença de juntas.

#### **- Rahal e Al-Khaleefi (2015)**

Nesta pesquisa foram produzidos 18 corpos de prova de *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 atingirem resistências comparáveis; porém, relações a/c menores foram necessárias em concreto com agregado reciclado para se alcançarem resistências à compressão mais elevadas. A taxa de armadura transversal também foi uma variável de estudo (Figura 2.8) e a principal diferença encontrada está no fato de que os corpos de prova de *push-off* não foram pré-fissurados.

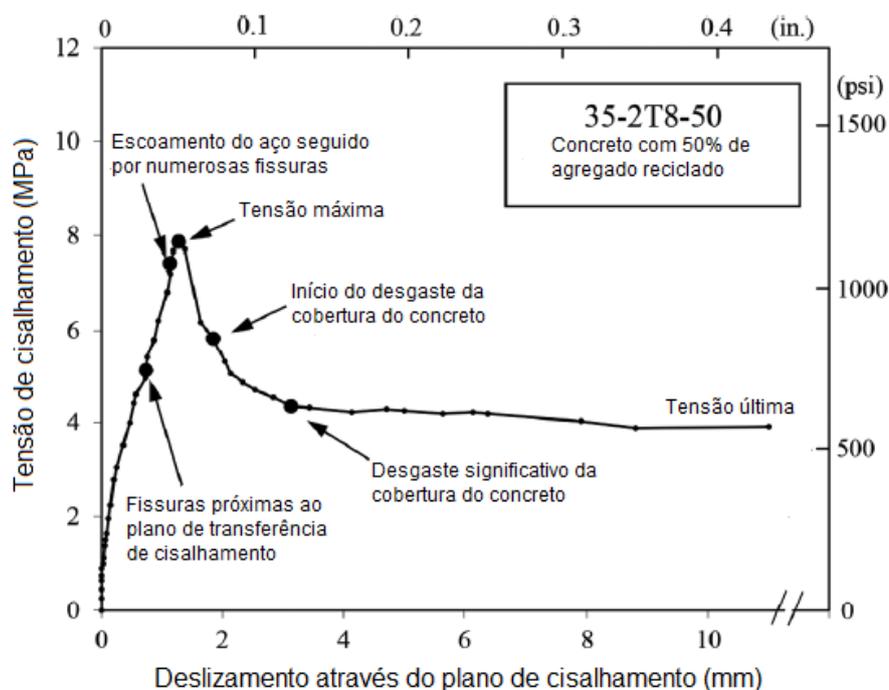


Figura 2.8: Curva típica de resposta à transferência de tensões cisalhantes de concretos com agregados reciclados (adaptado de Rahal e Al-Khaleefi, 2015).

De acordo com a Figura 2.8, os pesquisadores observaram que a curva pode ser dividida em três partes distintas. Uma parte ascendente que, geralmente, é linear e é caracterizada pelo surgimento de fissuras na superfície de transferência de cisalhamento; uma parte descendente que ocorre posteriormente à resistência máxima, atingida logo após o escoamento da armadura transversal; e uma terceira parte, na qual a resistência é estável com níveis de deslizamento relativamente elevados e maior grau de fissuração da superfície do concreto.

## 2.4 Considerações gerais

A partir das informações apresentadas neste capítulo, é possível notar a necessidade da melhor compreensão do comportamento de concretos com agregados reciclados, principalmente no que se refere à transferência de tensões de cisalhamento.

Os estudos citados sobre as propriedades dos agregados reciclados e dos concretos produzidos a partir deles evidenciam os efeitos negativos causados pela argamassa antiga que permanece aderida ao agregado após o processo de reciclagem. Porém, apesar da origem e do tratamento do

agregado reciclado serem citados como informações com grande potencial de interferência nas propriedades dos concretos a serem produzidos, a resistência do concreto original a ser reciclado é pouco comentada.

Quanto à transferência de tensões cisalhantes, a partir dos estudos apresentados, acredita-se que haja redução na capacidade máxima de cisalhamento em concretos com agregados reciclados. A porcentagem de agregado reciclado utilizado mostrou-se uma variável de grande relevância, tanto na caracterização mecânica dos concretos quanto nos resultados dos ensaios *push-off*. A tensão de confinamento proporcionada pela armadura transversal também se mostrou importante para a transferência de tensões de cisalhamento em concretos com agregados reciclados.

No capítulo seguinte, relativo ao programa experimental, a porcentagem de agregado reciclado, a resistência do concreto original e a tensão de confinamento serão abordadas como variáveis de estudo. Além disso, serão comentadas as etapas do trabalho de maneira mais detalhada, explicitando-se a importância de cada uma delas.

## CAPÍTULO III – PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1 Considerações iniciais

Ao longo deste capítulo estão apresentados os detalhes do programa experimental desenvolvido para atender aos objetivos especificados anteriormente.

As variáveis envolvidas no projeto são:

- presença do agregado reciclado: a inclusão de um concreto convencional como referência para o estudo permitiu a comparação das características deste concreto com o concreto produzido com agregados reciclados, possibilitando conclusões a respeito;
- resistência à compressão do concreto original: baseando-se em afirmações concluídas por Troian (2010), acredita-se que a resistência do concreto que origina o agregado reciclado influencia nas propriedades do novo concreto. Sendo assim, o agregado produzido nesta pesquisa foi proveniente da reciclagem de corpos de prova de concreto simples com procedência e resistência à compressão conhecidas. O conhecimento de tal informação possibilitou que a resistência à compressão do concreto que originou os agregados se tornasse uma variável de estudo. Para isso, optou-se por reciclar dois grupos de corpos de prova, conforme Tabela 3.1;

Tabela 3.1: Grupos de corpos de prova reciclados.

Grupo	Resistência à compressão (MPa)
1	15 – 20
2	35 – 40

- porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado: de acordo com diversos autores presentes na literatura, a porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado interfere de maneira direta em diversas características do novo concreto. Seguindo as recomendações de Hansen (1992), apenas

os agregados graúdos naturais foram substituídos por reciclados. Dessa forma, foram estudadas as substituições de 30%, 50% e 100%, com base nos estudos de Xiao *et al.* (2012), Fonteboa *et al.* (2010) e Rahal e Al-Khaleefi (2015);

- tensão de confinamento: diversos estudos que se relacionam ao assunto comprovaram que a taxa de armadura transversal, que gera a tensão de confinamento, é uma variável importante no estudo de transferência de cisalhamento. Portanto, foram estudadas as tensões de confinamento proporcionadas por  $2\phi 8$  mm ( $\rho_y = 0,84\%$ ) e  $3\phi 8$  mm ( $\rho_y = 1,34\%$ ), conforme Xiao *et al.* (2012) e corpos de prova sem nenhum confinamento, que permitiu a avaliação mais criteriosa da superfície da interface rompida, de acordo com Fonteboa *et al.* (2010).

A resistência à compressão do novo concreto foi fixada em 30 MPa para os dois grupos de corpos de prova reciclados. Sendo assim, aqueles produzidos com resíduo de 15 a 20 MPa tiveram agregados menos resistentes do que a matriz, sendo esperado um comportamento semelhante ao dos concretos leves e de alta resistência. Já para os produzidos com o Grupo 2, objetivou-se uma forma de ruptura característica de concretos convencionais, ou seja, contornando as partículas de agregados.

Os agregados reciclados foram submetidos a diversos ensaios de caracterização para posterior comparação com os agregados naturais e os resultados desses ensaios foram utilizados para a dosagem dos concretos reciclados.

Os concretos tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas por meio de ensaios como: resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), resistência à tração indireta ( $f_{ct,sp}$ ) e resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ).

Por fim, foram realizados ensaios usando o método de *push-off* com carregamento crescente em corpos de prova não fissurados. Os corpos de prova foram confeccionados e ensaiados na Oficina de Estruturas e Materiais do 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**

Para a confecção dos corpos de prova foi selecionado um cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI) da empresa Mizu.

### **3.2.2 Agregados**

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

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

### **3.2.3 Água**

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

### **3.2.4 Armaduras**

Foram utilizadas barras nervuradas CA-50 da GERDAU com diâmetro nominal de 8 mm para os estribos que constituem a armadura transversal e barras de 8 mm e 4,2 mm para armadura auxiliar.

Três amostras das barras de 8 mm de diâmetro nominal usadas na armadura transversal foram ensaiadas à tração conforme a ABNT NBR ISO 6892-1 (2015), no Laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

Para a aquisição da deformação ao longo do ensaio, as barras foram instrumentadas com *strain gage*.

## **3.3 Produção dos agregados reciclados**

Nos itens abaixo serão descritas as diferentes etapas que constituíram o processo de produção do agregado reciclado.

### 3.3.1 Coleta do concreto a ser reciclado

Com o intuito de produzir agregados reciclados com baixa, ou nenhuma, diversidade em sua composição, optou-se por utilizar resíduos de concreto simples. O material foi coletado no Laboratório de Controle Tecnológico LAB-TEC, na cidade de Campos dos Goytacazes, sob a forma de corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm.

Foram coletados cerca de 200 corpos de prova, os quais foram armazenados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LECIV/UENF), de acordo com a Figura 3.1. O material ficou armazenado por cerca de 20 dias até que se iniciasse o processo produtivo do agregado.



Figura 3.1: Armazenamento do material a ser reciclado.

As duas classes de resistência à compressão foram trabalhadas separadamente; porém, os procedimentos de britagem e peneiramento foram os mesmos para ambos os grupos.

### 3.3.2 Britagem

O britador utilizado para a produção dos agregados foi do tipo mandíbula, da marca Fritsch que possui a compressão como principal mecanismo de funcionamento. De acordo com Hansen (1992), este tipo de britador apresenta as seguintes vantagens:

- proporciona distribuição granulométrica dos agregados mais adequada para o uso em concreto;

- gera alterações pequenas na estrutura do agregado original do concreto a ser reaproveitado;
- produz apenas 20% de finos abaixo de 4,8 mm.

A Figura 3.2 mostra um desenho esquemático de um britador de mandíbula.

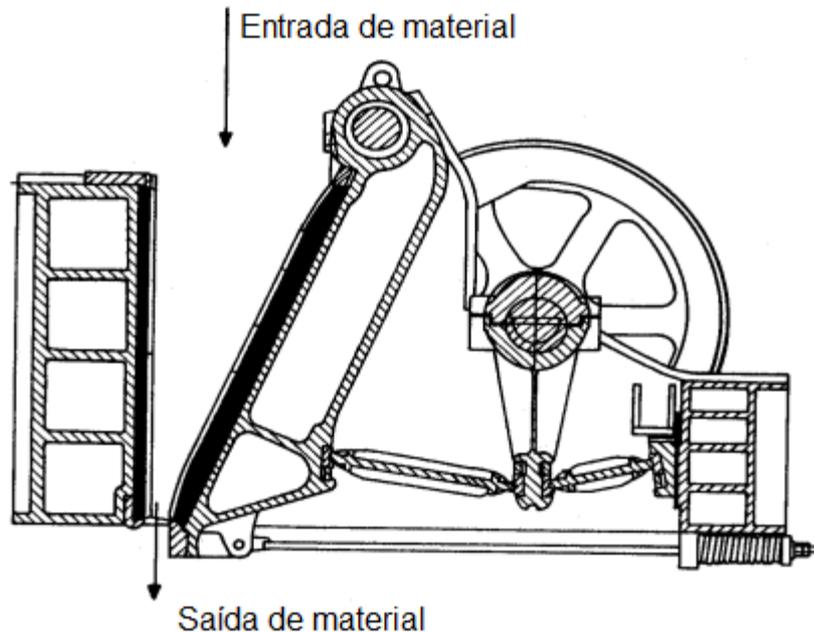


Figura 3.2: Britador de mandíbula (Figueira *et al.*, 2004).

Uma vez que a abertura do local de alimentação do britador era muito pequena, os corpos de prova passaram por um procedimento de diminuição de tamanho antes de sofrerem a britagem em si. Esse procedimento foi realizado com o auxílio de uma prensa manual que fragmentou os corpos de prova pois, apesar de rompidos, mostravam-se muito resistentes. Posteriormente, utilizando-se uma marreta, foi possível atingir o tamanho requerido para que o material fosse capaz de ser inserido no britador.

Quanto à fração escolhida para estudo, optou-se pela brita 0, visto que o processo de fragmentação dos corpos de prova ocasionou grande geração de partículas pequenas, com tamanho suficiente para serem transformadas em brita 0, ou seja, menores do que a brita 1. Desta forma, para se evitar a perda excessiva de material, uma vez que o tamanho das partículas de agregados não foi alvo de estudo, foram britados cerca de 500 quilos de material sob a forma de brita 0. Para isto, regulou-se a abertura de saída do britador por meio de uma alavanca presente no equipamento, que ficou fixada próxima à posição

número 4. A Figura 3.3 mostra o momento da inserção do material no britador e a forma com a qual o material sai do mesmo.



(a)



(b)

Figura 3.3: Britagem: (a) inserção do material no equipamento; (b) saída do material.

### 3.3.3 Peneiramento

Buscando-se a produção de brita 0, o peneiramento foi realizado com o auxílio de peneiras granulométricas quadradas com dimensões em centímetros de 50 x 50 x 10, cujas aberturas eram de 12,5 e 4,75 mm. Também se utilizou um peneirador elétrico da marca Pavitest, onde as peneiras foram encaixadas, e a vibração produzida pelo equipamento possibilitava a divisão das diferentes frações. O material retido na peneira 4,75 mm e passante na peneira 12,5 mm foi aproveitado para a pesquisa, enquanto que a fração fina depositada no fundo foi descartada e a fração não passante na peneira 12,5 mm foi rebitada e sofreu novo processo de peneiramento. A Figura 3.4 mostra o peneiramento do material no equipamento vibratório e a rebitagem de partículas superiores a 12,5 mm.



Figura 3.4: (a) Peneiramento, (b) rebitagem do material.

### 3.3.4 Pesagem e armazenamento

Após o peneiramento, os agregados foram armazenados em sacos plásticos, os quais foram pesados e etiquetados. Nas etiquetas, foram especificadas informações como o peso do conteúdo presente no saco e a classe de resistência do concreto que originou o agregado, para manter o controle dos agregados produzidos. A Figura 3.5 mostra os sacos de material armazenados no LECIV/UENF.



Figura 3.5: Armazenamento do agregado reciclado.

### **3.4 Caracterização dos agregados**

O processo de caracterização dos agregados se fez necessário para possibilitar a comparação entre as propriedades dos agregados naturais e reciclados. Além disso, essa etapa foi de grande importância para a dosagem, pois permitiu o conhecimento de propriedades físicas essenciais para o estudo de dosagem.

Para iniciar essa etapa, as amostras foram obtidas pelo método do quarteamento, de acordo com a ABNT NBR NM 27 (2001). Posteriormente, os agregados foram submetidos a diversos ensaios, descritos nos itens abaixo.

#### **3.4.1 Composição granulométrica**

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2003). Para o agregado miúdo foi utilizada uma amostra com cerca de 1 kg de massa seca e para o agregado graúdo amostras com cerca de 2 kg. As curvas granulométricas de todos os agregados e o módulo de finura da areia foram os dados obtidos nesta etapa.

#### **3.4.2 Massa específica real e unitária**

A massa específica real dos agregados miúdos e graúdos foi determinada por meio da técnica laboratorial conhecida como Picnometria. Já a massa unitária dos agregados graúdos, também necessária para a dosagem, foi determinada conforme a ABNT NBR NM 45 (2006).

#### **3.4.3 Absorção de água**

A absorção de água do agregado graúdo foi feita seguindo as recomendações da ABNT NBR NM 53 (2009). Os agregados, após secos em estufa, foram submersos num tanque onde permaneceram por 24 horas. Por diferença de massa, determinou-se a absorção de água.

#### **3.4.4 Abrasão Los Angeles**

O desgaste superficial dos agregados graúdos foi medido por meio do ensaio de Abrasão Los Angeles recomendado pela ABNT NBR NM 51 (2001). Para determinar alguns detalhes do ensaio como, por exemplo, a quantidade

de amostra, de esferas a serem utilizadas e de rotações do tambor, é necessário classificar a amostra de acordo com sua granulometria. Neste caso, os agregados obtiveram a classificação granulométrica “C”. A partir daí, determinou-se a necessidade de 5 kg de amostra, 8 esferas e 500 rotações. A perda de massa por abrasão foi calculada por diferença de massa antes e após o ensaio. A Figura 3.6 mostra as esferas utilizadas no ensaio, que totalizaram carga abrasiva de  $3330 \pm 20$  g.



Figura 3.6: Amostra e esferas utilizadas no ensaio de Abrasão Los Angeles.

#### **3.4.5 Quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado**

Para determinação da quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado utilizou-se o procedimento descrito por Bazuco (1999). O ensaio consiste num ataque ácido por meio de uma solução contendo ácido clorídrico com concentração de 10% m/v. Três amostras de 100 gramas foram ensaiadas para cada grupo de britas. Durante a execução do ensaio, a amostra ficou imersa na solução por 24 horas e apenas a argamassa antiga foi atacada, de modo que o agregado natural presente permaneceu intacto. Por diferença de massa, calculou-se a porcentagem de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado. A Figura 3.7 mostra o fundo do recipiente onde se realizou

o ensaio. Conforme se pode notar, há certa quantidade de grãos, principalmente areia, caracterizando grande perda de massa.



Figura 3.7: Fundo do recipiente onde ocorreu o ataque ácido.

#### **3.4.6 Massa específica real e absorção de água do agregado após o ataque ácido**

Após o ataque ácido, caracterizou-se o agregado proveniente do concreto original a fim de se ter uma ideia da diferença entre este e o agregado natural utilizado nesta pesquisa. Porém, devido à pequena quantidade de amostra, determinou-se apenas sua massa específica real e a absorção de água, seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente.

### **3.5 Detalhes dos corpos de prova**

O programa experimental foi composto por quatro séries de corpos de prova, sendo as características de cada série apresentadas na Figura 3.8.

As séries 1 e 2 possuíam três tipos de corpos de prova, enquanto que as séries 3 e 4 possuíam 2 tipos, de acordo com o especificado na Tabela 3.2.

Série 1	Série 2	Série 3	Série 4
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto original de 15 a 20 MPa;</li> <li>• Taxa de armadura transversal de 0% (<math>\rho_y f_y = 0</math> MPa);</li> <li>• Taxas de substituição de agregado natural pelo reciclado de 30%, 50% e 100%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto original de 35 a 40 MPa;</li> <li>• Taxa de armadura transversal de 0% (<math>\rho_y f_y = 0</math> MPa);</li> <li>• Taxas de substituição de agregado natural pelo reciclado de 30%, 50% e 100%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto original de 35 a 40 MPa;</li> <li>• Armadura transversal <math>2\phi 8</math> (<math>\rho_y f_y = 4,79</math> MPa) e <math>3\phi 8</math> (<math>\rho_y f_y = 7,64</math> MPa);</li> <li>• Taxas de substituição de agregado natural pelo reciclado de 50%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agregados naturais;</li> <li>• Armadura transversal <math>2\phi 8</math> (<math>\rho_y f_y = 4,79</math> MPa) e sem armadura (<math>\rho_y f_y = 0</math> MPa);</li> <li>• Taxa de substituição de agregado natural por reciclado de 0%.</li> </ul>

Figura 3.8: Esquema das séries dos corpos de prova.

Na nomenclatura utilizada para os corpos de prova o primeiro valor refere-se à série; o segundo à resistência do concreto original; o terceiro à quantidade de estribos empregada e o quarto à porcentagem de substituição do agregado natural por reciclado. A letra x representa o número do corpo de prova de cada tipo. Desta forma, o CP3 1-20-0-30, é o terceiro corpo de prova pertencente à Série 1 e possui 30% de agregado reciclado proveniente do concreto cuja resistência original era cerca de 20 MPa, além de não possuir estribos.

Tabela 3.2: Detalhes dos corpos de prova de cada série.

Série	Resistência do Concreto original (MPa)	Estribos de 8 mm	Substituição (%)	Corpo de prova
1	15 a 20	0	30	CPx 1-20-0-30
	15 a 20	0	50	CPx 1-20-0-50
	15 a 20	0	100	CPx 1-20-0-100
2	35 a 40	0	30	CPx 2-40-0-30
	35 a 40	0	50	CPx 2-40-0-50
	35 a 40	0	100	CPx 2-40-0-100
3	35 a 40	2	50	CPx 3-40-2-50
	35 a 40	3	50	CPx 3-40-3-50
4	-	0	0	CPx 4-0-0
	-	2	0	CPx 4-2-0

Dessa forma, pela comparação dos resultados de cada série e entre as séries foi possível o estudo de todas as variáveis descritas anteriormente. Ao se observarem os resultados da Série 1, o efeito da porcentagem de substituição de agregado natural pelo reciclado pôde ser analisado, bem como nos corpos de prova da Série 2. Quando se comparou a Série 1 com a Série 2, foi possível verificar a influência da resistência do concreto original do qual o agregado reciclado foi proveniente. Além disso, comparando-se os resultados dessas duas séries com o CPx 4-0-0, sem estribos da Série 4, a presença do agregado reciclado em concreto simples foi avaliada. Da mesma forma, utilizando-se os resultados do CPx 4-2-0 da Série 4 e do CPx 3-40-2-50 da Série 3 foi possível avaliar a presença do agregado reciclado no concreto com estribos. Por fim, ao se analisarem os corpos de prova da Série 3 entre si e com o CPx 2-40-0-50 da Série 2, a interferência da tensão de confinamento pôde ser estudada.

A geometria dos corpos de prova foi o clássico *setup* do tipo *push-off*, sendo este um ensaio de cisalhamento adotado para avaliar a resistência de união de interfaces de concreto quando existe armadura cruzando as mesmas.

As dimensões dos corpos de prova foram determinadas a partir de outras pesquisas que abordaram o tema, conforme a Tabela 3.3. A configuração da armadura auxiliar foi determinada com base no trabalho de Harish Kumar *et al.* (2015), pois a armadura proposta permite uma melhor análise da interface cisalhada após o ensaio de *push-off*. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram o esquema do corpo de prova *push-off*, com suas dimensões e detalhes da armadura auxiliar e estribos.

**Tabela 3.3: Dimensões dos corpos de provas de estudos anteriores e do presente estudo.**

<b>Referência</b>	<b>Dimensão do corpo de prova b x h (mm)</b>
Ahmed e Ansell (2010)	260 x 500
Rahal e Al-Khaleefi (2015)	250 x 540
Presente estudo	250 x 450

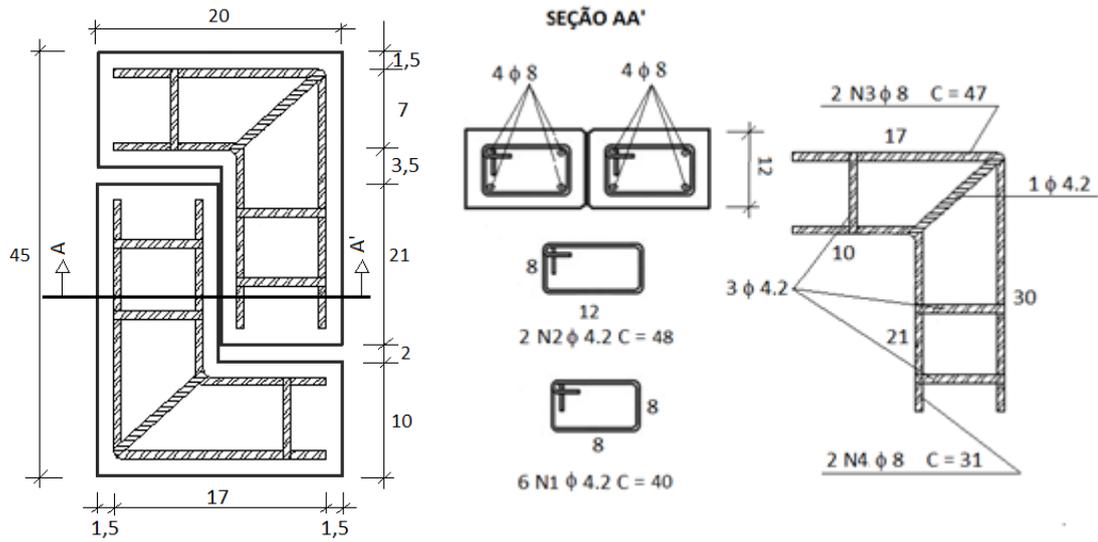


Figura 3.9: Esquema do corpo de prova *push-off* sem armadura transversal.

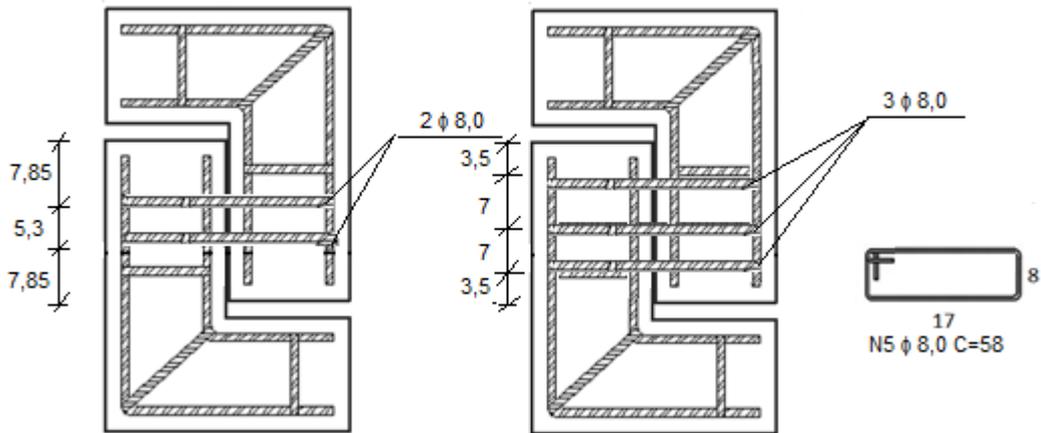


Figura 3.10: Esquema do corpo de prova *push-off* com armadura transversal.

A Tabela 3.4 mostra o resumo do aço utilizado, para os corpos de prova com 2 ou 3 estribos.

Tabela 3.4: Resumo do aço utilizado na confecção dos corpos de prova *push-off*.

Tipo	Aço	Ø (mm)	Comprimento unitário (cm)	Quantidade	Comprimento total (cm)	Peso (kg)
N1	CA-60	4,2	40	6	240	0,264
N2	CA-60	4,2	48	2	96	0,104
N3	CA-50	8,0	47	2	94	0,102
N4	CA-50	8,0	31	2	62	0,067
N5	CA-50	8,0	58	2/3	116/174	0,125/0,188
<b>Total:</b>					<b>608/666</b>	<b>0,662/0,725</b>

### 3.6 Dosagem dos concretos

As dosagens foram realizadas utilizando-se o método da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Os valores empregados para os cálculos foram os obtidos a partir dos ensaios de caracterização dos agregados. A resistência requerida aos 28 dias foi fixada em 30 MPa para todas as dosagens, conforme dito anteriormente.

Além disso, foram seguidas as recomendações dos autores do item 2.1.3, que se refere à dosagem dos concretos com agregados reciclados, com processo de pré-saturação e acréscimo de cimento de 2 a 5%, dependendo do percentual de agregado reciclado. De acordo com as séries especificadas no item 3.1, foram realizadas 7 dosagens distintas. Uma para o concreto de referência, três para os agregados originados de concretos de 15 a 20 MPa, com teores de substituição de 30, 50 e 100% e três para os agregados originados de 35 a 40 MPa, para os mesmos teores de substituição.

O processo de pré-saturação foi feito com base na ABNT NBR 15116 (2004), que recomenda a utilização de cerca de 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado.

A Tabela 3.5 mostra a quantidade de cada material empregado nas diferentes dosagens e a Tabela 3.6 relaciona a dosagem com seus respectivos corpos de prova.

**Tabela 3.5: Quantidade de cada material utilizado nas dosagens.**

Material	Dosagens						
	1	2	3	4	5	6	7
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	431,25	431,25	422,33	422,33	416,15	416,15	410,00
Água (kg/m <sup>3</sup> )	269,54	270,29	250,52	250,88	241,41	241,63	230,00
Brita natural (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	416,88	416,88	583,63	583,63	833,75
Brita 15-20 MPa (kg/m <sup>3</sup> )	-	678,50	-	339,25	-	203,55	-
Brita 35-40 MPa (kg/m <sup>3</sup> )	661,25	-	330,63	-	198,38	-	-
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	918,90	890,70	911,77	897,71	915,12	906,66	911,50
Relação a/c (total)	0,623	0,626	0,593	0,595	0,581	0,580	0,560

**Tabela 3.6: Dosagem utilizada para a produção de cada corpo de prova *push-off*.**

Dosagem	Corpo de prova
1	CPx 2-40-0-100
2	CPx 1-20-0-100
3	CPx 2-40-0-50
	CPx 3-40-2-50
	CPx 3-40-3-50
4	CPx 1-20-0-50
5	CPx 2-40-0-30
6	CPx 1-20-0-30
7	CPx 4-0-0
	CPx 4-2-0

### 3.7 Fôrmas

Para a produção dos corpos de prova *push-off* foi necessária a utilização de fôrmas fabricadas em chapas metálicas. As fôrmas possuem no fundo e na parte superior uma saliência com o objetivo de deixar um chanfro, delimitando, desta forma, o plano de cisalhamento. Foram usadas duas placas de isopor fixadas à forma para a abertura nas extremidades (Figura 3.11).



**Figura 3.11: Fôrma e armadura para a produção dos corpos de prova *push-off*.**

### 3.8 Produção e cura dos concretos

Para o procedimento de mistura na produção dos concretos foi utilizado um misturador do tipo planetário. Foram executadas as seguintes etapas:

- umedecimento da betoneira com água;

- homogeneização dos agregados reciclados com a água de pré-saturação por 1 minuto;
- repouso por 10 minutos, com a betoneira desligada, para que os agregados absorvessem parte da água;
- adição dos agregados graúdos naturais e da metade da água com homogeneização por 1 minuto;
- acréscimo do cimento e da outra metade da água com homogeneização por 30 segundos;
- adição da areia com homogeneização por 2 minutos.

Ressalta-se que a ordem de colocação dos materiais na betoneira foi a mesma utilizada por Leite (2001).

Os corpos de prova foram moldados horizontalmente de forma monolítica, utilizando-se mesa vibratória. A moldagem e a cura dos corpos de prova foram executadas conforme procedimentos recomendados pela ABNT NBR 5738 (2015), sendo a cura realizada durante 45 dias em tanque de água saturada com cal. Optou-se por 45 dias de cura pois a quantidade elevada de concretagens a serem feitas retardou a idade dos ensaios mecânicos, uma vez que os ensaios começaram a ser realizados somente quando todos os corpos de prova já haviam sido produzidos .

A Figura 3.12 mostra a moldagem dos corpos de prova com o auxílio da mesa vibratória.



**Figura 3.12: Moldagem dos corpos de prova na mesa vibratória.**

### 3.9 Caracterização dos concretos no estado fresco

Para determinar a consistência dos concretos produzidos, foram realizados ensaios de *slump test* e tempo VeBe. O primeiro ensaio, denominado abatimento do tronco de cone, foi realizado segundo a ABNT NBR NM 67 (1998). O ensaio de tempo VeBe, recomendado para concretos mais secos, não possui norma brasileira e, portanto, utilizou-se a norma britânica BS 1881 (1983).

O ensaio de tempo VeBe consiste na quantificação do tempo necessário para que o concreto moldado no tronco de cone do *slump test* atinja uma determinada compactação com o auxílio de uma mesa vibratória e de uma carga proporcionada por um disco de 1,9 kg apoiado sobre sua superfície. Quanto maior o tempo cronometrado, mais seco o concreto e, conseqüentemente, menos trabalhável.

A Figura 3.13 mostra a realização dos ensaios de consistência descritos acima.



(a)



(b)

Figura 3.13: (a) *Slump test*; (b) Tempo VeBe.

### 3.10 Caracterização dos concretos no estado endurecido

Nesta etapa foram realizados ensaios mecânicos para avaliar as seguintes propriedades: resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), resistência à tração indireta ( $f_{ct,sp}$ ) e resistência à tração na flexão ( $f_{ct,f}$ ). Tais ensaios foram realizados com auxílio de uma máquina universal da empresa EMIC com capacidade de 2000 kN, aos 75 dias de idade. Optou-se por 75 dias, pois nesta idade todos os concretos já haviam sido produzidos, moldados e curados. Dessa forma, pode-se iniciar a etapa dos ensaios de maneira não simultânea com a produção dos concretos.

Para os ensaios de resistência à compressão e tração indireta foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Já para o ensaio de resistência à tração na flexão foram produzidos corpos de prova prismáticos de seção transversal quadrada com 150 mm de aresta e 500 mm de comprimento, com vão livre de 450 mm. Para cada propriedade avaliada, três corpos de prova foram ensaiados.

Além disso, a absorção de água e a massa específica dos concretos também foram avaliadas para comparação entre o concreto convencional e o concreto com agregado reciclado. Nestes ensaios foram reutilizados os corpos de prova confeccionados para o ensaio de tração na flexão. Após a ruptura, os corpos de prova foram cortados em paralelepípedos de 150 mm x 150 mm x 120 mm, totalizando um volume de 2700 cm<sup>3</sup>, sendo este superior a 2500 cm<sup>3</sup>, conforme recomenda a NBR 9778 (2009).

As Figuras 3.14 a 3.16 mostram os ensaios de resistência à compressão, tração indireta e tração na flexão, respectivamente. A Tabela 3.7 mostra os ensaios realizados nesta fase e suas respectivas normas.

**Tabela 3.7: Ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido**

<b>Norma</b>	<b>Ensaio</b>
<b>ABNT NBR 12142 (2010)</b>	Resistência à tração na flexão
<b>ABNT NBR 5739 (2007)</b>	Resistência à compressão
<b>ABNT NBR 7222 (2011)</b>	Resistência à tração indireta
<b>ABNT NBR 9778 (2009)</b>	Absorção de água e massa específica



Figura 3.14: Ensaio de compressão.



Figura 3.15: Ensaio de tração indireta.



Figura 3.16: Ensaio de tração na flexão.

### 3.11 Instrumentação e ensaios *push-off*

Para o ensaio do tipo *push-off* utilizou-se a mesma prensa dos ensaios mecânicos anteriores e a carga foi aplicada por meio de um assento esférico e um conjunto de placas e rolos a uma velocidade de 5,9 mm/s (Figura 3.17). Os rolos garantem que a separação das duas metades do corpo de prova não seja restringida pela máquina de ensaio.



Figura 3.17: Conjunto de placas e rolos utilizados no ensaio *push-off*.

Os corpos de prova de cada série foram triplicados para garantir maior confiabilidade aos resultados. Além disso, os corpos de prova não foram pré-fissurados, pois a pré-fissuração poderia acarretar ruptura prematura, uma vez que a maioria deles não possuía estribos.

Para a realização do ensaio *push-off* os corpos de prova foram instrumentados com transformadores diferencial variável linear (LVDTs), dois para medir o deslizamento de uma das partes do corpo de prova em relação à outra, e mais dois posicionados horizontalmente para medir o deslocamento horizontal. Com o auxílio de suportes magnéticos e chapas metálicas, os LVDTs foram posicionados como mostra o desenho esquemático da Figura 3.18. Já Figura 3.19 mostra a parte frontal e a posterior do CP1 4-2-0 no momento do ensaio.

Além disso, para os corpos de prova do tipo CPx 3-40-3-50 e CPx 4-2-0, que possuem armadura transversal, foi medida a deformação desta armadura, por meio de um *strain gage* em um dos estribos, localizado no plano de cisalhamento. O *strain gage* foi posicionado com um pequeno deslocamento em relação ao centro da maior dimensão do estribo para evitar danos no momento do ensaio. Antes de colocá-lo a superfície foi higienizada e regularizada com o auxílio de uma lixa. Posteriormente ele foi fixado com auxílio de uma cola instantânea.

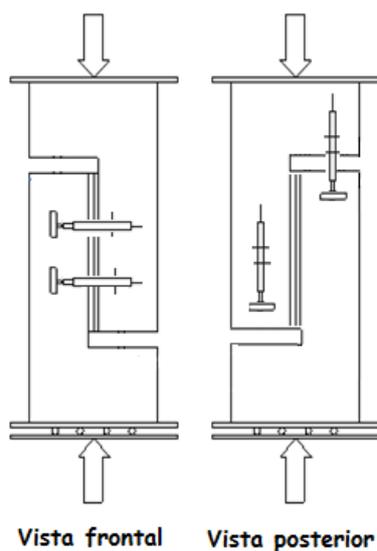


Figura 3.18: Desenho esquemático do posicionamento dos LVDTs.



Figura 3.19: Vista frontal e posterior do CP1 4-2-0 no momento do ensaio.

### 3.12 Análise da superfície de ruptura

Com o objetivo de estudar a influência da rugosidade da superfície de ruptura na resistência ao cisalhamento, os corpos de prova sem armadura transversal foram submetidos a uma análise após o ensaio. Porém, tal análise foi realizada apenas em um corpo de prova de cada tipo, aquele que obteve a resistência intermediária entre os três ensaiados.

Para esta análise quantitativa da rugosidade foi preciso elaborar um *setup* composto por uma mesa plana, fixada a uma régua e a um patamar com movimentação horizontal, em que se fixou um extensômetro mecânico e uma base magnética para posicionar um segundo extensômetro, conforme mostra a Figura 3.20.

Após a montagem do *setup* de medição, cada corpo de prova a ser analisado foi devidamente posicionado e foram feitas, para cada superfície, 150 medições das coordenadas x, y, z, medidas pela régua auxiliar e pelos dois extensômetros mecânicos. A área projetada analisada para cada corpo de prova foi de 12800 mm<sup>2</sup>. As coordenadas obtidas foram utilizadas para gerar uma superfície 3D com o auxílio do *software* Surfer 11<sup>®</sup>, que também calculou a área superficial de cada interface de ruptura, permitindo a análise quantitativa da superfície rugosa.



Figura 3.20: *Setup* de medição das coordenadas: (a) vista frontal; (b) vista lateral.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados da caracterização do aço das armaduras

A tensão de escoamento média do aço ( $f_y$ ) foi de 570 MPa e sua deformação de escoamento média ( $\epsilon_y$ ) foi de 4,3%. A Tabela 4.1 mostra as propriedades físicas e mecânicas da barra, resultantes dos ensaios das três amostras. Já a Figura 4.1 mostra a curva tensão vs. deformação da mesma.

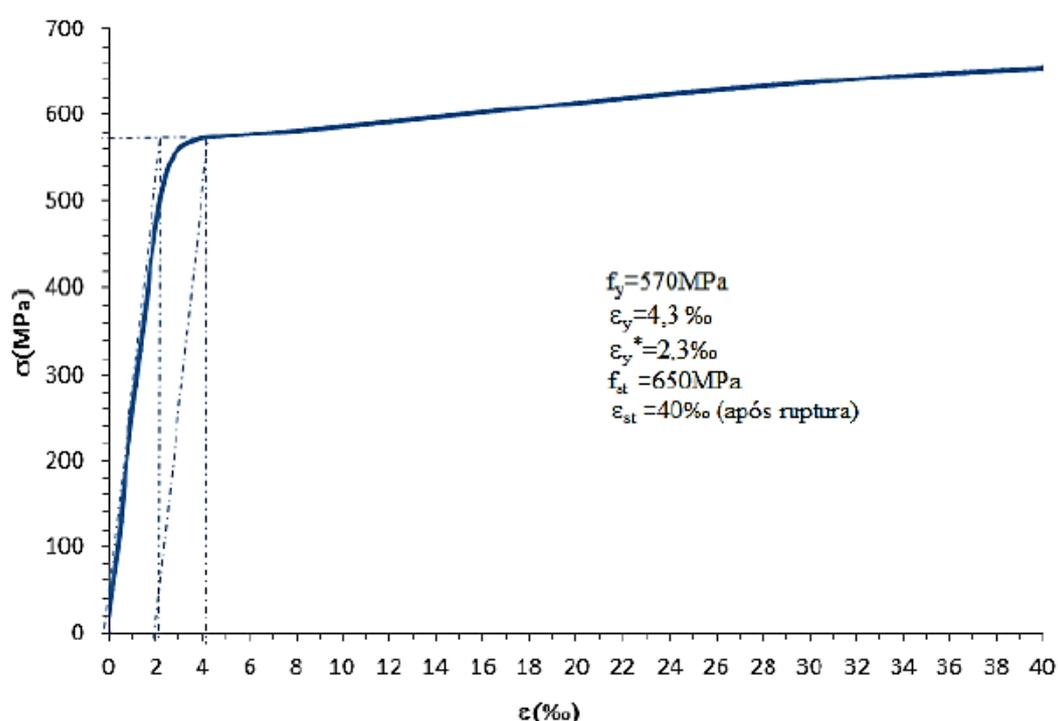


Figura 4.1: Gráfico tensão vs deformação do aço.

Tabela 4.1: Propriedades do aço.

Aço	Área (mm <sup>2</sup> )	$\phi$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\epsilon_v$ (‰)	$\epsilon_v^*$ (‰)	$E_{st}$ (‰)	$f_{st}$ (MPa)
CA-50	50,24	8	570	247,83	4,3	2,3	40	650

### 4.2 Resultados da caracterização dos agregados

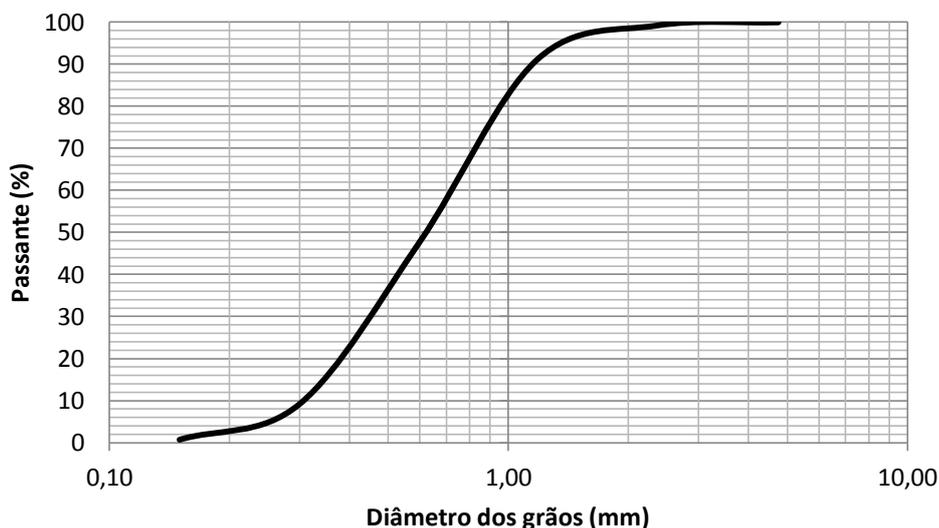
Nos itens a seguir serão descritos os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados miúdo e graúdos, discutindo-se e comparando-se os valores obtidos.

### 4.2.1 Composição granulométrica

O módulo de finura da areia foi de 2,52. A Figura 4.2 mostra a curva granulométrica do agregado miúdo, cujo diâmetro médio (d50) foi igual a 0,6 mm e a Tabela 4.2 mostra a quantidade de material passante acumulada com os limites estabelecidos por norma. A partir das porcentagens acumuladas retidas obtidas no ensaio, a areia possui granulometria adequada para aplicação em concretos, de acordo com a ABNT NBR 7211 (2009).

**Tabela 4.2: Porcentagem passante acumulada da areia e seus limites.**

Malha da peneira (mm)	Porcentagem, em massa, passante acumulada		
	Limite inferior	Limite superior	Presente estudo
6,3	100	93	100
4,75	100	90	99,95
2,36	100	75	99,20
1,18	95	50	91,05
0,6	85	30	47,75
0,3	50	5	9,15
0,15	35	0	0,65



**Figura 4.2: Curva granulométrica da areia.**

A Figura 4.3 mostra as curvas granulométricas dos agregados graúdos plotadas juntas para facilitar a comparação dos resultados. Observa-se que as composições granulométricas dos dois grupos de britas recicladas são muito semelhantes. Isso se deve ao fato de que o processo de reciclagem dos

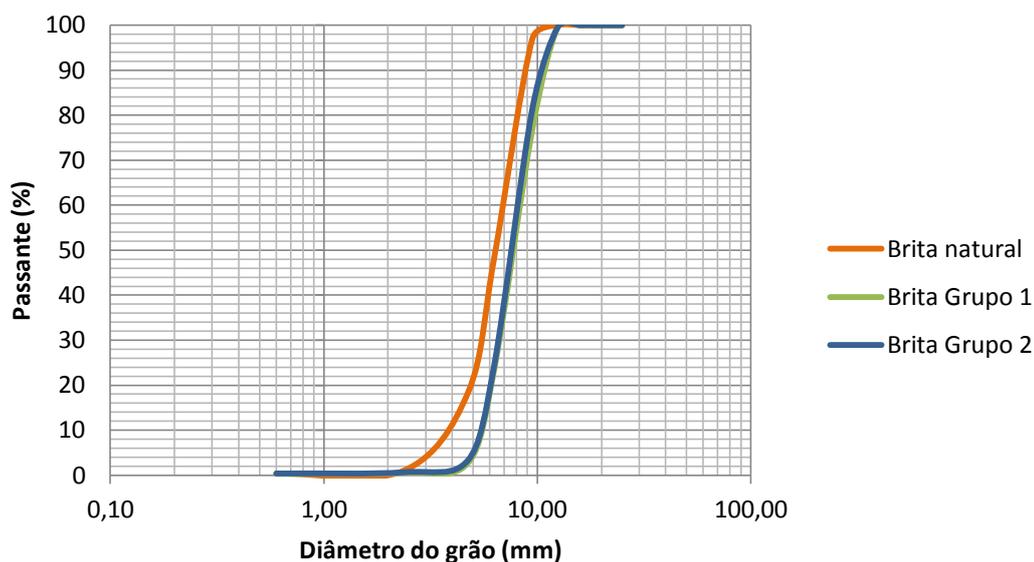
agregados foi controlado, sendo evitadas quaisquer diferenças no procedimento para ambos os grupos.

É importante destacar que a granulometria da brita reciclada foi levemente mais grossa comparada à brita natural. O diâmetro médio da primeira foi equivalente a 8 mm para ambos os grupos de resistência original; já para a brita natural foi de 6 mm.

De acordo com a ABNT NBR 7211 (2009), a brita natural utilizada possui granulometria adequada para concretos; em contrapartida, as britas recicladas mostraram pequena discrepância dos valores limites estabelecidos, porém, não a ponto de comprometer a qualidade dos concretos (Tabela 4.3).

**Tabela 4.3: Porcentagem passante acumulada das britas e seus limites.**

Malha da peneira (mm)	Porcentagem, em massa, passante acumulada				
	Limite inferior	Limite superior	Brita natural	Brita Grupo 1	Brita Grupo 2
12,5	100	95	100	99,63	99,60
9,5	98	85	97,0	76,95	81,43
6,3	60	35	48,45	23,63	24,56
4,75	20	0	18,41	2,76	3,37
2,36	5	0	0,95	0,5	0,67



**Figura 4.3: Curva granulométrica das britas.**

#### **4.2.2 Massa específica real e unitária**

A Tabela 4.4 mostra as massas específicas real e unitária dos agregados graúdos. Para o agregado miúdo obteve-se somente a massa específica real, que foi equivalente a 2,65 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 4.4: Massa específica real e massa unitária dos agregados graúdos.**

<b>Agregado</b>	<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Brita natural</b>	2,81	1,45
<b>Brita Grupo 1</b>	2,47	1,18
<b>Brita Grupo 2</b>	2,50	1,15

De acordo com os resultados, houve redução da massa específica real dos agregados reciclados em torno de 12% em relação ao agregado natural. Esse valor está de acordo com os encontrados na literatura, sendo a principal responsável por esta redução a argamassa antiga aderida ao agregado.

Já a massa unitária teve redução de cerca de 20% para os dois grupos de resistência. Esse fato pode ser explicado pelo formato mais anguloso dos agregados reciclados, que ao serem colocados num recipiente produzem um maior número de vazios, reduzindo o valor de massa por unidade de volume.

#### **4.2.3 Absorção de água**

As massas registradas durante o ensaio e a absorção de água dos agregados graúdos estão na Tabela 4.5. Conforme se pode notar, a absorção de água para as duas britas recicladas foi igual e 15 vezes maior do que a absorção da brita natural. Apesar da diferença significativa, os valores encontrados são coerentes com os registrados na literatura. Mais uma vez, acredita-se que o aumento da absorção de água seja resultado da presença da argamassa antiga contida no agregado reciclado.

**Tabela 4.5: Absorção de água dos agregados agraúdos.**

<b>Agregado</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Absorção (%)</b>
<b>Brita natural</b>	2391,74	2400,15	0,35
<b>Brita Grupo 1</b>	2331,04	2460,80	5,27
<b>Brita Grupo 2</b>	2349,13	2480,00	5,27

#### **4.2.4 Abrasão Los Angeles**

A Tabela 4.6 mostra as massas obtidas antes e após o desgaste superficial sofrido pelos agregados graúdos no ensaio de abrasão Los Angeles. Na última coluna encontra-se a porcentagem de perda por abrasão.

**Tabela 4.6: Perda de massa por abrasão dos agregados graúdos.**

<b>Agregado</b>	<b>Massa inicial (g)</b>	<b>Massa final (g)</b>	<b>Perda por abrasão (%)</b>
<b>Brita natural</b>	5000	2447,20	51,0
<b>Brita Grupo 1</b>	5000	2292,85	54,0
<b>Brita Grupo 2</b>	5000	2379,17	52,5

Os resultados encontrados não apresentam diferenças significativas entre si. Apesar da maioria dos trabalhos disponíveis na literatura apresentarem valores superiores de perda por abrasão aos aqui obtidos. Esta semelhança pode ser justificada pelo fato de que os agregados utilizados foram resíduos exclusivamente de concreto, sendo estes mais homogêneos e resistentes do que os agregados reciclados mistos.

#### 4.2.5 Quantidade de argamassa antiga aderida ao agregado reciclado

A Tabela 4.7 apresenta as massas medidas durante o procedimento de quantificação da argamassa antiga aderida ao agregado. A Figura 4.4 mostra os agregados antes e depois do ataque químico.

**Tabela 4.7: Quantidade de argamassa antiga aderida aos agregados reciclados.**

Agregado	Massa antes do ataque (g)	Massa após o ataque (g)	Perda de massa (%)
Grupo 1	100	61,72	38,28
		66,13	33,87
		62,84	37,16
		<b>Média:</b>	<b>36,44</b>
Grupo 2	100	55,20	44,80
		58,39	41,61
		59,14	40,86
		<b>Média:</b>	<b>42,42</b>



**Figura 4.4: Curva granulométrica das britas.**

De acordo com a tabela acima nota-se a grande parcela de argamassa antiga que compõe os agregados reciclados. O Grupo 2, que representa o agregado proveniente de um concreto original com cerca de 40 MPa, apresentou 6,5% mais argamassa antiga do que o Grupo 1 (20 MPa).

#### 4.2.6 Massa específica real e absorção de água do agregado após o ataque ácido

A Tabela 4.8 mostra a massa específica real e a absorção de água dos agregados reciclados após o ataque ácido. A partir da comparação desses resultados com os obtidos para a brita natural, percebe-se que a absorção de água foi em torno de 15% maior, uma vez que a brita natural, conforme já mencionado, obteve absorção de 0,35%. Porém, os resultados de absorção registrados para o agregado reciclado antes do ataque ácido foram 15 vezes maiores do que a brita natural. Desse modo, é possível concluir que a argamassa antiga é a principal e praticamente a única responsável por esse aumento.

Já a massa específica real foi aproximadamente 5% menor para as britas recicladas após o ataque ácido quando comparada ao valor obtido para a brita natural. Como a redução antes do ataque foi de 12% em relação à brita natural, é possível que a redução proporcionada pela argamassa antiga não tenha atingido a magnitude de 12%, e sim, algo em torno de 7%, se descontarmos o fato de que a própria brita natural utilizada no concreto original possui massa específica menor.

Tabela 4.8: Características dos agregados reciclados após o ataque ácido.

Agregado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Grupo 1	2,68	0,40
Grupo 2	2,67	0,38

#### 4.3 Resultados da caracterização do concreto fresco

A Tabela 4.9 mostra os resultados dos ensaios de consistência dos concretos no estado fresco. Nota-se que, quanto maior o percentual de agregados reciclados, mais água foi utilizada na pré-saturação e maior relação a/c total foi atingida, acarretando em concretos mais trabalháveis.

Tabela 4.9: Resultados dos ensaios no estado fresco.

Dosagem	(%) Agregado reciclado	Relação a/c total	Slump test (cm)	Tempo VeBe (s)
1	100	0,623	6,3	4,49
2	100	0,626	6,5	4,29
3	50	0,593	4,5	6,14
4	50	0,595	4,7	6,02
5	30	0,581	3,6	6,72
6	30	0,580	3,7	6,58
7	0	0,560	3,3	6,51

#### 4.4 Resultados da caracterização do concreto endurecido

As resistências à compressão dos corpos de prova estão descritas na Tabela 4.10, assim como suas respectivas médias e desvios-padrão.

A resistência à compressão prevista na dosagem foi de 30 MPa e todos os corpos de prova se aproximaram da resistência requerida. Os corpos de prova com maiores porcentagens de agregados reciclados tiveram uma compensação na quantidade de cimento utilizada, sendo 5% a mais para concretos com 100% de agregados reciclados, 3% para concretos com 50% e 2% para as dosagens contendo 30%. Deste modo, foi possível atingir resistências à compressão semelhantes e tornar este parâmetro não variável, conforme o objetivo inicial da pesquisa. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram as médias das resistências à compressão, plotadas comparando-se os grupos de resistência do concreto original e os percentuais de agregados reciclados empregados.

Tabela 4.10: Resultados da resistência à compressão.

Corpos de prova	Compressão			
	Carga (kN)	$f_{cm}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio- Padrão (MPa)
CP1 1-20-0-30	239,87	30,6	31,2	0,84
CP2 1-20-0-30	252,13	32,1		
CP3 1-20-0-30	241,75	30,8		
CP1 1-20-0-50	253,85	32,3	31,3	2,85
CP2 1-20-0-50	262,33	33,4		
CP3 1-20-0-50	220,06	28,0		
CP1 1-20-0-100	239,08	30,5	30,5	0,20
CP2 1-20-0-100	238,12	30,3		
CP3 1-20-0-100	241,26	30,7		
CP1 2-40-0-30	235,08	29,9	31,2	1,10
CP2 2-40-0-30	251,92	32,1		
CP3 2-40-0-30	246,86	31,4		
CP1 2-40-0-50	259,79	33,1	32,0	1,15
CP2 2-40-0-50	250,95	32,0		
CP3 2-40-0-50	241,74	30,8		
CP1 2-40-0-100	245,13	31,2	30,9	0,32
CP2 2-40-0-100	240,17	30,6		
CP3 2-40-0-100	241,62	30,8		
CP1 4-0-0	266,33	33,9	31,7	2,44
CP2 4-0-0	250,92	32,0		
CP3 4-0-0	228,18	29,1		

O estudo estatístico realizado para análise das médias foi o Teste de Ducan que classificou as resistências estatisticamente iguais entre si para um nível de significância de 5%. Desse modo, concluiu-se que utilizando pequenas alterações no método de dosagem foi possível atingir resistências à compressão comparáveis entre concretos com agregados reciclados e o concreto de referência.

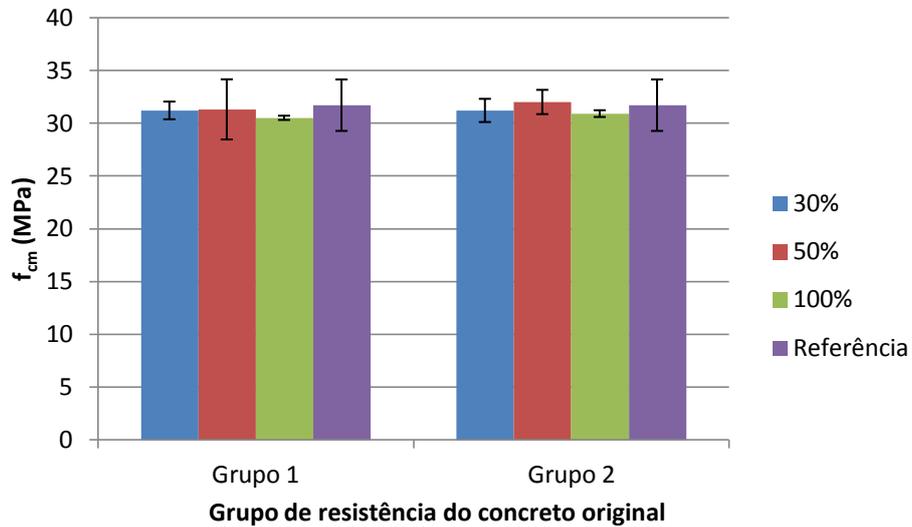


Figura 4.5: Resultados de resistência à compressão comparando-se as porcentagens de agregados reciclados.

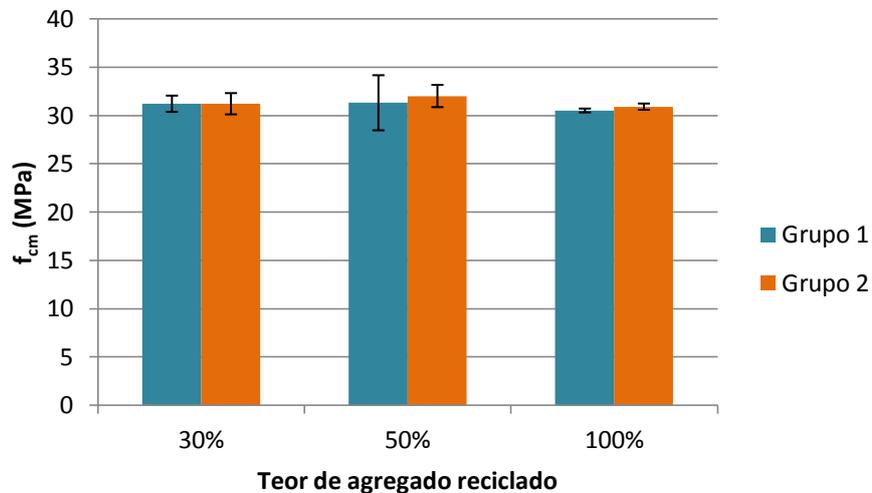


Figura 4.6: Resultados de resistência à compressão comparando-se os grupos de resistências do concreto original.

A Tabela 4.11 apresenta as resistências à tração indireta dos corpos de prova, além de suas médias e desvios-padrão. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram os gráficos desta propriedade.

Tabela 4.11: Resultados da resistência à tração indireta.

Corpos de prova	Tração indireta			
	Carga (kN)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio- Padrão (MPa)
CP1 1-20-0-30	92,28	2,74	2,81	0,07
CP2 1-20-0-30	94,32	2,87		
CP3 1-20-0-30	91,44	2,81		
CP1 1-20-0-50	89,38	2,85	2,74	0,10
CP2 1-20-0-50	86,06	2,74		
CP3 1-20-0-50	82,91	2,64		
CP1 1-20-0-100	72,43	2,31	2,37	0,08
CP2 1-20-0-100	73,75	2,35		
CP3 1-20-0-100	77,05	2,45		
CP1 2-40-0-30	82,13	2,61	2,52	0,08
CP2 2-40-0-30	78,23	2,49		
CP3 2-40-0-30	77,27	2,46		
CP1 2-40-0-50	84,26	2,68	2,78	0,09
CP2 2-40-0-50	90,12	2,87		
CP3 2-40-0-50	87,68	2,79		
CP1 2-40-0-100	75,17	2,39	2,48	0,12
CP2 2-40-0-100	76,25	2,43		
CP3 2-40-0-100	82,18	2,62		
CP1 4-0-0	109,78	3,49	3,26	0,42
CP2 4-0-0	110,15	3,51		
CP3 4-0-0	87,37	2,78		

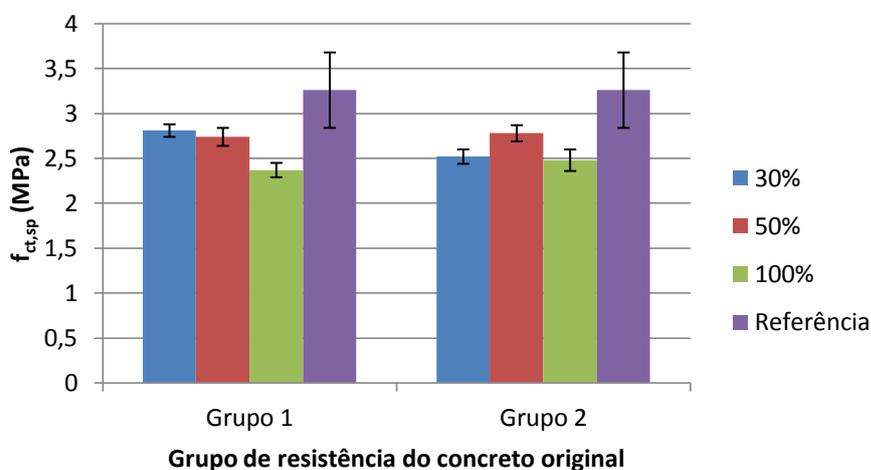
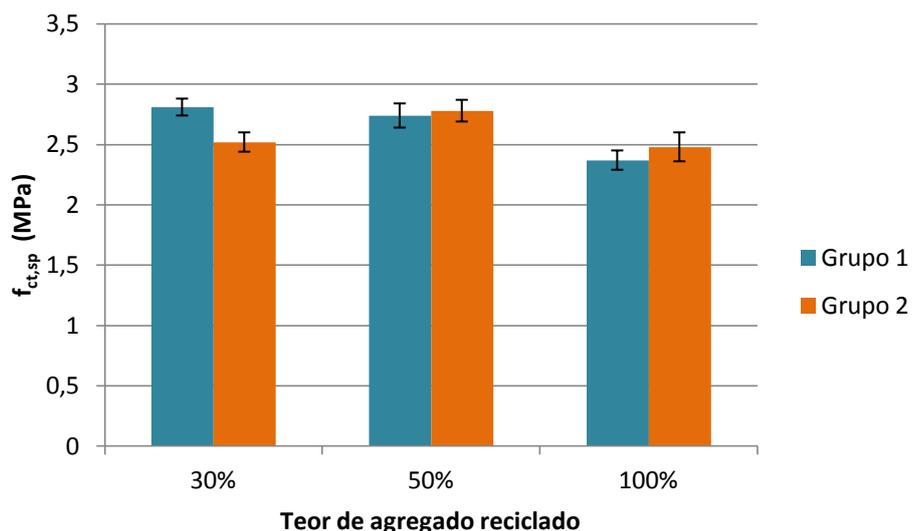


Figura 4.7: Resultados de resistência à tração indireta comparando-se as percentagens de agregados reciclados.



**Figura 4.8: Resultados da resistência à tração indireta comparando-se os grupos de resistências do concreto original.**

O estudo estatístico feito pelo Teste de Duncan ao nível de 5% de significância mostrou que as médias da resistência à tração indireta de todos os concretos produzidos com agregados reciclados são estatisticamente iguais entre si. Porém, a resistência atingida pelo concreto de referência é superior em termos estatísticos e, portanto, difere das demais. Com isso, é possível concluir que a resistência à tração é mais influenciada pela presença do agregado reciclado do que a resistência à compressão. O fato de que essa propriedade está diretamente relacionada com a resistência da zona de transição explica a maior influência do agregado reciclado neste parâmetro. Isto porque o concreto com agregados reciclados possui duas zonas de transição, conforme já mencionado, sendo mais suscetível a redução de determinadas propriedades.

Outra questão a se destacar é a independência da porcentagem de agregado reciclado na resistência à tração indireta. Concretos com maiores teores de agregados reciclados apresentaram menores resistências à tração indireta, exceto o concreto CPx 2-40-0-50; porém, essas diferenças não são estatisticamente significativas.

Uma vez que as médias dos valores obtidos para os diferentes concretos com agregados reciclados foram iguais entre si, calculou-se a média

entre eles, obtendo-se o valor de 2,62 MPa. Desta forma, comparando-se este valor com a resistência do concreto de referência, verifica-se redução média de 20% desta propriedade para os concretos com agregados reciclados. Porém, é importante comentar que este ensaio é prematuro e essa propriedade deve ser melhor avaliada.

O mesmo comportamento foi observado para a resistência à tração na flexão, conforme a Tabela 4.12.

**Tabela 4.12: Resultados da resistência à tração na flexão.**

Corpos de prova	Tração na flexão			
	Carga (Kn)	$f_{ct,f}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)
CP1 1-20-0-30	21,8	2,91	2,94	0,38
CP2 1-20-0-30	19,37	2,58		
CP3 1-20-0-30	25,07	3,34		
CP1 1-20-0-50	21,92	2,92	2,90	0,06
CP2 1-20-0-50	22,04	2,94		
CP3 1-20-0-50	21,19	2,83		
CP1 1-20-0-100	19,13	2,55	2,55	0,02
CP2 1-20-0-100	19,25	2,57		
CP3 1-20-0-100	19,01	2,53		
CP1 2-40-0-30	22,52	3,00	2,76	0,22
CP2 2-40-0-30	19,25	2,57		
CP3 2-40-0-30	20,34	2,71		
CP1 2-40-0-50	23,49	3,13	3,09	0,04
CP2 2-40-0-50	22,87	3,05		
CP3 2-40-0-50	23,25	3,10		
CP1 2-40-0-100	22,4	2,99	2,65	0,29
CP2 2-40-0-100	18,89	2,52		
CP3 2-40-0-100	18,4	2,45		
CP1 4-0-0	25,67	3,42	3,67	0,22
CP2 4-0-0	28,82	3,84		
CP3 4-0-0	28,17	3,76		

O estudo estatístico mostrou que os concretos com agregados reciclados obtiveram médias iguais entre si, sendo inferiores ao valor registrado para o concreto de referência.

Neste caso, a média das resistências à tração na flexão dos concretos reciclados foi de 2,81 MPa, o que resultou numa redução média de 23% para esta propriedade. As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam os resultados da resistência à tração na flexão dos concretos.

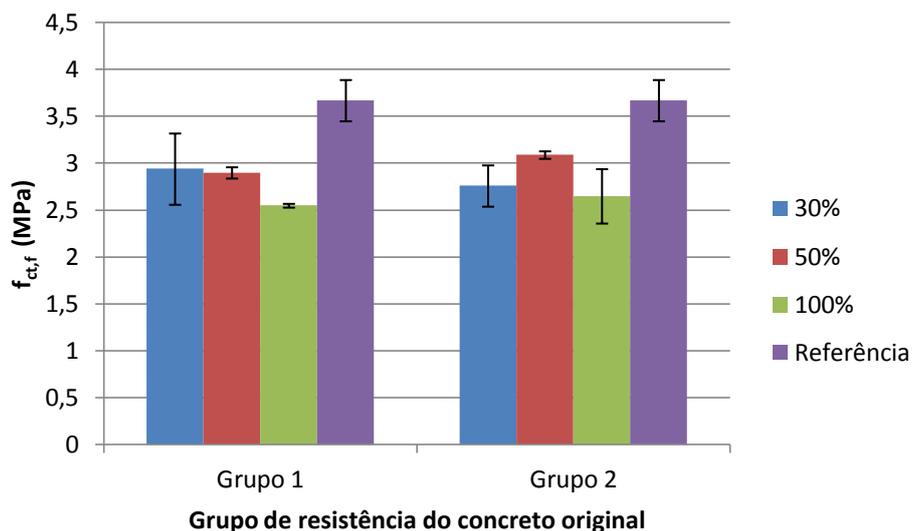


Figura 4.9: Resultados da resistência à tração na flexão comparando-se as porcentagens de agregados reciclados.

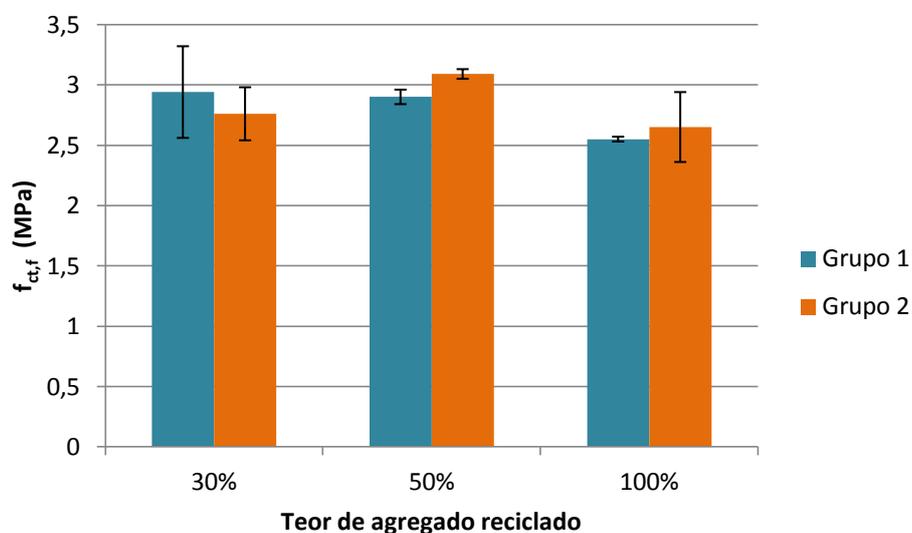


Figura 4.10: Resultados da resistência à tração na flexão comparando-se os grupos de resistência do concreto original.

Por fim, os resultados dos ensaios de absorção de água e massa específica real dos concretos estão na Tabela 4.13. Para esses ensaios físicos utilizou-se apenas um corpo de prova de cada dosagem.

Os valores de absorção de água encontrados para os concretos com agregados reciclados foram cerca de 30% maior do que o valor obtido para o concreto de referência.

Tabela 4.13: Resultados da absorção de água e da massa específica real.

Dosagem	% Agregado reciclado	Resistência do concreto original	Absorção de água (%)	Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )
1	100	40	5,46	2,79
2	100	20	6,02	2,86
3	50	40	5,17	2,91
4	50	20	5,82	2,75
5	30	40	5,38	2,97
6	30	20	4,71	2,79
7	0	-	4,66	2,93

É possível notar que, o fato de os agregados reciclados apresentarem maior absorção de água do que o natural surtiu efeito significativo nos concretos produzidos a partir deles.

Os resultados de massa específica real não diferiram muito entre si, uma vez que as dosagens continham diferentes quantidades de cada material, considerando justamente as diferenças na massa específica real dos agregados empregados.

#### 4.5 Resultados dos ensaios *push-off*

Neste item estão descritos os resultados dos ensaios *push-off* para a Série 4 (referência) de corpos de prova estudados. Os demais resultados estão descritos de forma detalhada no Anexo ao final deste trabalho. Dentro de cada série têm-se os resultados separados para cada corpo de prova que constituía a série, com fotos que apresentam a configuração dos mesmos durante e depois dos ensaios. Além disso, apresentam-se as tabelas e gráficos gerados a partir dos resultados.

O cálculo da resistência ao cisalhamento foi feito dividindo-se a carga máxima registrada pela área do plano de cisalhamento dos corpos de prova.

Para os corpos de prova sem armadura transversal, os valores dos deslocamentos horizontal e vertical dos corpos de prova foram denominados x e y, respectivamente, pois a ausência dos estribos não permite o efeito de deslizamento e separação das faces, e portanto, criou-se variáveis diferentes das padronizadas para este comportamento. Para os corpos de prova com

estribos, esses valores foram denominados  $w$  e  $s$ , já padronizados, pois tratam do deslizamento e da separação das faces do concreto.

#### 4.5.1 Resultados dos corpos de prova da Série 4

- **CPx 4-0-0**

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os corpos de prova durante e depois dos ensaios, respectivamente.

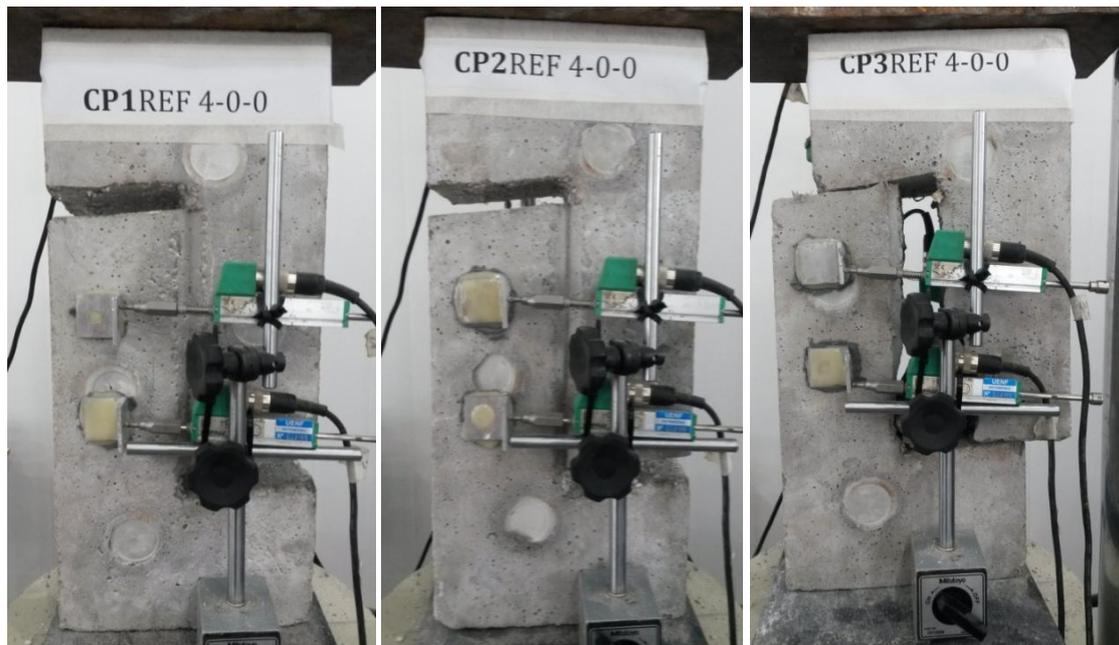


Figura 4.11: Corpos de prova CPx 4-0-0 no momento do ensaio *push-off*.



Figura 4.12: Corpos de prova CPx 4-0-0 após o ensaio *push-off*.

A Tabela 4.14 mostra os resultados dos corpos de prova e a Figura 4.13 apresenta os gráficos gerados a partir dos mesmos.

Tabela 4.14: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 4-0-0.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 4-0-0	102,71	5,43	0,171	0,332	0,549
CP2 4-0-0	84,05	4,45	0,140	0,381	0,507
CP3 4-0-0	108,64	5,75	0,181	0,351	0,536

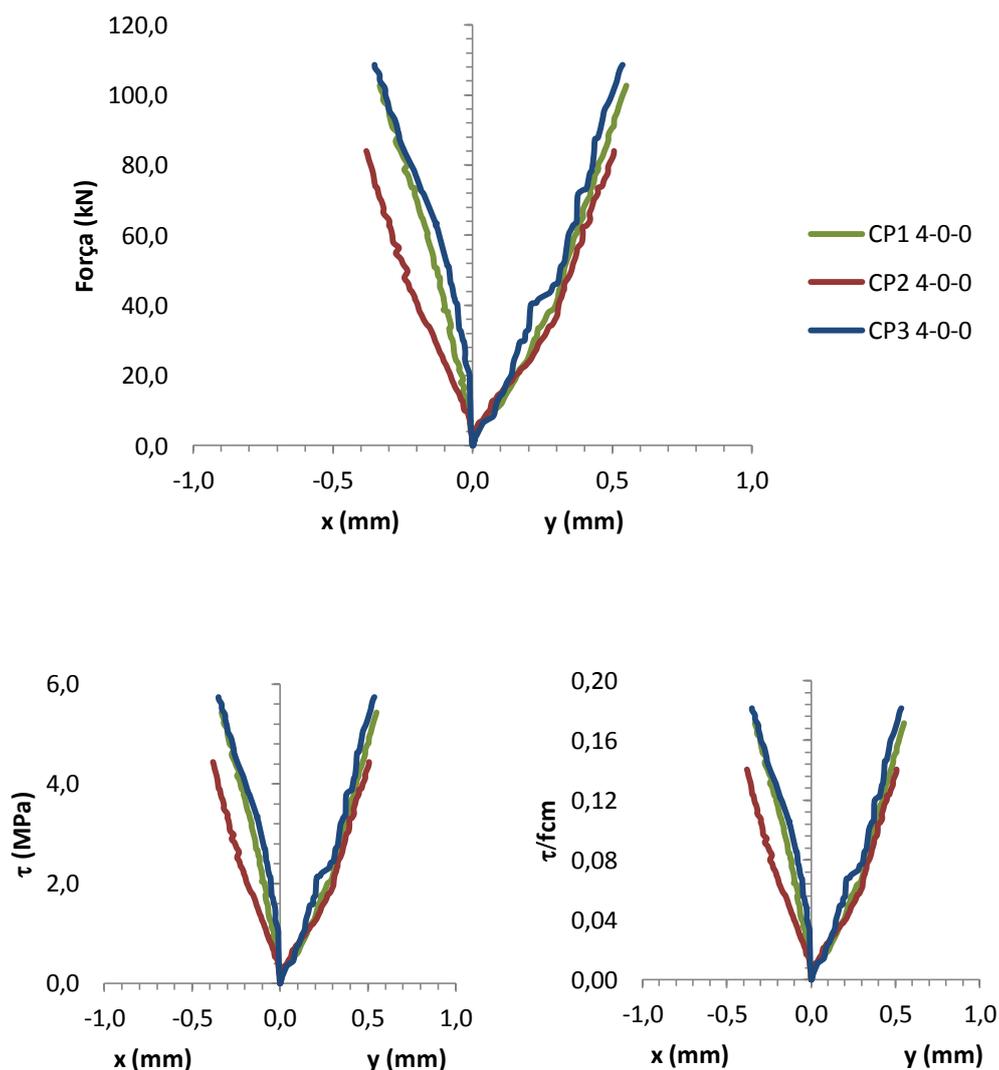


Figura 4.13: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 4-0-0.

- CPx 4-2-0

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os corpos de prova durante os ensaios e o padrão de ruptura após os mesmos, respectivamente.

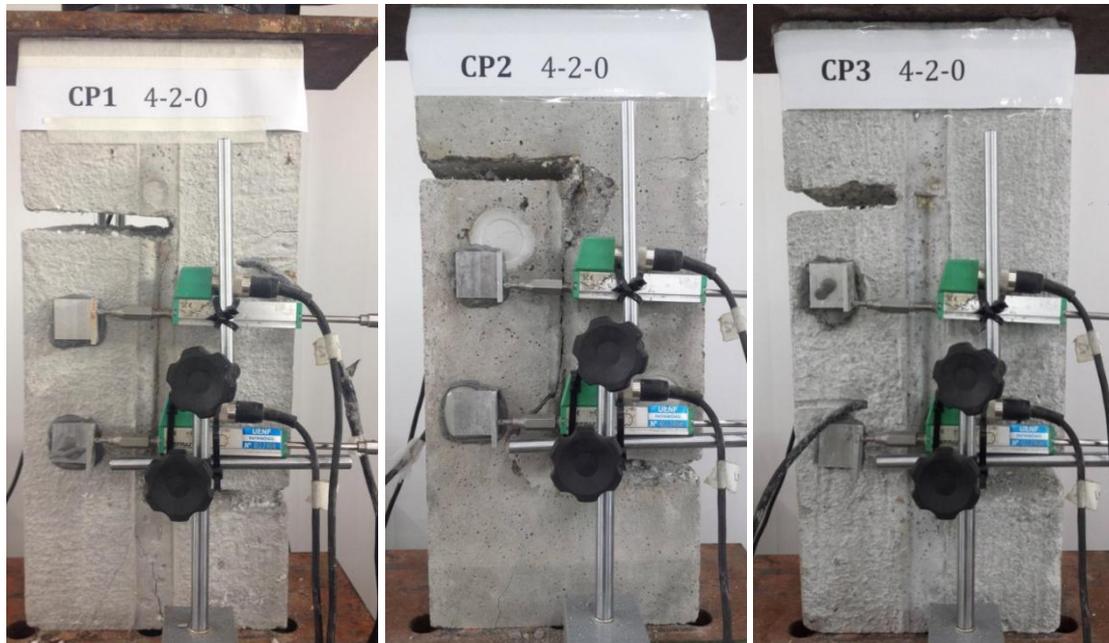


Figura 4.14: Corpos de prova CPx 4-2-0 no momento do ensaio *push-off*.



Figura 4.15: Corpos de prova CPx 4-2-0 após o ensaio *push-off*.

A Tabela 4.15 mostra os resultados obtidos para os três corpos de prova. Na Figura 4.16 estão os gráficos gerados a partir dos valores obtidos.

Tabela 4.15: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 4-2-0.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	w (mm)	s (mm)
CP1 4-2-0	147,03	7,78	0,245	2,140	2,479
CP2 4-2-0	153,09	8,10	0,255	1,767	1,866
CP3 4-2-0	138,07	7,31	0,230	1,740	1,985

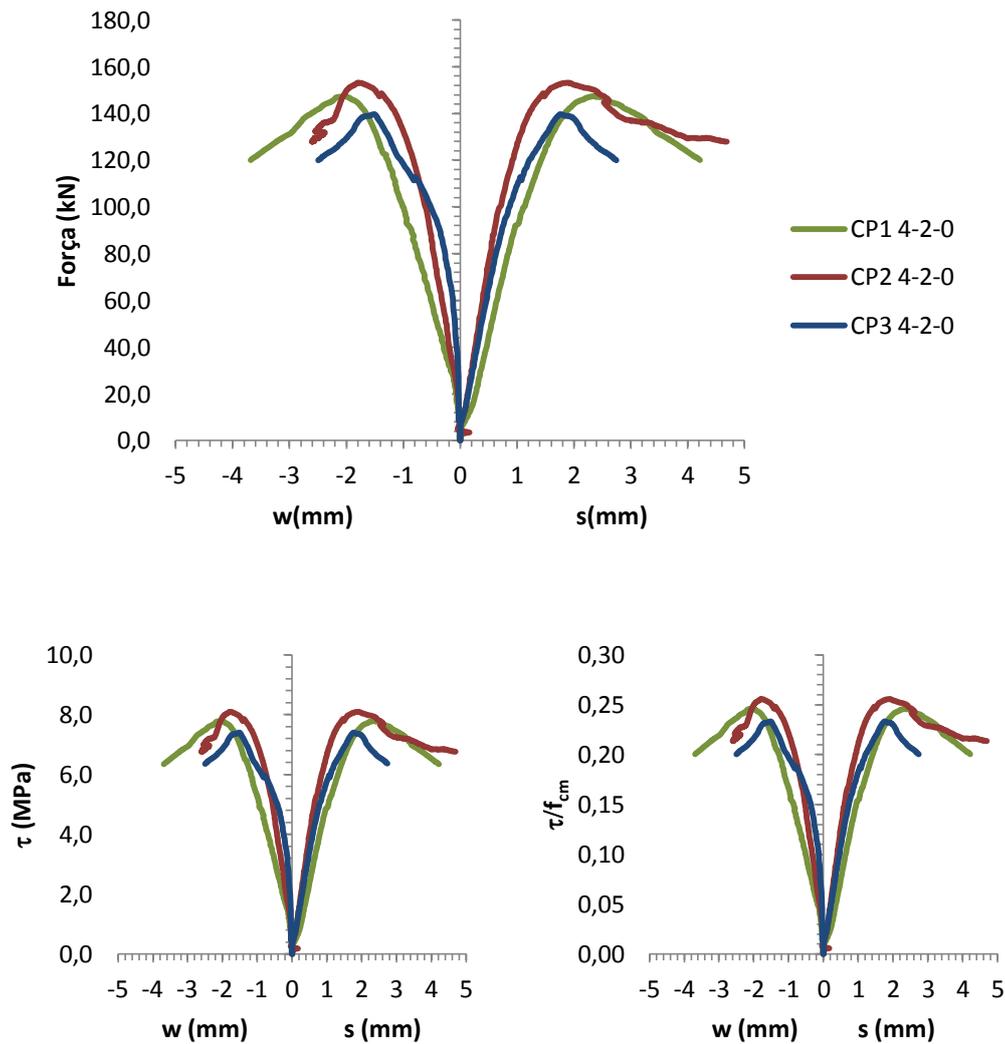


Figura 4.16: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 4-2-0.

#### 4.6 Comportamento da armadura transversal

Nos corpos de prova CPx 3-40-3-50 e CPx 4-2-0 foram colocados *strain gages* para medir a deformação da armadura transversal. Após os ensaios, verificou-se que as leituras de dois *strain gages* foram incompatíveis com as demais, caracterizando a perda dos dados. Isso ocorreu em um corpo de prova de cada série.

As curvas geradas para os demais corpos de prova estão nas Figuras 4.17 e 4.18. A partir dos gráficos, nota-se que a armadura transversal não escoou em nenhum dos casos, uma vez que sua deformação não ultrapassou o valor de 4,3‰.

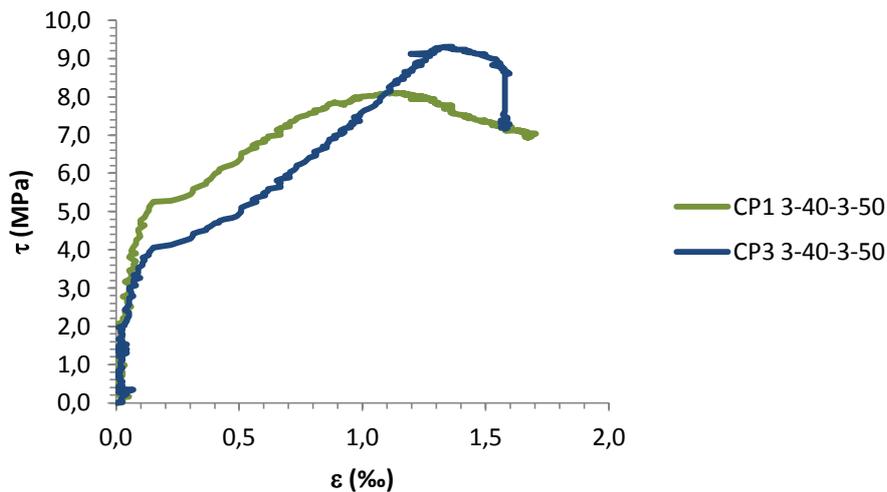


Figura 4.17: Gráfico tensão cisalhante versus deformação dos estribos para o CPx 3-40-3-50.

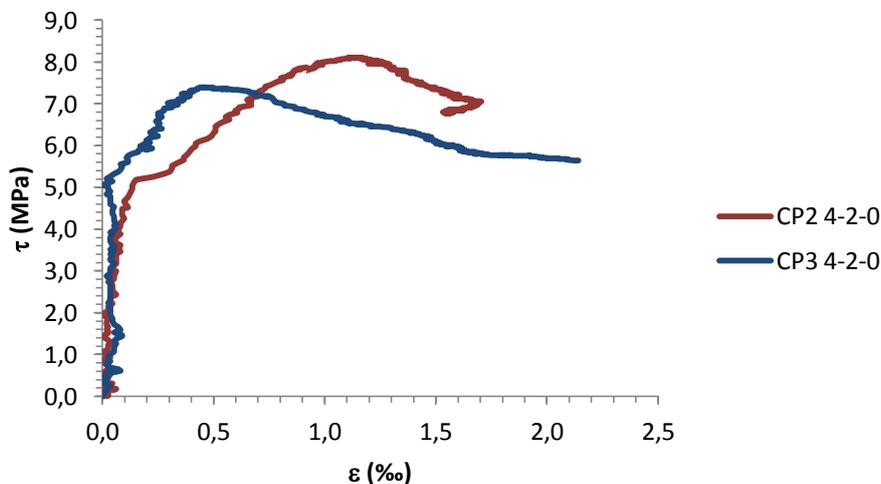


Figura 4.18: Gráfico tensão cisalhante versus deformação dos estribos para o CPx 4-2-0.

#### 4.7 Discussão dos resultados dos ensaios *push-off*

Os resultados da tensão máxima de cisalhamento apresentados anteriormente estão resumidos na Tabela 4.16, com suas respectivas médias e desvios-padrão. A influência de cada variável envolvida na pesquisa será discutida separadamente nos próximos itens, com base nos resultados desta tabela.

**Tabela 4.16: Resumo dos resultados dos ensaios *push-off*.**

Corpos de prova	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	Média (MPa)	Desvio- Padrão (MPa)
CP1 1-20-0-30	4,41	4,29	0,18
CP2 1-20-0-30	4,08		
CP3 1-20-0-30	4,38		
CP1 1-20-0-50	3,47	3,51	0,05
CP2 1-20-0-50	3,5		
CP3 1-20-0-50	3,57		
CP1 1-20-0-100	3,18	3,21	0,24
CP2 1-20-0-100	2,99		
CP3 1-20-0-100	3,46		
CP1 2-40-0-30	4,5	4,90	0,35
CP2 2-40-0-30	5,04		
CP3 2-40-0-30	5,16		
CP1 2-40-0-50	5,52	5,13	0,61
CP2 2-40-0-50	5,45		
CP3 2-40-0-50	4,43		
CP1 2-40-0-100	5,04	4,73	0,43
CP2 2-40-0-100	4,24		
CP3 2-40-0-100	4,91		
CP1 3-40-2-50	6,44	6,69	0,23
CP2 3-40-2-50	6,72		
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	5,46	5,22	0,68
CP2 4-0-0	4,46		
CP3 4-0-0	5,75		
CP1 4-2-0	7,8	7,76	0,36
CP2 4-2-0	8,1		
CP3 4-2-0	7,38		

#### 4.7.1 Influência da presença e da porcentagem de agregados reciclados empregados em concretos sem armadura transversal

A avaliação da influência da presença do agregado reciclado e da porcentagem do mesmo em concretos sem armadura transversal pode ser feita segundo a Figura 4.19. Neste gráfico estão os resultados para todos os concretos sem armadura transversal, separados de acordo com os grupos de resistência do concreto original.

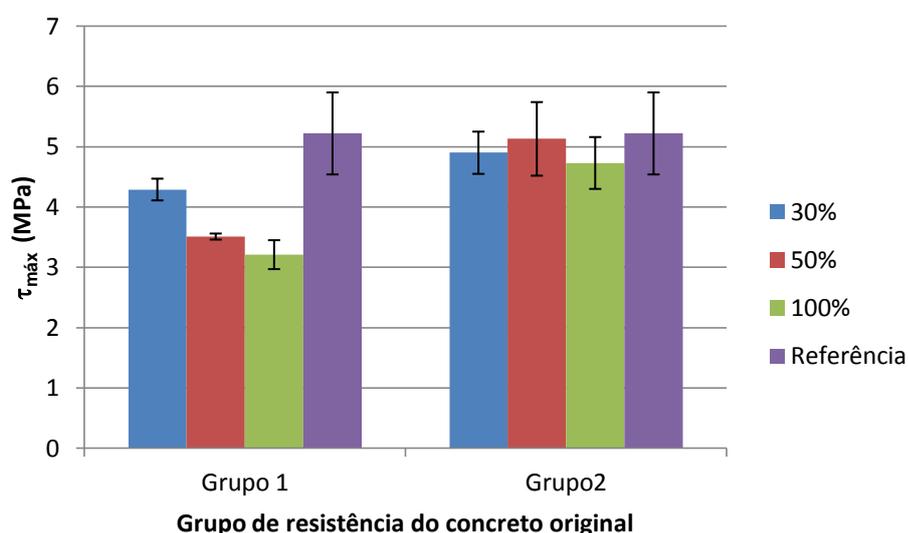


Figura 4.19: Influência da porcentagem de agregados reciclados na resistência ao cisalhamento.

Desta forma, observando-se as colunas da esquerda é possível analisar internamente os resultados da Série 1. Para esta série, cuja resistência do concreto original era cerca de 20 MPa (Grupo 1), observou-se determinada influência da porcentagem de substituição do agregado natural pelo reciclado, de modo que, quanto maior essa porcentagem, menor a resistência ao cisalhamento dos concretos. A redução da resistência ao cisalhamento para concretos com 50% de agregados reciclados em relação aos concretos com 30% foi de 18%, enquanto que a redução dos concretos com 100% em relação aos com 50% foi de 8,5%. Sendo assim, é possível concluir que, para os corpos de prova com agregado reciclado de menor resistência do concreto original, a influência do percentual de agregados reciclados é mais significativa até o teor de 50%. A partir deste valor, ainda é possível notar redução na propriedade avaliada, porém esta redução tem menor intensidade.

Ainda observando-se as colunas da esquerda, pode-se analisar a presença dos agregados reciclados do Grupo 1 em concretos sem armadura transversal quando comparados com o concreto de referência. Os resultados mostram que houve significativa diminuição da resistência ao cisalhamento para todas as porcentagens empregadas, sendo esta redução de 18% para o concreto com 30% de agregados reciclados, 33% para o concreto com 50% e 38,5% para o com 100%.

O estudo estatístico realizado por meio do Teste de Duncan ao nível de 5% de significância apontou que as médias dos corpos de prova com 50% e 100% de agregados reciclados dentro da Série 1 são iguais entre si. Este resultado confirma que a influência da porcentagem dos agregados reciclados é mais significativa até o teor de 50%, e que a partir deste valor qualquer que seja a porcentagem empregada, estatisticamente, a resistência ao cisalhamento é a mesma. Além disso, a análise mostrou que todas as médias dos concretos com agregados reciclados, independentemente da porcentagem utilizada, são diferentes da média do concreto de referência, comprovando que, quando o agregado reciclado foi proveniente de um concreto original de até 20 MPa, houve efeitos negativos para a resistência ao cisalhamento.

Ainda na Figura 4.19, observando-se as colunas da direita, tem-se os resultados dos corpos de prova da Série 2, cuja resistência do concreto original foi cerca de 40 MPa (Grupo 2). Ao analisar esses resultados entre si, é possível notar que a influência da porcentagem de agregados reciclados utilizados não seguiu o mesmo comportamento da Série 1.

Apesar dos valores das médias apontarem para uma pequena redução, ao considerar-se os desvios-padrão e outros parâmetros estatísticos, o estudo mostrou que todas as médias dos concretos da Série 2 são iguais entre si e iguais ao concreto de referência. Deste modo é possível inferir que, para os concretos da Série 2, quando se utilizou um agregado reciclado proveniente de um concreto original de 40 MPa, estatisticamente, nenhuma diferença foi registrada, independentemente da presença do agregado reciclado e da porcentagem utilizada.

Esses resultados podem ser explicados por meio do mecanismo de engrenamento entre os agregados, que embora não seja tão eficiente na ausência de estribos, ainda é um importante componente na transferência de

tensões de cisalhamento. Os corpos de prova produzidos com agregados provenientes de concretos do Grupo 1 apresentaram maiores efeitos no engrenamento desses agregados. Quanto maior a porcentagem de agregado reciclado utilizada, menos efetivo foi o mecanismo, o que acarretou na redução da resistência ao cisalhamento. Já os corpos de prova produzidos com agregados provenientes de concretos do Grupo 2, não apresentaram redução na eficiência do mecanismo de engrenamento, independentemente da porcentagem empregada. As diferenças existentes entre esses dois grupos de resistências estão discutidas no próximo item, que avalia a influência deste parâmetro.

#### **4.7.2 Influência da resistência do concreto original na resistência ao cisalhamento**

A Figura 4.20 mostra o gráfico comparativo entre as resistências do concreto original para cada porcentagem de agregado reciclado empregada. Esses resultados mostram a influência da resistência do concreto original na resistência ao cisalhamento dos concretos sem armadura transversal.

Analisando-se as colunas referentes à porcentagem de 30% de substituição, percebe-se uma aparente redução no valor da média quando um concreto de resistência original inferior foi utilizado, sendo esta redução de 12,5%. Apesar disso, o resultado do teste estatístico aponta que as médias desses dois concretos são iguais entre si, mostrando que para a porcentagem de 30% não se notou influência significativa da resistência do concreto original.

Ao observar as colunas do meio, relacionadas com 50% de substituição do agregado natural pelo reciclado, nota-se maior diferença entre os resultados. A redução quando se utilizou a resistência do concreto original inferior foi de 31,6% e os resultados estatísticos comprovaram que as médias de ambos os concretos são realmente diferentes entre si. Então, pode-se concluir que, para a porcentagem de 50% de agregado reciclado, a resistência do concreto original se mostrou uma variável bastante influente.

Por fim, observando-se as colunas referentes a 100% de agregado reciclado, a mesma diferença para a porcentagem anterior pôde ser notada. A redução para agregado proveniente do concreto de resistência inferior foi de 32,1% e o estudo estatístico também registrou médias diferentes entre esses

dois concretos, comprovando a influência da resistência original para o teor de 100% de agregado reciclado.

A análise estatística também mostrou que a média do concreto com 100% de agregado reciclado e resistência original de 40 MPa é igual a média do concreto com 30% de agregado reciclado e resistência original de 20 MPa. Esse resultado evidencia, mais uma vez, a influência da resistência do concreto original na resistência máxima ao cisalhamento dos concretos com porcentagens superiores a 30% de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Logo, conclui-se que o engrenamento entre os agregados foi realmente mais eficiente nos corpos de prova com agregado proveniente dos concretos do Grupo 2. Neste grupo, as fissuras tiveram maior tendência a contornar o agregado, tornando a superfície da interface formada mais rugosa, com maior contato entre os agregados e maior mecanismo de engrenamento. Este comportamento foi confirmado após a discussão dos resultados da análise de rugosidade das superfícies de ruptura.

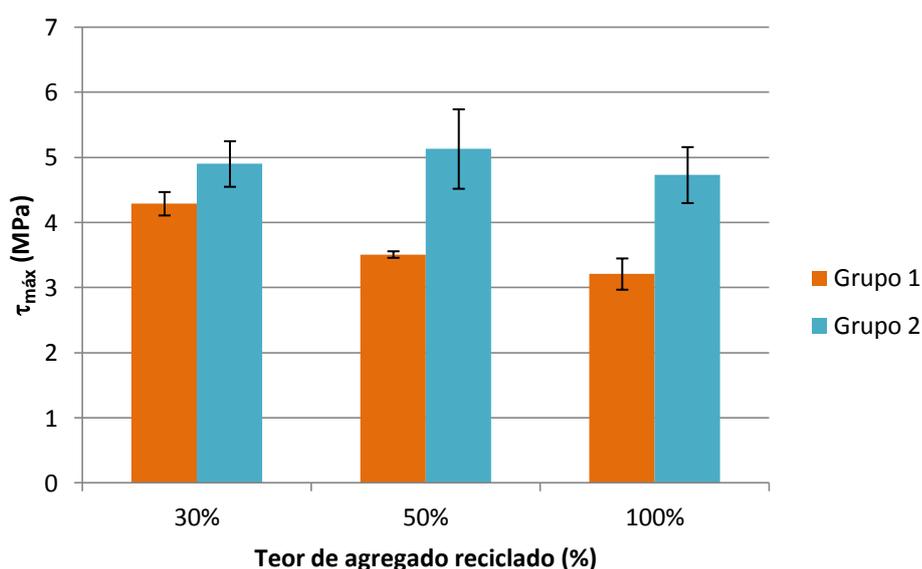


Figura 4.20: Influência da resistência do concreto original na resistência ao cisalhamento.

#### 4.7.3 Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal

A Figura 4.21 mostra os resultados dos concretos da Série 3 com 2 estribos e da Série 4, de referência, com a mesma quantidade de estribos, a fim de se determinar a influência do agregado reciclado em concretos com

armadura transversal. Porém, foram plotadas apenas as curvas dos corpos de prova que resultaram nos valores intermediários de resistência ao cisalhamento, ou seja, não se utilizaram as curvas com os menores e maiores valores, uma vez que não foi possível gerar uma curva média entre as três registradas para cada tipo de corpo de prova, devido à falta de compatibilização entre os tempos registrados pela máquina de ensaios.

Deste modo, para mesma taxa de armadura, a redução quando se utilizou 50% de agregado reciclado com resistência do concreto original de 40 MPa foi de 13,8% em relação ao concreto com agregado natural. O estudo estatístico feito pelo Teste de Duncan ao nível de 5% de significância mostrou que ambas as médias não são iguais entre si, indicando, portanto, influência do agregado reciclado para a taxa de armadura transversal empregada.

Esses resultados conflitam com aqueles obtidos pelo concreto sem armadura transversal, pois nenhuma diferença estatística foi registrada para esta porcentagem de agregado reciclado e resistência do concreto original. Porém, este comportamento pode ser explicado baseando-se, mais uma vez, no mecanismo de engrenamento entre os agregados, que se mostra muito mais atuante na presença de armadura transversal.

Os estribos, devido ao maior confinamento proporcionado, aumentam a pressão de contato entre as faces do concreto, que tendem a se separar quando submetidas a efeitos cisalhantes; e essa maior pressão de contato aumenta o mecanismo de engrenamento entre os agregados. Uma vez que o agregado reciclado possui argamassa antiga aderida à superfície, formando duas zonas de transição e prejudicando suas propriedades mecânicas, o engrenamento entre esses agregados, apesar de se mostrar eficiente quando nenhum estribo é utilizado, não possui o mesmo comportamento na presença de estribos, afetando a resistência ao cisalhamento dos concretos.

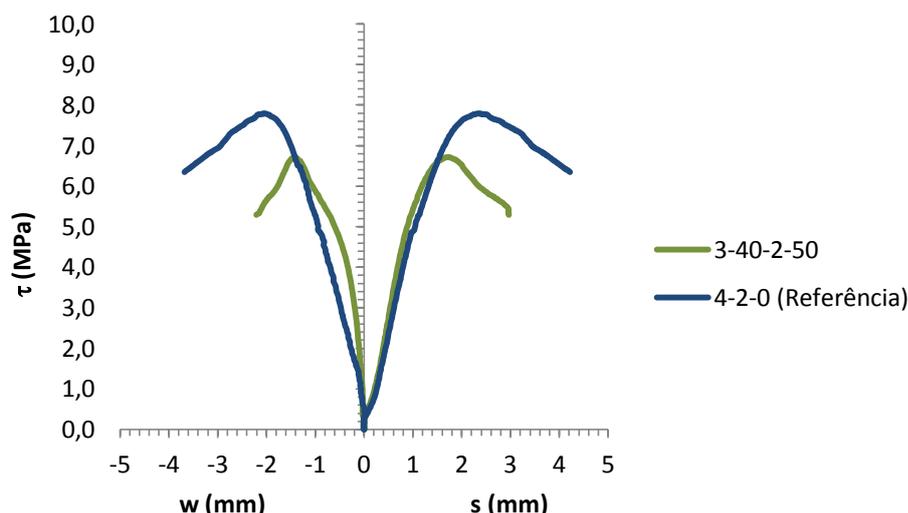


Figura 4.21: Influência do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento de concretos com armadura transversal.

#### 4.7.4 Influência da taxa de armadura transversal

A Figura 4.22 mostra os resultados dos corpos de prova com 50% de agregado reciclado, com resistência do concreto original de 40 MPa (Grupo 2) e com diferentes tensões de confinamento, sendo estas de 4,79 MPa para concretos com dois estribos e 7,64 MPa para concretos com três estribos. Foram analisadas as curvas intermediárias, assim como no item anterior.

É de se notar a influência da taxa de armadura transversal nos concretos com agregado reciclado, pois a maior tensão de confinamento proporcionada pelos estribos permite maior efeito de pino, que contribui para melhor eficiência do engrenamento entre os agregados. Dessa forma, o 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.

O estudo estatístico mostrou que as médias são diferentes, evidenciando a influência da taxa de armadura transversal. Este comportamento está de acordo com outros trabalhos da literatura como, por exemplo, os de Fonteboa *et al.* (2010) e Xiao *et al.* (2012).

A análise estatística mostrou que a média dos corpos de prova com dois estribos e com agregado natural é igual à média dos corpos de prova com três estribos e 50% de agregado reciclado. Essa semelhança entre os valores de ambos pode ser vista na Figura 4.23. Este fato observado torna-se interessante

no que se refere à viabilidade da utilização do concreto com agregado reciclado, uma vez que destaca a maior necessidade de armadura transversal para este concreto quando se deseja atingir comportamento semelhante ao concreto convencional.

Outro ponto importante a ser discutido trata-se do tipo de ruptura apresentado pelos corpos de prova. Nota-se que quando nenhuma taxa de armadura transversal foi empregada, a curva apresenta apenas um ramo ascendente, atingindo uma determinada tensão máxima que se iguala a tensão última. Este comportamento é típico de rupturas frágeis, onde a ausência do aço não permite há existência de maiores deformações. Já nas curvas pertencentes a corpos de prova com estribos, nota-se a presença de um ramo descendente. Este ramo se desenvolve logo após se atingir a tensão máxima e se estende horizontalmente caracterizando maiores valores de deformação. No fim, a tensão última é atingida e só então o material chega à ruptura, que neste caso, se apresenta como dúctil.

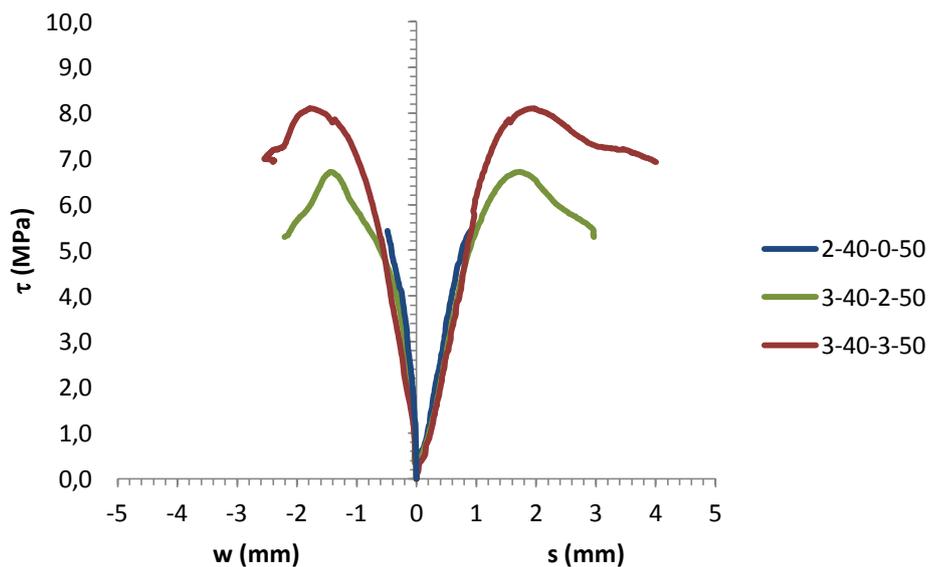


Figura 4.22: Influência da taxa de armadura transversal na resistência ao cisalhamento.

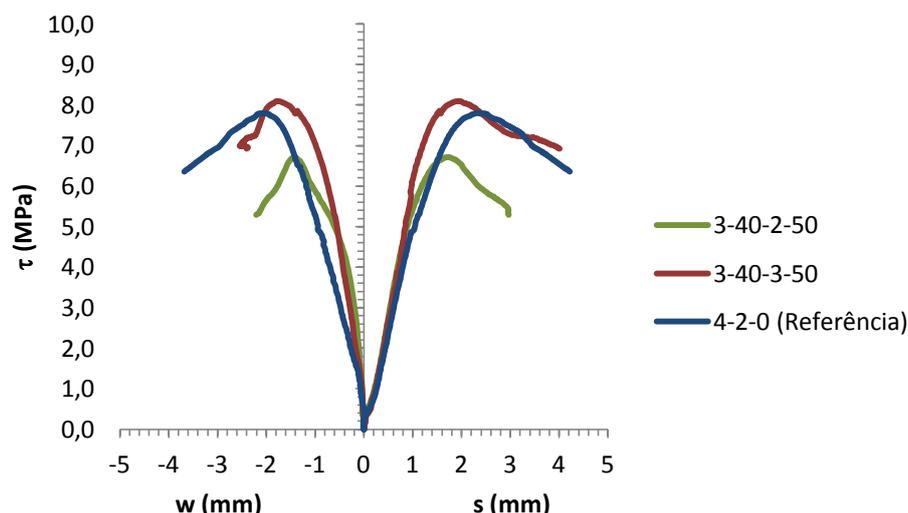


Figura 4.23: Comparação da resistência ao cisalhamento entre os corpos de prova com diferentes taxas de armadura transversal.

#### 4.7.5 Comparação dos resultados experimentais com os calculados por equações propostas por diferentes autores

Para a comparação dos resultados experimentais dos corpos de prova sem armadura transversal foram utilizadas as equações apresentadas por Mattock (1974) e Mattock (1988) citadas na Tabela 2.4 do Capítulo 2, pois apenas estas levam em consideração a coesão do concreto. Os resultados experimentais e os calculados estão apresentados na Tabela 4.17.

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	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)			Relação $\tau_{\text{máxexp}} / \tau_{\text{máxcal}}$	
	Mattock (1974)	Mattock (1988)	Experimental	Mattock (1974)	Mattock (1988)
1-20-0-30	1,48	1,61	4,26	2,87	2,64
1-20-0-50	1,48	1,61	3,49	2,36	2,17
1-20-0-100	1,48	1,59	3,21	2,16	2,02
2-40-0-30	1,48	1,61	4,89	3,30	3,04
2-40-0-50	1,48	1,63	5,09	3,44	3,12
2-40-0-100	1,48	1,60	4,73	3,19	2,95
4-0-0	1,48	1,62	5,21	3,52	3,21

A coluna referente à Mattock (1974) possui valores constantes, pois é independente das propriedades mecânicas do concreto e possui valor fixo de 28 kN para qualquer corpo de prova, uma vez que o coeficiente  $K_1$  adotado foi o referente a concreto convencional. Já Mattock (1988) possui valores muito próximos, pois é dependente da resistência à compressão do concreto e esta

propriedade foi mantida praticamente constante neste estudo (cerca de 30 MPa).

É possível notar que, embora as equações tenham sido elaboradas para concretos convencionais, ambas mostraram-se conservadoras também para concretos com agregado reciclado. As duas últimas colunas mostram a relação entre os valores experimentais e os calculados. Os valores experimentais foram o dobro ou o triplo dos calculados, dependendo da porcentagem de agregado reciclado empregada.

Os resultados encontrados nos ensaios experimentais para os corpos de prova com armadura transversal foram comparados com os obtidos a partir das equações presentes na Tabela 2.4 do Capítulo 2, conforme mostra a Figura 4.24.

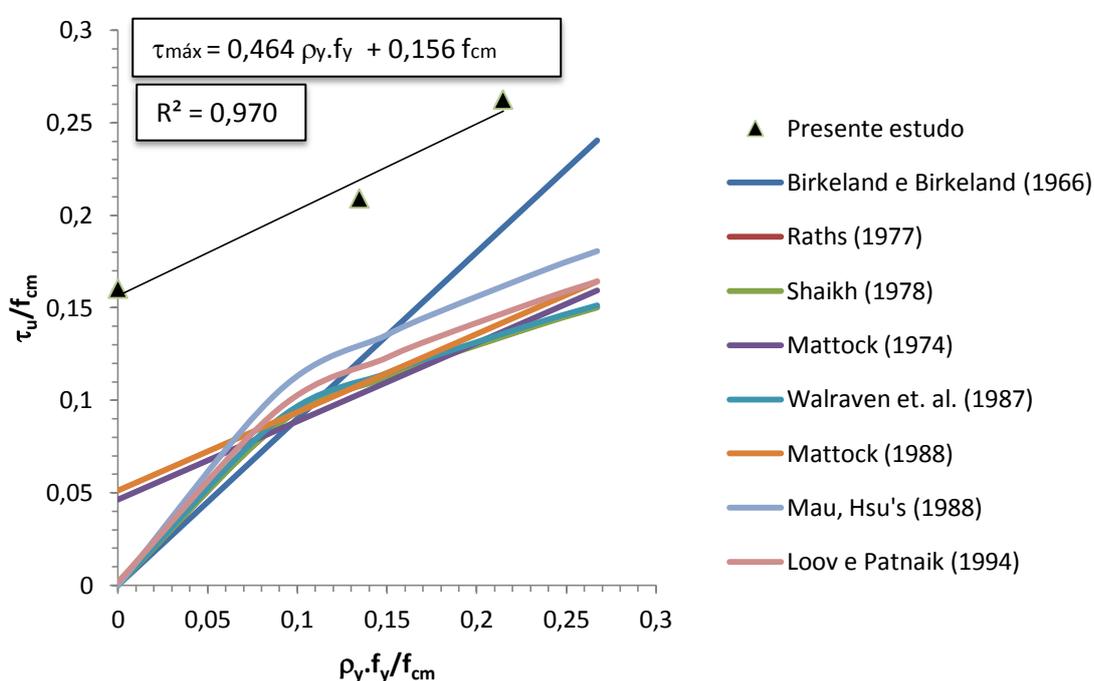


Figura 4.24: Gráfico comparativo entre os resultados experimentais dos corpos de prova com estribos e os valores calculados a partir de equações presentes na literatura.

É importante destacar que todas as equações utilizadas na elaboração do estudo comparativo referem-se a concretos convencionais, pois na literatura não foram encontradas equações que tratassem particularmente de concretos com agregado reciclado.

Apesar disso, os valores experimentais, mesmo com 50% de agregado reciclado, mostraram-se superiores aos valores calculados. Assim é possível concluir que todas as equações utilizadas são conservadoras, podendo, inclusive, serem aplicadas para concretos com agregado reciclado.

A Figura 4.24 também mostra a curva de tendência obtida a partir dos três valores de tensão de confinamento estudados. Além disso, foi feita a regressão linear múltipla relacionando os valores da tensão de confinamento normalizada pela resistência à compressão com a tensão máxima de cisalhamento também normalizada. A equação proposta possui um coeficiente de determinação igual a 0,97.

#### 4.7.6 Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com valores experimentais de outros pesquisadores

Os resultados experimentais dos corpos de prova com 50% de agregado reciclado do Grupo 2 foram comparados com os encontrados pelos três pesquisadores citados no item 2.3.1 do Capítulo 2, cujos corpos de prova também continham 50% de agregado reciclado, porém com diferentes tensões de confinamento. Os valores foram normalizados pela resistência à compressão. Para auxiliar a análise foi plotada a curva dos valores calculados segundo o ACI 318 (2014). A Figura 4.25 mostra esta comparação.

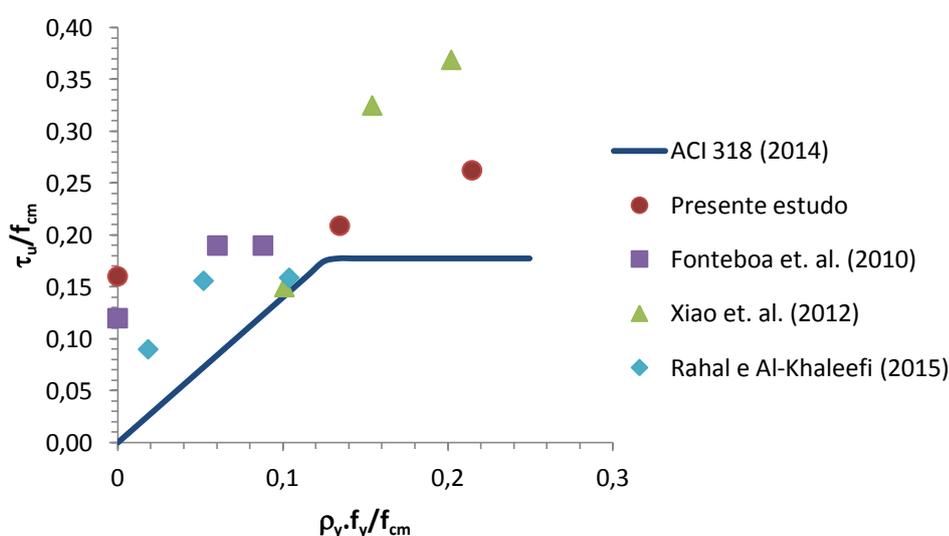


Figura 4.25: Gráfico comparativo entre os resultados experimentais deste trabalho e os obtidos por pesquisadores.

Conforme pode ser observado no gráfico, os resultados experimentais deste estudo e de todos os pesquisadores apresentaram valores acima dos calculados pela equação do ACI 318 (2014), recomendada para concretos convencionais. Deste modo, pode-se concluir que a equação proposta por essa norma é conservadora para concretos convencionais e pode ser aplicada para concretos com agregado reciclado.

Além disso, é possível notar que a resistência ao cisalhamento atingida pelo corpo de prova sem armadura transversal assemelha-se ao valor encontrado por Fonteboa *et al.* (2010). Para os corpos com armadura transversal, as tensões de confinamento normalizadas pela resistência à compressão que mais se aproximam das abordadas no presente estudo são as estudadas por Xiao *et al.* (2012). Porém nota-se que as resistências ao cisalhamento encontradas por este último autor são consideravelmente maiores do que a do presente estudo. Uma possível justificativa para este comportamento seria o fato de que para alcançar as tensões de confinamento estudadas, o presente estudo utilizou 2 e 3 estribos com 8 mm de diâmetro, já Xiao *et al.* (2012) utilizaram 3 e 4 estribos com o mesmo diâmetro. Desta forma, a quantidade de estribos pode ter se tornado uma variável, assim como o espaçamento entre os mesmos.

#### **4.8 Resultados da análise da superfície de ruptura**

As superfícies 3D geradas pelo *software* Surfer 11<sup>®</sup> para os corpos de prova com 30% de agregados reciclados com resistência original dos Grupos 1 e 2, respectivamente, estão apresentadas nas Figuras 4.26 e 4.27. Ao lado de cada superfície tem-se o gráfico com a carga cortante última atingida por cada corpo de prova. Desta maneira é possível comparar a irregularidade das interfaces com a tensão de cisalhamento apresentada por cada concreto.

A área superficial do corpo de prova do Grupo 1 (20 MPa) de resistência original foi de 13323 mm<sup>2</sup>, ou seja, 4,09% maior do que a área projetada (12800 mm<sup>2</sup>). Já a área superficial do corpo de prova do Grupo 2 (40 MPa) foi de 13368 mm<sup>2</sup>, 4,4% maior do que a projetada.

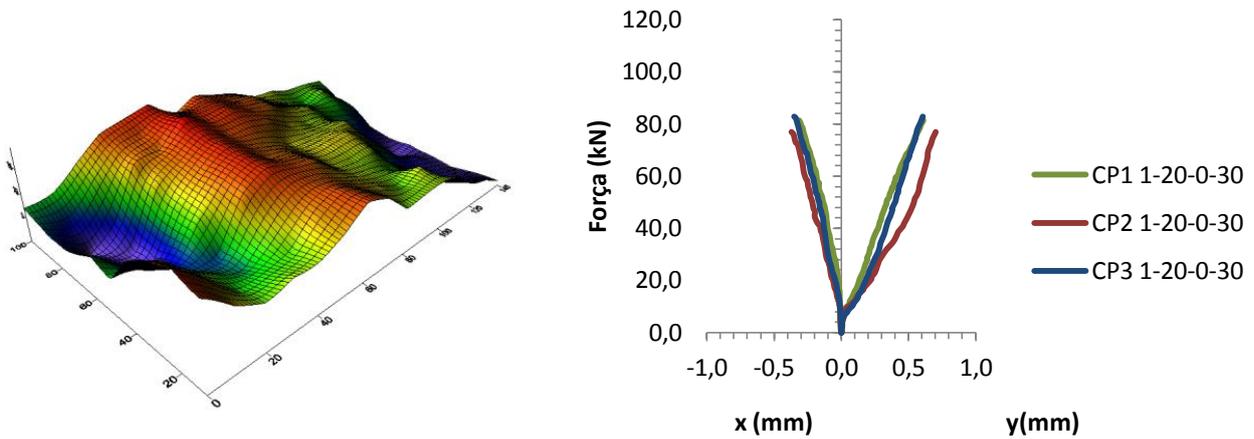


Figura 4.26: Superfície 3D do concreto com 30% de agregados reciclados do Grupo 1.

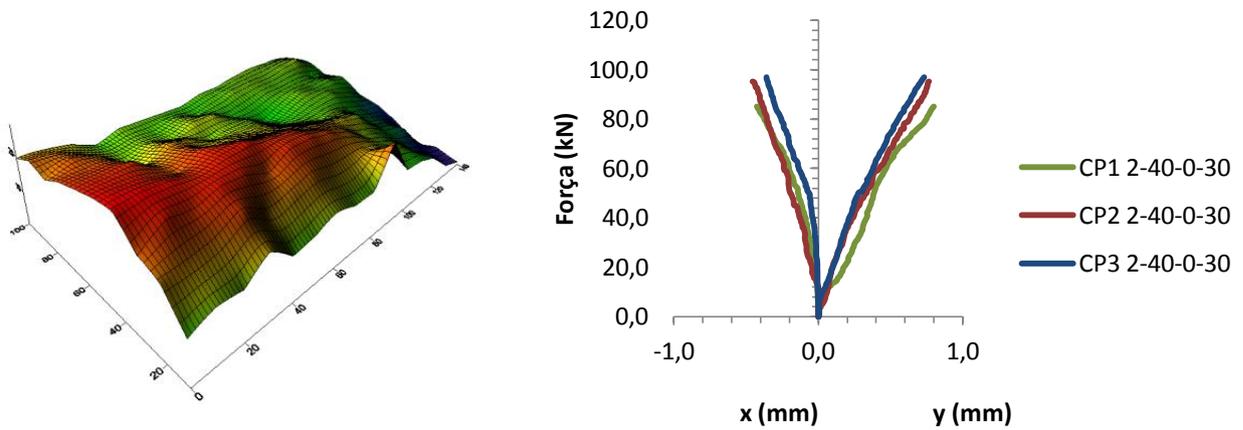


Figura 4.27: Superfície 3D do concreto com 30% de agregados reciclados do Grupo 2.

As Figuras 4.28 e 4.29 referem-se às superfícies 3D dos corpos de prova de ambos os grupos de resistência original com 50% de agregado reciclado.

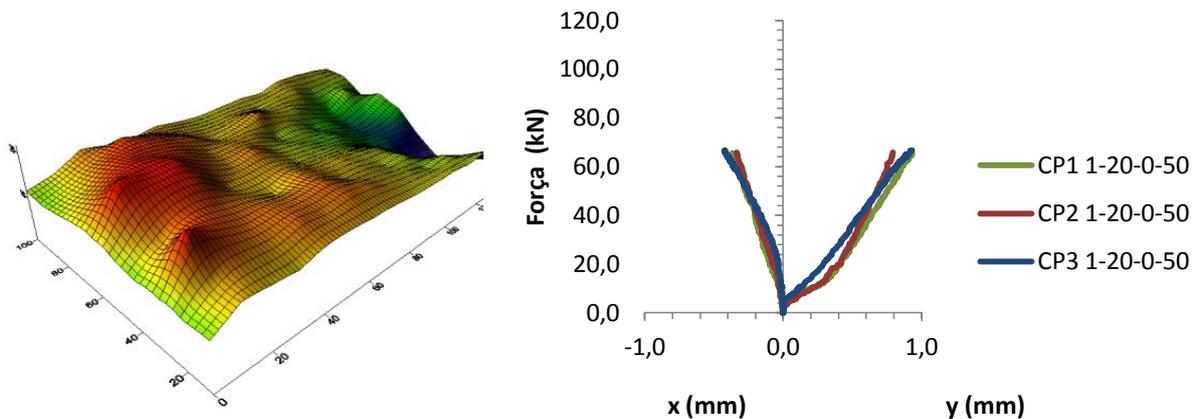


Figura 4.28: Superfície 3D do concreto com 50% de agregado reciclado do Grupo 1.

Para o Grupo 1 (20 MPa), a área superficial medida foi de 13051 mm<sup>2</sup>, 1,96% maior do que a área projetada. Para o Grupo 2 (40 MPa) esses valores foram de 13496 mm<sup>2</sup> e 5,44%.

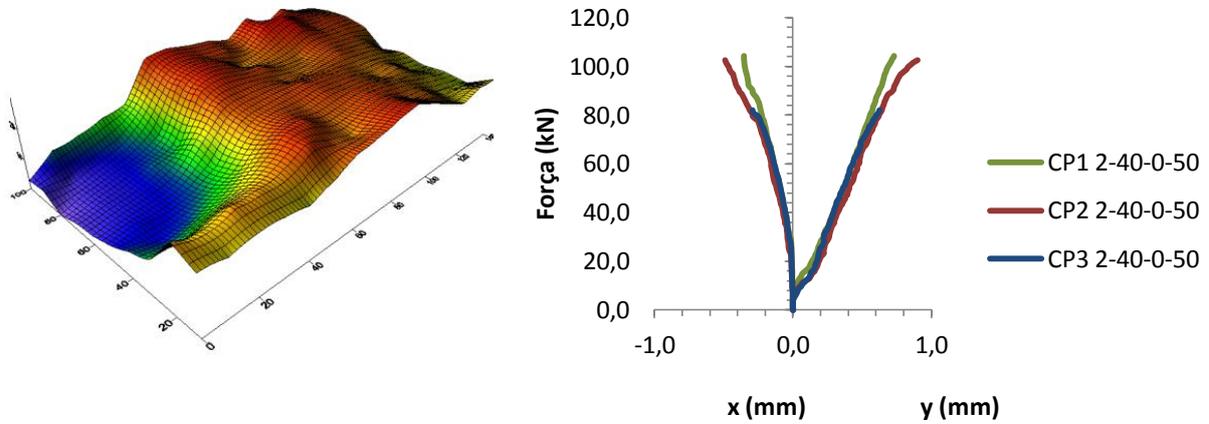


Figura 4.29: Superfície 3D do concreto com 50% de agregado reciclado do Grupo 2.

As superfícies geradas para os corpos de prova com 100% de agregado reciclado podem ser observadas nas Figuras 4.30 e 4.31. Os valores de área superficial para os grupos 1 e 2 foram de 13180 mm<sup>2</sup> e 13280 mm<sup>2</sup>, respectivamente. Esses valores representam 2,97 e 3,75% maior do que a superfície projetada.

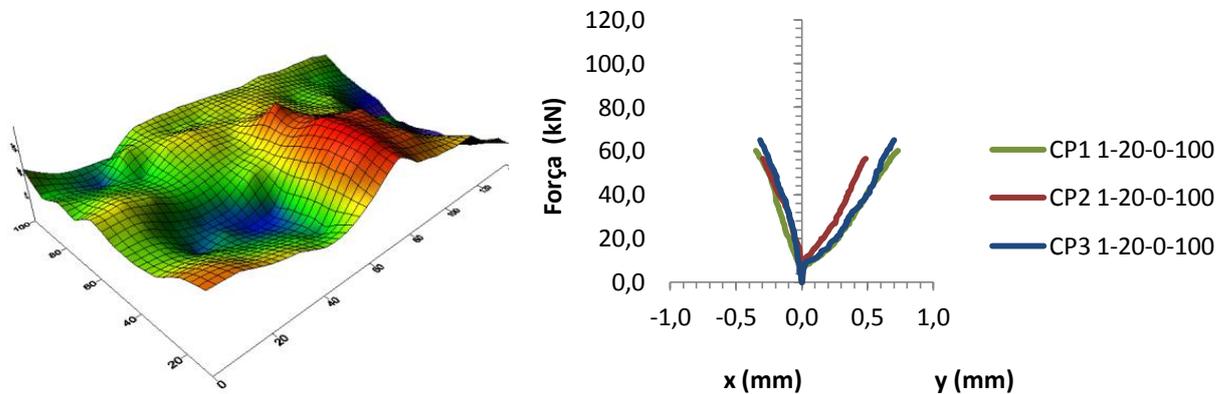


Figura 4.30: Superfície 3D do concreto com 100% de agregado reciclado do Grupo 1.

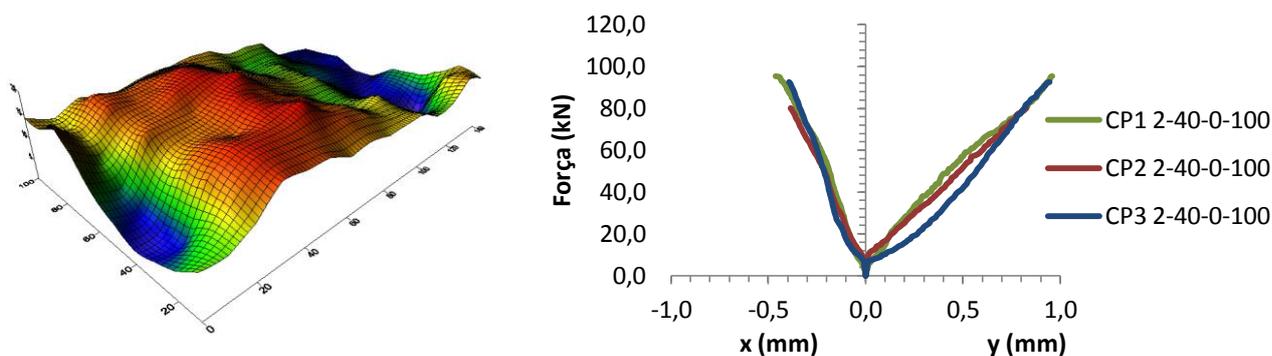


Figura 4.31: Superfície 3D do concreto com 100% de agregado reciclado do Grupo 2.

Por fim, tem-se na Figura 4.32 a superfície 3D gerada para o corpo de prova de referência, cuja área superficial foi de 13543 mm<sup>2</sup>, 5,80% maior que área projetada.

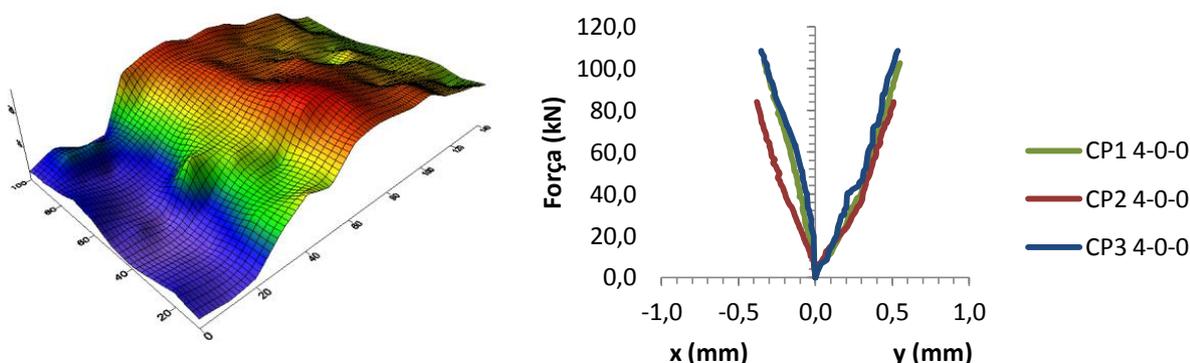


Figura 4.32: Superfície 3D do concreto de referência.

A partir dos resultados obtidos nesta etapa é possível concluir que todas as amostras do Grupo 2 ( 40 MPa) de resistência original apresentaram maior área superficial do que o Grupo 1 (20 MPa) para igual porcentagem de agregado reciclado. Além disso, pode-se notar que a diferença mais acentuada foi observada nos corpos de prova com 50% de agregado reciclado, justamente os que possuem a maior diferença entre as resistências ao cisalhamento.

Deste modo, é possível inferir que o emprego de diferentes resistências originais resultou em diferentes áreas superficiais, que possuem direta relação com a resistência ao cisalhamento. Essa relação pode ser observada na Tabela 4.18. A tabela também apresenta na última coluna os volumes

calculados para cada superfície. Esse parâmetro obteve comportamento semelhante ao da área superficial, sendo mais elevado para os corpos de prova do Grupo 2.

Apesar da diferença entre as áreas e os volumes superficiais não apresentarem valores muito elevados, a configuração da superfície de ruptura em 3D destacando os vales e os picos, nas cores azul e vermelha, respectivamente, mostram o comportamento mais irregular apresentado pelos concretos do Grupo 2, onde as fissuras tiveram maior tendência a contornar as partículas de agregados. Esta superfície mais irregular permitiu maior área de contato entre as faces envolvidas na transferência de cisalhamento e o mecanismo de engrenamento entre os agregados pôde se desenvolver de maneira mais efetiva.

**Tabela 4.18: Área superficial de cada superfície 3D analisada.**

<b>Agregado reciclado (%)</b>	<b>Grupo</b>	<b><math>\tau_{\text{máx}}</math> (MPa)</b>	<b>Área superficial (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (mm<sup>3</sup>)</b>
<b>30</b>	1 (20 MPa)	4,38	13.323,0	130.739,0
	2 (40 MPa)	5,04	13.368,0	220.560,0
<b>50</b>	1 (20 MPa)	3,50	13.051,0	167.370,0
	2 (40 MPa)	5,45	13.496,0	192.959,0
<b>100</b>	1 (20 MPa)	2,97	13.180,0	128.391,0
	2 (40 MPa)	3,75	13.280,0	151.236,0
<b>0</b>	-	5,80	13.543,0	247.161,0

# CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

## 5.1 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência de diferentes teores de agregado reciclado, provenientes de concretos simples com resistências originais distintas, no comportamento ao atrito-cisalhamento. Após a análise dos resultados pode-se concluir que:

- os concretos com agregados reciclados com resistência original de 35 a 40 MPa apresentaram resistências máximas ao cisalhamento estatisticamente, iguais a do concreto convencional, independentemente da porcentagem de agregado reciclado utilizada;
- os concretos com agregados reciclados com resistência original de 15 a 20 MPa tiveram redução na resistência máxima ao cisalhamento quando comparados ao concreto de referência e esta redução foi dependente da porcentagem de agregado reciclado utilizada;
- para uma mesma porcentagem de agregados reciclados, todos os concretos com resistência original de 35 a 40 MPa se mostraram superiores no que se refere à resistência ao cisalhamento quando comparados aos com resistência original de 15 a 20 MPa;
- quanto maior a tensão de confinamento empregada por meio da armadura transversal, maior a resistência aos esforços cortantes;
- a presença do agregado reciclado se mostrou eficiente nos corpos de prova com armadura transversal, ainda que o valor de tensão máxima de cisalhamento do concreto de referência com estribos tenha sido superior ao atingido pelo concreto reciclado com a mesma taxa de armadura;
- a análise das superfícies de ruptura mostrou a relação existente entre a rugosidade da interface e a resistência ao cisalhamento, uma vez que superfícies mais rugosas apresentaram valores mais elevados;
- os corpos de prova com agregados reciclados com resistência original de 35 a 40 MPa exibiram superfícies de ruptura mais rugosas em

relação aos com resistência original de 15 a 20 MPa, para todas porcentagens de agregado reciclado avaliadas;

- a maior área superficial foi a do concreto convencional, que também atingiu maior tensão máxima de cisalhamento;
- o mecanismo de engrenamento entre os agregados é a principal justificativa para os resultados obtidos. Os concretos do grupo de maior resistência original apresentaram maior eficácia deste mecanismo e, conseqüentemente, atingiram carga cortante máxima mais elevada.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- realizar estudo da capacidade de cisalhamento em concretos com agregados reciclados provenientes de resistências originais com valores mais distantes entre si, como, por exemplo, 20 e 60 MPa. Deste modo, seria possível melhor compreensão desta variável e de sua influência na propriedade avaliada;
- realizar estudo semelhante ao presente, porém acrescentando o processo de pré-fissuração, a fim de se conhecer a influência desse procedimento na resistência ao cisalhamento de concretos com agregados reciclados;
- estudar a resistência ao cisalhamento de concretos com agregados reciclados empregando-se maiores valores de tensão de confinamento, com o objetivo de se conhecer melhor o comportamento desta variável nesse tipo de material;
- estudar novas matrizes como, por exemplo, a geopolimérica com agregados reciclados.
- Considerar outros métodos de dosagem de concreto usando agregado reciclado, como por exemplo, o Método do volume de argamassa equivalente.

## **CAPÍTULO VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ABNT NBR 5738:2016. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.**

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

**ABNT NBR 7211:2009. Agregados para concreto – Especificação.**

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

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

**ABNT NBR 12142:2010. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.**

**ABNT NBR 15116:2004. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.**

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

**ABNT NBR NM 45:2006. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.**

**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 NM 67:1998. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.**

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

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

ALI, M. A. e WHITE, R. N. Enhanced contact model for shear friction of normal and high-strength concrete. **ACI Structural Journal**, May - 1999. pp. 348-361.

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

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

ANDERSON, A. R. - Composite designs in precast and cast-in-place concrete, **Progressive Architecture**, Vol. 41, pp. 172-179, September 1960.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>> Acesso em: Dezembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO – ABRECON. **Gestão de resíduos garante benefícios na construção civil.** Disponível em: <

<http://www.abrecon.org.br/index.php/2015/05/27/gestao-de-residuos-garante-beneficios-na-construcao-civil/>> Acesso em : Dezembro de 2015.

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.

BIRKELAND, P. W. e BIRKELAND, H. W.: “Connections in Precast concrete construction”, **ACI Journal**, vol. 63, Março 1966, pp. 345-368.

BRITISH STANDARD (BS) 1881: Part 4:1993. **Method for determination of Vebe time.**

BUTTLER, A. M. **Concretos com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD.** Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007.

CHOI H. B.; YI, C. K.; CHO, H. H. e KANG, K. I. Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, February – 2010. pp. 103 – 114.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução Nº 307.** 2002.

EVANGELISTA, P. P. A.; COSTA, D. B. e ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**. Porto Alegre. Setembro – 2010. pp. 23-40.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B. **Cominuição; In: Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, 2004.

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.

GOLDEN SOFTWARE, INC. SURFER for windows: release 11, contouring, and 3D surface mapping for scientist's engineer's user's guide.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2011.

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.

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

HARISH KUMAR N R, SNEHAL K & DR. PRABHAKARA R. "Investigation on In-Plane Shear Strength Using Push-Off Specimens with Different Clamping Reinforcement" **4th international Engineering Symposium IES – 2015**.

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. e HELENE, P. R. L. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. 2002.

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. **Journal of Materials in Civil Engineering**, April 2008. pp.294-302.

MARINKOVIC, S.; RADONJANIN, V.; MALEŠEV, M. e IGNJATOVIC, I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**. April – 2010. pp. 2255-2264.

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**, 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.

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

MATTOCK, A. H. e HAWKINS, N. M. - Shear transfer in reinforced concrete – recent research, Precast/Prestressed Concrete Institute, **PCI Journal**, Vol. 17, No. 2, pp. 55-75, March-April 1972.

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

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.

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

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.

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.

NGUYEN, M., GHORBEL, E. e WARDEH, G. Mechanical properties and stress-strain relationship for recycled aggregate concrete. **International Conference on Sustainable Structural Concrete**, September 2015, La Plata, Argentina.

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.

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

RAHAL K. N. e AL-KHALEEFI, A. Shear-Friction Behavior of Recycled and Natural Aggregate Concrete - An 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.

SAGASETA, J. e VOLLUM, R. P. Influence of aggregate fracture on shear transfer through cracks in reinforced concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 63, p. 119-137, 2011.

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.

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

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto frente à penetração de íons cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2010.

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.

VIERA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.

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. 66–84.

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.

# APÊNDICE

## Resultados dos corpos de prova da Série 1

- CPx 1-20-0-30

As Figuras A.1 e A.2 mostram os corpos de prova durante e depois dos ensaios, respectivamente.

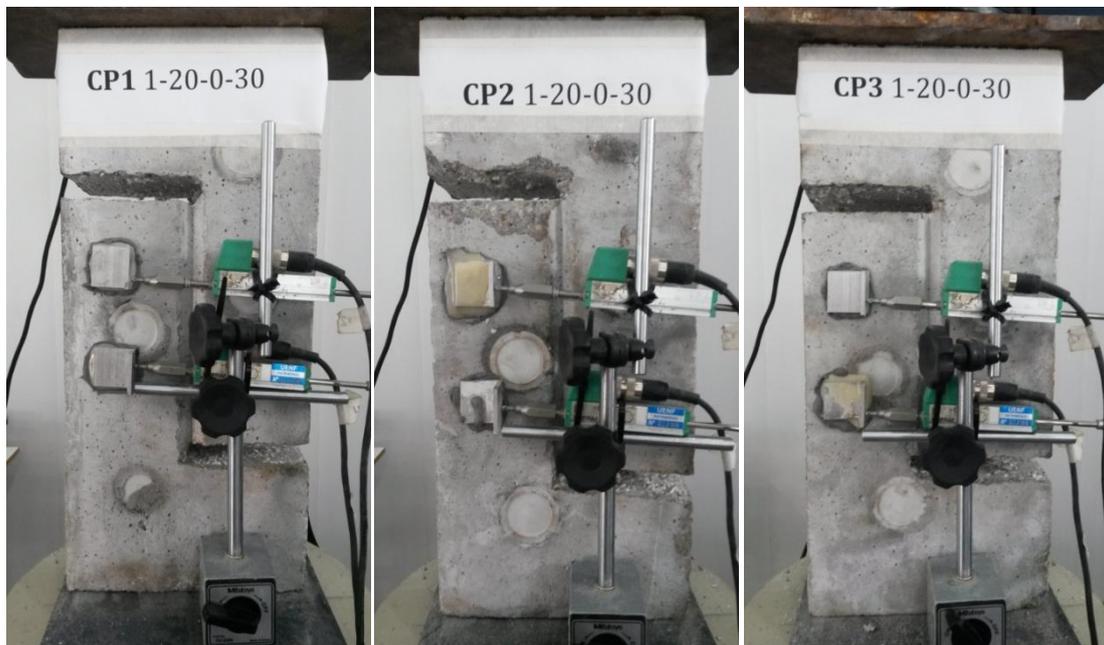


Figura A.7.1: Corpos de prova CPx 1-20-0-30 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.2: Corpos de prova CPx 1-20-0-30 após o ensaio *push-off*.

A Tabela A.1 mostra os resultados dos três corpos de prova. A Figura A.3 apresenta esses resultados graficamente, utilizando a força, a resistência cisalhante e a resistência cisalhante normalizada pela resistência à compressão *versus* os deslocamentos horizontais e verticais experimentados pelos corpos de prova.

Tabela A.7.1: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 1-20-0-30.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 1-20-0-30	81,39	4,31	0,138	0,314	0,613
CP2 1-20-0-30	77,03	4,076	0,131	0,371	0,704
CP3 1-20-0-30	82,84	4,38	0,140	0,351	0,606

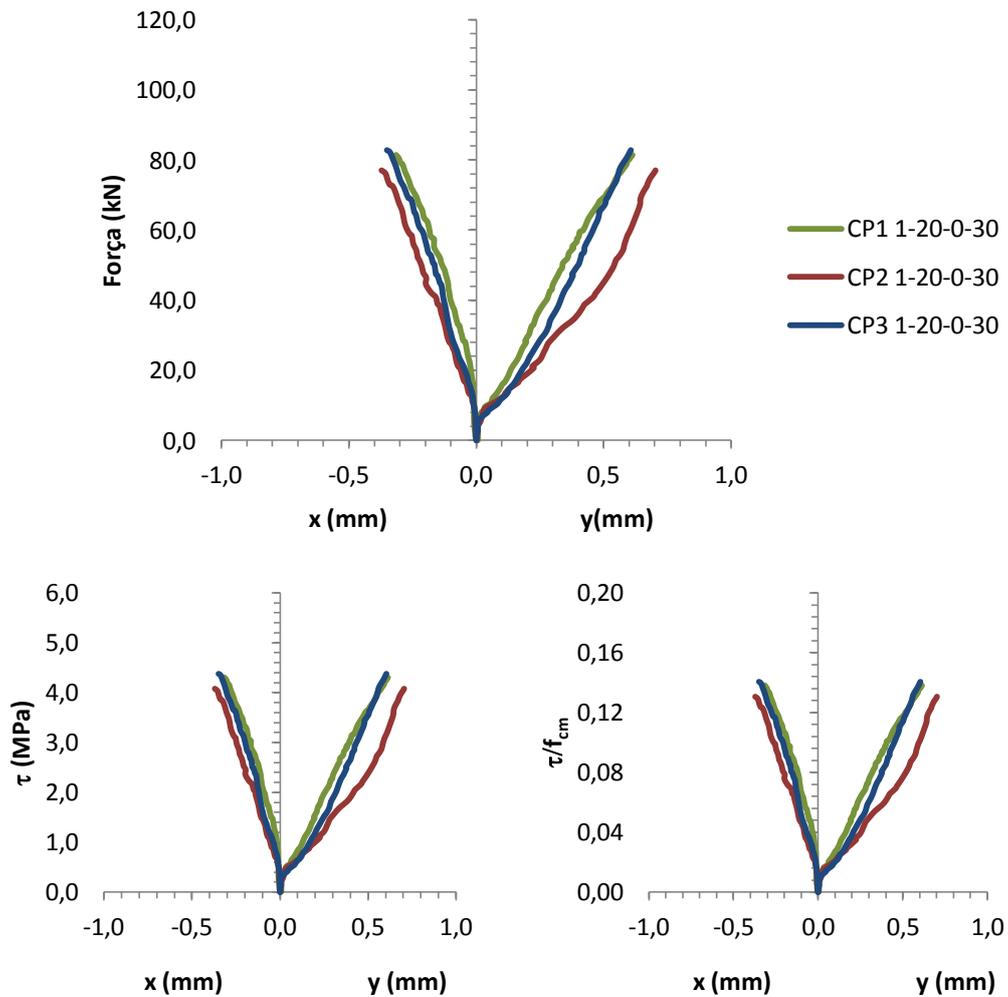


Figura A.7.3: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-30.

- **CPx 1-20-0-50**

As Figuras A.4 e A.5 mostram a configuração dos corpos de prova no momento do ensaio e posterior a ele, respectivamente.



Figura A.7.4: Corpos de prova CPx 1-20-0-50 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.5: Corpos de prova CPx 1-20-0-50 após o ensaio *push-off*.

Os resultados para os corpos de prova estão na Tabela A.2 e os gráficos gerados a partir destes resultados encontram-se na Figura A.6.

Tabela A.7.2: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 1-20-0-50.

Corpos de provas	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 1-20-0-50	65,64	3,47	0,111	0,368	0,931
CP2 1-20-0-50	65,76	3,48	0,111	0,335	0,791
CP3 1-20-0-50	66,73	3,53	0,113	0,422	0,930

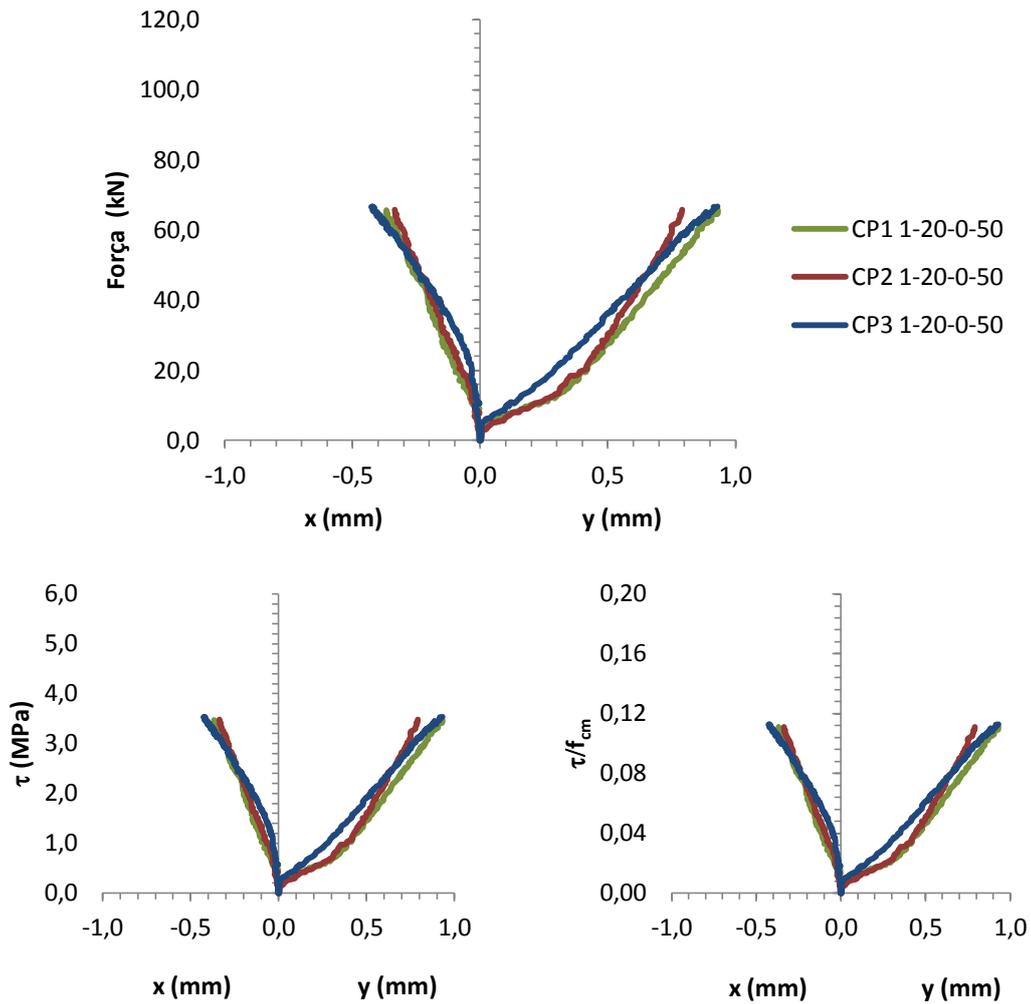


Figura A.7.6: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-50.

- **CPx 1-20-0-100**

As Figuras A.7 e A.8 mostram os ensaios e o padrão de ruptura dos corpos de prova, respectivamente.



Figura A.7.7: Corpos de prova CPx 1-20-0-100 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.8: Corpos de prova CPx 1-20-0-100 após o ensaio *push-off*.

Na Tabela A.3 estão apresentados os resultados obtidos para os três corpos de prova. Os resultados estão mostrados graficamente na Figura A.9.

Tabela A.7.3: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 1-20-0-100.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 1-20-0-100	60,19	3,18	0,104	0,349	0,730
CP2 1-20-0-100	56,56	2,99	0,098	0,296	0,486
CP3 1-20-0-100	65,09	3,44	0,110	0,316	0,701

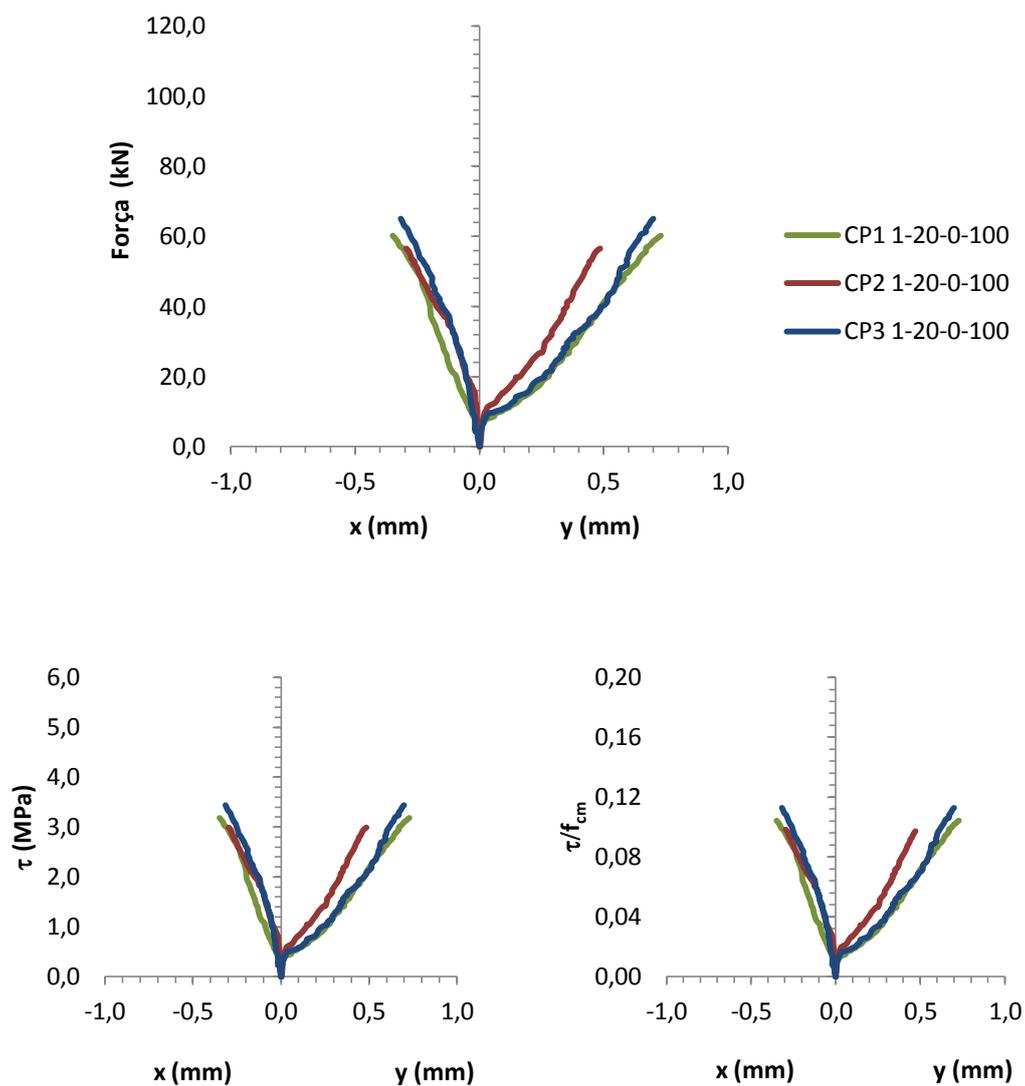


Figura A.7.9: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 1-20-0-100.

## Resultados dos corpos de prova da Série 2

- CPx 2-40-0-30

As Figuras A.10 e A.11 mostram os corpos de prova durante e depois dos ensaios, respectivamente.



Figura A.7.10: Corpos de prova CPx 2-40-0-30 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.11: Corpos de prova CPx 2-40-0-30 após o ensaio *push-off*.

A Tabela A.4 mostra os resultados dos ensaios para os corpos de prova. A Figura A.12 apresenta os gráficos gerados a partir dos resultados da tabela.

Tabela A.7.4: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 2-40-0-30.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 2-40-0-30	85,02	4,50	0,144	0,424	0,799
CP2 2-40-0-30	95,32	5,04	0,161	0,456	0,767
CP3 2-40-0-30	97,01	5,13	0,140	0,357	0,732

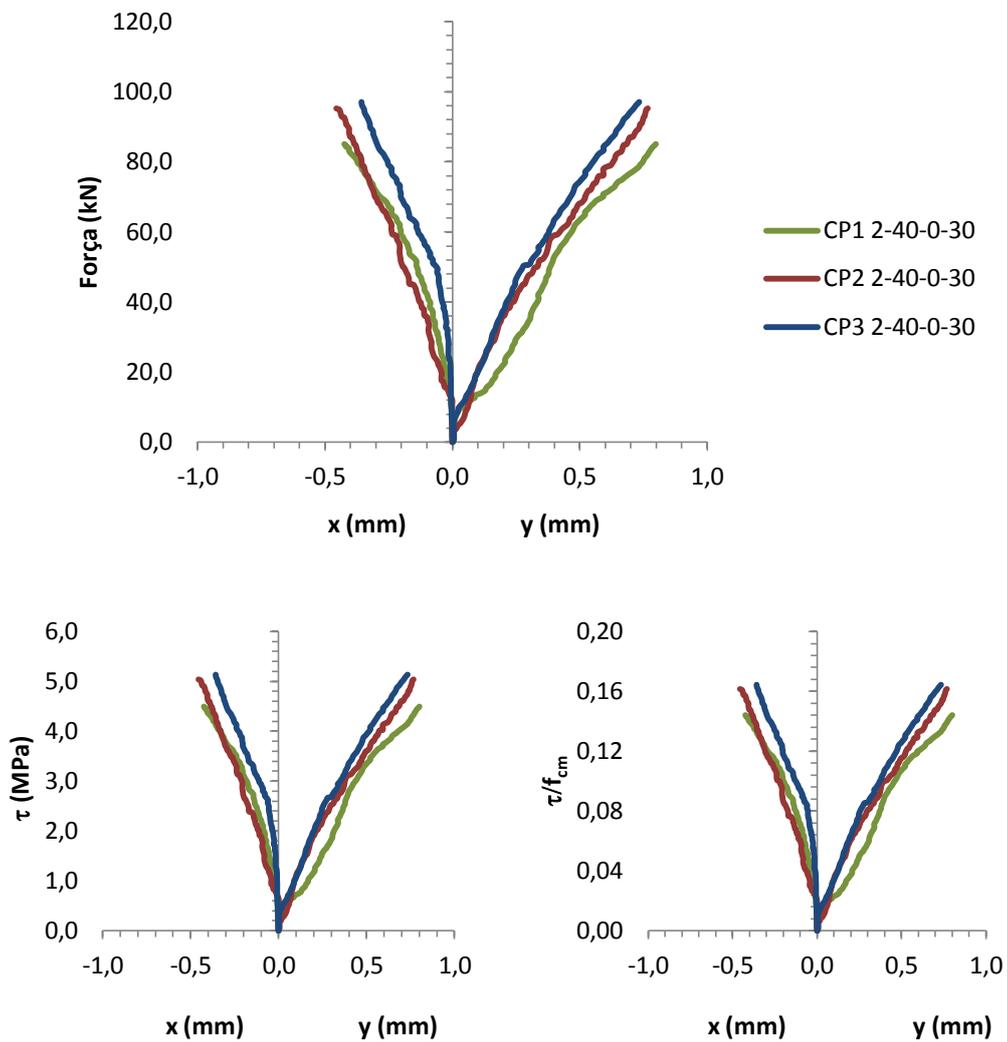


Figura A.7.12: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-30.

- **CPx 2-40-0-50**

As Figuras A.13 e A.14 mostram os corpos de prova sendo ensaiados e o padrão de ruptura após os ensaios, respectivamente.



Figura A.7.13: Corpos de prova CPx 2-40-0-50 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.14: Corpos de prova CPx 2-40-0-50 após o ensaio *push-off*.

A Tabela A.5 mostra os resultados dos três corpos de prova e a Figura A.15 apresenta os mesmos de forma gráfica.

Tabela A.7.5: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 2-40-0-50.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 2-40-0-50	104,28	5,52	0,172	0,352	0,730
CP2 2-40-0-50	102,58	5,43	0,169	0,488	0,901
CP3 2-40-0-50	81,99	4,34	0,135	0,293	0,626

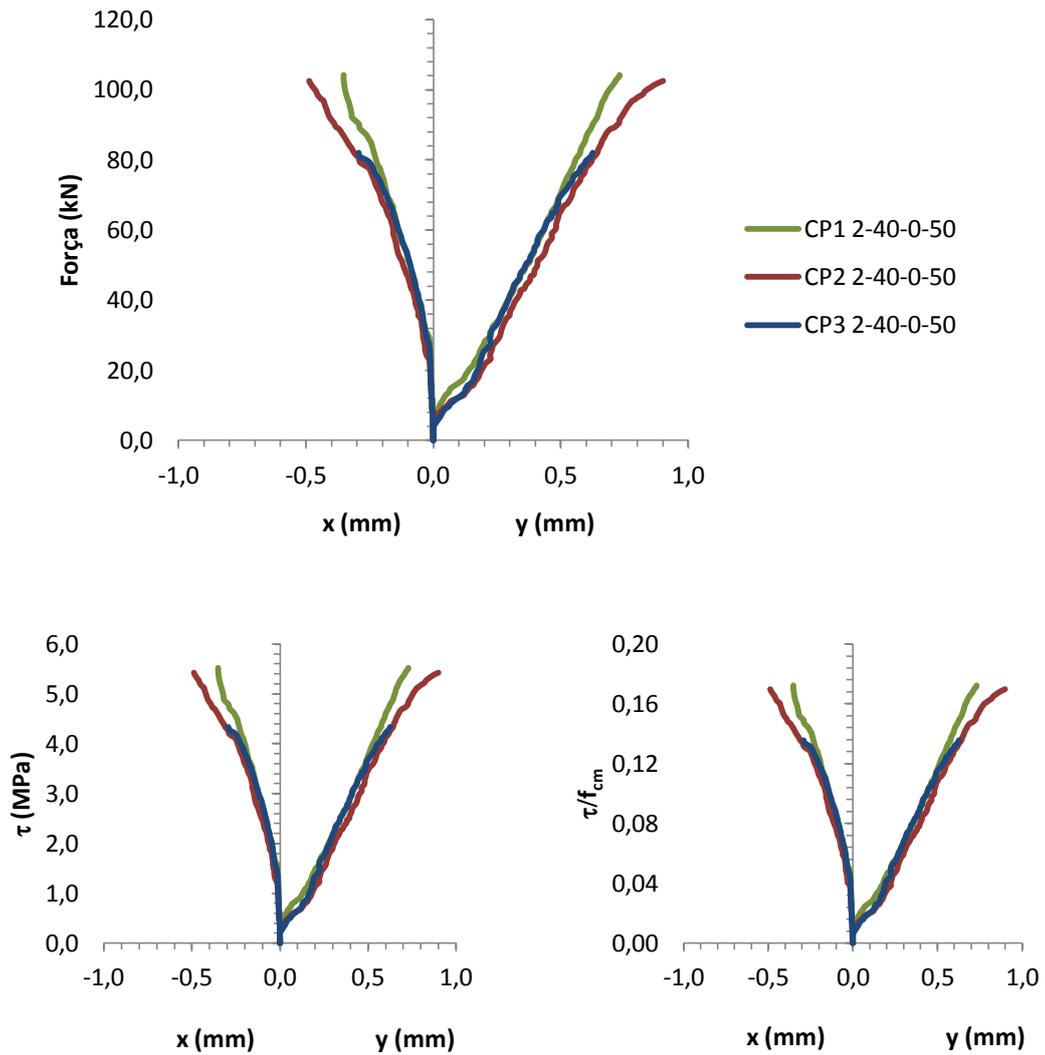


Figura A.7.15: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-50.

- **CPx 2-40-0-100**

As Figuras A.16 e A.17 mostram os corpos de prova durante e depois dos ensaios, respectivamente.

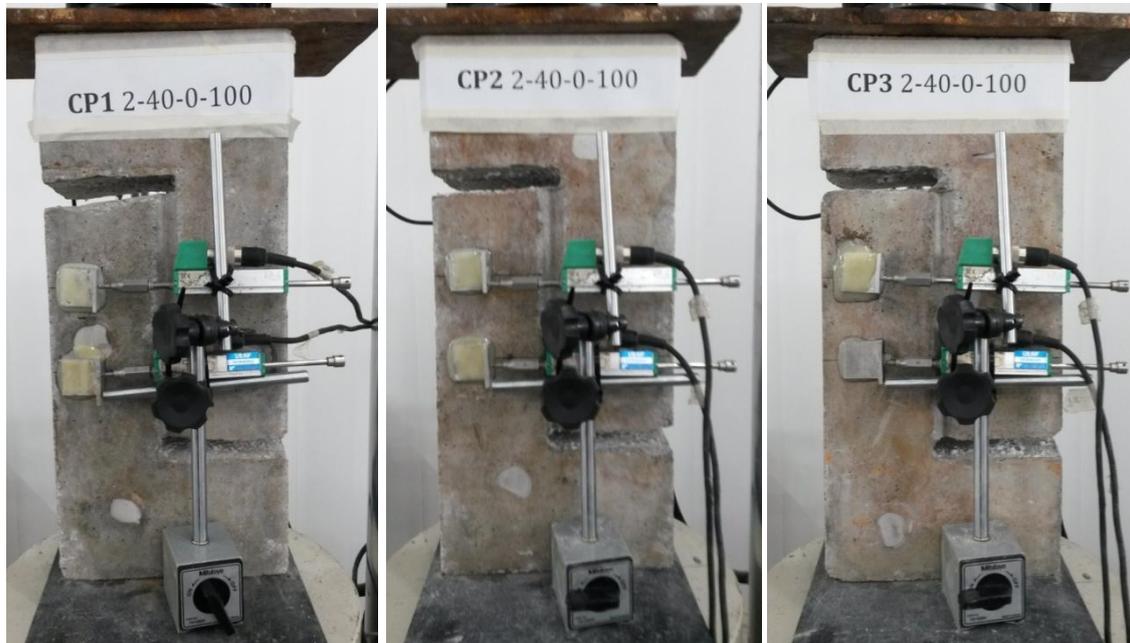


Figura A.7.16: Corpos de prova CPx 2-40-0-100 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.17: Corpos de prova CPx 2-40-0-100 após o ensaio *push-off*.

Os resultados dos três corpos de prova estão na Tabela A.6. A Figura A.18 mostra os gráficos gerados a partir desses resultados.

Tabela A.7.6: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 2-40-0-100.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (Mpa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	x (mm)	y (mm)
CP1 2-40-0-100	95,32	5,04	0,160	0,462	0,960
CP2 2-40-0-100	80,18	4,24	0,137	0,385	0,827
CP3 2-40-0-100	92,53	4,90	0,158	0,392	0,946

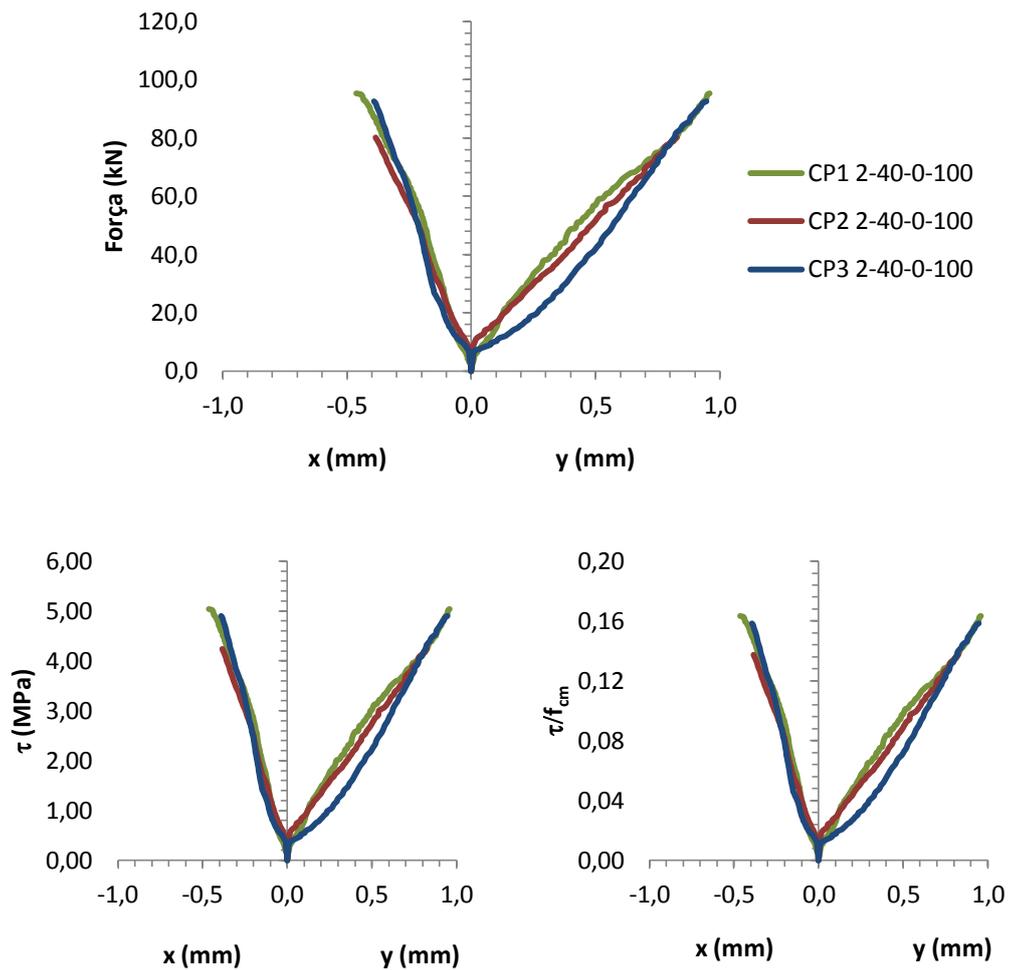


Figura A.7.18: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 2-40-0-100.

### Resultados dos corpos de prova da Série 3

- **CPx 3-40-2-50**

As Figuras A.19 e A.20 mostram os corpos de prova sendo ensaiados e o padrão de ruptura dos mesmos após os ensaios, respectivamente.



Figura A.7.19: Corpos de prova CPx 3-40-2-50 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.20: Corpos de prova CPx 3-40-2-50 após o ensaio *push-off*.

A Tabela A.7 mostra os resultados dos ensaios dos corpos de prova. A Figura A.21 apresenta os resultados graficamente.

Tabela A.7.7: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 3-40-2-50.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	w (mm)	s (mm)
CP1 3-40-2-50	121,84	6,45	0,201	1,116	1,310
CP2 3-40-2-50	127,05	6,72	0,210	1,440	1,730
CP3 3-40-2-50	130,44	6,90	0,215	1,300	1,523

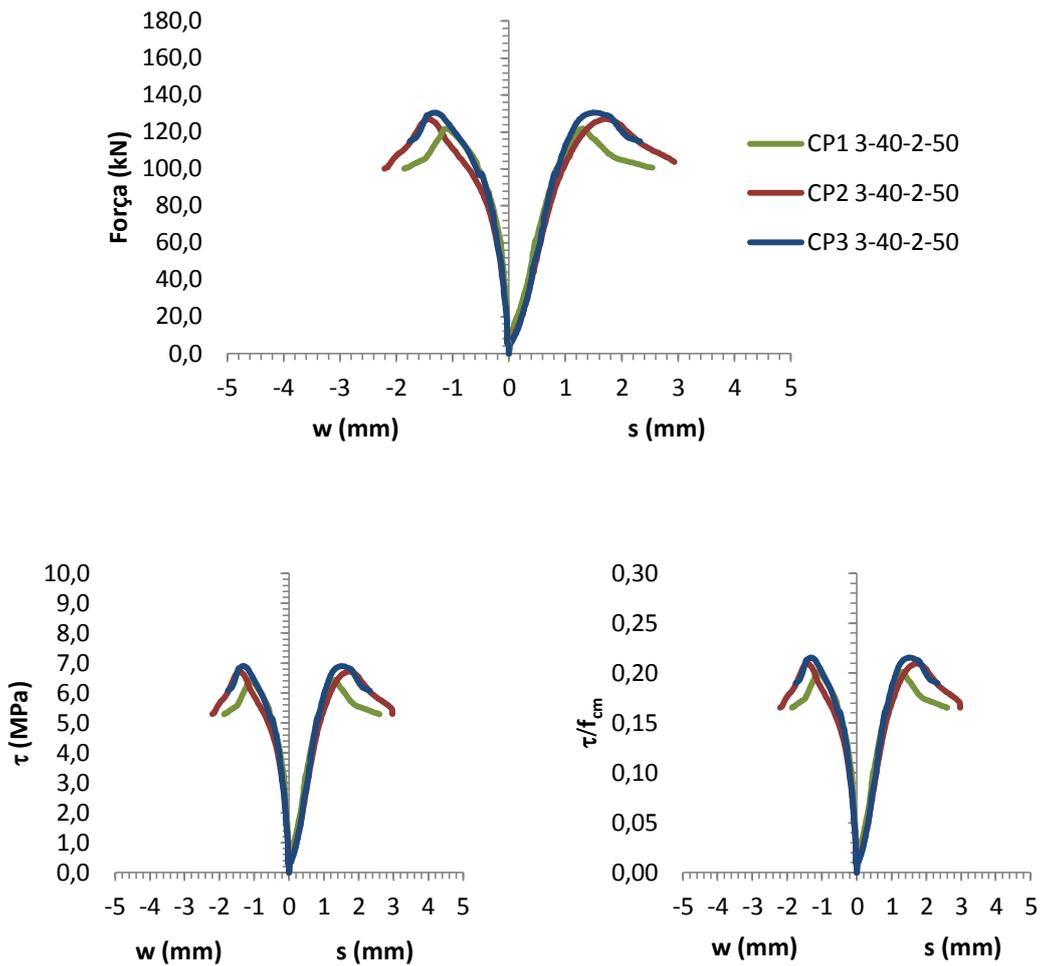


Figura A.7.21: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 3-40-2-50.

- **CPx 3-40-3-50**

As Figuras A.22 e A.23 mostram os corpos de prova deste tipo durante e depois dos ensaios, respectivamente.



Figura A.7.22: Corpos de prova CPx 3-40-3-50 no momento do ensaio *push-off*.



Figura A.7.23: Corpos de prova CPx 3-40-3-50 após o ensaio *push-off*.

Na Tabela A.8 estão os resultados obtidos dos três corpos de prova. A Figura A.24 apresenta os gráficos plotados a partir dos valores da tabela.

Tabela A.7.8: Resultados dos ensaios *push-off* para o CPx 3-40-3-50.

Corpos de prova	Força (kN)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/f_{\text{cm}}$	w (mm)	s (mm)
CP1 3-40-3-50	153,09	8,10	0,252	1,786	1,966
CP2 3-40-3-50	147,40	7,80	0,243	2,037	2,330
CP3 3-40-3-50	175,86	9,30	0,291	1,584	2,496

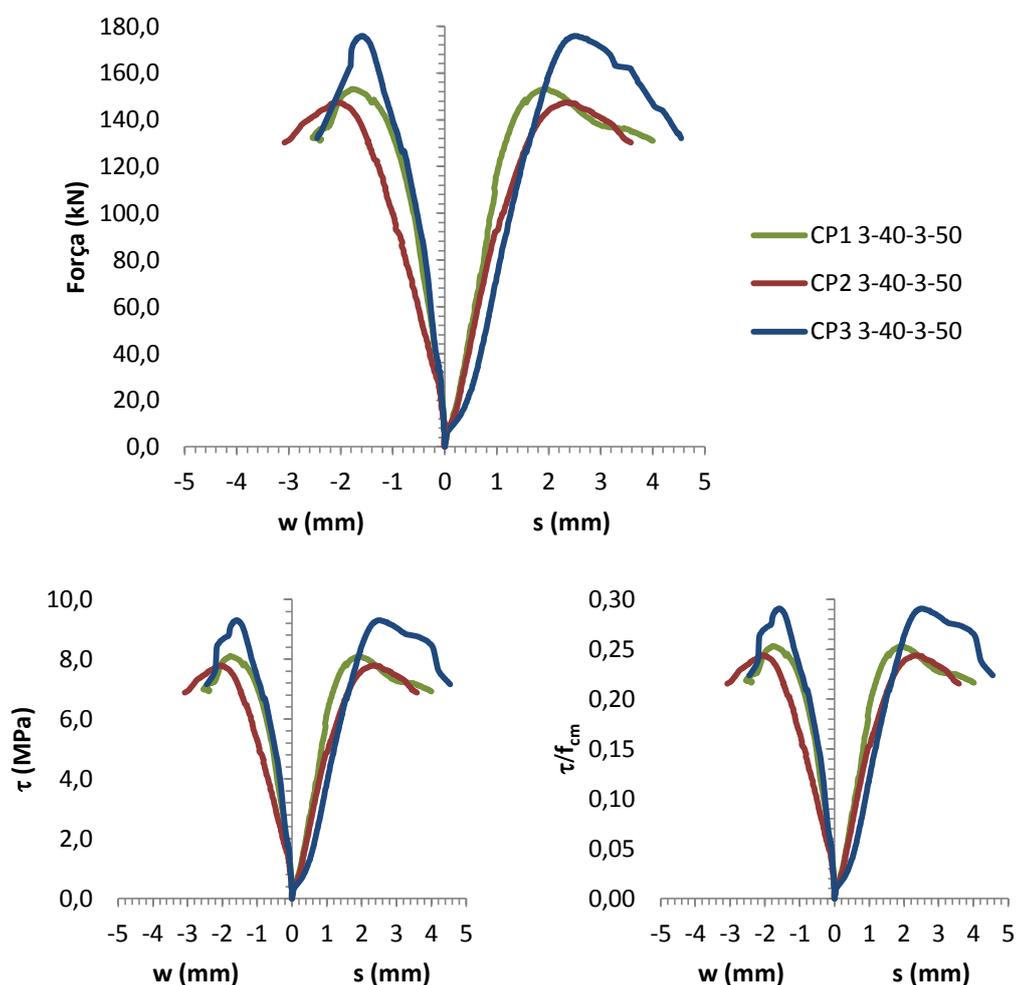


Figura A.7.24: Gráficos relativos aos corpos de prova CPx 3-40-3-50.