

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE  
TECNOLOGIA**

**BRUNA OLIVIERI FURIAN**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E FIBRAS  
DE AÇO E VIDRO AR**

**CAMPINAS  
2019**

**BRUNA OLIVIERI FURIAN**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E FIBRAS  
DE AÇO E VIDRO AR**

Dissertação de mestrado em Sistemas de  
Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências  
Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador. Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lia Lorena Pimentel  
Co-orientador. Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Nádia Cazarim da  
Silva Forti

**CAMPINAS  
2019**

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.136 Furian, Bruna Olivieri.  
F984a Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e fibras de aço e vidro AR / Bruna Olivieri Furian.- Campinas: PUC-Campinas, 2019.  
149 f.: il.

Orientadora: Lia Lorena Pimentel; Co-orientadora: Nádia Cazarim da Silva Forti.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

Inclui bibliografia.

1. Concreto. 2. Fibras 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Sustentabilidade. I. Pimentel, Lia Lorena. II. Forti, Nádia Cazarim da Silva. III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias. Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura Urbana. IV. Título.

CDD - 22. ed. 620.136

**BRUNA OLIVIERI FURIAN**

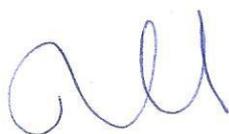
**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E FIBRAS  
DE AÇO E VIDRO-AR**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Lia Lorena Pimentel.

Co-orientador (a): Prof. (a) Dr. (a). Nádia Cazarim da Silva Forti.

Dissertação defendida e aprovada em 25 de fevereiro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



---

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

# AGRADECIMENTO

À Deus.

Aos meus familiares, principalmente meus pais, Alcides e Daniele, e minha irmã Roberta pelo apoio e compreensão.

Aos meu noivo Matheus pelo apoio e compreensão.

Aos Amigos que me apoiaram e incentivaram nessa jornada.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lia Lorena Pimentel pela orientação, paciência, dedicação, ajuda e ensinamentos, pois sem esse auxílio nada disso seria possível, você foi fundamental para tudo isso.

À minha co-orientadora Prof<sup>a</sup> Dra<sup>a</sup> Nádia Cazarim da Silva Forti pelo orientação, ensinamento e paciência.

À Prof<sup>a</sup> Dra<sup>a</sup> Ana Elisabete P. G. A. Jacintho pelos ensinamento, sugestões e apontamentos na qualificação.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Marco Antônio Carnio pela disponibilidade e auxílio com o ensaio da norma EN 14651, além dos apontamentos e sugestões na qualificação.

Ao Pro<sup>o</sup> Dr. Leandro Mouta Trautwein pelos apontamentos e sugestões na qualificação.

Ao técnico do Laboratório de Materiais da Puc Campinas Igor Citrangulo Pereira e ao auxiliar técnico Joventino Manoel Gonçalves Filho, pelo ajuda com as moldagens, desmoldagens, elaboração dos ensaios e execução dos mesmos.

À empresa Belgo Bekaert Arames Ltda pelo fornecimento das fibras de aço utilizadas na etapa Final desse trabalho.

À CAPES, já que o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À PUC Campinas e a todo seu corpo docente, pela oportunidade e pela disponibilização dos Laboratórios, materiais e demais espaços para realização desta pesquisa.

À GCP Applied technologies pelo doação de materiais.

# RESUMO

FURIAN, B.O. Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e fibras de aço e vidro AR. 2019. 149 f. Dissertação, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2019.

A construção civil é maior geradora de resíduos sólidos urbanos em função da alta atividade advinda das necessidades do ser humano. O descarte desse resíduo, em sua maioria, ocorre em locais impróprios, e o reaproveitamento do material proveniente da construção civil é mínimo. Esse trabalho tem como objetivo comparar o comportamento mecânico do concreto convencional em relação ao concreto produzido com agregado reciclado, e na tentativa de melhorar o comportamento mecânico do compósito, foram utilizadas fibras de aço e de vidro AR. Para o desenvolvimento da pesquisa foram executados dois traços base, o referência, com agregado natural e o traço com 30% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. A partir destes dois traços base foram produzidos traços com porcentagens, em volume, de 0,25%, 0,38% e 0,50% de fibras, tanto para a fibra de aço, como para a fibra de vidro AR, totalizando 14 traços diferentes. Após a realização dos ensaios, foram escolhidos dois traços para realização da etapa experimental final, na qual foi utilizado o programa FitFG para determinação da energia de fratura e da curva coesiva dos ensaios experimentais, além da comparação entre métodos de ensaios de residual (Ensaio Barcelona Simplificado e EN 14651). Nesse trabalho, observou-se que o módulo de elasticidade tende a aumentar com o aumento do teor de fibra de aço, sendo que o tipo de agregado não influencia nos resultados de maneira significativa, já o concreto com fibra de vidro AR possui módulo de elasticidade maior quando utilizado agregado natural. O aumento da resistência à tração na flexão em função do aumento do teor de fibras foi observado apenas para o concreto com fibra de aço. Na etapa experimental final foram executados ensaios para a determinação de resistência residual e de tenacidade. Os ensaios utilizando a norma ASTM C1399 proporcionou valores de resistência residual média muito similares tanto para o concreto com agregado natural como para o concreto com agregado reciclado. O ensaio utilizando a norma EN 14651 proporcionou resultados similares para os dois tipos de concreto, com agregado natural e com agregado reciclado, para as resistências residuais. Os resultados do Ensaio Barcelona Simplificado apontaram similaridade entre o concreto com agregado natural e o concreto com agregado reciclado. Ao comparar os valores de resistência residual obtidos pelos dois métodos ensaios (Ensaio Barcelona Simplificado e EN 14651), observou-se resultados muito diferentes, no entanto fazendo uma correlação de segundo e terceiro graus entre os resultados obtidos nos ensaios, observa-se que o  $R^2$  resultante é acima de 0,8, apontando uma ótima correlação entre os dois métodos de ensaio, o que permite a utilização do Ensaio Barcelona Simplificado, que é menos dispendioso que o método EN 14651. As curvas coesivas obtidas pelo programa FitFG, por análise inversa, foram próximas para agregado natural e reciclado. O ajuste do programa também indicou maior resistência à tração para o traço com agregado reciclado, mas com menor energia de fratura se comparado ao agregado natural.

Palavras Chave: Concreto; Agregado reciclado; Fibra; Sustentabilidade; Análise inversa.

# ABSTRACT

FURIAN, B.O. Analysis of the mechanical behavior of concrete with recycled aggregate and steel and AR glass fibers. 2019. 149 f. Dissertation, Post-graduation Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2019.

Civil construction is one of the economic sectors that generate the most solid waste, due to the high activity, coming from the needs of the human being. Disposal of this waste, for the most part, occurs in inappropriate places and the reuse of the material coming from civil construction is minimal. In order to optimize the consumption of these residues as aggregates in concrete production, the objective of this work was to compare the mechanical behavior of conventional concrete in relation to the concrete produced with recycled aggregate. Two types of fiber it used (steel and AR glass fibers) to improve the mechanical behavior of the composite. For the development of the research two proportions of base mix, the reference, with natural aggregate and the mixture with 30% of natural aggregate replacement by the recycled aggregate were executed. From these two mixing ratios, other blends were produced with percentages by volume of 0.25%, 0.38% and 0.50% fibers for both the steel fiber and AR glass fiber, totaling 14 different mixing ratios. After the tests, two mixing ratios were chosen to perform the final experimental stage, in which the FitFG program was used to determine the fracture energy and the cohesive curve of the experimental tests, as well as the comparison between the test methods for the determination of residual resistance (Barcelona Simplified Test and EN 14651). In this work, it was observed that the modulus of elasticity tends to increase with the increase of the fiber content of steel, and the type of aggregate does not influence the results in a significant way, already for the concrete with glass fiber AR the module of elasticity was higher when the natural aggregate was used. The increase in tensile strength in flexion was observed only for concrete with steel fiber, due to the increase in fiber content. In the final experimental stage, tests were performed to determine residual strength and toughness. Both the tests using ASTM C1399 and the tests performed according to EN 14651 showed very similar average residual strength values for both, the natural aggregate concrete and the recycled aggregate concrete. The results of the Barcelona Simplified Assay showed similarity between concrete with natural aggregate and concrete with recycled aggregate. When comparing the values of residual resistance obtained by the Barcelona Simplified test methods and EN 14651, very different results were observed. However, by making a second and third degree correlation between the results obtained by both test methods, it is observed that the resulting  $R^2$  is above 0.8, indicating an optimal correlation between the two test methods. This allows the use of the Simplified Barcelona Test, which is less expensive than the EN 14651 method. The cohesive curves obtained by the FitFG program, by inverse analysis, were close to the two types of concrete, with natural aggregate and with recycled aggregate. The program adjustment also indicated higher tensile strength for concrete with recycled aggregate, but with lower fracture energy compared to that obtained for natural aggregate concrete.

Keywords: Concrete; Recycled aggregate; Fiber; Sustainability; Reverse analysis.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento .....	10
Tabela 2- Propriedades típicas das fibras .....	29
Tabela 3 - Especificação das propriedades dos agregados e a respectiva norma de ensaio.....	55
Tabela 4 - Características gerais das fibras utilizadas .....	56
Tabela 5 - Características dos agregados graúdos .....	59
Tabela 6 - Nomenclatura das diferentes dosagens .....	61
Tabela 7 - Quantidade e tipos de corpos de prova.....	62
Tabela 8 - Especificação da característica e a respectiva norma utilizada .....	63
Tabela 9 - Nomenclatura das diferentes dosagens .....	65
Tabela 10 - Quantidade e tipos de corpos de prova.....	66
Tabela 11 - Especificação da característica e a respectiva norma utilizada .....	67
Tabela 12 - Massa específica e absorção .....	100
Tabela 13 - Comparação do concreto sem agregado reciclado e com agregado reciclado.....	105
Tabela 14- Valores e cálculos da resistência residual.....	112
Tabela 15- Valores e cálculos da resistência residual.....	115
Tabela 16 - Dimensões dos corpos de provas .....	117
Tabela 17 - Limite de proporcionalidade .....	118
Tabela 18 - Resistência residual .....	119
Tabela 19 - Dimensões dos corpos de provas .....	120
Tabela 20 - Limite de proporcionalidade .....	120
Tabela 21 - Resistência residual .....	121
Tabela 22 - Comparação dos resultados desse trabalho com o de Salvador (2013) .....	123
Tabela 23 - Resistência Residual pelo Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38 ...	127

Tabela 24 - Resumo das Médias das Resistências Residuais .....	127
Tabela 25 - Cálculo da tenacidade com uso do Ensaio Barcelona Simplificado .....	128
Tabela 26 - Resistência Residual pelo Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38 ...	130
Tabela 27 - Resumo das Médias das Resistências Residuais .....	131
Tabela 28 - Cálculo da tenacidade com uso do Ensaio Barcelona Simplificado .....	131
Tabela 29- Comparativo entre as médias das Resistência Residual (MPa).....	133
Tabela 30 - Comparação entre as resistências à tração obtidas.....	134
Tabela 31 - Valores de resistência à tração e energia de fratura obtidos através de análise inversa .....	136

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dispositivos de armazenamento inicial .....	9
Figura 2 - Acondicionamento final do resíduo .....	9
Figura 3 - Usina de reciclagem em São José do Rio Preto/SP .....	11
Figura 4 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural .....	13
Figura 5 - Determinação do tipo e frequência da execução dos ensaios .....	14
Figura 6 - Fibras de aço soltas curtas (a) e longas (b) e longas coladas em forma de pentes (c) .....	29
Figura 7 - Diagrama de tensão por deformação elástica da matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto .....	30
Figura 8 - Diferença da Fibra de vidro AR para A Fibra de vidro E em contato com a matriz cimentícia .....	31
Figura 9 - Mecanismos de transferências de tensões entre a matriz e as fibras.....	32
Figura 10 - Curvas médias de carga por deflexão obtidas nos ensaios de tração na flexão de concretos de $f_{ck}=20\text{MPa}$ e com diferentes porcentagens de fibra de aço.	33
Figura 11 - Instabilidade pós-pico para matrizes com diferentes resistências mecânicas .....	34
Figura 12 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras .....	35
Figura 13 - Resumo dos principais itens dos quatro procedimentos normatizados (ASTM, 2010; JSCE, 1948; ASTM, 2010; EN, 2007) .....	38
Figura 14 - Representação do processo de amolecimento entre as faces de uma fissura no concreto .....	50
Figura 15 - Representação do Método de Fissuras Fictícias .....	51
Figura 16 - Curva coesiva Segundo equação do Hordijk .....	52
Figura 17 - Etapas da pesquisa.....	53
Figura 18 - Agregado reciclado produzido .....	54
Figura 19 - Granulometria - Agregado miúdo.....	57
Figura 20 - Granulometria - Agregado graúdo.....	58
Figura 21 - Nomenclatura.....	61

Figura 22 - Detalhes do ensaio de CMOD.....	68
Figura 23 - "Clip gauge" e placas metálicas durante ensaio .....	68
Figura 24 - Montagem do corpo de prova e equipamentos para execução do ensaio CMOD .....	69
Figura 25 - Diagrama Carga x CMOD e FL.....	70
Figura 26 - Diagrama Carga x CMOD e Fj (j=1,2,3,4).....	71
Figura 27 - Diferentes fases da falha de uma amostra no teste Barcelona.....	72
Figura 28 - Configuração do ensaio Barcelona .....	73
Figura 29 - Ensaio Barcelona Simplificado.....	73
Figura 30 - Correlação entre ensaio Barcelona simplificado (esquerda) e ensaio Barcelona (direita).....	74
Figura 31 - Conversão do resultado do ensaio Barcelona com deslocamento vertical (esquerda) para TCOD (direita).....	75
Figura 32 - Parâmetros analisados no estudo.....	76
Figura 33 - Parte inicial do ensaio da C1399.....	77
Figura 34 - Curva Carga x Deflexão.....	78
Figura 35 - Programa FitFG - Inserção de dados (T00A38).....	80
Figura 36 - Ajuste até 0,50mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado...81	
Figura 37 - Ajuste até 1,50mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado...81	
Figura 38 - Ajuste até 3,70mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado ..82	
Figura 39 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à compressão aos 7 dias.....	83
Figura 40 - Resistência à compressão - traços referências e com adição de fibra de aço .....	84
Figura 41 - Resistência à compressão - traços referências e com adição de fibra de vidro AR .....	84
Figura 42 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à compressão aos 28 dias.....	85
Figura 43 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias.....	86
Figura 44 - Resistência à tração - traços referências e com adição de fibra de aço .87	

Figura 45 - Resistência à tração - traços referências e com adição de fibra de vidro AR .....	88
Figura 46 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	89
Figura 47 - Módulo de elasticidade - traços referências e com adição de fibra de aço .....	90
Figura 48 - Módulo de elasticidade - traços referências e com adição de fibra de vidro AR.....	90
Figura 49 - ANOVA fator duplo com repetição para módulo de elasticidade aos 28 dias.....	91
Figura 50 - Resistência à tração na flexão - traços referências e com adição de fibra de aço .....	92
Figura 51 - Resistência à tração na flexão - traços referências e com adição de fibra de vidro AR.....	93
Figura 52 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração na flexão aos 28 dias.....	93
Figura 53 - Absorção por capilaridade - traços referências e com adição de fibra de aço .....	95
Figura 54 - Absorção por capilaridade - traços referências e com adição de fibra de vidro AR.....	96
Figura 55 - ANOVA fator duplo com repetição para absorção por capilaridade - Fibra de aço .....	97
Figura 56 - ANOVA fator duplo com repetição para absorção por capilaridade - Fibra de vidro AR.....	98
Figura 57 - Absorção por capilaridade às 72 horas - Fibra de aço.....	99
Figura 58 - Absorção por capilaridade às 72 horas - Fibra de vidro AR.....	99
Figura 59 - ANOVA - Massa específica seca .....	102
Figura 60 - ANOVA - Massa específica seca .....	103
Figura 61 - ANOVA - Massa específica seca .....	104
Figura 62 - Resistência à compressão traços finais .....	106
Figura 63 - Tração na flexão para traços finais .....	108
Figura 64 - Módulo de elasticidade da segunda etapa .....	109
Figura 65 - Gráfico dos dados obtidos no ensaio de resistência residual .....	110

Figura 66 - Mostra os gráficos dos 4 corpos de prova (CP) e os polinômios obtidos para aproximação dos gráficos .....	111
Figura 67 - (a) curva obtida através dos dados experimentais; (b) Curva desenvolvida através dos polinômios obtidos .....	111
Figura 68 - Resistência residual segunda etapa .....	112
Figura 69 - Gráfico dos dados obtidos no ensaio de resistência residual .....	113
Figura 70 - Mostra os gráficos dos 4 corpos de prova (CP) e os polinômios obtidos para aproximação dos gráficos .....	114
Figura 71 - (a) Curva obtida através dos dados experimentais; (b) Curva desenvolvida através dos polinômios obtidos .....	114
Figura 72 - Resistência residual segunda etapa .....	115
Figura 73 - Comparação entre os gráficos médios dos traços TF00A38 e TF30A38 .....	116
Figura 74 - Gráfico CMOD x Carga .....	117
Figura 75 - Gráfico CMOD x Carga .....	119
Figura 76 - Anova ensaios CMOD.....	122
Figura 77 - Diâmetro do disco de carga utilizado .....	123
Figura 78 - Gráficos do Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38.....	124
Figura 79 - Corpos de prova após Ensaio Barcelona Simplificado.....	125
Figura 80 - Gráfico com os corpos de prova selecionado .....	125
Figura 81 - Gráfico Força x TCOB .....	126
Figura 82 - Gráficos do Ensaio Barcelona Simplificado - T30A38.....	128
Figura 83 - Corpos de prova após Ensaio Barcelona Simplificado.....	129
Figura 84 - Deslocamento do pico para o eixo .....	130
Figura 85 - ANOVA aplicado a Resistência Residual.....	132
Figura 86 - Correlação entre ensaio Barcelona e Ensaio da EN 14651 .....	133
Figura 87 - Gráfico com os CPs do ensaio de CMOD - T00A38.....	135
Figura 88 - Gráfico com os CPs do ensaio de CMOD - T30A38 .....	135
Figura 89 - Curvas coesivas ajustadas para os ensaios das vigas em concreto sem agregado reciclado.....	136

Figura 90 - Curvas coesivas ajustadas para os ensaios das vigas em concreto com agregado reciclado.....	136
Figura 91 - Comparação dos resultados de simulação com ensaios experimentais(concreto sem agregado reciclado).....	137
Figura 92 - Comparação dos resultados de simulação com ensaios experimentais (concreto com agregado reciclado) .....	137

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	4
1.1.1. Objetivo específico .....	4
<b>2. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO .....</b>	<b>5</b>
2.1. Geração de resíduo de construção e sua classificação .....	5
2.2. Produção de agregado reciclado .....	8
2.3. Caracterização dos agregados reciclados .....	13
2.4. Um olhar sobre as normas e procedimentos internacionais.....	14
2.5. Análise do comportamento mecânico e características físicas de concretos com agregado reciclado .....	20
<b>3. Concreto com fibras.....</b>	<b>28</b>
3.1. Fibras .....	28
3.2. Compósito de concreto com fibras .....	31
3.2.1. Avaliação do comportamento mecânico de concreto com fibras .....	36
<b>4. Concreto com agregado reciclado e fibra.....</b>	<b>45</b>
<b>5. Análise numérica de estruturas em concreto.....</b>	<b>49</b>
5.1.1. Fraturas coesivas.....	50
<b>6. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>53</b>
6.1. Produção e caracterização dos materiais – Etapa 1 .....	53
6.1.1. Caracterização do agregado miúdo - Areia.....	56
6.1.2. Caracterização do agregado graúdo - Brita .....	58
6.2. Dosagem-Etapa 2 .....	60
6.3. Produção e caracterização do concreto – Etapa 3.....	62
6.4. Análise de dados - Quarta etapa.....	63
6.5. Re-Produção dos melhores traços - Quinta etapa .....	65
6.5.1. Ensaio CMOD - Resistência à tração na flexão (Limite de Proporcionalidade e resistência residual) .....	67
6.5.2. Ensaio Barcelona Simplificado:.....	71
6.5.3. Ensaio Resistência Residual (C1399):.....	76
6.6. Análise inversa - Sexta etapa.....	79
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>83</b>
7.1. Parte experimental – Inicial.....	83
7.1.1. Resistência à compressão .....	83

7.1.2. Resistência à tração por compressão diametral .....	86
7.1.3. Módulo de elasticidade.....	89
7.1.4. Resistência à tração na flexão .....	92
7.1.5. Absorção por capilaridade.....	95
7.1.6. Absorção por imersão e massa específica.....	100
7.1.7. Justificativa para escolha traço final.....	105
7.2. Parte experimental - Final .....	106
7.2.1. Resistência à compressão .....	106
7.2.2. Resistência à tração na flexão .....	107
7.2.3. Módulo de elasticidade.....	109
7.2.4. Resistência residual segundo norma ASTM C1399 .....	110
7.2.4.1. T00A38.....	110
7.2.4.2. T30A38.....	113
7.2.5. CMOD .....	116
7.2.5.1. T00A38.....	116
7.2.5.1. T30A38.....	119
7.2.6. Resistência residual e Tenacidade segundo ensaio Barcelona Simplificado .....	123
7.2.6.1. T00A38.....	124
7.2.6.1. T30A38.....	128
7.2.7. Comparação entre os métodos de ensaio para determinação da Resistência Residual .....	132
7.2.8. Comparação entre os métodos de ensaio para determinação da Resistência à tração .....	134
7.3. Análise no Programa FitFG - Determinação de curva coesiva.....	134
<b>8. Conclusão.....</b>	<b>138</b>
8.1. Sugestão para trabalhos futuros .....	140
<b>9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>141</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é o segundo material mais consumido mundialmente, perdendo apenas para a água. Isso ocorre devido a versatilidade de seu uso, podendo ser utilizado na construção de casas, edifícios, pontes, usinas hidrelétricas etc. Sua versatilidade se dá devido ao composto ser plástico, quando em estado fresco e possuir alta resistência depois de endurecido. Essas características permitem que ele seja moldado e que alcance altas resistências, (PEDROSO, 2009).

Com relação ao consumo de energia, Pedroso (2009) afirma que o concreto consome menos energia e emite, proporcionalmente, menos poluentes em comparação a produção de alumínio, aço e vidro, assim, o concreto é mais sustentável nesse quesito. No entanto, no que se refere à reciclagem é o material menos sustentável.

Os materiais que compõe o concreto são finitos, além disso, tanto a extração de recursos naturais quanto a produção de materiais, que são utilizados pela construção civil, geram impactos ambientais. Outros grandes problemas na construção civil são a quantidade de resíduos de construção e demolição gerados e o frequente descarte em locais impróprios, como os aterros clandestinos. Esses problemas enfrentados pela construção civil são causadores de grandes impactos ambientais. Sendo assim, é visível a necessidade de mudanças, e para isso são necessários altos investimentos públicos, (TAVARES e KAZMIERCZAK, 2016).

Miranda *et al.* (2016), baseado em um levantamento junto a cerca de 100 usinas recicladoras, observou que aproximadamente 52% dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) que chegam as usinas é totalmente triado, 23% não é triado e 25 % parcialmente triado. Além disso, a composição dos RCD é predominantemente misto, 50% cinza com 50% vermelho, e representa 69% dos RCDs. O material cinza equivale a 19%, material exclusivamente de concreto a 1% e o material exclusivamente cerâmico, representa 11%.

Com a alta taxa de geração de resíduos e com a utilização de materiais finitos na construção civil, uma medida alternativa que pode ser utilizada no Brasil, como já vem sendo utilizada em outros países, é a utilização do agregado reciclado

na produção de concreto. Apesar do uso de agregado reciclado ser importante, sua utilização altera algumas propriedades do concreto, como por exemplo, resistências à tração, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Além disso, os agregados reciclados possuem propriedades físicas e mecânicas heterogêneas, prejudicando a repetibilidade de sua aplicação. A porosidade e a absorção dos agregados reciclados influenciam significativamente nas propriedades do concreto, (DIAS et al., 2017).

Alguns estudos realizados (DELLA PIETRA et al., 2003; DELLA PIETRA e SOUZA, 2006; SANTOS et al., 2017) afirmam que a utilização das fibras em concreto com agregado reciclado geram melhoras no comportamento do compósito, como aumento de tensão de ruptura, aumento de energia de fratura etc. Além disso afirmam que algumas propriedades se aproximam daquelas obtidas com agregados convencionais.

As fibras suprem algumas deficiências comuns ao concreto convencional, além disso, a maneira de preparo é similar, apenas com a necessidade de maior atenção na dosagem, lançamento e vibração. Apesar dos benefícios que o concreto reforçado com fibra traz, seu uso ainda é bastante restrito no Brasil, sendo usado principalmente para pavimentação, concreto projetado e pré-moldados, (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

Dos poucos estudos que avaliam concreto com agregado reciclado de concreto (ARC) e fibra, pode-se citar os estudos de Tavares e Kazmierczak (2016), que usaram agregado reciclado e fibra de vidro para a elaboração de concreto permeável. Outro estudo foi de Santos (2014), a qual realizou estudos com agregado reciclado e fibra de aço para a elaboração de pisos táteis. Os estudos de Della Pietra et al. (2003) e Della Pietra e Souza (2006) são estudos que também utilizam agregado reciclado e fibra de aço para avaliar a resistência à tração para diferentes porcentagens de fibras e utilização do agregado reciclado seco e úmido.

Para que a Construção Civil se torne um segmento sustentável é necessário pensar nesse segmento como um ciclo fechado, ou seja, é necessário começar a reaproveitar e reutilizar. Desta forma, o agregado reciclado que é

proveniente da própria construção e deveria ser aplicado neste mesmo segmento de mercado.

Além da análise do concreto produzido com ARC e fibras, o comportamento estrutural utilizando este material é muito importante. Para este tipo de análise, existe também as modelagens numéricas. Segundo Carmo *et al* (2006), a modelagem numérica de estruturas de concreto reforçado com fibras é muito complexa, além da necessidade de conhecimento sobre o comportamento mecânico desse material.

Esse estudo avaliou o efeito da substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado de concreto com adição de fibras, de aço e vidro AR, para melhorar as propriedades mecânicas quando comparado ao concreto com agregado convencional.

O estudo utilizou o programa FitFG para determinação da energia de fratura e da curva coesiva dos ensaios experimentais. Este programa simula o ensaio de flexão de 3 pontos através do método dos elementos finitos (MEF) e do modelo *Cracked-Hinge* desenvolvido por Olesen (2001).

## **1.1. OBJETIVOS**

Analisar o comportamento mecânico de concretos produzidos com agregado reciclado e fibras de aço e vidro AR e utilizar os dados experimentais, por meio de programas de modelagem numérica, para obter os valores de energia de fratura e a curva coesiva de alguns traços.

### **1.1.1. Objetivo específico**

- ✓ Avaliar o comportamento físico e mecânico de concreto elaborado com substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado e reforçado com fibras;
- ✓ Avaliar através de um programa de modelagem numérica as energias de fraturas e curvas coesivas de traços de concreto selecionado;
- ✓ Comparar métodos de ensaio para a determinação de resistência residual.

## **2. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO**

### **2.1. Geração de resíduo de construção e sua classificação**

No Brasil, os resíduos de construção civil representam entre 50% e 70% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerado. Além disso, muitos desses resíduos são descartados em locais impróprios, e representam um grave problema na maioria das cidades brasileiras, (GONSALEZ, 2017).

Segundo John e Agopyan (2000) é possível que a massa de resíduo de construção e demolição (RCD) nas regiões urbanas seja superior aos resíduos sólidos domiciliares. A quantidade gerada de RCD é grande e, em sua maioria, são depositados em lugares ilegais nas cidades que não possuem política adequada para esses resíduos.

A construção civil é considerada um forte expoente na economia nacional, entretanto é um grande responsável pelos impactos ambientais. Um dos motivos da alta geração de RCD no Brasil é a técnica construtiva predominante, concreto armado e os materiais empregados durante a construção. Sendo assim, o Brasil gera muito mais resíduos em comparação com os países que se utilizam de técnicas construtivas secas como steel-framing ou wood-framing, (AMADEI *et al.*, 2011).

Existem dados muito distintos a respeito da quantidade de RCD reaproveitada nos diferentes países, porém a sociedade está buscando a redução da geração de resíduos e aumentando o reaproveitamento desse material. Para isso, a maior aplicabilidade ocorre na indústria da construção civil, principalmente na forma de agregado reciclado, (BRASILEIRO e MATOS, 2015).

Atualmente, o Brasil, possui políticas de reciclagem de resíduos sólidos, como por exemplo a Lei 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) e a Resolução 307/2002 (CONAMA, 2002). Apesar dessa Lei ser recente, já provocou mudanças nos projetos e canteiros de obra, buscando reduzir a geração de RCD e dando destinação adequada aos mesmos. Além disso, serviu para guiar a sociedade quanto a responsabilidade de cada um a respeito dos resíduos gerados, (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

Conforme prevê a Lei 12305 (BRASIL, 2010), o gerador é responsável pela gestão dos resíduos gerados, levando muitas empresas do setor em parceria com os sindicatos da construção a desenvolver ações para separação dos resíduos na própria obra e definir a destinação adequada para cada tipo de resíduo gerado.

A engenharia civil é responsável pelo consumo intenso de recursos naturais, sendo assim, os entulhos devem ser vistos como uma oportunidade de redução de gastos e, até mesmo, geração de lucro. Os resíduos de construção e demolição (RCD) devem ser gerenciados de maneira correta para que o reaproveitamento possa ocorrer, (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

"Os resíduos de construção são constituídos de uma ampla variedade de produtos, que podem ser classificados em: Solos; Materiais cerâmicos, que compreendem concreto, argamassas a base de cal ou cimento, tijolos e telhas cerâmicos, cerâmica branca, especialmente a de revestimento, cimento-amianto, gesso em pasta ou placas e vidro; Material metálico, como aço para concreto armado, chapa de aço galvanizado, latão etc.; Materiais orgânicos: como madeiras, plásticos, materiais betuminosos, tintas, restos de vegetais e outros, resultantes de limpeza de terrenos." (NASCIMENTO *et al.*, 2015)

Segundo John e Agopyan (2000), o RCD é viável tecnicamente e ambientalmente, já que o risco de contaminação pode ser considerado baixo, apesar de ser necessário um controle mínimo, principalmente para resíduos industriais. A redução da geração desse resíduo é complexa, e necessita de prazos maiores para serem atingidas.

Segundo ABRELPE (2016), em 2015, a quantidade de RCD coletado no Brasil foi de 123.721 toneladas/dia, em 2016 foi de 123.619 toneladas/dia indicando uma constância da quantidade de RCD gerado.

Verificou-se que nos anos de 2015 e 2016 a região sudeste foi a região que mais coletou RCD no Brasil. Apesar da região sudeste coletar a maior quantidade de RCD, o seu índice de coleta em função do número de habitantes não é o maior do país (0,741 kg/habitante/dia - em 2016), contra a região que apresentou um maior índice de coleta (0,882 kg/habitante/dia - em 2016), a região centro-oeste, (ABRELPE, 2016).

Segundo a Resolução do CONAMA 307 (BRASIL, 2002) e CONAMA 348 (BRASIL, 2004), o artigo 4º estabelece que os geradores deverão ter como objetivo não gerar resíduos. Caso isso não seja possível, deverão tentar reduzir, reutilizar ou reciclar. Por último, na ausência de outras alternativas, deverão dar uma destinação final sem dispô-los em aterros de resíduos domiciliares. No Art. 3º, o CONAMA classifica os resíduos, conforme descrito abaixo:

"Art. 3º Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso; (Redação dada pela Resolução nº 469/2015);

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; (Redação dada pela Resolução nº 431/11).

IV - Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde."

CONAMA 307 (BRASIL, 2002); CONAMA 348(BRASIL, 2004)

## **2.2. Produção de agregado reciclado**

Segundo Lima e Lima (2009), o gerenciamento de resíduos envolve diversas etapas, sendo elas: Planejamento; Caracterização do RCD; Triagem ou Segregação; Acondicionamento; Transporte interno do RCD; Reutilização e reciclagem na obra; Remoção dos resíduos do canteiro - Transporte externo; Destinação dos resíduos.

Na primeira etapa - o planejamento - é necessário a interação entre projetos, para que todos sejam compatíveis. Outros itens importantes no planejamento de uma obra dependem da exatidão nas cotas, nos níveis e nas alturas, além das corretas especificações dos materiais e o detalhamento dos projetos, (LIMA E LIMA, 2009).

Na segunda etapa - a caracterização - os resíduos gerados devem ser identificados e quantificados, para que dessa maneira possa ser planejado a redução, reutilização, reciclagem e a destinação final. A identificação do resíduo deve ser analisada por etapa, para que haja uma melhor interpretação do momento de reutilização e das quantidades de RCD geradas, (LIMA E LIMA, 2009).

Na terceira etapa - a triagem - a segregação do material e destinação de cada resíduo para locais corretos é mais adequada quando o gerador faz na origem. Para que a triagem seja feita é indicado que os resíduos sejam colocados em pilhas e no final de cada dia de serviço ou após o término de tarefa seja executada a triagem na pilha. Além de facilitar a triagem, essa prática manterá o canteiro sempre limpo e organizado. Após essa segregação o resíduo deve ser acondicionado em depósitos distintos, para que esse resíduo possa ser reaproveitado futuramente, (LIMA E LIMA, 2009).

A quarta etapa - o acondicionamento - está dividido em duas partes, acondicionamento inicial e final. No acondicionamento inicial, o material é colocado perto dos locais de segregação, quando atingido um volume considerável ocorrerá o transporte interno desse resíduo para o depósito final de onde saíram para seu destino final. Os dispositivos de armazenamento inicial são, geralmente, bombonas, bags, baias e caçambas estacionárias (Figura 1), e elas devem estar sempre sinalizadas com os tipos de resíduos que devem receber. Já o acondicionamento

final depende do tipo de resíduo, da quantidade gerada e da destinação prevista, sendo assim, os materiais que serão destinados para outros locais devem estar em posição de fácil acesso para a remoção através dos agentes transportadores (Figura 2), (LIMA E LIMA, 2009).

Figura 1 - Dispositivos de armazenamento inicial



Fonte: Lima e Lima (2009)

Figura 2 - Acondicionamento final do resíduo



Fonte: Lima e Lima (2009)

Na quinta etapa - o transporte interno de RCD - ocorre, geralmente, através de carrinhos ou giricas, elevadores de carga, guias e guinchos. Em alguns casos o transporte pode ser manual, com auxílio de sacos, bags ou fardos, (LIMA E LIMA, 2009).

A sexta etapa - a reutilização e reciclagem na obra - só ocorre se a reutilização de materiais for prevista e planejada desde o projeto, para que o resíduo tenha aplicabilidade na própria obra até o final da mesma. O reaproveitamento deve seguir a Agenda 21, além disso, é necessário que as normas regulamentadoras sejam seguidas e que o material seja enquadrado no padrão de qualidades que essas normas exigem, (LIMA E LIMA, 2009).

Podem haver parcerias para a realização de análises, ensaios e determinação de traços que serão empregados para a reutilização dos RCD. A Tabela 1 indica o tipo de resíduo gerado em cada etapa da obra e os possíveis reaproveitamentos no canteiro de obra e fora dele, (LIMA E LIMA, 2009).

Tabela 1- Identificação dos resíduos por etapas da obra e possível reaproveitamento

<b>Fase da obra</b>	<b>Tipos de resíduos possivelmente gerados</b>	<b>Possível reutilização no canteiro</b>	<b>Possível reutilização fora do canteiro</b>
<b>Limpeza do terreno</b>	Solos	Reaterros	Aterros
	Rochas/ vegetação/ galhos	-	-
<b>Montagem do canteiro</b>	Blocos cerâmicos/ concreto (Areia e brita)	Base de piso, enchimentos	Fabricação de agregados
	Madeiras	Formas/ escoras/ travamentos (gravatas)	Lenha
<b>Fundações</b>	Solos	Reaterros	Aterros
	Rochas	Jardinagem/ Muros de arrimo	-
<b>Superestrutura</b>	Concreto (areia e brita)	Base de piso/ enchimento	Fabricação de agregados
	Madeiras	Cercas/ Portões	Lenha
	Sucata de ferro/ Fôrmas plásticas	Reforço para contra piso	Reciclagem
<b>Alvenaria</b>	Blocos cerâmicos/ Blocos de concreto/ Argamassa	Base de piso/ Enchimento/ Argamassas	Fabricação de agregados
	Papel/ plástico	-	Reciclagem
<b>Instalações hidro-sanitárias</b>	Blocos cerâmicos	Base de piso/ Enchimento	Fabricação de agregados
	PVC/ PPR	-	Reciclagem
<b>Instalações elétricas</b>	Blocos cerâmicos	Base de piso/ Enchimento	Fabricação de agregados
	Conduítes/ mangueira/ Fio de cobre	-	Reciclagem
<b>Reboco interno/ externo</b>	Argamassa	Argamassa	Fabricação de agregados
<b>Revestimentos</b>	Pisos/ Azulejos cerâmicos	-	Fabricação de agregados
	Piso laminado de madeira/ papel/ papelão/ plástico	-	Reciclagem
<b>Forno de gesso</b>	Placas de gesso acartonado	Readequação em áreas comuns	-
<b>Pinturas</b>	Tintas/ Seladores/ Vernizes/ Textura	-	Reciclagem
<b>Cobertura</b>	Madeiras	-	Lenha
	Cacos de telha de fibrocimento	-	-

Fonte: Adaptada de Lima e Lima (2009)

Nessa etapa, a reciclagem é dividida em duas partes, a que ocorre dentro do canteiro de obras e a que ocorre fora do canteiro de obras. A primeira pode trazer inúmeros benefícios para a obra, tais como: redução do volume de descarte, redução do consumo de matéria prima, redução dos acidentes de trabalho (canteiros mais limpos e organizados), redução do número de caçambas retiradas da obra, melhoria na produtividade, etc. Na segunda, a reciclagem ocorre em Centrais de Reciclagem de RCD, conforme Figura 3, a qual mostra uma central de reciclagem em São José do Rio Preto-SP , (LIMA E LIMA, 2009).

Figura 3 - Usina de reciclagem em São José do Rio Preto/SP



Fonte: Lima e Lima (2009)

A sétima etapa - o transporte externo de RCD - é representada pela coleta, a qual deve ser controlada através do preenchimento de uma ficha que contenha dados do gerador, tipo e quantidade dos resíduos, dado do transportador e dados da destinação final, é importante que as empresas sejam licenciadas para esses tipos de serviços (transporte e destinação final), (LIMA E LIMA, 2009).

Na oitava etapa - a destinação dos resíduos - ocorre de acordo com o tipo de resíduo. Resíduos de classe A devem ser destinados para áreas de triagem e transbordo, áreas de reciclagem ou aterros da construção civil. Resíduos da classe B podem ser comercializados com empresas, cooperativas ou associações de coleta seletiva. Classe C e D devem ser destinados aos fornecedores, já que esses tem corresponsabilidade na destinação dos mesmos, (LIMA E LIMA, 2009).

Segundo Porto (2011), a reciclagem de RCD pode seguir três tipos de plantas diferentes, conforme sua finalidade e características, sendo elas: fixas, semi-

móveis e móveis. O processo de reciclagem segue uma sequência de operações conforme descritas abaixo:

- I. O entulho é trazido através de caminhões, os quais são pesados e levados para o pátio de recepção, local onde o caminhão é vistoriado superficialmente para verificar se a carga é compatível com o equipamento de trituração da usina. Caso os padrões estejam fora, o caminhão é encaminhado para um aterro, caso contrário, faz a descarga no pátio;
- II. Após a carga estar no pátio é feita uma separação manual, a qual é retirada materiais como: plásticos, metais e matéria orgânica. Apesar da separação ser manual é auxiliada por uma pá carregadeira que revira o material. Esses materiais separados são classificados em comercializáveis, como exemplo a sucata ferrosa, e inservíveis, os quais são separados para destinação futura;  
Observações: Não devem ser aceitos materiais que tenham dimensões maiores que a boca do alimentador, além de elementos de concreto que tenham ferragem embutida. Além de não serem aceitos materiais contaminados por grande quantidade de plástico, pois pode danificar o equipamento.
- III. Após toda a separação e análise do material, o mesmo deve ser levemente umedecido, geralmente através de um sistema de aspersão de água. Esse processo tem o intuito de minimizar a poeira gerada com a trituração do material.
- IV. O material é colocado no alimentador com auxílio de uma pá carregadeira. Após passar pelo alimentador o material segue para o moinho, local onde ocorrerá a trituração.
- V. Após triturado, o material segue por uma esteira rolante, a qual é equipada por um separador magnético para separar os resíduos de ferro que passaram pela triagem. Em seguida segue até uma peneira vibratória, a qual é responsável pela separação do material na granulometria selecionada.
- VI. Em seguida, cada uma das granulometrias é transportada para seus respectivos pátios de estocagem através de uma esteira

transportadora, a qual é montada sobre rodízio que permite o deslocamento no semicírculo no pátio de estocagem.

### 2.3. Caracterização dos agregados reciclados

A NBR 15116 (ABNT, 2004) tem como objetivo estabelecer requisitos para o emprego do agregado reciclado de RCD para produção de concreto sem fins estruturais e para pavimentação. A norma especifica que o agregado reciclado deve ser produzido a partir de resíduo classe A. O agregado reciclado produzido pode ser classificado em dois tipos:

- I. Agregado de resíduo de concreto (ARC) - Deve ser composto de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rocha.
- II. Agregado de resíduo misto (ARM) - Deve ser composto por menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rocha.

Para que o agregado reciclado possa ser utilizado em concreto sem função estrutural deve atender aos requisitos da Figura 4, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004).

Figura 4 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural

Propriedades	Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
	ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos	1			ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1			ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais <sup>1)</sup>	2			Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2			ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3			-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)	≤10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	

<sup>1)</sup> Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: NBR 15116 (ABNT, 2004)

Além disso, a NBR 15116 (ABNT, 2004) orienta que a composição granulométrica do agregado deve estar de acordo com a norma de agregado natural, NBR 7211 (ABNT, 2009a). A norma também permite que caso a composição granulométrica do agregado reciclado não estiver conforme a norma pode ser corrigida através da adição de agregados convencionais.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) exige que ocorra a pré-molhagem dos agregados, utilizando 80% do teor da capacidade de absorção de água do agregado reciclado em uso.

Por fim, a NBR 15116 (ABNT, 2004) especifica na Figura 5 os ensaios necessários para a caracterização do agregado reciclado.

Figura 5 - Determinação do tipo e frequência da execução dos ensaios

Propriedades		Método de ensaio	Frequência de ensaios	
			Concreto sem função estrutural	Camada de pavimento
Composição granulométrica		ABNT NBR 7181	Não se aplica	A cada lote
		ABNT NBR NM 248	A cada lote	Não se aplica
Teor de material passante na peneira 75 µm		ABNT NBR NM 46	A cada lote	Não se aplica
Absorção de água	Agregado graúdo	ABNT NBR NM 53	A cada lote	Não se aplica
	Agregado miúdo	ABNT NBR NM 30		
Torrões de argila e materiais fráveis		ABNT NBR 7218	A cada lote	Não se aplica
Índice de forma (agregado graúdo)		ABNT NBR 7809	Não se aplica	A cada lote
Índice de suporte Califórnia e expansibilidade		ABNT NBR 9895	Não se aplica	A cada lote
Composição do agregado graúdo		Anexo A	A cada lote	
Percentual de materiais não minerais no agregado miúdo		Anexo B	A cada lote	
Teor de cloretos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6 000 m <sup>3 1)</sup>	Não se aplica
Teor de sulfatos		ABNT NBR 9917	Uma vez por mês ou 6 000 m <sup>3 1)</sup>	

<sup>1)</sup> O que primeiro ocorrer.

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2009a)

#### 2.4. Um olhar sobre as normas e procedimentos internacionais

A NBR 15116 (ABNT, 2004) especifica ainda que os agregados reciclados só podem ser utilizados na produção de concreto sem fins estruturais.

Segundo Gonçalves e Brito (2010) e Gonçalves e Brito (2008), a maioria das normas internacionais classificam os agregados recicláveis de acordo com sua composição e sua destinação. Geralmente são feitas três classificações:

- ✓ RCA (agregado reciclado de concreto)
- ✓ MRA (mistura de agregado reciclado de concreto e de alvenaria)
- ✓ RMA (agregado reciclado de alvenaria)

Gonçalves e Brito (2010) apresentam um panorama sobre o tipo e aplicação dos agregados reciclados em diferentes países, conforme apresentado abaixo:

- **ALEMANHA:**

Segundo Gonçalves e Brito (2010) a Norma DIN 4226-100 “Aggregates for mortar and concrete – recycled aggregates” (2002) especifica os requisitos para agregados reciclados com densidade de 1500kg/m<sup>3</sup> ou maiores quando usadas em argamassa e concreto. O agregado reciclado é dividido em grupos variando conforme sua composição original:

- ✓ resíduos de concreto;
- ✓ resíduos de construção e demolição;
- ✓ resíduos de alvenaria;
- ✓ Mistura de material.

Ademais, os agregados reciclados de concreto e de resíduos de demolição podem ser usados na produção de concreto estrutural, segundo a norma DIN 4226-100, enquanto que os agregados de alvenaria e os agregados mistos podem ser usados apenas em elementos não estruturais. Além disso, não é permitido a utilização de areia reciclada no concreto, (GONÇALVES E BRITO, 2010).

Na situação menos exigente, pode-se substituir 35% e 25% de agregado reciclados por agregado graúdo natural, sendo que essas substituições permitem a produção de concretos com classes de resistências até C25/30 e C30/37, respectivamente. O concreto com agregado reciclado é permitido em ambientes secos ou com baixa umidade. Quando os riscos de ataques ambientais ao concreto aumentam é permitido uma menor quantidade de substituição, (GONÇALVES E BRITO, 2010).

- **HONG KONG**

Segundo Gonçalves e Brito (2010) a Specification Works Bureau Technical Circular nº 12 (2002) "Specification facilitating the use of recycled aggregates" (2002), há dois tipos de uso para os agregados reciclados na produção de concreto, ambos são determinados pela quantidade de agregado graúdo no compósito.

- Teor de 20% de agregado reciclado: Pode ser usado em concreto estrutural, cuja resistência à compressão é de até 35 MPa;
- Teor de 100% de agregado reciclado: Não pode ser utilizado na produção de concreto estrutural, cuja resistência à compressão seja superior a 20 MPa.

- **JAPÃO**

Segundo Gonçalves e Brito (2010) The Building Contractors Society of Japan publicou "Proposed standard for the use of recycled aggregate sand RAC" (1977), o qual não limita o uso do agregado reciclado de alvenaria de concreto. Entretanto, estabelece um alto limite para a densidade seca do agregado reciclado, sendo assim não é possível utilizar agregado reciclado cerâmico.

Segundo Gonçalves e Brito (2010) a norma determina que o concreto executado com agregado reciclado graúdos seja limitado a 18 MPa. E o concreto executado com agregado reciclado graúdo e miúdo seja limitado a 12 MPa. Além disso, ambos são recomendados apenas para uso em concreto não estrutural.

Atualmente, existem um conjunto de normas japonesas que regulam o uso dos agregados reciclados no concreto, sendo elas, (GONÇALVES E BRITO, 2010):

- ✓ JIS A 5021 (2011) - Agregado reciclado para concreto - Classe H - Diz respeito ao uso de agregados reciclados em concreto de alto desempenho
- ✓ JIS A 5022 (2012) - Agregado reciclado para concreto - Classe M - Regula o concreto com agregado reciclado não afetado por ciclos de congelamento / descongelamento

- ✓ JIS A 5023 (2012) - Agregado reciclado para concreto - Classe L - Regula a aplicação de agregados reciclados em concreto não estrutural.

Esses documentos estabelecem requisitos que são impostos aos agregados, sendo que o agregado da classe H possui mais exigências do que os concretos da classe L. Esses requisitos estão ligados ao tipo de aplicação pela qual o concreto (com o agregados incorporado) terá, (GONÇALVES E BRITO, 2010).

- **RILEM**

Segundo Gonçalves e Brito (2010), a norma RILEM TC 121-DRG - "Guidance for demolition and re-use of concrete and masonry" (1994) não especifica nada a respeito dos agregados miúdos reciclados, porém, quanto ao agregado reciclado graúdo há diferentes classes. São elas:

- ✓ Tipo I: Agregados originados principalmente, de resíduos de alvenaria.
- ✓ Tipo II: Agregados originados, principalmente, de resíduos de concreto.
- ✓ Tipo III: Agregados compostos de uma mistura de agregados naturais e reciclados. Essa mistura deve ser composta por 80% de agregado natural e 10% de agregado Tipo I.

Essa norma permite que haja até 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, além do mais permite uma classe de resistência de no máximo C50/50, quando utilizado o agregado do tipo II. Isso é possível devido aos coeficientes corretivos adotados durante o projeto estrutural, para isso é levado em consideração a densidade do agregado para definir a resistência e deformação do concreto que será utilizado, (GONÇALVES E BRITO, 2010).

- **REINO UNIDO**

Segundo Gonçalves e Brito (2010), na norma britânica, BS 8500:2 "Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1 - Part2: Specification for constituent material sand concrete" (2002) não há especificações a respeito do agregado miúdo, entretanto, o agregado graúdo é dividido em dois grupos:

- ✓ RCA (agregado reciclado de concreto): Pode ser usado em estruturas com classe de resistência de no máximo C40/50 e pode ser utilizado em locais com maior exposição.
- ✓ RA (agregado reciclado): É limitado ao uso em concretos com classe de resistência de no máximo C16/20 e apenas em locais com menor exposição.

- **HOLANDA**

Segundo Gonçalves e Brito (2008), o CUR (Centro de investigação Holandês) desenvolve especificações para a utilização dos agregados reciclados, as especificações foram as seguintes:

- ✓ CUR Betonpuingranulaaten als toeslagsmateriaal vor beton. Aanbeveling a, CUR-VB, Holanda, 1984 - Especificação para utilização de agregado reciclado proveniente da britagem de concreto;
- ✓ CUR Betonpuingranulaaten metselwerkpuins granullat alls toeslagmateriaal van beton. Rapport 125, CUR, Holanda, 1986 - Especificação homóloga para agregados reciclados de alvenaria;
- ✓ CUR Metselwerkpuingranulaat als Toeslagsmateriaal vor Beton. Aanbeveling 5, CUR-VB, Holanda, 1994 - Especificação para agregado proveniente de resíduos de argamassa britada.

A norma Holandesa especifica a utilização de agregado reciclado em concreto simples, armado ou pré-esforçado. Além disso pode ser utilizada o agregado reciclado fino ou grosso. Para taxa de substituição de agregado natural por agregado reciclado em até 20% o concreto deve ser encarado como convencional. Para taxa de substituição de agregado natural por agregado reciclado em mais de 20%, são apresentados coeficientes para corrigir algumas propriedades do concreto. (GONÇALVES E BRITO, 2008)

- **PORTUGAL**

Segundo Moreno e Pimentel (2017) a utilização da EN 12620 pela comunidade europeia para classificação e composição e classificação dos agregados reciclados, em Portugal utiliza-se a LNEC E 471-2009: Guia para

utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a qual especifica três tipos de agregados:

- ✓ ARB1 (agregado reciclado de concreto) - Pode ser substituído 25% do agregado natural por ele. E a classe de resistência do concreto a ser produzido com ele é no máximo de C35/45.
- ✓ ARB2 (agregado reciclado de concreto)-Pode ser substituído 20% do agregado natural por ele. E a classe de resistência do concreto a ser produzido com ele é no máximo de C40/50.
- ✓ ARC (mistura de concreto e alvenaria) - Pode ser usado apenas em concreto não estrutural

- **BÉLGICA**

Segundo Gonçalves e Brito (2010) a prescrição técnica padrão utilizada é a PTV 406 "Recycled aggregates from construction and demolition waste" (2003) estabelece a composição dos agregados reciclados para utilização em concretos e os dividem em três grupos:

- ✓ Agregados reciclado de concreto;
- ✓ Agregados reciclado de alvenaria;
- ✓ Agregado misturado de concreto e alvenaria.

- **SUÍÇA**

Segundo Gonçalves e Brito (2010) a norma OT 70085 (2006) - "Instruction technique Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris", existem dois tipos de incorporação:

- ✓ Utilizando na maior parte até 20% de agregado reciclado - Não necessita de alterações no projeto estrutural
- ✓ Incorporação de até 100% de agregado reciclado - Necessita de alterações no projeto com correção no módulo de elasticidade, deformação e retração.

## **2.5. Análise do comportamento mecânico e características físicas de concretos com agregado reciclado**

Topçu e Sengel (2004) fizeram um estudo com objetivo de determinar uma quantidade ótima de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto, sendo o agregado reciclado de concreto produzido em laboratório com resistência de 14 MPa. Em seguida, executaram concretos com duas resistências, 16 MPa e 20 MPa, e para cada uma dessas resistências foram feitos traços com 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado (produzido no laboratório - 14MPa).

O estudo de Topçu e Sengel (2004) mostrou que quanto maior a quantidade de agregado reciclado, menor é a massa específica do concreto endurecido, ou seja, os concretos com agregado reciclados mostraram ser 6% mais leves com relação ao concreto com agregado natural. Na compressão, os concretos com agregado reciclado tem uma queda em relação ao concreto com agregado natural, com redução de até 33% para os concretos com resistência de 16 MPa e de até 23,5% para concretos com resistência de 20 MPa. Para a resistência à flexão, em ambas as resistências de concreto - 16 MPa e 20 MPa - ocorreu uma queda com o aumento de agregado reciclado no concreto. No concreto com resistência de 16 MPa essa queda chegou a 13% para o concreto com 100% de agregado reciclado, já no concreto com resistência de 20 MPa essa queda chegou a 27% para o concreto com 100% de agregado reciclado. Com isso os autores concluem que a resistência à compressão diminui com a utilização do agregado reciclado. Quanto à trabalhabilidade os autores afirmam que os concretos com mais de 50% de agregado reciclado tendem a ter maiores problemas. Sendo assim, os autores afirmam que a produção de concretos com resistência de 16 MPa é possível desde que não ultrapassem 30% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto com resistência de 14 MPa.

Cabral *et al.* (2008) fizeram um estudo com 50 traços combinando agregado miúdo e graúdo sendo que cada um deles possui 4 tipos :natural, reciclado de cerâmica vermelha, reciclado de concreto e reciclado de argamassa. Além disso as porcentagens de agregados foram variadas entre 25%, 33%, 50% e 100%, outro aspecto que foi variado é a relação água/cimento que variou entre 0,46; 0,60; 0,74.

Após todas essas combinações os autores estudaram o módulo de deformação dos concretos. Sendo assim os autores concluíram que todos os traços produzidos com agregado reciclado apresentaram módulo de deformação menores que o concreto produzido com agregados naturais. Além disso, o agregado graúdo reciclado de cerâmica vermelha foi o traço que exerceu a maior influência sobre o módulo de deformação.

Moreira e Figueiredo (2010) fizeram um estudo com a utilização de quatro tipos de agregado reciclado, sendo eles provenientes de dois tipos de britagem/separação, mandíbula e jigue, e de duas cidades, São Paulo e Macaé. Para a utilização desse agregado, foram utilizados aqueles com granulometria entre 4,8 e 19 mm. Foram realizados três tipos de dosagem, as quais foram denominadas de traço rico, intermediário e pobre. Os agregados reciclados foram colocados na betoneira sem pré-saturação e o ajuste do abatimento foi feito através da correção da quantidade de água para atingir a trabalhabilidade necessária.

Moreira e Figueiredo (2010) concluíram com esse estudo que a separação por densidade faz com que o comportamento do agregado reciclado e o agregado natural fiquem próximos. Os concretos produzidos em São Paulo estão mais próximos dos produzidos com aqueles produzidos em Macaé, já que o agregado de São Paulo é mais denso. Para a mesma faixa de resistência, os agregados menos densos necessitam de mais cimento para atingir a resistência requerida. Os autores acrescentam que a utilização do agregado reciclado sem pré-saturação, pode ter possibilitado o preenchimento dos agregados pela pasta de cimento, sendo assim possibilitou menor diferença com os concretos com agregado natural, principalmente com os concretos com maior relação água/cimento.

O estudo de Benetti (2012), avaliou o comportamento de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto. Os estudos foram divididos em dois grupos. No "Grupo A" o agregado reciclado foi obtido através de uma indústria de pré-fabricados, sendo um deles resíduos de concreto plásticos com cura convencional (RCC) e o outro de resíduo de concreto seco submetido a cura térmica (RCT). Foram preparados três traços (pobre, intermediário e rico) com 0% e 50% de substituição do agregado graúdo natural pelo agregado reciclado de ambos os tipos do grupo A. No "Grupo B", o agregado reciclado utilizado foi de concreto produzido

em laboratório. Foram feitos dois traços, um com resistência de 18 MPa ( $a/c=0,85$ ), e outro com resistência de 50 MPa ( $a/c=0,43$ ). Para cada um desses traços foram feitas substituições de 25%, 50%, 75%, 100% do agregado reciclado de concreto pelo agregado natural.

Benetti (2012) observou que, no "Grupo A", o módulo de elasticidade dinâmico (ocorre através de ensaios destrutivos, conforme C597 (ASTM, 2009)) sofre influência conforme o tipo de agregado e o processo de cura do mesmo. O concreto referência com o concreto com RCC não possuem diferenças significativas em relação ao módulo de elasticidade, já o concreto com RCT, possuem queda em relação ao concreto sem agregado reciclado. No "Grupo B", observou-se que a média dos módulos de elasticidade dinâmicos não teve variações significativas entre os concretos com agregado reciclado das classes de 18 MPa e de 50 MPa. De maneira geral, o módulo de elasticidade é maior em concretos sem resíduos.

Benetti (2012), também, observou a influência da umidade no módulo de elasticidade dinâmico. Verificou que os corpos de prova úmidos apresentaram valores maiores de módulo de elasticidade que os corpos de prova que estavam secos. Essa diferença ocorreu em todos os teores de substituições, em ambas as resistências ensaiadas e em ambos os grupos estudados.

Kubissa *et al.* (2015), utilizaram dois métodos para tentar melhorar a granulometria do agregado natural. O agregado natural estudado consistia em 75% de granulometria entre 2-4 mm. No primeiro método, parte desse agregado natural foi substituído por agregado reciclado de concreto de baixa qualidade com granulometria entre 2-16 mm. No segundo método, parte do agregado natural foi substituído por agregado reciclado de concreto de boa qualidade por frações entre 4-8mm e 8-16mm. As propriedades mecânicas do concreto com esses agregados reciclados de concreto foram testada quanto a durabilidade, e pode-se afirmar que, com base nos resultados, os dois métodos conseguiram melhorar as propriedades vitais do concreto.

Esse estudo conclui que a adição de agregado reciclado de concreto a um agregado natural que não atende os requisitos de granulometria é um método eficiente e fácil, e insere esse material na construção civil novamente. A substituição

de no máximo 50% de agregado natural por agregado reciclado de concreto, quando seco ao ar, pode ser utilizado sem mudanças na composição da mistura de concreto, apesar de haver algumas mudanças em relação a consistência e a propriedades mecânicas. Esse rearranjo permitiu uma melhoria na resistência à compressão, além disso, observou-se uma correlação entre a alta absorção do agregado reciclado com a absorção do concreto.(KUBISSA *et al.*, 2015)

Spohr *et al.* (2015) fizeram um estudo utilizando agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) utilizando corpos de provas de concreto britados (do Laboratório de Engenharia Civil da Unijuí), os quais foram britados similares a brita 1. Foram feitos ensaios com o traço referência (0% de agregado reciclado), com 10%, 40%, 70% e 100% de substituição de agregado natural por AGRC, mantendo a trabalhabilidade em  $90\pm 10$ mm, o que ocasionou diferentes relações a/c. Além disso foram utilizadas duas relações a/c para o traço referência, sendo elas de 0,45 e 0,55.

Como resultado, Spohr *et al.* (2015) obtiveram que a resistência à compressão, aos 7 e 28 dias, foi maior para o referência do que para os outros traços em ambas as relações a/c. Para a resistência à tração na compressão diametral (aos 28 dias), o traço referência também obteve valores maiores, mas os traços com substituições obtiveram valores muito próximos, mas quanto maior a quantidade de agregado reciclado menor é a resistência. Sendo assim os autores concluíram que as propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado e o referência são similares, com isso os autores consideraram as diferenças aceitáveis, segundo os resultados obtidos.

Silva *et al.* (2015) elaboraram um trabalho que analisou 2 traços de resistência de 30 MPa, sendo 1:1,94:3,06:0,6, porém um com apenas agregado natural e outro com 25% de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto. Os autores concluíram após análise estatística que o traço com 25% de agregado reciclado não alterou de forma significativa as propriedades do concreto quando comparado com o concreto produzido apenas com agregado natural. Os autores concluíram que a utilização de agregado graúdo reciclado de concretos para concretos estruturais foi viável quando analisada a resistência à compressão aos 28

dias. Porém alertaram da importância da boa caracterização e seleção com controle desse material, além do tratamento prévio do mesmo.

Moitinho e Leite (2015) estudaram 3 dosagens diferentes de concreto, e para cada dosagem foi produzido um concreto somente com agregado natural e outro com 50% de agregado reciclado. O agregado graúdo reciclado utilizado proveniente de resíduos de argamassas de assentamento e revestimento. A taxa de absorção do agregado graúdo reciclado foi aproximadamente 10 vezes maior que a taxa de absorção do agregado natural. Os resultados obtidos pelos autores concluem que o uso do agregado reciclado exerce influência na produção do concreto com utilização desse material. Quanto mais rico o traço, maior é a quantidade de cimento, portanto maior é a resistência à compressão e na resistência à tração, ocorrendo uma maior influência do agregado reciclado.

Araújo *et al.* (2016) fizeram um estudo com quatro porcentagens de substituições de agregado natural por agregado reciclado cinza, proveniente de resíduos de concreto e argamassa de construção e demolição (19%, 43%, 75%, 100%) e uma porcentagem de substituição do agregado natural por agregado reciclado tratado (26%). O consumo de cimento utilizado variou entre 460 e 480 kg/m<sup>3</sup>. O traço escolhido foi 1:1,44:2:0,45, sendo as substituições conforme descritas acima. A relação água/cimento (0,67 – 0,50 – 0,40) foi mantida constante para que os autores pudessem comparar as resistências mecânicas dos traços, e para obter o abatimento entre 80 e 100 mm foi necessário a utilização de aditivos, já que o agregado reciclado retira parte da água disponível durante a mistura do concreto.

Nos estudos de Araújo *et al.* (2016), os resultados obtidos foram que com substituição de 19% do agregado natural pelo agregado reciclado obteve-se o maior valor de resistência à compressão, tanto aos 7 quanto aos 28 dias. Já nos traços com 43% e 75% do agregado natural pelo agregado reciclado observou uma redução da resistência à compressão (próxima a 30 MPa), e ocorreu um aumento, novamente, com 100% de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado. Através do teste de comparação das médias, os autores concluíram que independente do teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado não ocorreram alterações significativas da resistência à compressão. Na resistência à tração por compressão diametral, o teste de comparação de médias, mostrou que

independente da porcentagem de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado não ocorreu queda significativa na resistência. Os autores, também concluem - através do teste de comparações múltiplas de médias, com o teste de Tukey - que o módulo de elasticidade foi influenciado com a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, o qual teve redução média no módulo de elasticidade de 6% a 12%. Apesar da redução apresentada, o autor após análise estatística, observou que a redução não foi significativa.

Santos (2016), fez um estudo para entender a dosagem e produção de concretos com agregado reciclados de concreto, provenientes de concretos de uma fábrica de pré-moldados, todos com resistência entre 25 e 40 MPa. Para análise desses concretos foram executados ensaios tanto no estado plástico (trabalhabilidade - Ensaio de espalhamento na mesa Graff), quanto no estado endurecido (resistência à compressão). Além disso foi feita uma análise estatística de variância, usando o Software Statistica®.

Os ensaios dos agregados mostraram que no estudo de Santos (2016), o agregado reciclado possuía módulo de finura semelhante ao agregado natural. A massa específica do agregado reciclado é 1% menor quando comparado com o agregado natural. Já a taxa de absorção de água do agregado reciclado (4,5%) é 11 vezes maior que do agregado natural (0,4%). A partir da massa específica a autora concluiu que o agregado reciclado é de qualidade, além da taxa de absorção ser inferior quando comparado a outras encontradas na literatura (entre 6 e 7%)

Santos (2016) concluiu que, naquele estudo, a utilização de agregado reciclado em porcentagens entre 20 e 40% não apresentou efeito significativo sobre os resultados de resistência à compressão, o qual se repetiu para todos os métodos de dosagem utilizados. Porém, entre os métodos de dosagem utilizados, a resistência à compressão teve melhor desempenho no método do IPT/EPUSP.

Thomas et al. (2016) fizeram o estudo com 4 misturas, sendo uma com agregado natural e as outras com substituições de 20%, 50% e 100% de agregado natural por agregado reciclado proveniente de resíduos de concreto estrutural pré-moldado (resistência à compressão mínima de 25 MPa). O valor do coeficiente de absorção de água do agregado reciclado é de 4,37%. Com os ensaios e as análises

os autores concluíram que o concreto com agregado reciclado possui maior resistência à compressão isso ocorre já que existe uma diminuição na relação água/cimento. Os concretos com substituição de 20% possuem um excelente desempenho quando comparado ao concreto referência

Pelissari (2016) fez um estudo com concretos de 30 MPa, com traço de 1:2,02:2,58:0,54, com substituições de 0% (referência - sem agregado reciclado), 10%, 20%, 50% e 100% de agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (ARC). A autora concluiu que o agregado graúdo reciclado compara com o natural possui: menor massa específica, menor massa unitária, maior capacidade de absorção de água e maior índice de vazios. O traço com 10% de ARC e o referência não precisarão de aditivo superplastificante, já para os outros traços (20%, 50% e 100% de ARC) foi necessário o uso do aditivo. Todos os concretos atingiram a resistência esperada de 30MPa, porém quanto maior a porcentagem de agregado reciclado, menor foi a resistência obtida. Esse comportamento se repetiu para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade, já que ambos tiveram uma diminuição conforme o aumento da quantidade de agregado reciclado no traço. Isso ocorre, pois o módulo de elasticidade está associado à porosidade e dureza do agregado graúdo, sendo assim, devido a maior porosidade do ARC em relação ao agregado natural, ocorre uma maior limitação para as deformações da matriz, ocorrendo assim diminuição no módulo de elasticidade. A porosidade do ARC fez com que a absorção para os concretos com agregado reciclado sejam maiores que para o concreto referência. A autora conclui que analisar somente a resistência a compressão é falho, já que os concretos estudados estavam com resistências superiores a 30 MPa, mas as outras propriedades acabaram prejudicando a qualidade do concreto

Conforme Senaratne *et al.* (2017), uma das principais características do agregado reciclado é a diminuição na resistência do concreto. Muitas pesquisas tentam melhorar as falhas do agregado reciclado, com uso de aditivos ou com alteração do método de produção. Com isso, esse estudo realizou entrevistas com empresas australianas que atuam na área da construção, para fazer o seguinte questionamento: "Quais facilitadores e barreiras afetam a utilização do concreto com agregado reciclado como material estrutural?".

A pesquisa mostrou que, no geral, os profissionais e as indústrias na área de construção estavam preocupados com os custos iniciais por serem mais altos. Os participantes da pesquisa solicitaram uma análise de ciclo de vida, para que assim eles pudessem avaliar e quantificar o potencial econômico desse material. Outros pontos que incentivariam o uso desse material seriam: maior motivação, como por exemplo, uma classificação verde mais alta para o uso de agregado reciclado em estruturas e projetos governamentais. Outra alternativa seria a utilização desse material em painéis pré-moldados. (SENARATNE *et al.*, 2017)

### **3. CONCRETO COM FIBRAS**

O concreto é um material com limitações, já que é frágil e possui baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando tracionado, além de sua resistência à tração ser baixa em comparação a resistência à compressão. Para minimizar essas limitações, o uso de fibras para o reforço do concreto é uma alternativa. O concreto com fibras é considerado um compósito, constituído por duas fases distintas principais: o concreto e as fibras. As fibras podem ser metálicas (aço), vidro, sintéticas, etc. As fibras são elementos descontínuos que possuem comprimento variados, (FIGUEIREDO, 2011).

#### **3.1. Fibras**

Nos tempos modernos, o primeiro composto amplamente difundido foi o cimento amianto. Atualmente, muitos materiais recebem fibras como reforço. Muitas fibras têm sido utilizadas para reforço de concretos como são os casos das fibras de aço, vidro, carbono, kevlar, polipropileno, etc. As fibras variam no quesito propriedades, eficácia e custo. A Tabela 2 mostra as propriedades típicas de algumas fibras bastante utilizadas e coloca as propriedades da matriz cimentícia, para comparações, (BENTUR; MINDESS, 2007).

As fibras podem se diferenciar quanto a geometria, já que isso interfere diretamente na ligação mecânica com a matriz cimentícia. Atualmente, as fibras podem ser de vários formatos, tais como: perfiladas, ganchos ou extremidades deformadas, podem ocorrer como filamentos agrupados ou filmes fibrilados, soltas ou podem ser utilizadas na sua forma contínua (tapetes, por exemplo), (BENTUR; MINDESS, 2007).

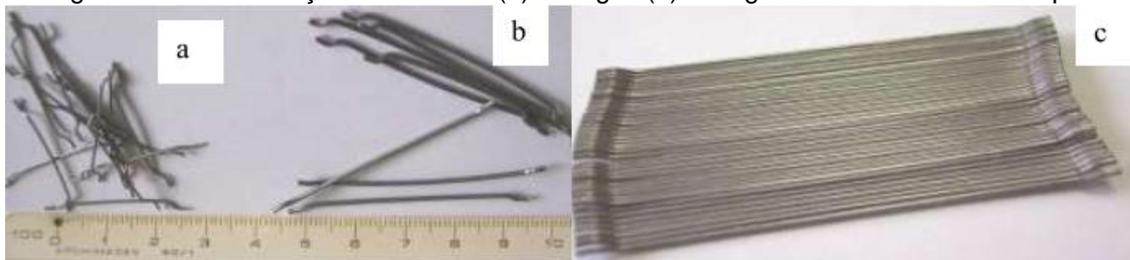
Tabela 2- Propriedades típicas das fibras

Fibra	Diâmetro (µm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento de ruptura (%)
<b>Aço</b>	5-500	7,58	200	0,5-2,0	0,5-3,5
<b>Vidro</b>	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
<b>Amianto</b>	-	-	-	-	-
<b>Crocidolita</b>	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2,0-3,0
<b>Crisolita</b>	0,02-0,4	2,6	164	3,1	2,0-3,0
<b>Polipropileno</b>	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
<b>Aramida (Klevar)</b>	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
<b>Carbono (alta resistência)</b>	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
<b>Nylon</b>	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
<b>Celulose</b>	-	1,2	10	0,3-0,5	-
<b>Acrílico</b>	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
<b>Polietileno</b>	25-100	0,92-0,96	5	0,08-0,6	3-100
<b>Fibra de madeira</b>	-	1,5	71,0	0,9	-
<b>Sisal</b>	10-50	1,5	-	0,8	3,0
<b>Matriz cimentícia (para comparação)</b>	-	1,5-2,5	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Adaptada de Bentur e Mindess (2007)

As fibras de aço, geralmente, possuem a extremidade em forma de gancho, para auxiliar no aumento da ancoragem. As fibras possuem comprimentos variando de 25 mm (fibras curtas) a 60 mm (fibras longas). Além disso, elas podem ser soltas ou em forma de pentes. A Figura 6 abaixo ilustra os modelos encontrados no mercado, (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 6 - Fibras de aço soltas curtas (a) e longas (b) e longas coladas em forma de pentes (c)

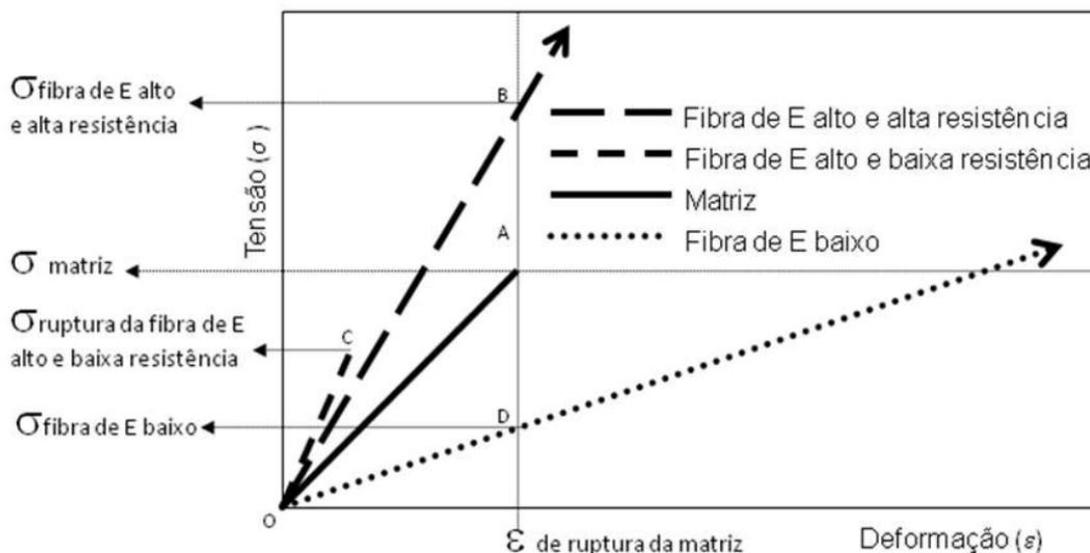


Fonte: Figueiredo (2011)

O módulo de elasticidade e a resistência das fibras são definidos pelo tipo de material da que elas são feitas. As fibras podem ter baixo ou alto módulo de elasticidade. As fibras de aço são consideradas fibras de alto módulo, já que

possuem módulo de elasticidade mais alto do que o do concreto. A Figura 7 mostra o diagrama de tensão por deformação elástica da matriz e fibras com baixo e alto módulo de elasticidade. (FIGUEIREDO, 2011)

Figura 7 - Diagrama de tensão por deformação elástica da matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto



Fonte: Figueiredo (2011)

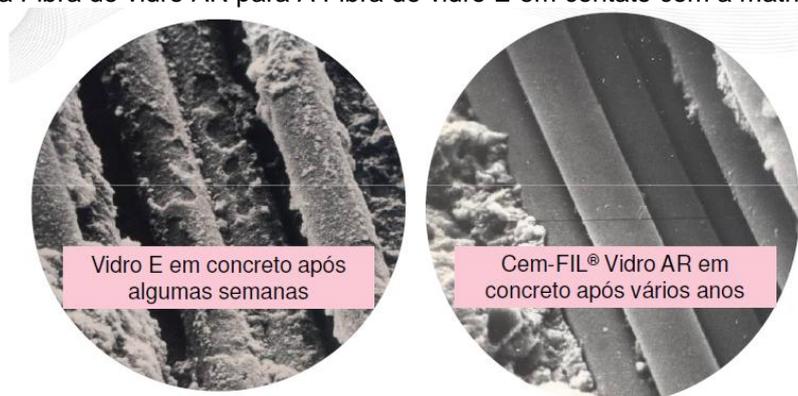
Segundo Santiago (1997) apud Vefago (2006), existem vários tipos de fibra de vidro no mercado, sendo elas:

- Vidro A e C: São utilizados em camadas superficiais, já que possuem alta resistência química, e são resistentes a corrosão.
- Vidro B (Boro silicato de cálcio): Possui como principais características a extensa durabilidade e excelente propriedades elétricas.
- Vidro D (Dielétrico): É empregado na construção de componentes eletrônicos, já que possui propriedades elétricas.
- Vidro E: É o tipo de fibra de vidro mais utilizada, devido a suas propriedades, entre elas, o isolamento elétrico em ambiente onde a alcalinidade é baixa, elevada resistência a tração e baixa absorção de umidade.
- Vidro R e S: Suas principais características são a alta resistência à tração e à fadiga (aproximadamente 33% a mais que nas fibras de vidro tipo E), além disso consegue manter essas características em altas temperaturas. Portanto são utilizadas nas indústrias aeronáuticas, espacial e bélica.

- Vidro AR: Principal característica é a resistência aos álcalis do cimento a partir da incorporação do óxido de zircônia no seu processo de fabricação. Contudo, é utilizada na fabricação de peças em GRC (glassfiber reinforced concrete).

Um exemplo de fibra de vidro AR é Anti-Crak® HP 67/36 (CEM-FIL®, 2014). Essa fibra é resistente a álcalis e de alto desempenho, projetada para aumentar o desempenho a flexão, a resistência ao impacto e a resistência à fadiga. Além disso auxilia no controle de fissuras plásticas, térmicas e trincas por retração de secagem. A Figura 8 ilustra a diferença entre a fibra de vidro AR e a fibra de vidro E, após algum tempo em contato com a matriz cimentícia.

Figura 8 - Diferença da Fibra de vidro AR para A Fibra de vidro E em contato com a matriz cimentícia



Fonte: Araújo (2010)

### 3.2. Compósito de concreto com fibras

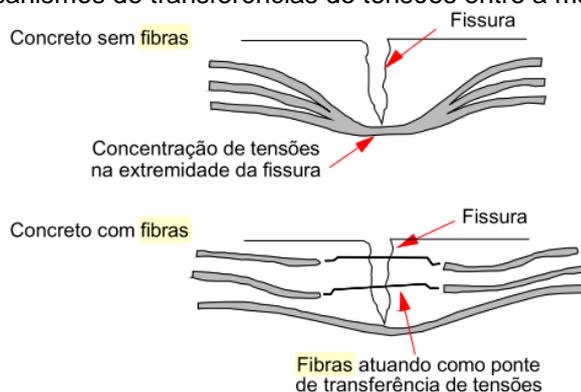
O concreto possui comportamento frágil e baixa capacidade de se deformar antes de romper, isso faz com que esse material seja limitado. Além disso possui baixa resistência à tração comparada a sua resistência à compressão. A combinação entre o concreto e a armadura de aço e/ou adição de alguns tipos de fibras permite com que o concreto tenha resistência à tração e ductibilidade necessárias. Mas além disso, a fibra pode conferir ao concreto diminuição de retração, e melhor comportamento pós fissuração, à erosão e à fadiga e maior resistência ao impacto, etc., (BENTUR e MINDESS, 2007).

Quando se trata de concreto é mais comum a utilização de armaduras para o reforço do material, já que as fibras não são tão eficientes na resistência a

tração quanto o reforço em barras de aço. Porém as fibras são descontínuas, ocasionando uma melhor distribuição na matriz cimentícia, enquanto as barras de aço reforçam apenas parte do concreto. Com isso, as barras de aço são mais utilizadas para aumentar a capacidade de carga do concreto, enquanto as fibras para um melhor controle de fissuração, (BENTUR e MINDESS, 2007).

As fibras atuam como pontes de transferências de tensão nas fissuras do concreto, com isso ocorre um aumento da energia associada à ruptura do compósito, além de restringir à propagação de fissuras. Apesar dos benefícios trazidos pelas fibras, é necessário a utilização correta para que isso ocorra, ou seja, é necessário que as fibras tenham módulo de elasticidade adequado ao concreto, além de serem adicionadas em teores corretos. Quando utilizadas de forma correta o compósito deixa de ter o caráter frágil. A Figura 9 mostra a diferença das tensões em concretos convencional e em concretos reforçados com fibras, (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 9 - Mecanismos de transferências de tensões entre a matriz e as fibras.



Fonte: Medeiros (2012)

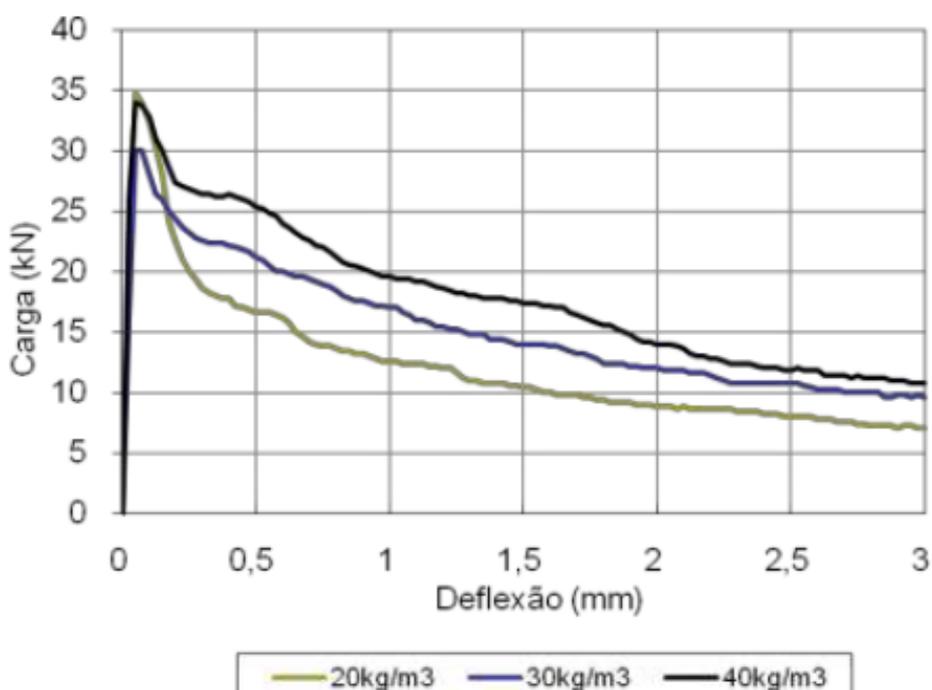
É necessário que haja um equilíbrio entre a fibra e a matriz, pois se a fibra não aderir adequadamente à matriz, podem escorregar quando submetidas a baixos carregamentos, e conseqüentemente não contribuirão tanto para a diminuição de fissuração. Mas, se a aderência da fibra com a matriz for muito alta, as fibras podem acabar se rompendo antes mesmo de dissipar a energia. Sendo assim, a interação fibra-matriz é de suma importância, porém depende de vários fatores, como o atrito fibra-matriz, a ancoragem mecânica da fibra na matriz e a adesão físico-química

entre os materiais. Todos esses fatores sofrem influência das características das fibras e da matriz, (MEDEIROS, 2012).

Fibras com baixo módulo de elasticidade, quando aplicadas à elevadas tensões, sofrem grandes deformações, ou seja, podem se romper. Portanto as fibras de baixo módulo de elasticidade são consideradas, convencionalmente de baixa capacidade de reforço pós-fissuração. Em contraposição as fibras de alto módulo de elasticidade e alta resistência suportam elevados níveis de tensão, no momento em que o compósito atinge a ruptura, (FIGUEIREDO, 2011).

A grande vantagem das fibras é que elas são distribuídas por toda a matriz cimentícia de maneira aleatória, reforçando todo o material. Durante a fase elástica a matriz com fibra e a matriz sem fibra trabalham de forma igual, porém após o pico ou depois da fissuração é possível notar que, com o aumento do teor de fibra na matriz cimentícia ocorre um aumento da carga resistida, o que pode ser observado na Figura 10, (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 10 - Curvas médias de carga por deflexão obtidas nos ensaios de tração na flexão de concretos de  $f_{ck}=20\text{MPa}$  e com diferentes porcentagens de fibra de aço



Fonte: Figueiredo et al.(2000) apud Figueiredo (2011)

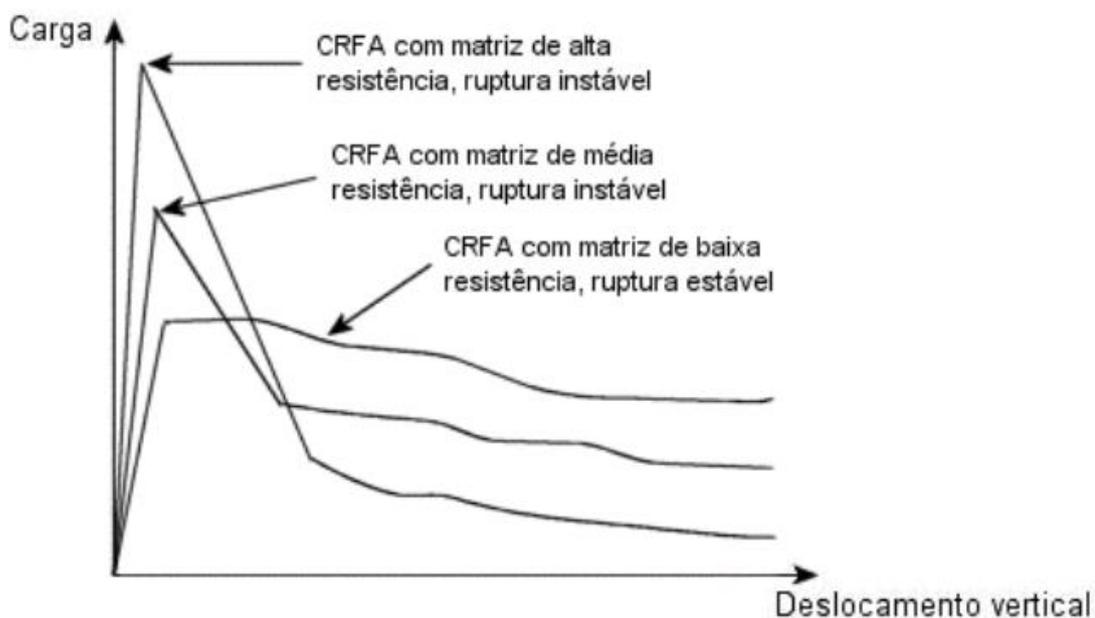
A geometria da fibra é importante para o desempenho após a fissuração do concreto, para isso é utilizado um parâmetro, fator de forma ( $\lambda$ ), que é obtido por

meio da divisão do comprimento da fibra pelo diâmetro equivalente da sua seção transversal. Geralmente o fator de forma é diretamente proporcional à capacidade resistente após a fissuração. A resistência da fibra afeta diretamente o comportamento do compósito, e quanto maior a resistência da fibra, maior será a capacidade resistente residual do compósito. É recomendado a utilização de fibras que possuam comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto, (FIGUEIREDO, 2011).

Tiguman e Figueiredo (2005), descrevem que:

"A instabilidade pós-pico está associada a uma queda abrupta do nível de tensões depois da ruptura da matriz, devido a uma grande diferença de tensões suportadas pela matriz e posteriormente pelas fibras. Tal diferença acontece em virtude da alta resistência mecânica da matriz (Figura 11), pelo baixo volume de fibras empregado ou pela quantidade de fibras presente na seção de ruptura."

Figura 11 - Instabilidade pós-pico para matrizes com diferentes resistências mecânicas



Fonte: Nunes (1998) apud Tiguman e Figueiredo (2005)

Segundo Carnio (2009), existem 3 faixas de teores de fibras em volume que podem ser adicionados a matriz cimentícia:

- ✓ Baixo teor - Até 0,5%
- ✓ Médio teor - Entre 0,5% e 1%
- ✓ Alto teor - Acima de 1%

Góis e Barboza (2009), afirmam que as fibras absorvem parte das tensões internas, já que a carga aplicada na matriz é transferida para as fibras, o que ocasiona, geralmente, um aumento do módulo de elasticidade e da tensão máxima, devido ao aumento da contribuição das fibras na resistência mecânica do compósito. A Figura 12 ilustra um gráfico de tensão x deformação dos concretos com e sem fibra. A utilização de baixos teores de fibras proporciona mudanças na tenacidade do concreto, que é expressa pelo alongamento da curva tensão x deformação, devido ao maior controle de fissuras.

Figura 12 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras



Fonte: Nunes (1998) apud Adaptado de Góis e Barboza (2009)

Góis e Barboza (2009) afirmam que o aumento da resistência à tração, agrega benefícios na estrutura, mas, ao mesmo tempo, o alto volume de fibras pode

comprometer a trabalhabilidade da mistura, o que ocasiona dificuldades durante o processo de moldagem do concreto. Porém um baixo volume de fibras aumenta a tensão transferida para a matriz, conseqüentemente para as fibras também, sendo assim, ocorre o rompimento da aderência fibra-matriz e o arrancamento das fibras. Para que as fibras sejam bem aproveitadas é necessário buscar, sempre que possível, a fração volumétrica que acarrete em aumento da resistência à tração e trabalhabilidade adequada para a mistura.

### **3.2.1. Avaliação do comportamento mecânico de concreto com fibras**

Para que os compósitos sejam utilizados de maneira efetiva e econômica é necessário a execução de ensaios que avaliem as propriedades desse compósito. Alguns ensaios necessários são comuns para qualquer tipo de concreto que esteja analisando, como é o caso da resistência à compressão, resistência à tração etc. Outras propriedades devem ser analisadas devido a utilização das fibras na matriz cimentícia, como é o caso dos ensaios que identifiquem propriedades como tenacidade, resistência residual, controle de trincas, resistência à impactos, etc., (BENTUR e MINDESS, 2007).

A alteração da resistência à compressão não é um dos objetivos da adição de fibras, mas devido as fibras servirem de ponte de transferência das tensões pelas fissuras, o concreto poderá apresentar um acréscimo de resistência à compressão. Entretanto estudos mostram que para consumos usuais de fibras (menores que 2% de volume) as alterações para o comportamento à tração e à flexão são maiores que para o comportamento do concreto à compressão, ou seja, para a resistência, módulo de elasticidade e a deformação específica relativa à tensão máxima, não existem grandes alterações, (MEDEIROS, 2012).

A resistência à tração pode ser obtida por 3 tipos diferentes de ensaios, sendo eles a tração direta, tração indireta (tração por compressão diametral) e a tração na flexão. Sendo os dois últimos mais comuns e mais simples de se executar, (MEDEIROS, 2012).

A tenacidade é a capacidade que o material tem de absorver energia por unidade de volume, até o rompimento desse material. O material é classificado como

frágil (quando absorve pouca energia antes de romper) ou tenaz (quando absorve bastante energia antes de romper). A energia total pode ser calculado através da área abaixo de um gráfico tensão x deformação do material.

Para avaliar os compósitos, a tenacidade possui a desvantagem de depender das dimensões do corpo-de-prova e do sistema de aplicação dos esforços, (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto convencional se rompe assim que atinge a resistência última, já o concreto com fibras, após atingir a tensão máxima, ainda suporta tensões e deformações. Com isso, o concreto com fibras não se rompe abruptamente, após a primeira fissura, pois ele ainda suporta tensões e deformações consumindo energia até a ruptura. Para o concreto com fibras, a falha ocorre, geralmente, devido ao escorregamento ou arrancamento das fibras, (MEDEIROS, 2012).

A resistência residual é calculada com base na teoria da elasticidade, que é uma simplificação do comportamento do material. Assim é possível converter a energia absorvida no ensaio, em tensão o que facilita a utilização dos valores obtidos para execução de dimensionamento das estruturas, (FIGUEIREDO, 2011).

Para avaliação dos concretos com fibra é usual a utilização de ensaios de resistência residual ou tenacidade, sendo assim, Salvador (2013) investigou 4 métodos para avaliação do comportamento mecânica do concreto com fibras, sendo esses ensaios:

- JSCE-SF (1984) - Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concretos reforçados com fibras de aço;
- ASTM C1609 (2010) - Método de avaliação do desempenho à flexão de concretos com fibras;
- ASTM C1399 (2010) - Método para obtenção de resistência residual de concreto reforçado com fibras;
- EN 14651 (2007) - Método de ensaio para concretos reforçado com fibras metálicas - Determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade e resistência residual)

A Figura 13 mostra os parâmetros necessários para a execução de cada um dos ensaios.

Figura 13 - Resumo dos principais itens dos quatro procedimentos normatizados (ASTM, 2010; JSCE, 1948; ASTM, 2010; EN, 2007)

Item	ASTM C1609	JSCE-SF4	ASTM C1399	EN 14651
Representação esquemática				
Tipo de ensaio	<i>closed-loop</i>	<i>closed-loop</i>	<i>open-loop</i>	<i>closed-loop</i>
Variável controlada	deslocamento vertical do corpo-de-prova	deslocamento vertical do corpo-de-prova	deslocamento vertical do corpo-de-prova	deslocamento vertical do corpo-de-prova, abertura de fissura
Geometria e dimensões do corpo-de-prova / mm <sup>3</sup>	prismático, 100 x 100 x 350 ou 150 x 150 x 500	prismático, 100 x 100 x 350 ou 150 x 150 x 500	prismático, 100 x 100 x 400	prismático, 150 x 150 x 550
Vão de ensaio / mm	300 ou 450	300 ou 450	300	500
Velocidade de deflexão – abertura de fissura / mm/min	0 a L/600: 0,06 a 0,12 L/600 a L/150: 0,06 a 0,24	0,15 a 0,50	0,50 a 0,80	0 a 0,10mm: 0,05 0,10 a 4,0mm: 0,2
Número de LVDTs	2	2	1ª etapa: 1 2ª etapa: 2	2
Pontos para análise do gráfico	Cargas residuais ( $P_{d,L/600}$ e $P_{d,L/150}$ )	Área sob a curva carga-deslocamento vertical	Cargas residuais ( $P_A$ , $P_B$ , $P_C$ e $P_D$ )	Carga máxima até 0,050mm ( $F_I$ ) e cargas residuais ( $F_j$ )
Resultado obtido	Resistências residuais ( $f_{d,L/600}$ e $f_{d,L/150}$ ), Tenacidade ( $T_{d,L/150}$ )	Tenacidade ( $T_b$ ) e fator de tenacidade à flexão ( $\bar{\sigma}_b$ )	Resistência residual média (ARS)	Limite de proporcionalidade ( $f_{ct,L}^f$ ) e resistências residuais ( $f_{R,i}$ )

Fonte: Salvador (2013)

Segundo Salvador (2013), cada método obteve resultados com diferenças significativas, sendo assim, o autor determinou equações que correlacionam cada método de ensaio, sendo essas correlações dependentes do tipo e do teor de fibra. O ensaio ASTM C1609 (2010) obteve vantagem no estudo devido ao comportamento pós-fissuração, que não foi afetado pela instabilidade pós-pico, mesmo com a utilização de baixos teores de fibra. A utilização do ensaio ASTM C1399 (2010), segundo o autor, para ocasiões em que não está disponível equipamento com controle de velocidade fechado, é o ensaio mais simples e rápido, podendo ser utilizado como controle tecnológico de obras. No ensaio EN 14651 (2007), as fissuras sempre ocorrem no plano do entalhe e se propagam de maneira estável, devido ao próprio entalhe que é executado para este ensaio, além disso os resultados desse ensaio podem ser relacionados a parâmetros de dimensionamento de estruturas.

Salvador (2013), também conclui que os ensaios de flexão em quatro pontos possuem desvios padrão maiores que os obtidos nos ensaios de três pontos. O desvio padrão da resistência residual está diretamente relacionado ao teor de fibras, ou seja, quanto maior o teor de fibras maior foi o desvio padrão. Além disso, o autor afirma que as dosagens de fibras normalmente utilizadas em campo não influenciam nas propriedades elásticas do concreto, somente melhoram a resposta pós fissuração do compósito. Os valores de fibras utilizados pelo autor foram de no máximo 1,0% em volume, e foi possível notar que essa porcentagem não prejudica a capacidade de compactação do concreto. Para auxiliar na compactação dos corpos de prova foi utilizada a mesa vibratória, que segundo o autor ajudou nas baixas variações de resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão.

A trabalhabilidade do concreto é alterada pelas fibras, isso ocorre, pois com a adição de fibra há mais área para ser molhada, e a quantidade de água disponível para fluidificar a mistura é menor. Quanto maior o fator de forma das fibras utilizadas na matriz cimentícia, maior será o impacto na trabalhabilidade do concreto, (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Armelin (1992) apud Figueiredo (2000), não existe consenso entre os resultados obtidos com ensaios de resistência à compressão, já que alguns apontam redução nos valores, o que pode ser ocasionado pela má compactação. Porém outros trabalhos apontam um aumento na resistência à compressão, a qual pode ser ocasionada devido as pontes de transferências que surgem com a adição de fibra, ocasionando também um ganho quanto à tenacidade.

Salvador e Figueiredo (2013) estudaram uma matriz cimentícia convencional, outra com três teores de fibra de aço (0,19%, 0,32% e 0,45%) e outra com seis teores de macrofibras poliméricas (0,22%, 0,33%, 0,50%, 0,66%, 0,82% e 1,0%). Para analisar os concretos com fibras, os autores fizeram o estudo das seguintes propriedades dos materiais, no estado fresco: Abatimento, massa específica e ar incorporado; para o concreto no estado endurecido fizeram ensaios para a determinação da resistência à compressão axial e resistência a tração na flexão, resistência residual, módulo de elasticidade e fator de tenacidade.

Salvador e Figueiredo (2013) concluíram, através dos ensaios de flexão (sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento) que, quando comparada as fibras em um mesmo teor de volume, as fibras de aço concedem maior resistência residual ao concreto, principalmente quando utilizadas para baixo nível de deformação. Quando utilizados alto nível de deformação, as fibras poliméricas podem resistir mais que as fibras de aço. As propriedades elásticas do concreto não são influenciadas pelas fibras de aço, isso ocorre devido aos baixos teores utilizados nesse estudo, apesar das fibras melhorarem o desempenho pós-fissuração do compósito. A capacidade de compactação do concreto não é prejudicada devido aos teores de fibra utilizados, além de possuírem baixíssima variação da resistência à compressão do compósito. Por fim, os autores correlacionaram a resistência residual e o fator de tenacidade com as dosagens de fibras, e obtiveram valores de  $R^2$  maiores que 0,99, o que indica que existe uma correlação muito boa entre os dois fatores, (SALVADOR e FIGUEIREDO, 2013).

No trabalho de Carnio (2009) foi realizado um estudo sobre a propagação de trinca por fadiga nos concretos reforçados com baixos teores de fibras de polipropileno e de aço. Foram utilizados baixos teores de fibras, pois estes são pouco explorados em pesquisas, entretanto são teores comuns para utilização em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos (exemplo: pavimentos). O traço utilizado para o experimento foi o traço em massa 1:2,14:0,72:3,35 com relação água/cimento de 0,55. O trabalho foi dividido em duas etapas:

- ✓ Inicial: Caracterização dos materiais utilizados no concreto, e ensaios de compressão axial e tração na flexão do concreto referência;
- ✓ Final: Foram executados novos ensaios de propagação de trinca por fadiga do concreto referência e dos com adição de fibras, além de ensaios de resistência à compressão axial, à tração por flexão, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Nos concretos com fibras, Carnio (2009) utilizou três diferentes teores de fibras, sendo elas 0,25%, 0,38% e 0,50%. Sendo 0,25% o valor mínimo estabelecido para que a fibra possibilitasse o reforço no concreto.

Carnio (2009) concluiu que o concreto que obteve a melhor resistência à propagação de trinca por fadiga foi o concreto com 0,50% de fibra de aço de 35 mm. Os concretos reforçados com fibra metálica de comprimento 60 mm e fibra de polipropileno de 54 mm apresentaram desempenho similar quanto à propagação de trinca, isso ocorreu para todos os teores de fibras. Os três traços de concretos com fibras metálicas mostraram um aumento significativo em relação à tenacidade comparado ao concreto simples. A resistência à propagação de trincas por fadiga só aumentou para as fibras com 35 mm de comprimento, porém foi a que obteve menor valor para a tenacidade. Para melhorar a resistência à propagação de trinca por fadiga foi admitido que o teor de fibra de 0,50% mostrou-se melhor, sendo assim para essa finalidade é indicado a utilização mínima de 0,50% de fibras.

Segundo o estudo de Silva Júnior et. al (2006), para concretos com fibras de aço, os ensaios de tração por compressão diametral e de tração na flexão indicaram aumento de resistência, conforme o aumento da dosagem de fibra. Para teores de fibras de 1%, a resistência à compressão axial do compósito caiu em relação ao concreto sem fibras, isso pode ter ocorrido devido ao ar incorporado pelas fibras. Entretanto com o teor de fibras de 2%, ocorreu um acréscimo de resistências em relação ao traço referência. A tenacidade aumenta mesmo com pequenos teores de fibras, além de melhorar o controle de fissura, o que melhora o comportamento do compósito pós-fissuração. Para ensaios de compressão e tração, o traço com brita de 12,5 mm indicaram melhores resultados em relação ao traço com brita de 19 mm.

O estudo de Medeiros, (2012) utilizou concreto de alta resistência e todos foram moldados com a mesma dosagem de concreto, sendo dividido em 3 tipos de ensaio: C1 (concreto sem fibra), C2 (concreto com 0,56% fibra de polipropileno) e C3 (concreto com 0,64% fibra de aço). O concreto foi produzido numa fábrica de estruturas pré-moldadas em Madri, Espanha. As fibras de polipropileno utilizadas eram do tipo corrugada com ganchos suaves as extremidades, com comprimento de 40 mm e fator de forma 62. Já as fibras de aço tinham ganchos nas extremidades, com comprimento de 35 mm, com fator de forma de 64.

Medeiros, (2012) obteve valores médios maiores para resistência à compressão para o concreto com fibras de aço (67 MPa) que para o concreto

convencional (56 MPa). Para o módulo de elasticidade os valores foram de 33 GPa para o concreto convencional e 35MPa para o concreto com fibra de aço. Para resistência à tração na flexão por 3 pontos, o concreto convencional obteve valor médio de 7,0 MPa, já para o concreto com fibra foi de 10,7 MPa. Nesse mesmo ensaio o autor obteve valores de resistência residual pela norma EN 14651 (2007), o qual obteve valores (para o concreto com fibras) de:  $fR1=6,4$  MPa;  $fR2=4,3$  MPa;  $fR3=3,1$  MPa e  $fR4=2,4$  MPa.

O estudo de Pereira (2017) utilizou 8 traços diferentes, sendo combinados entre duas resistências características (20 MPa e 40 MPa) e três volumes de fibras de aço (40 kg/m<sup>3</sup>, 50 kg/m<sup>3</sup> e 60 kg/m<sup>3</sup>), além do traço referência para as duas resistências características utilizadas. As fibras utilizadas foram da DRAMIX RC 60/65 RN, com fios de aço trefilado e seção circular, com comprimento de 60 mm. A autora conseguiu concluir através dos resultados obtidos que a adição de fibras de aço no concreto, de modo geral, teve um ganho para módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, porém o maior ganho foi obtido para a resistência à tração. Para ambos as classes de concreto, a adição de fibras de aço permitiu um aumento de tenacidade.

O estudo de (GUIMARÃES, 2015) utilizou o traço 1:2,50:3,10 com relação água/cimento de 0,55 e cimento CP V. Foram estudados dois tipos de fibra de aço, uma com fator de forma 65 e outra com fator de forma 80. Para cada um dos tipos de fibra foram utilizados 3 teores de fibras em volume, 0,25%, 0,35% e 0,60%. O autor concluiu que a adição de fibras praticamente não afetou a resistência à compressão axial. Quanto ao módulo de elasticidade longitudinal, pode-se afirmar que não ocorreram variações nos resultados médios quando adicionado fibras. Ocorreu uma tendência de aumento do módulo de ruptura, para ambos os fatores de forma. Quando analisada o fator de tenacidade, o autor conclui que existe uma tendência de aumento (comportamento logarítmico) conforme se aumenta o teor de fibras. Para o autor, os resultados dos ensaios de flexão a três pontos geraram resultados mais estáveis que os ensaios de flexão a quatro pontos, isso ocorre, pois no ensaio de três pontos a pré-fissura é induzida na viga. A energia de fratura aumenta com o aumento do teor de fibras (para ambos os fatores de forma), porém isso não pode ser afirmado devido a variação amostral.

O estudo de Dias (2018) utilizou 8 traços diferentes, sendo combinados entre duas resistências características (20 MPa e 40 MPa) e três volumes de fibras de aço: 40 kg/m<sup>3</sup> (0,37%), 50 kg/m<sup>3</sup> (0,50%) e 60 kg/m<sup>3</sup> (0,64%), além do traço referência para as duas resistências características utilizadas. Foram utilizadas fibras produzidas a partir de fios de aço trefilado, sendo a fibra da Belgo Bekaert Arames Ltda, DRAMIX RC 60/65 RN. O autor concluiu que a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade obteve ganhos quando comparado o concreto com fibras e o concreto convencional. Além disso o ganho mais significativo foi para a resistência à tração por compressão diametral do concreto com fibra. A tenacidade obteve maior ganho com o método ASTM C1609 quando o teor de fibra aumentou de 0,50% para 0,64%, para a classe de resistência de C40, com ganho de 50,14 N.m. Quando comparado uma classe com a outra, o maior ganho foi com o teor de 0,64%, com aumento de 18,92 N.m. Com isso, conclui-se que o acréscimo de tenacidade é maior com o aumento de fibra do que com o aumento da classe de resistência do concreto.

O estudo de Monte et al. (2014) utilizou o traço 1:1,57:1,96 (em massa de materiais secos) e relação água/cimento de 0,60. Nessa matriz foram adicionadas fibras de aço (0,25%, 0,375% e 0,50%) e fibras de polipropileno (0,50%, 0,75% e 1,00%), sendo os teores em volumes. A fibra de aço utilizada é do tipo A, ancorada nas extremidades, e classe I, oriunda de arame trefilado a frio), com fator de forma 45 e 30 cm de comprimento. Já as fibras de polipropileno são compostas de macrofibra estrutural monofilamento, com 54 mm de comprimento e fator de forma de 158. Os autores concluíram que o sistema aberto de controle de velocidade para métodos de ensaio de tenacidade (EBS - Ensaio Barcelona Simplificado) e JSCE-SF4) compromete a avaliação do comportamento mecânico em ambos os ensaios, principalmente para baixos teores de fibras e baixos níveis de deslocamento (ou abertura de fissura). O ensaio EBS apresentou-se menos sensível a variação nos teores de fibras em relação ao ensaio de flexão de vigas, principalmente com os menores teores de fibras. É possível correlacionar o ensaio EBS e o JSCE-SF4, obtendo bons resultados para tenacidade e resistência residual.

Salvador (2013), utilizou 3 matrizes de concreto com diferentes classes de resistências (30 MPa, 35 MPa e 40 MPa), para cada traço foram utilizados vários

teores de fibras de macrofibra polimérica (2,0 kg/m<sup>3</sup>, 3,0 kg/m<sup>3</sup>, 4,5 kg/m<sup>3</sup>, 6,0 kg/m<sup>3</sup>, 7,5 kg/m<sup>3</sup> e 9,0kg/m<sup>3</sup>). Para a fibra de aço (15 kg/m<sup>3</sup>, 25 kg/m<sup>3</sup> e 35 kg/m<sup>3</sup>) foi utilizada apenas a matriz de 35 MPa. Foram utilizados quatro métodos de ensaio (ASTM C1609, ASTM C1399, EN 14651 e ABNT NBR 5739). Cada um dos métodos ensaiados obteve valores distintos, porém é possível correlacionar os métodos de ensaios, além disso essas correlações são fortemente dependentes do tipo e teor de fibras.

Salvador (2013) concluiu que a norma ASTM C1609 (2015), mostrou-se vantajosa ao estudo, já que o comportamento pós-fissuração não foi afetado pela instabilidade pós-pico, mesmo com baixos teores de fibras. A ASTM C1399 (2015) é uma alternativa interessantes quando não estiver disponível o equipamento com sistema fechado de controle de velocidade, apesar de maior variação nos resultados. O ensaio EN 14651(2005) é interessante, pois a fissura ocorre no plano do entalhe e se propaga de maneira estável, além disso os resultados podem ser relacionados a parâmetros de dimensionamentos de estruturas. Pela ASTM C1399 (2015), a resistência residual média corresponde a aproximadamente, 74% do mesmo valor encontrado pela ASTM C1609 (2015), para os concretos reforçados com as fibras poliméricas, essa diferença é ocorreu em todos os traços estudados e é dependente do teor de fibras. Quando comparada a fibra polimérica e a fibra de aço, em um mesmo teor em volume, verifica-se que as fibras de aço possuem maiores resistências residuais, principalmente em baixos níveis de deformações, devido a sua maior rigidez.

#### 4. CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO E FIBRA

Há poucos estudos nesta linha de pesquisa, sendo o estudo de Della Pietra et. al (2003) um dos precursores. O estudo de Della Pietra et. al (2003) utilizou agregado reciclado e fibra. Para fazer a análise comparativa foi utilizado o traço 1:2:3, com relação água/cimento de 0,5. Foram utilizados o agregado natural (referência) e o agregado reciclado foi utilizado de duas maneiras: seco e úmido. Para cada um desses tipos de agregado utilizado foram adicionado três teores diferentes de fibras de aço, sendo eles: 10 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup>, 40 kg/m<sup>3</sup>. O agregado reciclado seco foi obtido após secagem na estufa, já o agregado reciclado úmido foi obtido deixando o agregado reciclado submerso em água por 24 horas e depois seco ao tempo por 1 hora (umidade de 9%). O traço com agregado reciclado seco e 40 kg/m<sup>3</sup> de fibra de aço não foi executado já que com 20 kg/m<sup>3</sup>, não ocorreu abatimento adequado, e com uma porcentagem maior de fibra seria ainda mais difícil moldar os corpos de prova.

Com esse estudo, Della Pietra et. al (2003) concluíram que concreto com agregado reciclado seco apresentaram resultados um pouco superiores, na maioria dos casos, porém não pode afirmar que houve diferença entre as médias de tensões. Além disso, os concretos com agregado reciclado seco absorvem mais água e dificultam a moldagem aumentando a porosidade, sendo assim ocorre uma diminuição na relação água/cimento, o que ocasiona um aumento na resistência do compósito. Tanto na resistência de ruptura, obtida no ensaio de tração na flexão (ASTM C 1018 (1994)), quanto na resistência residual (para deslocamentos de 0,5; 1 e 2 mm) ocorreu uma diminuição em relação ao concreto com agregado convencional. Quando aumenta o teor de fibras, as tensões de ruptura e as tensões residuais nos concretos com agregado reciclado se aproximam daquelas obtidas no concreto com agregado convencional.

Della Pietra e Souza (2006), afirmam que a utilização de baixos teores de fibras proporcionam um comportamento pseudo-dúctil ao concreto, isso ocorre porque as fibras atuam como pontes de transferência de tensões através das fissuras do concreto. O estudo dos autores foi sobre a influência de diferentes teores (10 kg/m<sup>3</sup>, 20 kg/m<sup>3</sup> e 40 kg/m<sup>3</sup>) de fibra de aço nas tensões de ruptura à tração na

flexão e nas tensões residuais, tanto para concretos convencionais como para concretos com agregado reciclado cinza. Também foi avaliada a influência da umidade no agregado reciclado na resistência à tração.

Para o estudo de Della Pietra e Souza (2006), foi utilizado o traço 1:2:3 com relação água/cimento de 0,50, com Cimento Portland - CII-E 32). A utilização do agregado reciclado foi feita de duas maneiras, a primeira, o agregado sofreu processo de secagem em estufa, a segunda, o agregado ficou submerso em água por 24 horas e depois sofreu processo de secagem ao tempo por 1 hora. As fibras utilizadas foram de aço com ancoragem em gancho e seção retangular, com comprimento de 50 mm. O concreto com agregado reciclado seco e 40 kg/m<sup>3</sup> de fibra não foi produzido, pois com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra não ocorreu abatimento. Todos os corpos de prova sofreram cura úmida durante os 7 dias, até o ensaio que ocorreu com essa idade.

Della Pietra e Souza (2006) concluíram que os compósitos com agregado reciclado seco obteve maior resistência quando comparado com os compósitos com agregado reciclado úmido, apesar de não haver diferença significativa entre as médias das tensões de ruptura dos compósitos tanto com agregado reciclado úmido quanto seco, já que a diferença foi de 5% de variação. No concreto convencional, os teores de fibra não alteraram as tensões de ruptura. Embora, para o concreto com agregado reciclado, o aumento de fibras ocasionou um aumento na tensão de ruptura do mesmo, principalmente, nos concretos com agregado úmido com 40 kg/m<sup>3</sup>, os quais obtiveram valores de tensão na ruptura mais próximos ao concreto convencional. Tanto para o concreto convencional quanto para o concreto com agregado reciclado, as resistências residuais aumentaram com o aumento do teor de fibras, e para os teores mais elevados de fibras os valores da tensão residual para concretos com agregado reciclado ficaram próximos dos concretos convencionais.

O estudo de Santos (2014) teve como principal objetivo avaliar a influência dos RCD nos concretos com fibra de aço, os quais foram produzidos utilizando agregado reciclado miúdo para a confecção de pisos táteis intertravados. Para esse estudo foram utilizadas substituições de agregado natural por agregado reciclado de 15%, 20%, 25% e 50%. Os ensaios feitos nesse estudo foram:

resistência à compressão axial, absorção de água, resistência à abrasão profunda, tenacidade e resistência à tração na flexão.

Santos (2014) concluiu que os concretos com maior porcentagem de agregado reciclado, até 25% de substituição, obtiveram melhores resistências à compressão axial, em contra posição os concretos com mais de 25% de substituição não mantiveram esse comportamento. Já na resistência à tração na flexão, os concretos com agregado reciclado sofreram um decréscimo em relação ao concreto referência. Por fim, a autora afirma que é viável a produção de concreto com fibras de aço e agregado reciclado miúdo para o uso de pisos intertravados. A autora observou que houve um aumento na energia de fratura para concretos até 20% de agregado reciclado, e para 25% a 50% de agregado reciclado ocorreu uma queda na energia de fratura.

No estudo de Xie et al. (2018) foram avaliados 13 misturas diferentes, contendo agregado natural ou reciclado, fibra de aço (1% volume) ou polipropileno (0,13% volume), sendo 8 com agregado natural e 4 com agregado reciclado (substituição de 100% do agregado natural). Nos traços com agregado reciclado adicionou-se água à mistura, conforme a taxa de absorção do agregado reciclado. O trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento dos concretos à compressão e a flexão. Observaram que a adição de fibra de aço podem apresentar efeito negativa na resistência à compressão, mas a adição de sílica ativa pode compensar esse defeito. O acoplamento da sílica ativa e fibra de aço proporcionaram um aumento, não só da resistência à compressão, mas também da resistência à flexão. Os autores concluíram que, considerando melhoria de desempenho e custo econômico, a substituição de 10% de cimento por sílica ativa foi ideal para a resistência à compressão e à flexão de concreto com agregado reciclado reforçado com fibra de aço. A utilização de fibra de aço obteve desempenho à flexão superior a fibra de polipropileno. A adição de sílica ativa pode melhorar a tenacidade à fratura do concreto com fibra de aço. Os autores concluem que o concreto com agregado reciclado e fibra de aço com sílica ativa é uma alternativa mais ecológica do que o concreto convencional para utilização em estruturas de concreto.

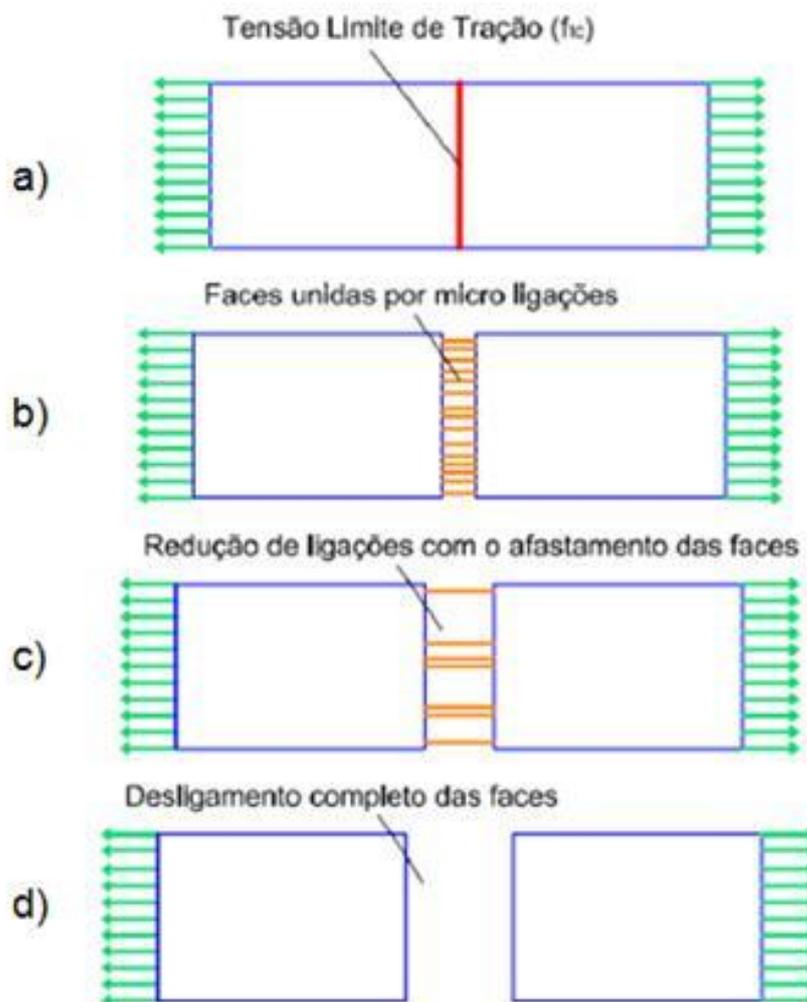
Prasad e Rathish Kumar (2007) estudaram concretos com agregado natural e agregado graúdo reciclado de concreto (0%, 50% e 100%) com adição de fibra de vidro. Para isso foram utilizadas duas classes de resistências diferentes, C20 e C40, com fibra de vidro e sem fibra de vidro. Os autores afirmam que o agregado graúdo reciclado não é inferior ao agregado natural. Quando adicionado fibra ao concreto com agregado reciclado observou-se melhora na resistência à tração (10-17%), na resistência à flexão (10-14%) e do módulo de elasticidade.

## 5. ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS EM CONCRETO

Uma das dificuldades na modelagem computacional de estruturas de concreto é a definição das relações constitutivas que descrevem o comportamento não linear do material, a ocorrência de fissuração e as suas diferentes respostas à tração e à compressão. Na modelagem de estruturas em concreto é muito difícil separar os fenômenos de deformação e de ruptura, porque as microfissuras, que existem antes mesmo da existência de qualquer solicitação, interferem diretamente na resposta do material.

A Figura 14 representa um corpo de concreto quando submetido a tração uniaxial. A Figura 14-a indica o momento em que a tensão de tração atinge seu limite ( $f_{tc}$ ). Após esse limite ser atingido, observa-se macroscopicamente que ocorreu fratura ou fissuras nesse material. Entretanto, microscopicamente, ainda existem microligações entre as faces dessa fratura (Figura 14-b). Conforme aumenta a distância entre as faces da fissura, ocorre uma diminuição das microligações (Figura 14-c). Na Figura 14-d não há mais microligações e temos a completa propagação da fissura.

Figura 14 - Representação do processo de amolecimento entre as faces de uma fissura no concreto



Fonte: Adaptada de Gea dos Santos (2014)

Na simulação numérica de estruturas de concreto armado fissuradas via Método dos Elementos Finitos, a escolha adequada do tipo de modelo a ser utilizado é determinante para o sucesso da análise. Historicamente, no contexto dos elementos finitos, três linhas distintas vêm sendo desenvolvidas para representar a fissuração do concreto: discreta, distribuída e incorporada (Guello et. al. 2002).

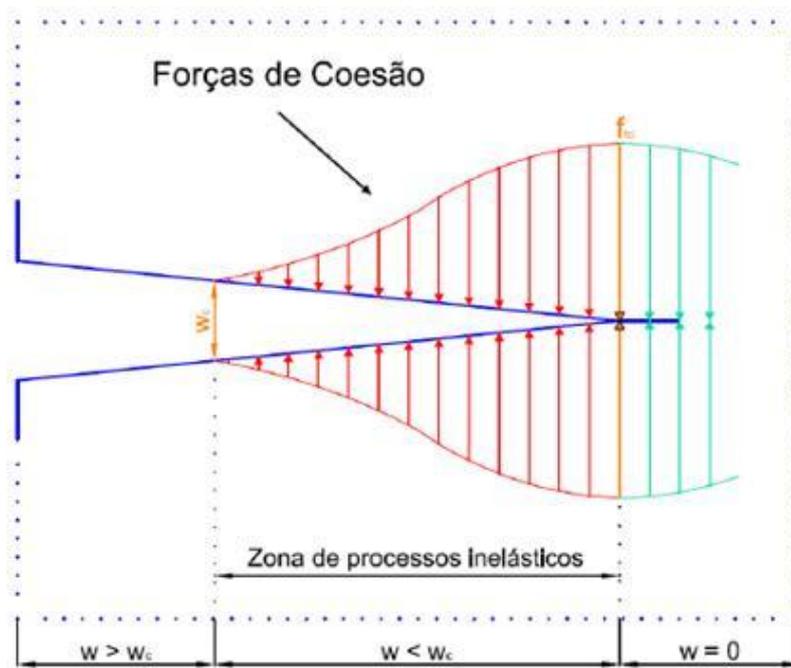
### 5.1.1. Fraturas coesivas

Na representação de forma discreta, as fissuras são modeladas como descontinuidades de deslocamentos entre os elementos. Estes modelos se baseiam na ideia de trabalhar sempre com a parte do sólido que permanece contínua e não danificada, de modo que na formação ou progressão de uma fissura, seus lados se incorporam ao contorno do sólido. O modelo de fissura fictícia ou modelo de zona coesiva (Barenblatt 1959; Barenblatt 1962; Dong et al. 2010) descreve a zona de

fissuração como uma fissura discreta (fictícia) em que os efeitos de amolecimento do material são expressos por zonas coesivas na interface entre os elementos. A formação da fissura é considerada um fenômeno gradual. Inicialmente, o material está sujeito a tensões elásticas. Após atingir certo valor de tensão de tração, a fissura começa a abrir. Então processos inelásticos regem o fenômeno até que a abertura atinja um valor crítico e as faces da fissura estejam totalmente separadas.

A Figura 15 ilustra o modelo de fissura fictícia. Na região em que a abertura é nula temos o comportamento de material contínuo. À medida que a abertura aumenta, temos forças de coesão atuando, na região denominada zona de processos inelásticos. Quando a abertura atinge o valor crítico  $w_c$  (abertura de fissura crítica) não existem mais micro ligações entre as faces.

Figura 15 - Representação do Método de Fissuras Fictícias



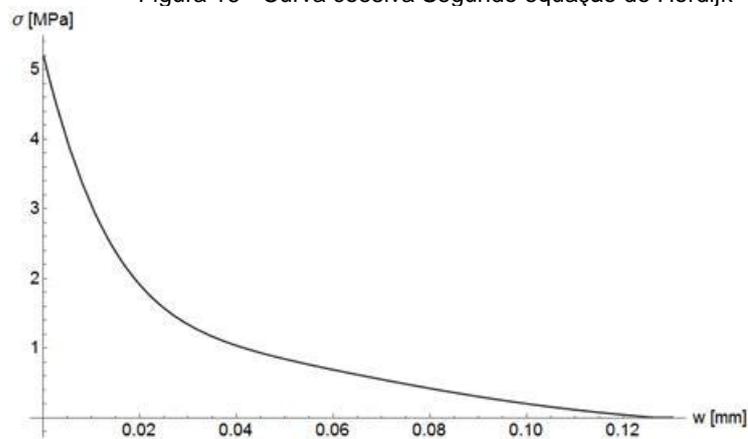
Fonte: Gea dos Santos (2014)

A tensão coesiva é definida como função da abertura de fissura. A curva coesiva deve ser definida a partir de dados do material. Diferentes expressões são utilizadas, como função linear ou bilinear. Uma expressão difundida é a de equação de Hordijk (1991), a qual é bastante adequada a concretos simples, mas não para concretos com fibras:

$$\sigma_{coesiva} = \begin{cases} f_{tc} \left( \left( 1 - \left( 3 \frac{w}{w_{lt}} \right)^3 \right) e^{-6.93 \frac{w}{w_{lt}}} - 28 \frac{w}{w_{lt}} e^{-6.93} \right), & \text{para } w \leq 5.136 \frac{G_F}{f_{tc}} \\ 0, & \text{for } w > 5.136 \frac{G_F}{f_{tc}} \end{cases}$$

onde  $w_{lt} = 5.136 \frac{G_F}{f_{tc}}$ ,  $f_{tc}$  é a resistência a tração do concreto e  $G_F$  é a energia de fratura aparente, correspondente a energia por unidade de área necessária para a completa separação das duas faces da fratura. Dada a equação de Hordijk, se substituirmos nela o valor de energia de fratura e a tensão de tração, teremos a curva conforme a Figura 16, a qual é apenas uma ilustração.

Figura 16 - Curva coesiva Segundo equação do Hordijk

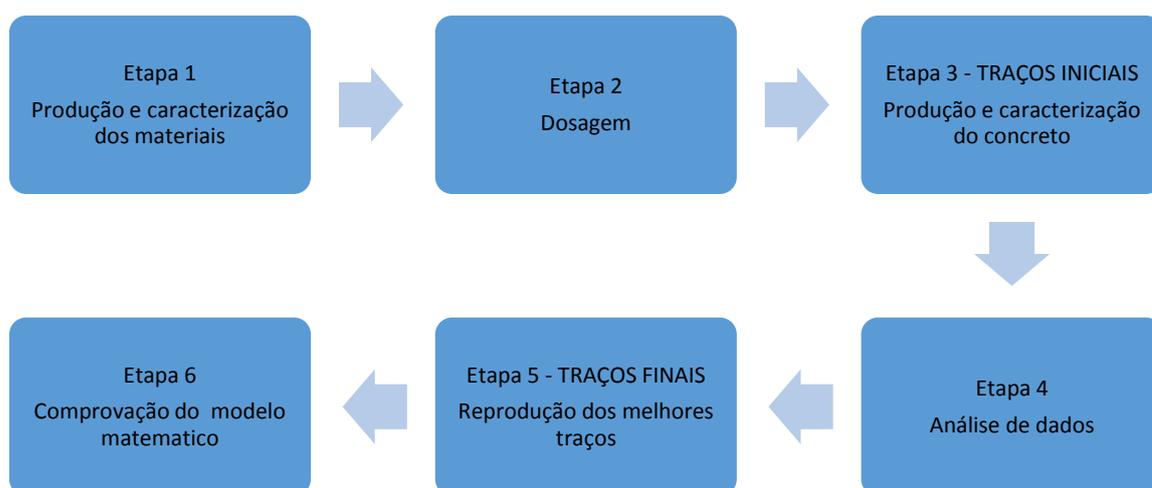


Fonte: Própria

## 6. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 17 representa as etapas da pesquisa. A parte experimental se iniciou com a produção do agregado reciclado e a caracterização dos materiais, e na sequência foram definidos os traços e tipos de fibras a serem utilizados para posteriormente serem produzidos e caracterizados os concretos (traços iniciais). Em seguida, depois dos resultados obtidos, ocorreu a análise dos dados. Através da análise dos resultados foram escolhidos dois traços para serem reproduzidos (traços finais). Com os resultados utilizou-se o programa FitFG para determinação da energia de fratura e da curva coesiva dos ensaios experimentais.

Figura 17 - Etapas da pesquisa



Fonte: Própria

### 6.1. Produção e caracterização dos materiais – Etapa 1

O agregado reciclado de concreto (ARCO) foi produzido a partir da britagem de corpos de prova de concreto com resistência mínima de 30 MPa no Laboratório de Materiais da PUC Campinas. Além disso, tanto o agregado natural (miúdo e graúdo) quanto o agregado reciclado foram ensaiados para obtenção de suas propriedades.

Os corpos de prova foram triturados, em um britador tipo mandíbula, a regulagem da abertura foi feita para produção de agregado com diâmetro máximo na faixa 9,5/25mm.

Todo o material triturado passou por peneiramento mecânico, para que o material estivesse entre os diâmetros de 4,78 mm e 25 mm, conforme Figura 18.

Figura 18 - Agregado reciclado produzido



Fonte: Própria

Os agregados naturais utilizados foram a areia de rio e brita de origem basáltica na faixa granulométrica 9,5/25mm.

A caracterização dos agregados foi feita conforme as especificações das normas NBR 7211 (ABNT, 2009a) e a NBR 15116 (ABNT, 2004) para classificação dos agregados para concreto e de agregados reciclados, respectivamente. As propriedades avaliadas são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação das propriedades dos agregados e a respectiva norma de ensaio

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Agregado reciclado
Diâmetro máximo e Módulo de Finura	NBR NM248(2003a) e NBR 7211(2009a)	NBR NM248 (2003a) e NBR 7211 (2009a)	NBR NM248 (2003) e NBR 7211 (2009a)
Massa específica / Massa específica aparente	NBR NM 52 (2009b)	NBR NM 53 (2009c)	NBR NM 53 (2009c)
Capacidade de absorção de água	NBR NM 30 (2001)	NBR NM 53 (2009c)	NBR NM 53 (2009c)
Teor de Finos	NM 46 (2003b)	NM 46 (2003b)	NM 46 (2003b)
Composição	X	X	Anexo A da NBR 15116 (2004) (ARC//ARM)

Fonte: Própria

O aditivo utilizado foi o Adva<sup>TM</sup>Cast 525 é um superplastificante de terceira geração baseado em policarboxilato. O teor de adição do aditivo, especificado pelo fabricante pode variar entre 0,15 a 0,8% da massa do cimento. Esse aditivo possui densidade de 1,06 kg/m<sup>3</sup>. (GRACE CONSTRUCTION, 2004)

Para essa pesquisa foram utilizados dois tipos de fibras, fibra de aço e a de vidro AR. A fibra de aço utilizada nos traços iniciais foi fornecida pela Fibra Steel, sendo seu código de fabricação FSD 75/60 AI-FF80, que é uma fibra ancorada com arame de aço trefilado de 0,75x0,60 mm, com fator de forma 80 e comprimento de 60 mm. Já nos traços finais foram utilizadas as fibras de aço da Belgo Bekaert, DRAMIX<sup>®</sup> RC 80/60 BN, que é uma fibra ancorada com arame de 0,75mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, com fator de forma 80, essa mudança foi necessária, pois não encontramos no comércio as fibras usadas na parte experimental inicial.

A fibra de vidro AR utilizada foi Anti-Crak<sup>®</sup> HP 67/36 (CEM-FIL<sup>®</sup>, 2014), que é uma macro fibra de vidro álcali resistente de alta performance. Esse tipo de fibra é desenvolvida para reforço contra fissuração por retração plástica, térmica e de secagem, além de aumentar a resistência a flexão e a ductibilidade, aumentando

a dureza, resistência à fadiga e impactos do concreto (CEM-FIL®, 2011, 2014). A tabela 4 identifica as propriedades de cada uma das fibras.

Tabela 4 - Características gerais das fibras utilizadas

Características	FIBRA DE VIDRO AR	FIBRA DE AÇO
Comprimento da fibra (mm)	36	60
Fator de forma	67	80
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,68	7,86
Módulo de elasticidade (GPa)	72	200
Material	Vidro álcali resistente	Arame de aço trefilado
Ponto de amolecimento (°C)	860	800
Condutividade elétrica	Muito baixa	Alta
Resistência química	Muito alta	-
Resistência à tração (MPa)	1.700	1.100 a 1.200
Observações	-	Fibra com ancoragem de extremidade

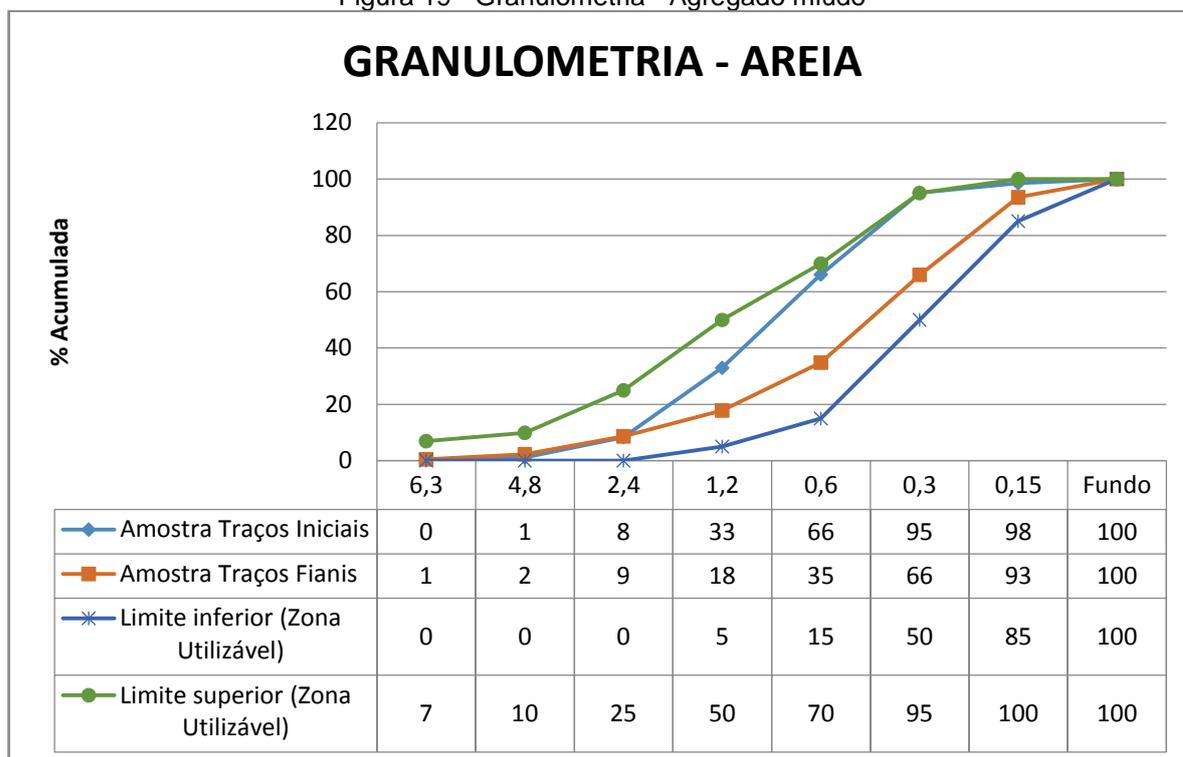
Fonte: (CEM-FIL®, 2011, 2014) (GRACE CONSTRUCTION,2014)

O cimento utilizado foi o cimento CP II E 32, que atende a NBR 11578 (ABNT, 1991).

### 6.1.1. Caracterização do agregado miúdo - Areia

O ensaio de granulometria da areia foi executado conforme prescrito nas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003a) e NBR 7211 (ABNT, 2009a). Os resultados obtidos nesse ensaio, tanto para o material utilizado para os traços da etapa inicial como para os traços da etapa final, foram colocados no gráfico, junto com limites inferior e superior de norma, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Granulometria - Agregado miúdo



Fonte: Própria

O agregado utilizado no traço inicial possui dimensão máxima de 4,8 mm, e seu módulo de finura é de 3,02. Sendo assim o módulo de finura do agregado está dentro da zona ótima utilizável superior (valores entre 2,90 e 3,50), conforme NBR 7211 (ABNT, 2009a).

O ensaio de teor de finos foi executado conforme prescrito na norma NM46 (2003b), e o resultado médio obtido foi de 2,13%, inferior ao especificado pela NBR7211 (ABNT, 2009a), para agregados para concreto, que é de 3% - para concreto submetido a desgaste superficial.

A determinação da massa específica e da capacidade de absorção de água foi executada conforme prescrito nas normas NBR NM 52 (ABNT, 2009b) e NBR NM30 (ABNT, 2001). A massa específica da areia é de 2,45 g/cm<sup>3</sup> e a capacidade de absorção de água de 1,39%.

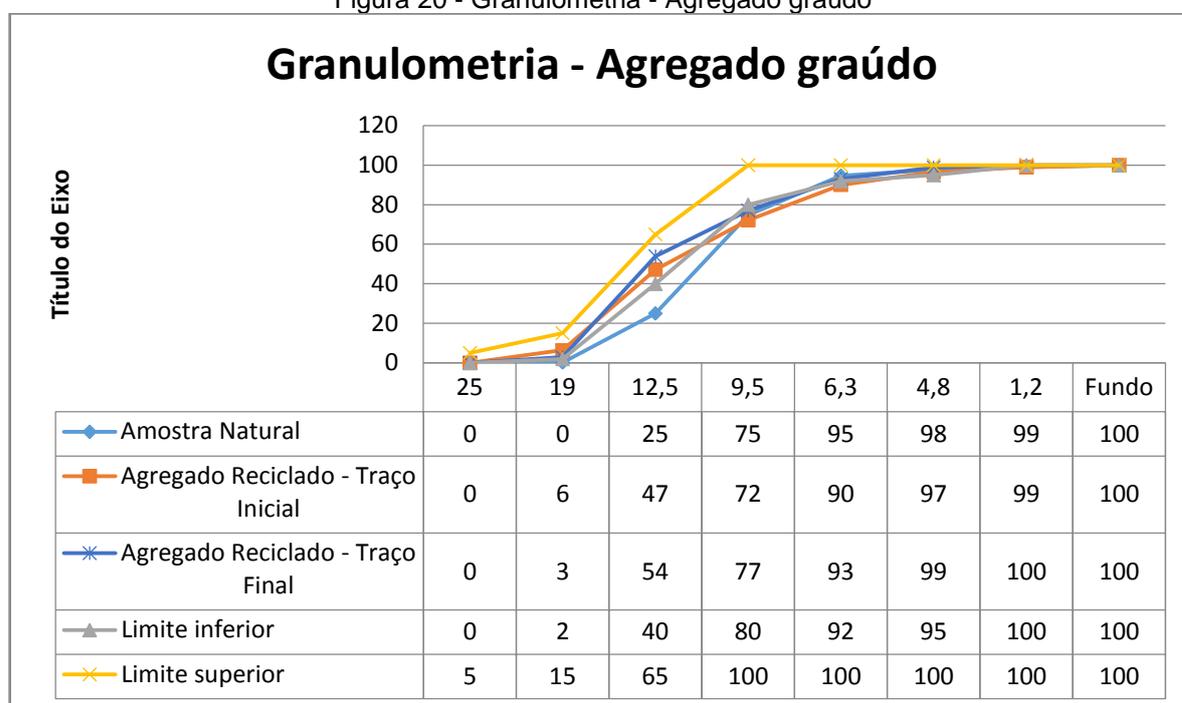
O agregado utilizado no traço final possui dimensão máxima de 4,8 mm, e seu módulo de finura é de 2,23. Sendo assim o módulo de finura do agregado está dentro da zona ótima (valores entre 2,20 e 2,90), conforme NBR7211 (ABNT, 2009a).

### 6.1.2. Caracterização do agregado graúdo - Brita

O ensaio de granulometria para os agregados graúdos, natural e reciclado, foi executado conforme prescrito nas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003a) e classificado conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Os resultados obtidos nesse ensaio para os agregados utilizados em ambas as etapas experimentais, traços iniciais e finais, foram colocados no gráfico da Figura 20, junto com limites inferior e superior de norma.

Figura 20 - Granulometria - Agregado graúdo



Fonte: Própria

Os agregados graúdos reciclados estão entre os limites especificados por norma. Já o agregado graúdo natural está um pouco abaixo do limite inferior especificado por norma. Mas apesar da diferença entre as curvas, ambos apresentam módulo de finura muito próximos.

O agregado graúdo natural possui dimensão máxima de 19 mm, e seu módulo de finura é de 6,70. O agregado graúdo reciclado utilizado no traço Inicial possui dimensão máxima de 25 mm, e seu módulo de finura é de 6,71. Já o agregado graúdo reciclado utilizado no traço Final possui dimensão máxima de 19 mm, e seu módulo de finura é de 6,78.

A determinação da massa específica e da capacidade de absorção de água foi executada conforme prescrito na norma NBR NM 53 (ABNT, 2009c) e NBR 7211 (ABNT, 2009a), sendo os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos agregados graúdos

	Agregado graúdo		
	Natural	Reciclado - Traço Inicial	Reciclado - Traço Final
Massa específica seca	2,68	2,33	2,33
Massa específica saturada de superfície seca	2,70	2,46	2,45
Massa específica aparente	2,75	2,69	2,64
Absorção	0,93%	5,76%	5,16%
Teor de finos	0,48%	0,29%	N.E.
N.E. = Não Executado			

Fonte: Própria

A capacidade de absorção de água dos agregados graúdos reciclados atendem ao limite de 7%, especificado pela norma NBR 15116 (ABNT, 2004). Conforme NBR 15116 (ABNT, 2004), o teor de finos para agregado graúdo reciclado é de no máximo 10%, sendo assim o agregado reciclado produzido está de acordo com a norma. A NBR 7211 (ABNT, 2009a) exige que os agregados graúdos naturais tenham teor de fino de no máximo 1%, sendo assim nosso agregado graúdo natural está de acordo com a norma.

Os agregados reciclados (traço inicial e traço final) possuem uma taxa de absorção de, aproximadamente, 6 vezes maior que a do agregado natural. Na literatura, Moitinho e Leite (2015) encontram que o agregado reciclado possui taxa de absorção 10 vezes maior que do agregado natural, enquanto Santos (2016) achou um valor referente a 11 vezes.

A massa específica do agregado reciclado é de 13% menor que do agregado natural, já no estudo de Santos (2016) o agregado tinha massa específica 1% menor que do agregado natural. Sendo assim, quanto mais próximas as massas específicas do agregado natural e reciclado espera-se que menor seja as alterações nas características mecânicas do concreto.

## 6.2. Dosagem-Etapa 2

Todos os traços foram executados a partir do traço unitário em massa 1:2,50:3,10:0,55, que atende a classe de resistência de 35 MPa, sendo esse, baseado nos trabalhos de Salvador (2013) e Salvador e Figueiredo (2013). A relação água/cimento que nos trabalhos citados foi de 0,60, foi alterada neste trabalho para 0,55.

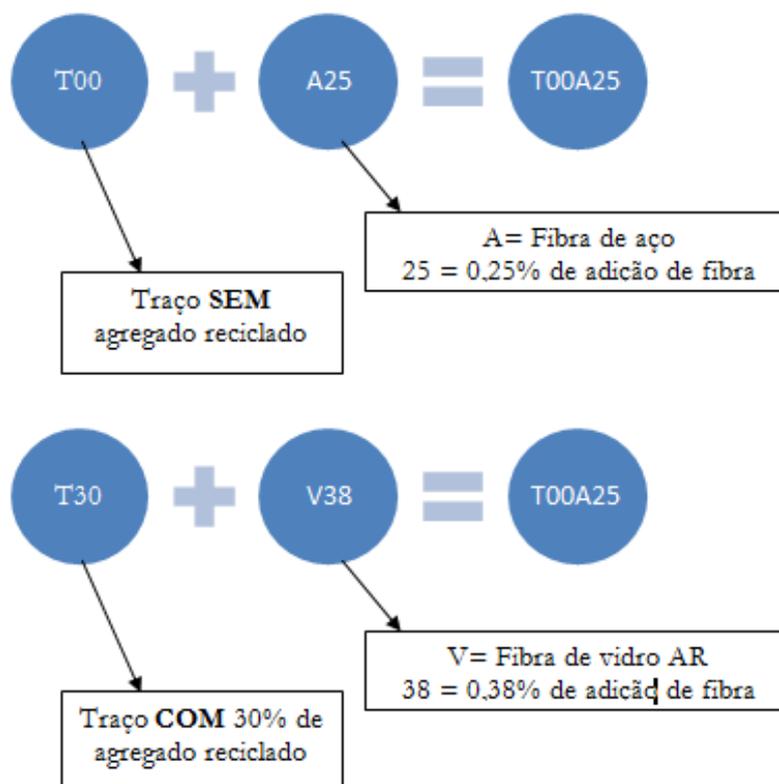
Para os concretos produzidos com agregado reciclado a porcentagem de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto (ARCO) foi de 30%. As fibras utilizadas foram a de aço e a de vidro AR e as porcentagens de adição de fibras ao concreto foram 0,25%, 0,38% e 0,50% em volume. Os traços foram executados conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

Todos os traços que utilizaram agregado reciclado tiveram um acréscimo de água, esse acréscimo é relativo a 70% da capacidade de absorção de água do agregado graúdo reciclado. O ajuste do abatimento foi feito utilizando de aditivo para que a relação água/cimento não fosse alterada, diferente do que foi feito no trabalho de Moreira e Figueiredo (2010), que foi ajustada a consistência com alteração na quantidade de água.

Após 24 horas da moldagem dos corpos de prova todos foram desmoldados e colocados na câmara úmida até o dia do ensaio.

O delineamento experimental resultou em catorze (14) traços, os quais foram nomeados conforme apresentado na Tabela 6. A Figura 21 mostra como as nomenclaturas foram criadas.

Figura 21 - Nomenclatura



Fonte: Própria

Tabela 6 - Nomenclatura das diferentes dosagens

TIPOS DE DOSAGEM				
	NOMENCLATURA	AGREGADO RECICLADO (%)	FIBRA DE VIDRO AR (% em volume)	FIBRA DE AÇO (% em volume)
REFERÊNCIA	T00	0,00	0,00	0,00
	T00A25	0,00	0,00	0,25
	T00A38	0,00	0,00	0,38
	T00A50	0,00	0,00	0,50
	T00V25	0,00	0,25	0,00
	T00V38	0,00	0,38	0,00
	T00V50	0,00	0,50	0,00
COM AGREGADO RECICLADO	T30	30,00	0,00	0,00
	T30A25	30,00	0,00	0,25
	T30A38	30,00	0,00	0,38
	T30A50	30,00	0,00	0,50
	T30V25	30,00	0,25	0,00
	T30V38	30,00	0,38	0,00
	T30V50	30,00	0,50	0,00

Fonte: Própria

### 6.3. Produção e caracterização do concreto – Etapa 3

Na terceira etapa foram executados os 14 traços de concreto e moldados os corpos de prova, sendo 32 cilíndricos e 10 prismáticos, para cada traço. A Tabela 7 apresenta o tipo e a distribuição dos corpos de prova em relação aos ensaios de caracterização do concreto.

Tabela 7 - Quantidade e tipos de corpos de prova

ENSAIO	TIPO DE CORPO DE PROVA	QUANTIDADE DE CORPO DE PROVA (para cada dosagem e idade)	DIFERENTES IDADES DE ENSAIO	CORPOS DE PROVA TOTAL
Massa específica /Absorção	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4	1	56
Resistência compressão	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	6	2	168
Resistência à tração por compressão diametral	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4	2	112
Tração na flexão	Prismático (10cm x 10 cm x 40 cm)	4	1	56
Resistência Residual	Prismático (10cm x 10 cm x 40 cm)	6	1	84
Módulo de elasticidade	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4	1	56

Fonte: Própria

As características determinadas tanto para o concreto no estado fresco como para ele no estado endurecido são indicadas na Tabela 8, juntamente com as respectivas normas de ensaio.

No estado endurecido, foram feitos ensaios aos 7 e 28 dias. Aos 7 dias foram determinadas a resistência a compressão (6 corpos de provas cilíndricos) e à tração por compressão diametral (4 corpos de provas cilíndricos). Aos 28 dias, foram determinadas a resistência à compressão axial (6 corpos de provas cilíndricos), à tração por compressão diametral (4 corpos de provas cilíndricos), o módulo de elasticidade (4 corpos de provas cilíndricos), a resistência residual (6 corpos de

provas prismáticos) e a resistência à tração na flexão (6 corpos de provas prismáticos).

Tabela 8 - Especificação da característica e a respectiva norma utilizada

Características	Estado plástico	Estado endurecido
Consistência	NBR NM 67 (1998)	X
Massa específica	X	NBR 9778 (2005)
Resistência à compressão	X	NBR 5739 (2007)
Resistência à tração	X	NBR 7222 (2011)
Resistência à Tração na flexão	X	NBR 12142 (2010)
Resistência residual	X	ASTM C1399/C1399M (2015)
Módulo de elasticidade	X	NBR 8522 (2008)
Absorção por imersão	X	NBR 9778 (2005)
Absorção por capilaridade	X	NBR 9779 (2012)

Fonte: Própria

#### 6.4. Análise de dados - Quarta etapa

Os resultados, tanto da caracterização dos materiais quanto os ensaios dos concretos, foram tabelados e analisados, pela obtenção de média e desvio padrão que possibilitaram análises comparativas.

Posteriormente os resultados foram analisados através de Análise de Variância (ANOVA) para verificar se existem diferenças ao nível de 5% de significância entre os traços avaliados.

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica utilizada para identificar os fatores que produzam mudanças em alguma variável de interesse, (Fonseca e Martins, 1995; Guerra e Donaire, 1986 apud Pessoa, 2012). O objetivo dessa análise é verificar se, para a média das amostras, as diferenças são ou não significativas (Laponi, 2005 apud Pessoa, 2012).

Segundo Pessoa (2012) a ANOVA analisa duas variações: dentro da amostra e variação entre amostras. Com isso a resposta para a ANOVA é obtida

através do teste de hipótese, o qual pode ser realizado pelo valor-P. O valor-P é "definido como a probabilidade de qualquer média da amostra ser mais extrema do que a média da amostra ( $\alpha$ ) extraída para o teste, sem rejeitar a hipótese nula.", (Pessoa, 2012). Sendo assim temos que:

- ✓ O nível de significância observado é dado através do valor-P;
- ✓ Quando o valor-P tiver valor maior ou igual ao valor de significância não existe diferença significativa;
- ✓ Quando o valor-P tiver valor menor ou igual ao valor de significância existe diferença significativa.

Segundo Pessoa (2012), a ANOVA é classificada de acordo com os fatores de interesse que influenciam a variável (fator único ou duplo), além disso são classificados pela repetição (com ou sem repetição). Sendo (Pessoa, 2012):

- ✓ ANOVA - Fator único: é avaliado por apenas um fator, sendo assim, testa a igualdade da média de três ou mais populações analisadas.
- ✓ ANOVA - Fator duplo: são avaliados dois fatores de interesse, os quais influenciam a variável dependente. Esse tipo de análise pode usar os fatores sem ou com repetição.

"A Análise de Variância (ANOVA) serve para verificar se existe diferença significativa entre colunas (fator único), e entre linhas e entre colunas (fator duplo); porém, se houver diferença não se sabe quais as linhas ou colunas que diferem entre si." (Pessoa, 2012)

Além disso a análise dos resultados possibilitou a escolha dos dois traços que foram refeitos para a última etapa experimental.

### 6.5. Re-Produção dos melhores traços - Quinta etapa

A partir da análise dos resultados obtidos na quarta etapa, foram selecionados os traços com 0,38% de fibra de aço, já que a diferença destes para os traços com 0,50% foram pequenas. Além disso, os traços com 0,50% são mais difíceis de serem produzidos devido à grande quantidade de fibras. Essa explicação está mais detalhada no 7.1.5, onde será justificada a escolha dos traços finais.

Todos os traços foram executados conforme a norma NBR 5738 (ABNT, 2016), com a mesma dosagem das etapas anteriores, ou seja, traço unitário em massa 1:2,50:3,10:0,55. Os traços produzidos com agregado reciclado tiveram o agregado natural graúdo, substituído pelo agregado reciclado de concreto em 30%.

Além disso todos os traços tiveram o mesmo processo de mistura da etapa experimental anterior. O processo de desmoldagem e cura, também, foram feitos de forma idêntica ao do processo experimental colocado anteriormente.

Nessa etapa foram executados apenas dois traços conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Nomenclatura das diferentes dosagens

NOMENCLATURA	AGREGADO RECICLADO (%)	FIBRA DE AÇO (% EM VOLUME)
TF00A38	0,00	0,38
TF30A38	30,00	0,38

Fonte: Própria

Foram executados os dois traços de concreto e moldados os corpos de prova, sendo 22 cilíndricos (10x20), 6 cilíndricos (15x15), 10 prismáticos (10x10x40) e 6 prismáticos (15x15x55), para cada traço. A Tabela 10 apresenta o tipo e a quantidade de corpos de prova para cada traço.

Tabela 10 - Quantidade e tipos de corpos de prova

ENSAIO	TIPO DE CORPO DE PROVA	QUANTIDADE DE CORPO DE PROVA (para cada dosagem e idade)	DIFERENTES IDADES DE ENSAIO
Resistência compressão	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	6	2
Tração na flexão	Prismático (10 cm x 10 cm x 40cm)	4	1
Resistência Residual	Prismático (10 cm x 10 cm x 40cm)	6	1
Módulo de elasticidade	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	6	1
CMOD - "Crack Mouth Opening Displacement"	Prismático (15 cm x 15 cm x 55cm)	6	1
Barcelona Simplificado	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	6	1

Fonte: Própria

As características determinadas tanto para o concreto no estado fresco como para ele no estado endurecido são indicadas na Tabela 11 juntamente com as respectivas normas de ensaio.

No estado fresco foi determinada a consistência, no estado endurecido foram feitos ensaios aos 7 e 28 dias. Aos 7 dias foi determinada a resistência à compressão (6 corpos de provas cilíndricos). Aos 28 dias foram determinadas à resistência á compressão axial (6 corpos de provas cilíndricos), a resistência à tração na flexão (4 corpos de provas prismáticos), o módulo de elasticidade (6 corpos de provas cilíndricos), a resistência residual (6 corpos de provas prismáticos), e os ensaios de Barcelona Simplificado (6 corpos de provas cilíndricos) e CMOD (6 corpos de provas prismáticos).

Tabela 11 - Especificação da característica e a respectiva norma utilizada

Características	Estado plástico	Estado endurecido
Consistência	NBR NM 67 (1998)	X
Resistência à compressão	X	NBR 5739 (2007)
Resistência à tração	X	NBR 7222 (2011)
Resistência à Tração na flexão	X	NBR 12142 (2010)
Módulo de elasticidade	X	NBR 8522 (2008)
Resistência residual	X	ASTM C1399 (2015)
CMOD	X	EN 14651 (2005)
Barcelona Simplificado	X	Pujadas <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Própria

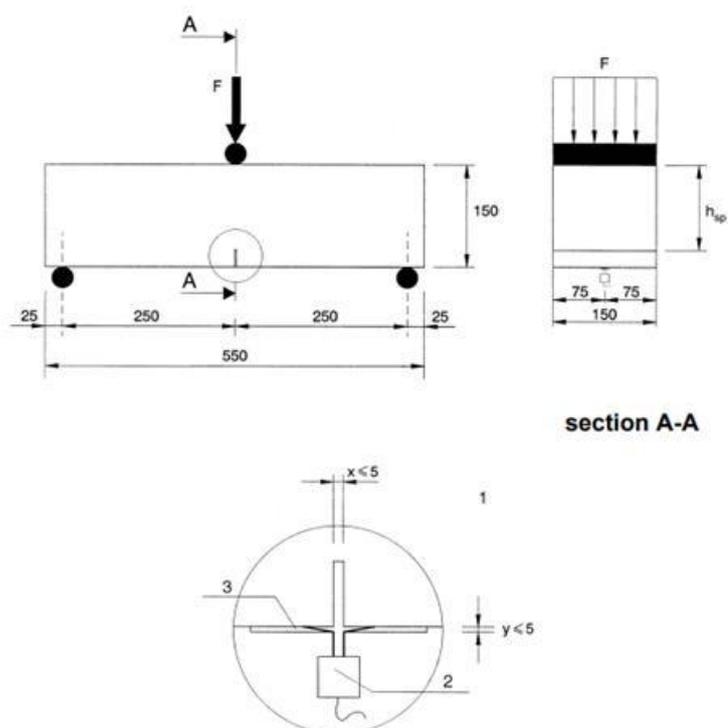
### 6.5.1. Ensaio CMOD - Resistência à tração na flexão (Limite de Proporcionalidade e resistência residual)

O ensaio de CMOD segue a norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), o qual será descrito abaixo. CMOD em inglês é "Crack Mouth Opening Displacement", o que significa deslocamento da abertura da boca da fissura.

Esse teste é destinado para concretos com fibras metálicas com comprimento máximo de 60 mm, ou para concretos com mistura de fibra metálica e alguma outra fibra.

Para esse ensaio foram necessários corpos de provas prismáticos com medida de 15x15x55 cm. Após a cura do concreto, é necessário que seja executado um entalhe, ao longo da direção transversal, de no máximo 0,5 cm de profundidade, no centro do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 22. Após executar o entalhe é necessário medir, para todos os corpos de provas, as seguintes dimensões: base, altura e profundidade do entalhe.

Figura 22 - Detalhes do ensaio de CMOD



Fonte: EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005)

Esse corpo de prova precisa ser preparado para o ensaio, e isso exige que sejam coladas duas placas metálicas, no corpo de prova, próximo a abertura do entalhe para que posteriormente o "clip gauge" (medidor de deslocamento) seja enganchado nessas duas placas de metal, conforme detalhe 1 da Figura 22. A Figura 23 mostra como o "clip gauge" é encaixado junto com as placas metálicas coladas.

Figura 23 - "Clip gauge" e placas metálicas durante ensaio



Fonte: Própria

Após essa preparação é necessário que o corpo de prova seja colocado sobre os rolos de suporte, na distância correta, ou seja, o entalhe deve estar com 25 cm de distância do eixo dos rolos, em ambos os lados (Figura 22 e 24).

Figura 24 - Montagem do corpo de prova e equipamentos para execução do ensaio CMOD



Fonte: Própria

A carga só deve começar a ser aplicada quando todos os cutelos, de apoio e de aplicação de carga, estiverem apoiados uniformemente contra o corpo de prova. A máquina utilizada no ensaio deve controlar a taxa de aumento de abertura (CMOD). Então, a máquina deve operar de modo que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,05 mm/min. Assim que o CMOD atingir 0,1mm é necessário que a máquina passe a operar de modo que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,20 mm/min.

Nos dois minutos iniciais de ensaio os valores da carga e do correspondente CMOD devem ser aquisitados a uma taxa igual ou superior a 5 Hz. Após esses dois minutos iniciais essa taxa pode ser reduzida para valores não inferiores a 1 Hz. O ensaio só deve ser finalizado com valores de CMOD igual ou superiores a 4 mm.

Além do mais, testes que tiverem suas trincas iniciadas fora do entalhe devem ser rejeitados.

A norma EN 14651(EUROPEAN STANDARD, 2005), permite que através Da fórmula abaixo, seja encontrada uma aproximação entre CMOD e deflexão ( $\delta$ ):

$$\delta = 0,85 \text{ CMOD} + 0,04$$

Equação 1

Sendo:

 $\delta$  = deflexão (mm)

CMOD = Valor do CMOD (mm)

Segundo a norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), o limite de proporcionalidade vem da expressão:

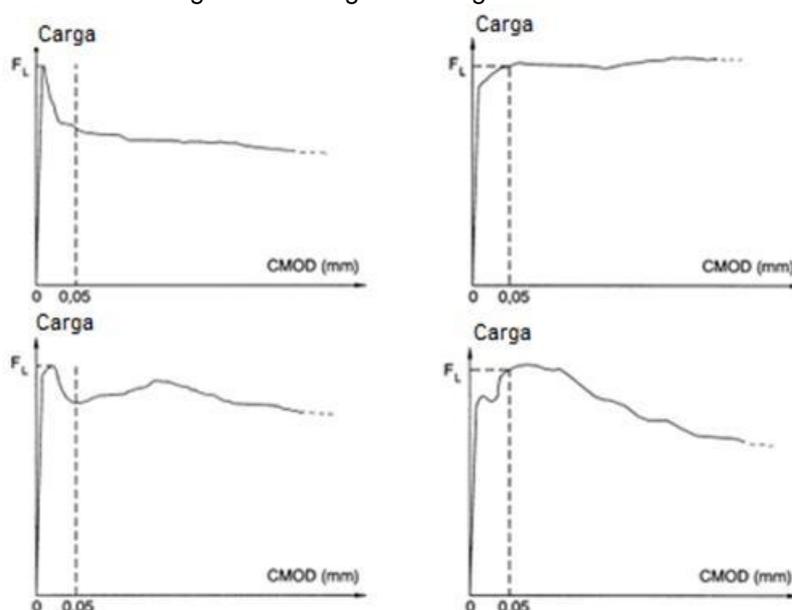
$$f_{ct,L}^f = \frac{3F_L l}{2bh_{sp}^2}$$

Equação 2

Sendo:

 $f_{ct,L}^f$  = É o limite de proporcionalidade (N/mm<sup>2</sup>) $F_L$  = É a carga correspondente ao limite de proporcionalidade (N) $l$  = Comprimento (mm) $b$  = Largura da amostra (mm) $h_{sp}$  = É a distância entre a ponta do entalhe e o topo da amostra (mm)

O valor utilizado para a carga  $F_L$  deve ser determinado traçando uma linha a uma abertura de 0,05 mm (CMOD) e paralela ao eixo de carga do diagrama. O valor a ser utilizado para  $F_L$  é o maior valor de carga no intervalo de 0,05 mm, conforme Figura 25.

Figura 25 - Diagrama Carga x CMOD e  $F_L$ 

Fonte: Adaptada de EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005)

Segundo a norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), a resistência à tração à flexão residual ( $f_{Rj}$ ) é dada pela expressão:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

$f_{R,j}$  = É a resistência à tração na flexão residual correspondente a CMOD = CMOD<sub>j</sub> ou  $\delta = \delta_j$  ( $j = 1,2,3,4$ ) (N/mm<sup>2</sup>), conforme mostra Figura 26.

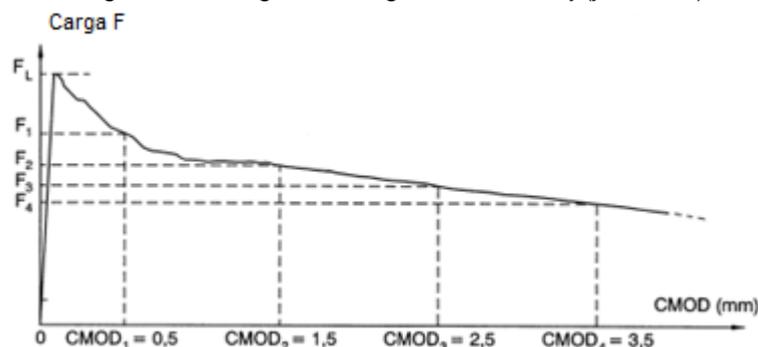
$F_L$  = É a carga correspondente com CMOD = CMOD<sub>j</sub> ou  $\delta = \delta_j$  ( $j = 1,2,3,4$ ) (N), conforme mostra Figura 26.

$l$  = Comprimento (mm)

$b$  = Largura da amostra (mm)

$h_{sp}$  = É a distância entre a ponta do entalhe e o topo da amostra (mm)

Figura 26 - Diagrama Carga x CMOD e  $F_j$  ( $j=1,2,3,4$ )



Fonte: Adaptado de EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005)

### 6.5.2. Ensaio Barcelona Simplificado:

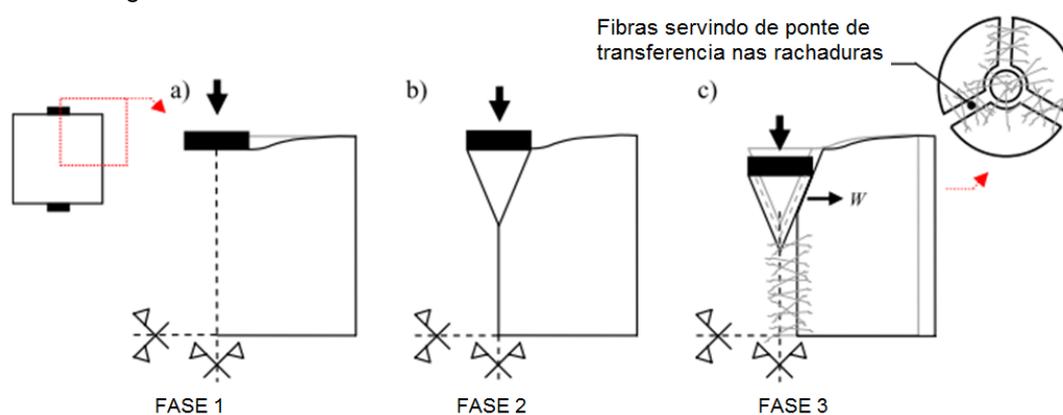
Pujadas *et al.* (2013) propôs uma simplificação do Ensaio Barcelona (AENOR UNE 83515) que foi denominada como Ensaio Barcelona Simplificado (EBS). Durante o ensaio são observadas três fases dependendo de sua integridade e do mecanismo de resistência (Figura 26):

- Fase 1: Coincide com a aplicação inicial de carga, sendo que nessa fase não são apresentadas grandes rachaduras (Figura 27-a).
- Fase 2: Se inicia quando o estresse atinge a resistência à tração do material. Em seguida as cunhas inferiores e superiores são formadas abruptamente. O aparecimento de grandes rachaduras surge

dividindo a amostra em partes que são mantidas juntas pelas fibras, as quais atravessam as rachaduras. (Figura 27-b)

- Fase 3: O início dessa fase ocorre com a estabilização das rachaduras. E segue com um mecanismo cinemático que envolve o deslizamento entre a cunha cônica e a amostra é fragmentada (Figura 27-c).

Figura 27 - Diferentes fases da falha de uma amostra no teste Barcelona



Fonte: Adaptado de Pujadas et al. (2013)

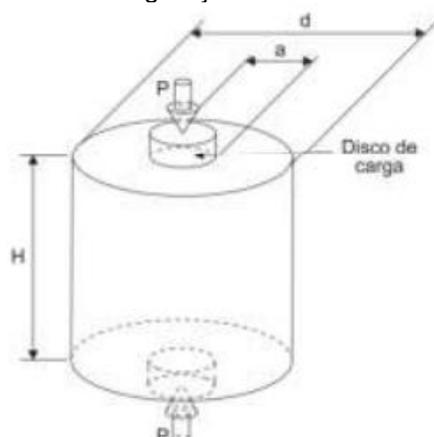
Para executar o ensaio são necessários corpos de prova cilíndrico com diâmetro e altura de 15 cm. O puncionamento ocorre através do contato de dois discos cilíndricos de aço (chamados de discos de cargas) com a face superior e inferior do corpo de prova. As superfícies dos discos de carga devem ser planas e retificadas.

Os discos devem apresentar as seguintes dimensões:

- Diâmetro (a) = 1/4 do diâmetro do corpo de prova;
- Altura = 1/5 da altura do corpo de prova ou 15 mm;

A Figura 28 ilustra o ensaio Barcelona:

Figura 28 - Configuração do ensaio Barcelona



Fonte: Adaptado de Saludes (2006) apud Nogueira *et al.* (2017)

O conjunto formado pelo corpo de prova e os discos de carga devem ser centralizados na máquina de ensaio, conforme Figura 29. A máquina deve aplicar carga uniforme com velocidade de descida da máquina de ensaio de  $(0,5 \pm 0,05)$  mm/min.

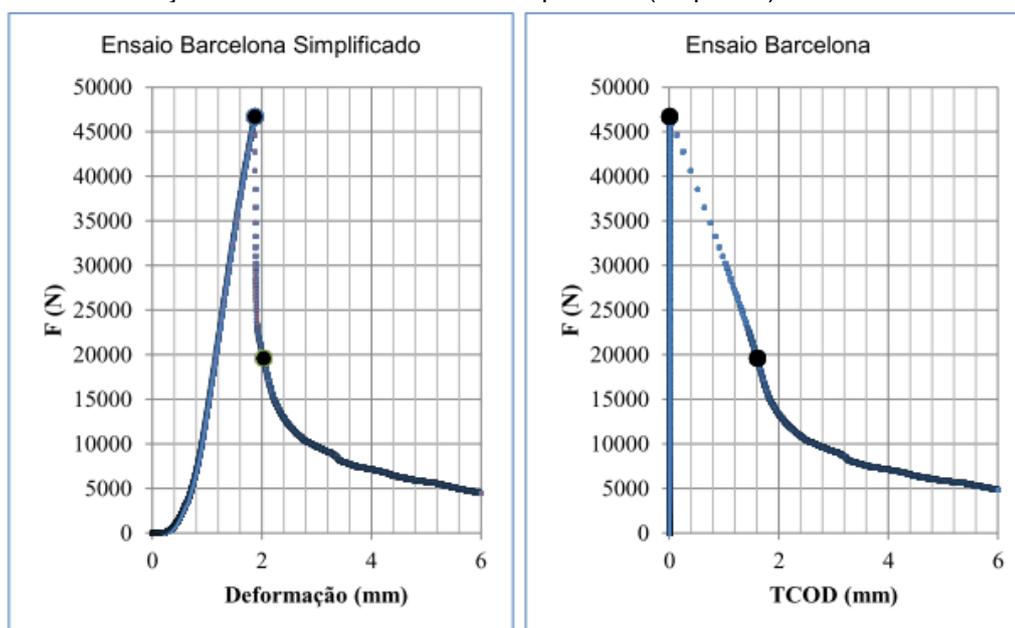
Figura 29 - Ensaio Barcelona Simplificado



Fonte: Própria

Para ensaios que medem o deslocamento vertical (como é o caso do EBS), é sugerido que o ensaio finalize com deslocamento mínimo de 7mm. Para elaboração dos resultados é necessário transformar os gráficos obtidos no Ensaio Barcelona Simplificado (EBS) em Ensaio Barcelona, conforme a Figura 30.

Figura 30 - Correlação entre ensaio Barcelona simplificado (esquerda) e ensaio Barcelona (direita)



Fonte: Monte et. al (2014)

Para que seja criado esse gráfico é necessário utilizar as seguintes equações:

$$\text{TCOD} = 0 \quad \delta_p \leq \delta_{p,cr} \quad \text{Equação 4}$$

$$\text{TCOD} = n \times \frac{a \times \delta_{p,R,0}}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left( 1 - \frac{P}{P_{cr}} \right) \quad \delta_{p,cr} < \delta_p < \delta_{p,R,0} \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{TCOD} = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left[ \delta_p - \delta_{p,cr} + \delta_{p,R,0} \times \left( 1 - \frac{P_{R,0}}{P_{cr}} \right) \right] \quad \delta_p \geq \delta_{p,R,0} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

$n$ =número de fissuras radiais formadas no ensaio;

$a$ =diâmetro do disco de carga;

$l$ =comprimento da cunha formada;

$P$ =Carga no ponto calculado;

$P_{cr}$ =Carga vertical no ponto de carga máxima;

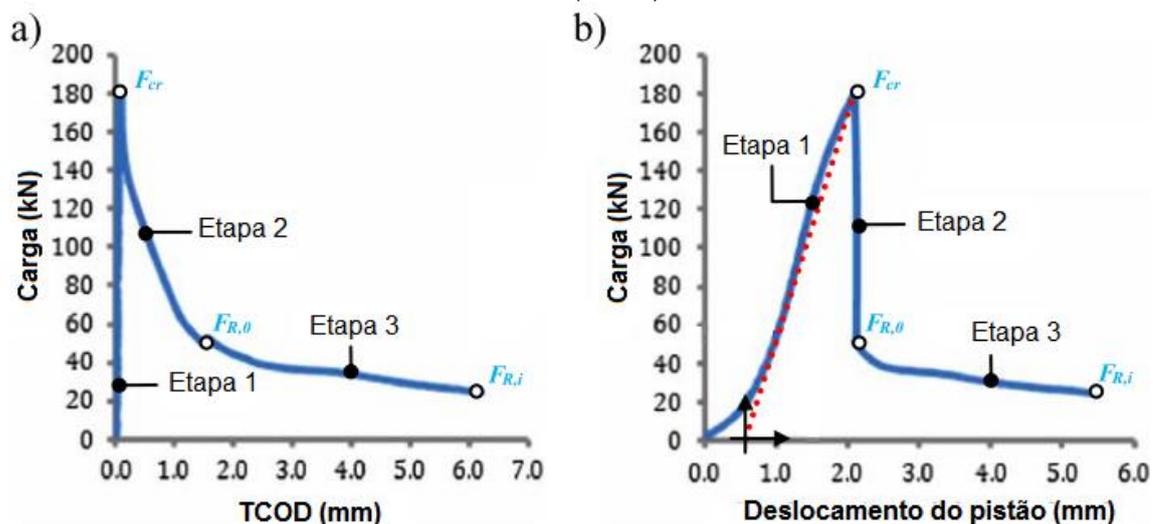
$\delta_{p,cr}$ =Deslocamento vertical no ponto de carga máxima;

$P_{R,0}$ =Carga vertical no ponto de início da resistência residual;

$\delta_{p,R,0}$ =Deslocamento vertical no ponto de início da resistência residual;

Sendo que a Equação 4 é utilizada para a Fase 1 (ou 1º estágio), a Equação 5 para a Fase 2 (ou 2º estágio) e a Equação 6 para a Fase 3 (ou 3º estágio), conforme Figura 31.

Figura 31 - Conversão do resultado do ensaio Barcelona com deslocamento vertical (esquerda) para TCOD (direita)



Fonte: Adaptado de Pujadas *et al.* (2013)

Com o novo gráfico montado é possível calcular Resistência à tração, Resistência Residual à tração e tenacidade. Para determinar a resistência à tração ( $f_t$ ) através do ensaio Barcelona é calculado com a seguinte equação:

$$f_t = \frac{4 \times P_f}{9 \times \pi \times a \times H} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

$f_t$ =Resistência à tração (MPa);

$P_f$ =Carga que produz a fissuração (N);

$a$ =Diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);

$H$ =Altura do corpo de prova (mm).

Para determinar a resistência residual ( $f_{t,TCODx}$ ) para diferentes níveis de deformação circunferencial TCOD é calculado com a seguinte equação:

$$f_{t,TCODx} = \frac{4 \times P_{t,TCODx}}{9 \times \pi \times a \times H} \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

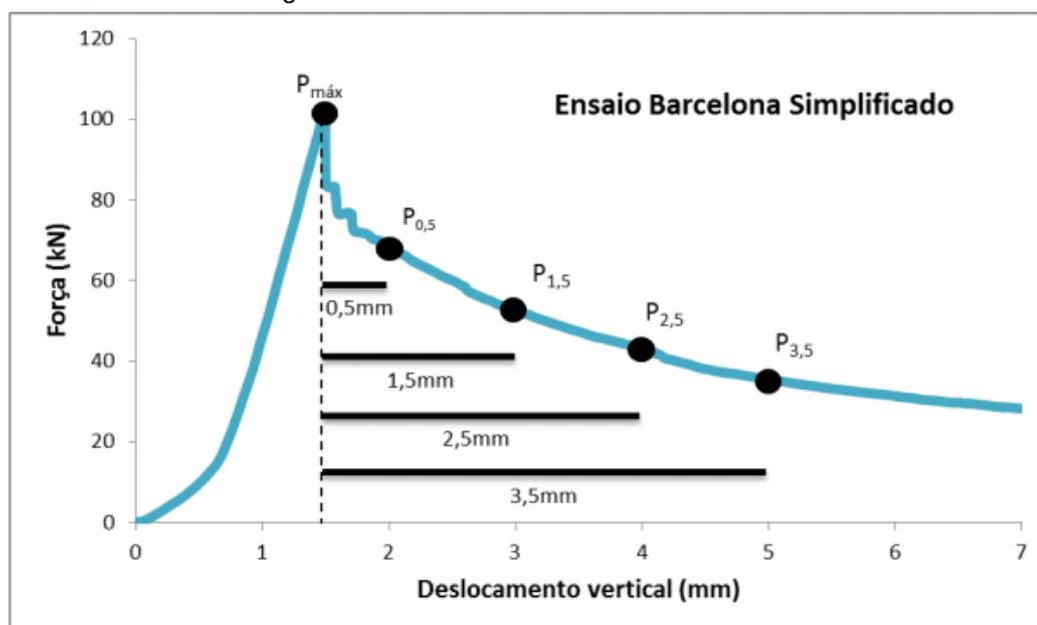
$f_{t,TCODx}$ =Resistência residual correspondente a um TCODx;

$P_{t,TCODx}$ =Carga correspondente a um TCODx (N);

$a$ =Diâmetro do disco de aplicação da carga (mm);  
 $H$ =Altura do corpo de prova (mm).

Nesse trabalho os valores utilizados foram iguais aos do trabalho do (NOGUEIRA *et al.*, 2017), ou seja, os valores utilizados foram os valores de 0,50; 1,5; 2,5; e 3,5, após o ponto de máximo, conforme ilustra a Figura 32.

Figura 32 - Parâmetros analisados no estudo



Fonte: Nogueira et al. (2017)

E por último, foram utilizados os trechos padronizados acima para fazer o cálculo da tenacidade (área embaixo da curva) para cada trecho e para o total.

### 6.5.3. Ensaio Resistência Residual (C1399):

Para esse ensaio foi utilizada a norma C1399 (ASTM, 2015), a qual é um Método de Teste Padrão para Obter a Resistência Residual Média do Concreto Reforçado com Fibra.

O teste é iniciado colocando-se uma placa metálica embaixo do corpo de prova, centrada nos rolos de apoio (inferiores). A viga de concreto deve estar centralizada na placa de aço. É necessário colocar os sensores de deslocamento, LVDT, para aquisição de dados e ajustar a velocidade para que seja constante (taxa de movimento do rolo deve ser definida em  $0,65 \pm 0,15$  mm/min antes do feixe carregado). Só assim o teste é iniciado, e a placa permanece sob o corpo de

prova durante toda a parte inicial do ensaio, conforme Figura 33. A chapa de aço ajuda a controlar a taxa de deflexão, até a ocorrência da primeira fissura.

Figura 33 - Parte inicial do ensaio da C1399

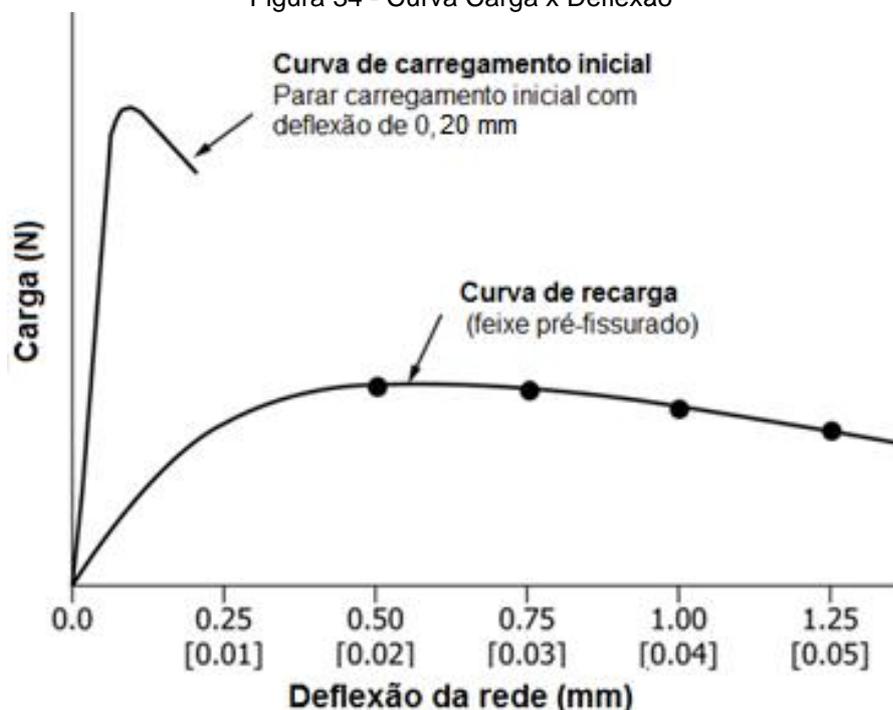


Fonte: Própria

Após o início do carregamento da combinação (viga e chapa de aço), o mesmo só deve ser encerrado ao atingir uma deflexão de 0,20 mm (Figura 34). Caso a fissura não ocorra nesse intervalo o teste é dado como inválido.

Assim que o carregamento for encerrado a placa deve ser removida e a viga trincada viga trincado deve ser centralizado nos cutelos inferiores, mantendo as mesmas orientações do ciclo inicial de carregamento. O LVDT (sensor para medir deslocamento), o qual aquisitará as medidas de deformação vertical do corpo de prova, deverá ser ajustado. Após o equipamento e o corpo de prova prontos é necessário iniciar a máquina novamente, com a mesma taxa especificada para o carregamento inicial. Nessa etapa do ensaio, só será encerrado o carregamento após o corpo de prova atingir uma deflexão de 1,25 mm (medida a partir do início do carregamento).

Figura 34 - Curva Carga x Deflexão



Fonte: Adaptado de C1399(ASTM, 2015)

É importante ressaltar que a carga máxima não deve ser utilizada para calcular o módulo de ruptura, já que esta carga inclui a carga transportada pela placa de aço, bem como pela viga de concreto.

O cálculo da Resistência Residual Média (ARS) de cada viga utilizando o valor de 0,01 MPa mais próximo usando as cargas determinadas pelas deflexões (na curva de recarga) de: 0,50; 0,75; 1,00 e 1,25 mm, da seguinte maneira:

$$ARS = \left( \frac{P_A + P_B + P_C + P_D}{4} \right) \times K \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

$$k = \frac{L}{bd^2} \text{ (mm}^2\text{)}$$

ARS= Força residual média (MPa)

$P_A + P_B + P_C + P_D$  = Soma das cargas registradas em deflexões (N)

L= comprimento (mm)

b=largura média da viga

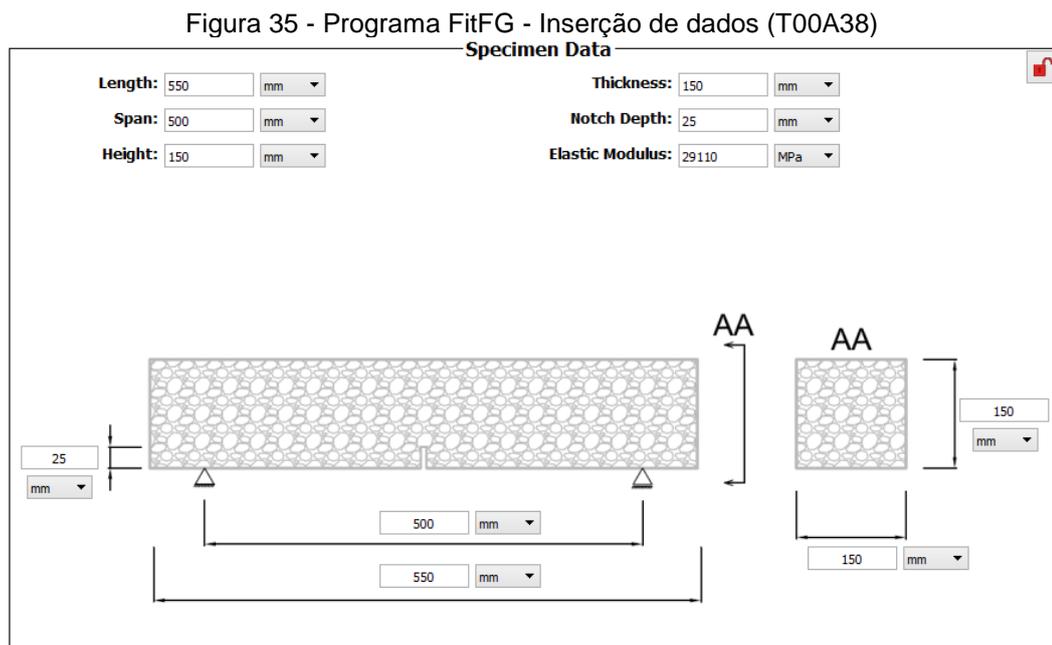
d=profundidade média da viga

## 6.6. Análise inversa - Sexta etapa

Neste trabalho, utilizou-se o programa FitFG para determinação da energia de fratura e da curva coesiva dos ensaios experimentais realizados na etapa final. O programa FitFG (GEA DOS SANTOS, 2014; GEA DOS SANTOS E SOUZA, 2015) está disponível para download em <http://www.fec.unicamp.br/~labmem/>. O programa simula o ensaio de flexão de 3 pontos, como os ensaiados neste trabalho, através do método dos elementos finitos (MEF) e do modelo *Cracked-Hinge* desenvolvido por Olesen (2001).

Além disso, o programa busca, através de um processo de otimização, determinar a curva coesiva que produz o melhor ajuste entre os resultados de simulação e os resultados experimentais. Essa funcionalidade foi utilizada para se determinar a curva coesiva dos ensaios realizados e a energia de fratura. Observa-se, no entanto, que o processo de otimização pode, em razão da adoção de parâmetros iniciais, convergir para diferentes soluções de curvas coesivas. Os parâmetros ( $a_1$ ,  $b_2$  e  $a_2$ ) estão definidos no trabalho de Gea dos Santos (2014). Desse modo, o ajuste automático deve ser encarado como um procedimento matemático de ajuste, mas que não necessariamente conduz a soluções fisicamente consistentes.

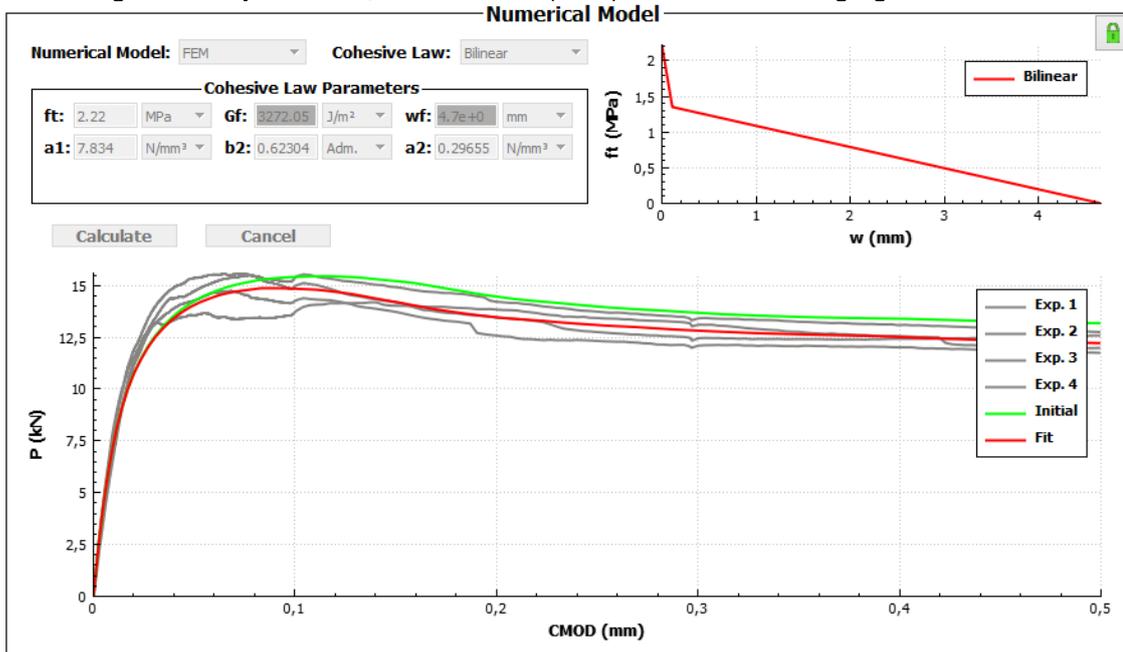
O processo de ajuste da curva coesiva se deu em etapas. Inicialmente foram inseridas as dimensões dos corpos de prova prismáticos utilizados no ensaio, além do módulo de elasticidade obtidos através de ensaios experimentais, conforme Figura 35.



Em seguida, foram utilizados dois métodos numéricos: Crack Hinge e Método dos Elementos Finitos (MEF) para o ajuste da curva coesiva, tanto para o corpo de prova de concreto sem agregado reciclado, quanto para a de concreto com agregado reciclado. Para a execução de ambos os métodos foram necessárias 3 etapas, sendo elas:

- 1<sup>o</sup>) Os ajustes dos parâmetros foram feitos utilizando-se apenas a primeira parte da curva, ou seja, os primeiros 0,50mm da abertura da boca (CMOD), conforme Figura 36;

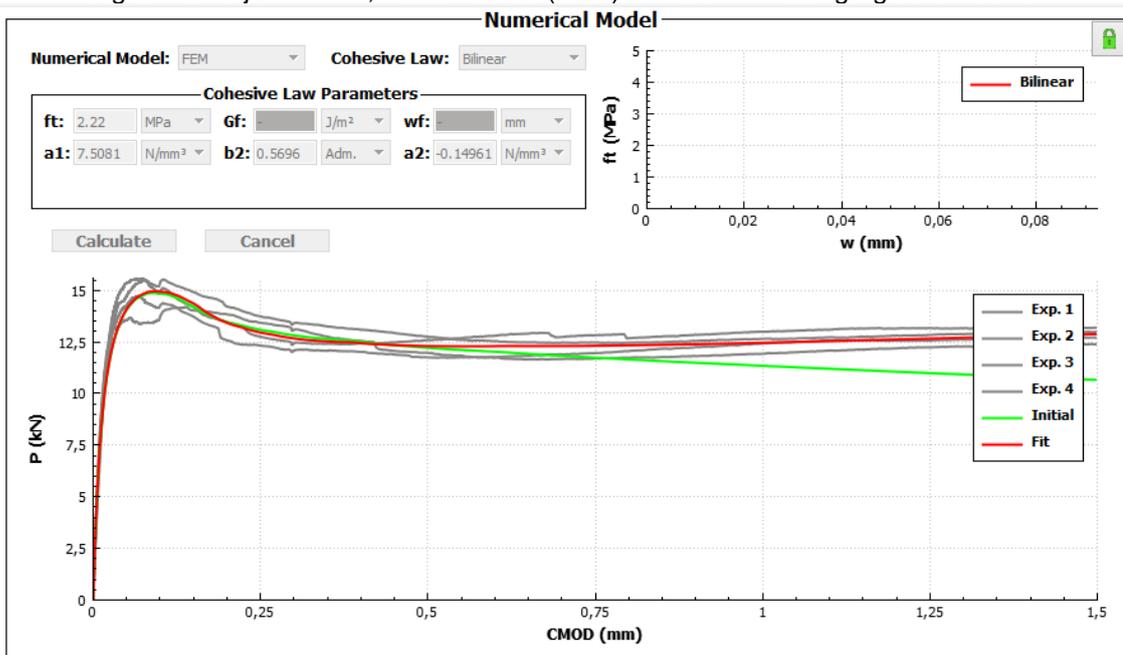
Figura 36 - Ajuste até 0,50mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado



Fonte: Própria

2º) A zona de abertura de boca utilizada nessa etapa foi aumentada para 1,50mm, e os ajustes dos parâmetros foram atualizados, conforme Figura 37. Na Figura 37, a curva coesiva (gráfico no canto superior esquerdo) não foi obtido, pois o parâmetro a2 obtido tem valor negativo;

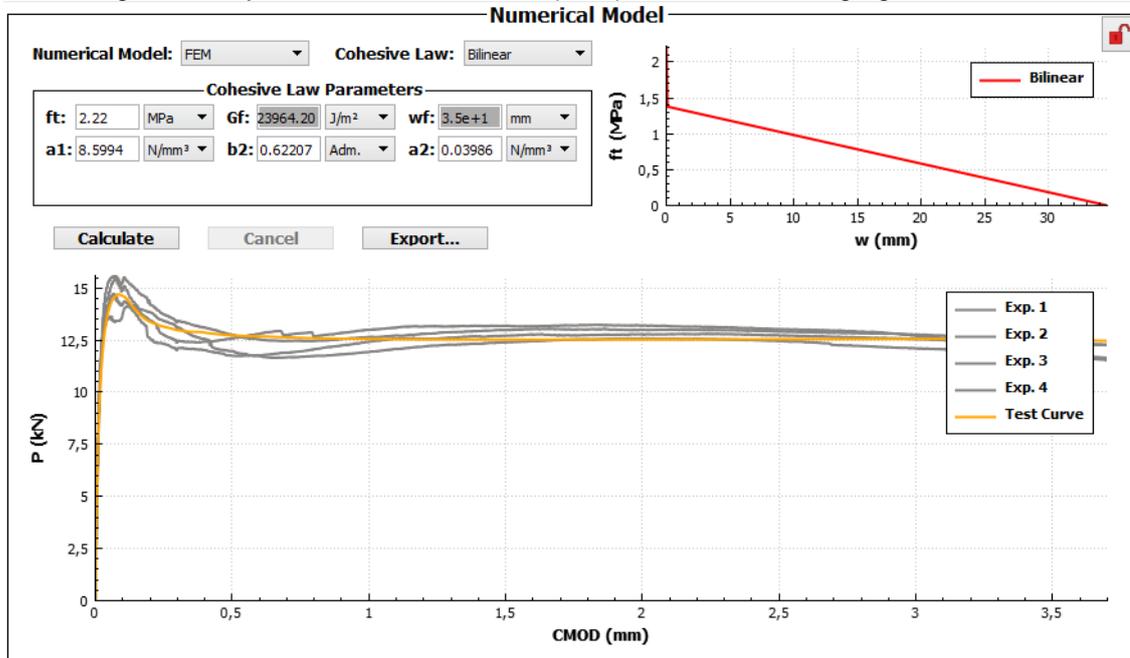
Figura 37 - Ajuste até 1,50mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado



Fonte: Própria

3º) Nessa etapa foi utilizada a faixa total, ou seja, abertura de boca de 3,70 mm para os ajustes dos parâmetros, conforme Figura 38.

Figura 38 - Ajuste até 3,70mm CMOD (MEF) – concreto sem agregado reciclado



Fonte: Própria

O ajuste em etapas, permitiu guiar o programa na direção de soluções fisicamente consistentes. Além disso, a resistência a tração também foi obtida através do ajuste das curvas, ao invés de impor os valores obtidos no ensaio de tração na flexão.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Parte experimental – Inicial

Neste tópico serão apresentados os resultados da primeira fase experimental

#### 7.1.1. Resistência à compressão

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à compressão aos 7 dias indicaram que, para a adição de fibra de aço não existe uma diferença significativa quando avaliado o tipo de agregado utilizado (T00 x T30), como pode ser observado na Figura 39 que apresenta os resultados da ANOVA com valor-P superiores a 0,05. Já o teor de fibra influi significativamente na resistência aos 7 dias (com valor-P de  $1,319E^{-09}$ ).

A ANOVA aplicado para os traços com adição de fibra de vidro AR mostraram que tanto o teor de fibra de vidro quanto o teor de agregado são significativos para a resistência aos 7 dias, como pode ser observado na Figura 39 que apresenta os resultados da ANOVA com valor-P inferiores a 0,05.

Figura 39 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à compressão aos 7 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	0,039102	1	0,039102	0,019269	0,890295	4,084746
% de fibra	161,3584	3	53,78615	26,50503	1,32E-09	2,838745
Interações	163,2491	3	54,41637	26,8156	1,13E-09	2,838745
Dentro	81,17122	40	2,02928			
Total	405,8179	47				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	40,9406	1	40,9406	19,20053	8,28E-05	4,084746
% de fibra	122,0771	3	40,69236	19,0841	7,69E-08	2,838745
Interações	141,1588	3	47,05294	22,06712	1,36E-08	2,838745
Dentro	85,29058	40	2,132265			
Total	389,4671	47				

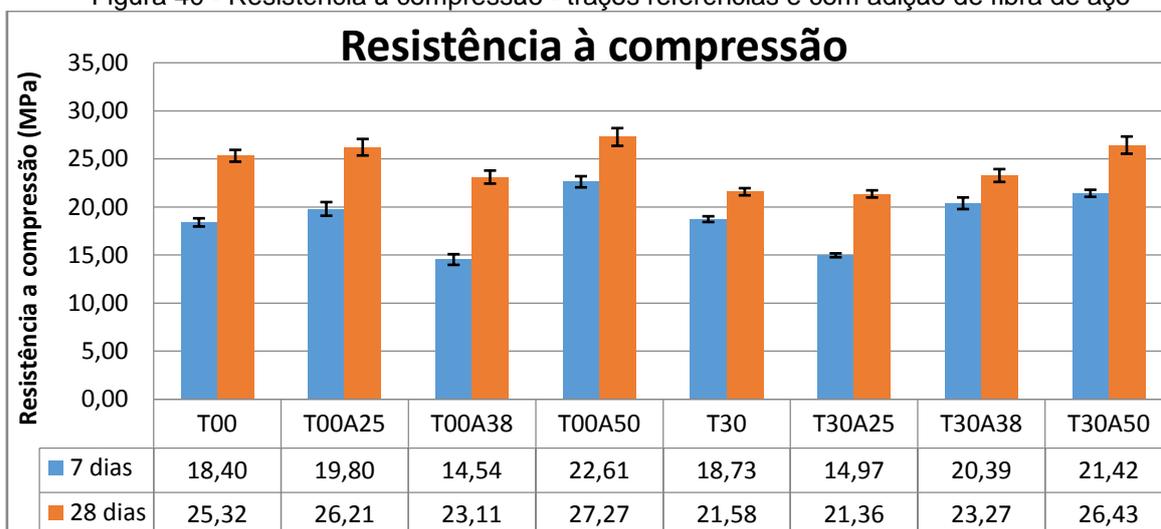
Fonte: Própria

As Figuras 40 e 41 apresentam a resistência média à compressão e os respectivos desvios padrões para os traços nas idades de 7 e 28 dias de traços de concreto com fibra de aço e de vidro, respectivamente.

Aos 7 e 28 dias, para os traços com agregado natural, é possível verificar no gráfico que a resistência à compressão tende a aumentar, tanto com o aumento de teor de fibra de aço como com o aumento da fibra de vidro.

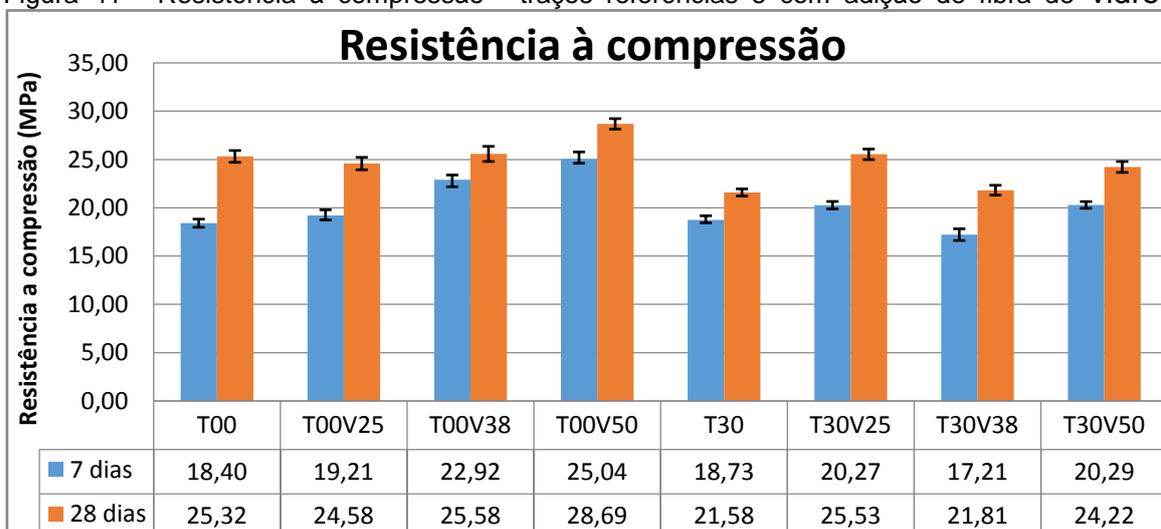
Salvador (2013), não observou esta tendência de aumento da resistência à compressão em função do aumento do teor de fibras de aço, o autor trabalhou com porcentagens de 0,19%; 0,32% e 0,45%. Silva Júnior et. al (2006), observou o contrário, ou seja, que a resistência à compressão diminuiu nos concretos com fibras (1%) em relação ao concreto referência, sem fibras. Armelin (1992) apud Figueiredo (2000) afirmam que não há consenso sobre o ensaio de resistência à compressão de concretos com adição de fibras.

Figura 40 - Resistência à compressão - traços referências e com adição de fibra de aço



Fonte: Própria

Figura 41 - Resistência à compressão - traços referências e com adição de fibra de vidro AR



Fonte: Própria

A ANOVA aplicado aos resultados de resistência à compressão aos 28 dias, tanto para traços com adição de fibra de aço como para adição de fibra de vidro, mostraram que existem significativas diferenças entre os traços com agregados naturais e agregados reciclados, bem como em função do teor de adição de fibras, como pode ser observado na Figura 42 que apresenta os resultados da ANOVA com valor-P inferiores a 0,05.

Figura 42 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à compressão aos 28 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	70,64027	1	70,64027	18,78635	9,59E-05	4,084746
% de fibra	125,873	3	41,95766	11,15839	1,86E-05	2,838745
Interações	41,66604	3	13,88868	3,693611	0,019438	2,838745
Dentro	150,4076	40	3,76019			
<b>Total</b>	<b>388,5869</b>	<b>47</b>				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	38,898	1	38,898	5,118375	0,029176	4,084746
% de fibra	75,98929	3	25,32976	3,333004	0,028851	2,838745
Interações	67,95651	3	22,65217	2,980675	0,042656	2,838745
Dentro	303,9872	40	7,599679			
<b>Total</b>	<b>486,8309</b>	<b>47</b>				

Fonte: Própria

Aos 28 dias, os traços executados com 30% de substituição do agregado natural pelo reciclado apresentaram menor resistência à compressão, cerca de 15% menor que o traço referencia (T00). Araújo *et al.* (2016) e Topçu e Sengel (2004), também observaram que, quanto maior o teor de agregado reciclado, menor é a resistência à compressão do concreto. Em contraposição, Santos (2016) observou que a utilização de agregado reciclado em porcentagens entre 20% e 40% não apresentaram efeitos significativos em relação a resistência à compressão.

Para os traços com 30% de agregado reciclado, o aumento do teor de fibras de aço apresenta uma tendência de aumento na resistência à compressão. A mesma tendência foi observada por Santos (2014), que produziu concretos com até 25% de agregado miúdo reciclado e fibra de aço.

Quando se compara os traços referências com os traços com 30% de substituição do agregado natural pelo reciclado, os concretos com fibras de vidro apresentam uma tendência de redução da resistência à compressão. Apenas o traço com 0,25% de fibra de vidro AR apresentou resistência à compressão 3,9% maior

para o traço com 30% de agregado reciclado (T30V25) ao invés do traço com agregado natural (T00V25).

Em Salvador (2013) o traço 1:2,50:3,10:0,60 obteve valores de resistência à compressão de 36,1 MPa com teores de fibra de aço de 0,32% e 36,5 MPa para teores de fibras de 0,45%. Sendo assim, como o traço utilizado nesse trabalho foi similar (só mudou a relação água/cimento para um valor menor), o valor de resistência entre os traços de Salvador (2013) e os desse trabalho não deveriam ter sido tão diferentes.

### 7.1.2. Resistência à tração por compressão diametral

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias indicou que para a adição de fibra de aço existe uma diferença significativa quando avaliado o tipo de agregado utilizado (T00 x T30), e o teor de fibra adicionado, como pode ser observado na Figura 43, que apresenta os resultados da ANOVA com valor-P inferiores a 0,05.

A ANOVA aplicada para os traços com adição de fibra de vidro AR mostraram que é significativa a diferença da resistência a tração por compressão diametral em função apenas do tipo de agregado, sendo os maiores valores obtidos para o agregado natural. Além disso, não ocorreu diferença significativas entre os teores de fibras de vidro.

Figura 43 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	5,67845	1	5,67845	22,44872	8,08E-05	4,259677
% de fibra	35,85778	3	11,95259	47,25239	3,18E-10	3,008787
Interações	10,06913	3	3,356375	13,26882	2,61E-05	3,008787
Dentro	6,07085	24	0,252952			
<b>Total</b>	<b>57,6762</b>	<b>31</b>				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	0,585903	1	0,585903	5,677528	0,025451	4,259677
% de fibra	0,808009	3	0,269336	2,609928	0,074762	3,008787
Interações	1,202409	3	0,400803	3,883869	0,021435	3,008787
Dentro	2,476725	24	0,103197			
<b>Total</b>	<b>5,073047</b>	<b>31</b>				

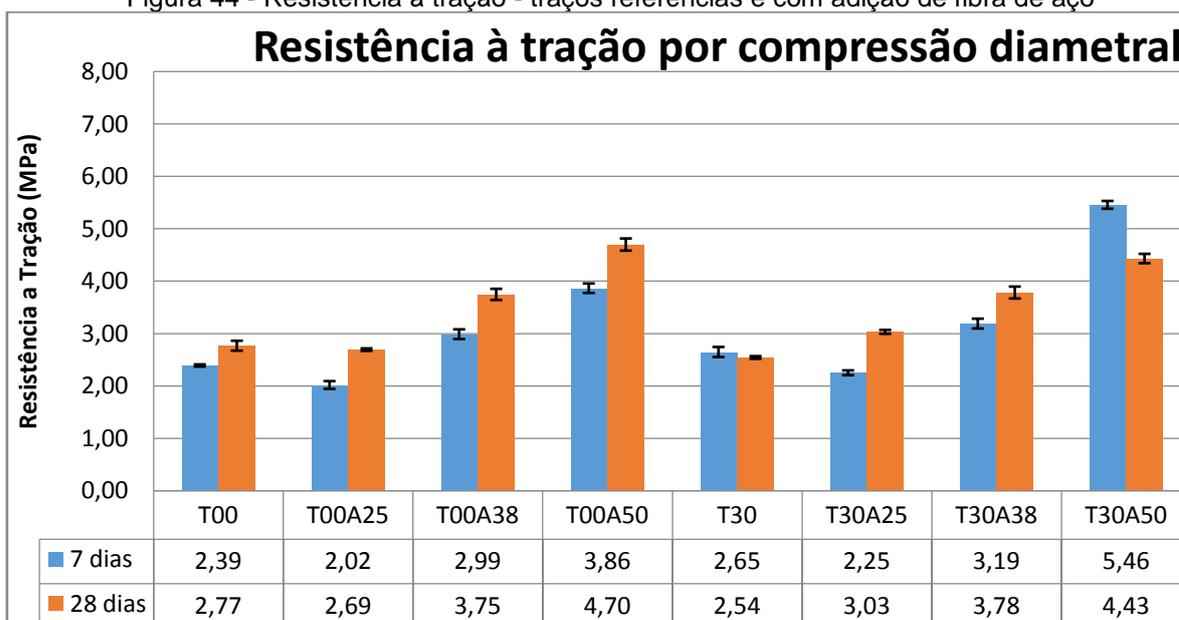
Fonte: Própria

As Figuras 44 e 45 apresentam resistência à tração por compressão diametral e os respectivos desvios padrões para os traços com fibras de aço e de vidro, respectivamente, para as idades de 7 e 28 dias.

Aos 7 dias, o concreto com 0% de agregado reciclado (T00) tinha resistência menor do que o concreto com 30% de agregado reciclado (T30), em contraposição, aos 28 dias o traço T00 passou a ser mais resistente que o T30.

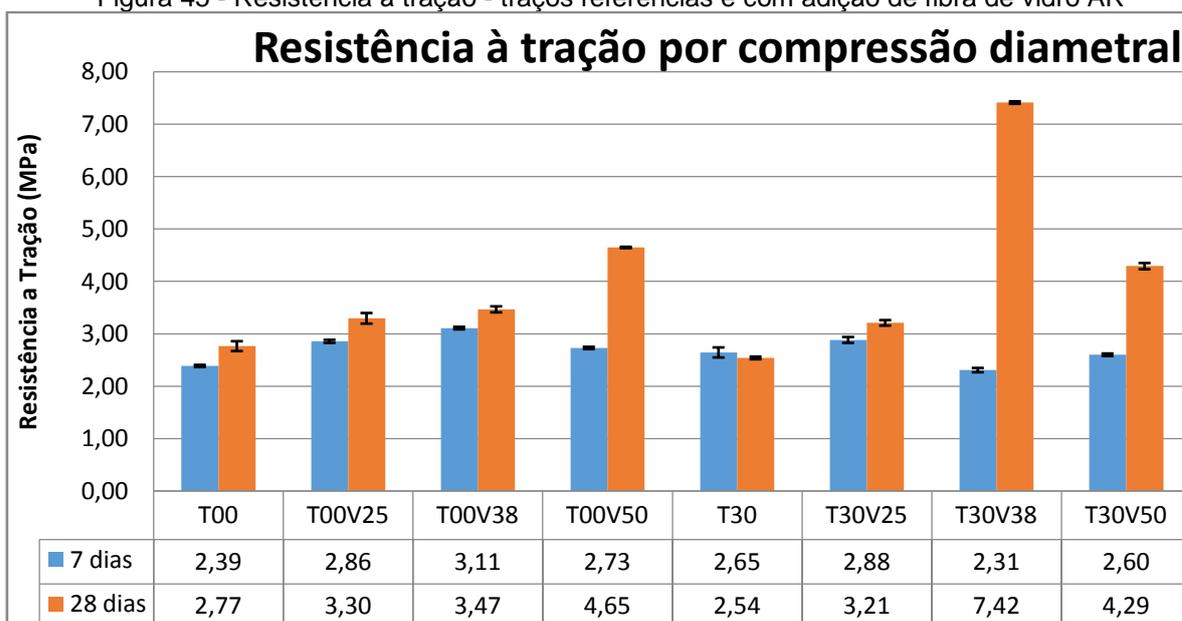
O aumento da quantidade de fibra de aço tende a aumentar a resistência à tração tanto para os traços com agregado natural, quanto para os traços com agregado reciclado. Silva Júnior et. al (2006) e Góis e Barboza (2009) obtiveram a mesma conclusão, ou seja, que o aumento do teor de fibras ocasiona um aumento na resistência à tração.

Figura 44 - Resistência à tração - traços referências e com adição de fibra de aço



Fonte: Própria

Figura 45 - Resistência à tração - traços referências e com adição de fibra de vidro AR



Fonte: Própria

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias indicaram que para a adição de fibra de aço existe uma diferença significativa quando avaliado o teor de fibra adicionado, como pode ser observado na Figura 46 que apresenta os resultados da análise de variância com valor-P inferior a 0,05.

A ANOVA aplicada para os traços com adição de fibra de vidro AR mostraram que é significativa a diferença da resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias em função do tipo de agregado e do teor de fibra adicionado.

Figura 46 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tipo de agregado	0,03125	1	0,03125	0,19418	0,663404	4,259677
% de fibra	13,09105	3	4,363683	27,11485	7E-08	3,008787
Interações	0,23805	3	0,07935	0,493061	0,690456	3,008787
Dentro	3,8624	24	0,160933			
<b>Total</b>	<b>17,22275</b>	<b>31</b>				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tipo de agregado	3,334653	1	3,334653	11,14799	0,002739	4,259677
% de fibra	33,17721	3	11,05907	36,97127	3,7E-09	3,008787
Interações	25,39841	3	8,466136	28,30291	4,72E-08	3,008787
Dentro	7,179025	24	0,299126			
<b>Total</b>	<b>69,0893</b>	<b>31</b>				

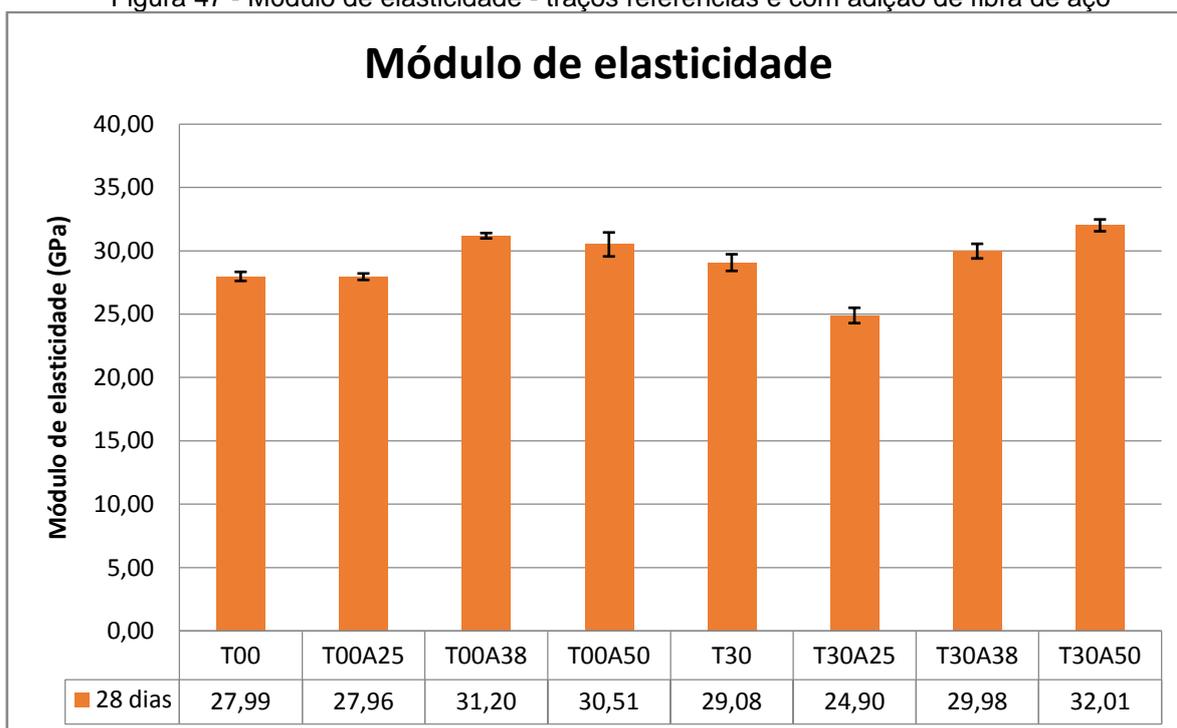
Fonte: Própria

Aos 28 dias, tanto os traços com fibra de aço quanto os com fibra de vidro AR, tendem a aumentar a resistência à tração por compressão diametral, com o aumento do teor de fibras, embora dois traços saiam fora desse padrão, os traços T00A25 (diminuição em relação ao referência) e T30V38 (maior valor entre todos os traços).

### 7.1.3. Módulo de elasticidade

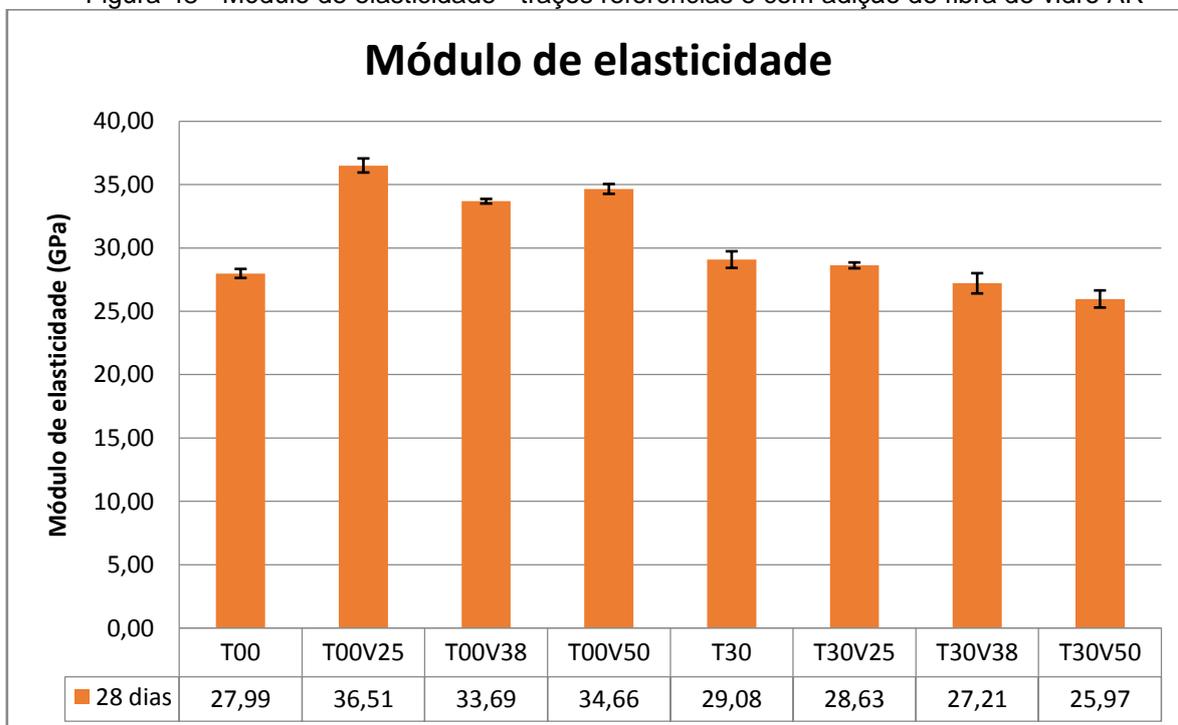
O módulo de elasticidade foi determinado aos 28 dias. Os valores médios e os respectivos desvios padrões são apresentados nas Figuras 47 e 48, para concretos com fibra de aço e de vidro respectivamente.

Figura 47 - Módulo de elasticidade - traços referências e com adição de fibra de aço



Fonte: Própria

Figura 48 - Módulo de elasticidade - traços referências e com adição de fibra de vidro AR



Fonte: Própria

Para os traços de concreto com 0% de agregado reciclado e fibra de aço, o módulo de elasticidade, tende a aumentar conforme o aumento do teor de fibra. Góis e Barboza (2009) observou essa tendência de que o aumento dos teores de

fibra de aço aumentam o módulo de elasticidade. Nos traços de concreto com 30% de agregado reciclado com fibra de aço, ocorre um aumento no módulo de elasticidade com o aumento da porcentagem de fibra.

Com aplicação de ANOVA para os fatores tipo de agregado e porcentagem de fibra, observou-se que, para a aplicação de fibra de aço a porcentagem de adição de fibra é significativa (valor-P = 0,00020237), porém a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado não influenciou significativamente no módulo de elasticidade, conforme pode-se observar na Figura 49.

Figura 49 - ANOVA fator duplo com repetição para módulo de elasticidade aos 28 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	4,96125	1	4,96125	1,572942	0,221859	4,259677
% de fibra	93,21878	3	31,07293	9,851533	0,000202	3,008787
Interações	19,10763	3	6,369208	2,019329	0,138023	3,008787
Dentro	75,6989	24	3,154121			
<b>Total</b>	<b>192,9866</b>	<b>31</b>				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	81,63225	1	81,63225	4,845157	0,037584	4,259677
% de fibra	15,89521	3	5,298403	0,314479	0,814737	3,008787
Interações	57,04866	3	19,01622	1,128679	0,35727	3,008787
Dentro	404,3572	24	16,84822			
<b>Total</b>	<b>558,9333</b>	<b>31</b>				

Fonte: Própria

O módulo de elasticidade do concreto com 30% de agregado reciclado (T30) é, aproximadamente, 3,9% maior que o concreto com 0% de agregado reciclado (T00). Benetti (2012), obteve resultados similares, pois afirmou que o módulo de elasticidade não teve variações significativas quando comparados os concretos referências com os concretos com agregado reciclado. Por outro lado, os autores Araújo *et al.* (2016) afirmam que o concreto com substituição de agregado natural por agregado reciclado faz com que o módulo de elasticidade do concreto diminua (6% a 12%).

Para os concretos com 0% de agregado reciclado e fibra de vidro, todos os valores são maiores que o obtido para o traço referência, embora a tendência seja que, o aumento da fibra de vidro gera uma diminuição do módulo de elasticidade.

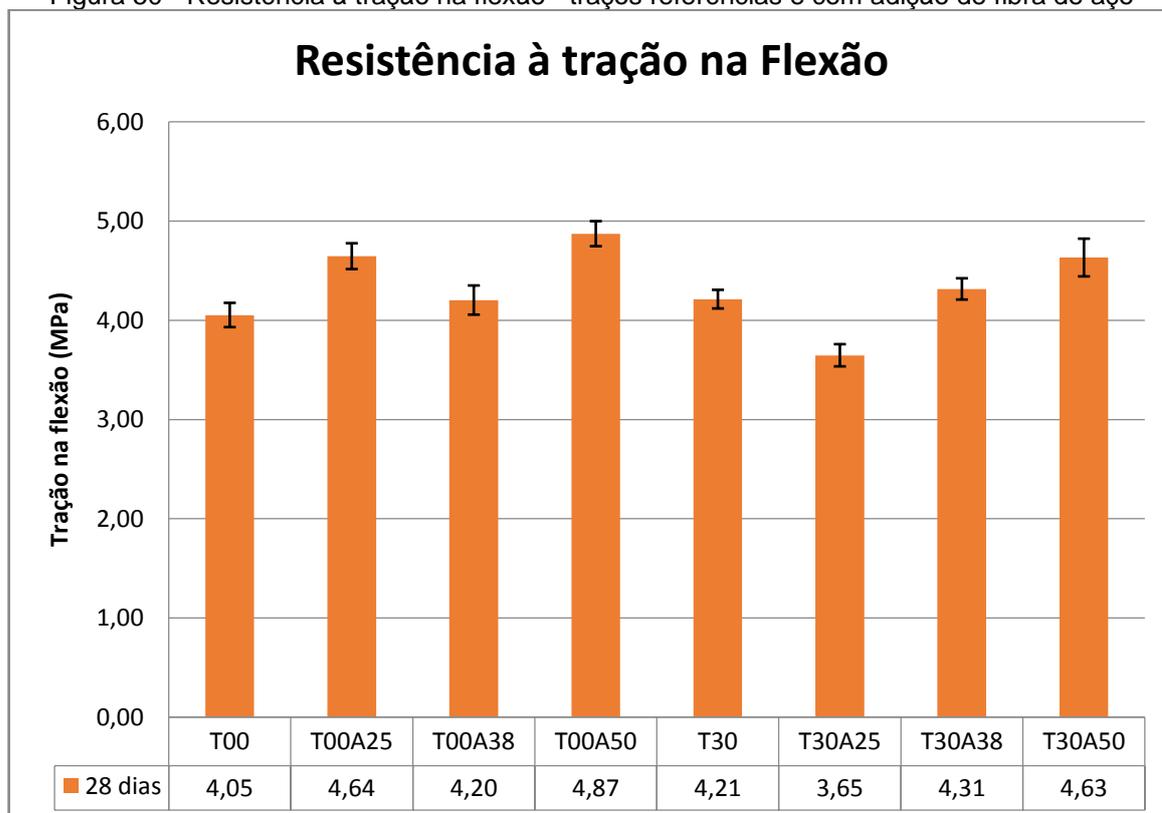
Para a adição de fibra de vidro no concreto com 30% de agregado reciclado, o módulo de elasticidade tende a diminuir com o aumento do teor da fibra de vidro.

Para a aplicação da fibra de vidro, observa-se na análise estatística (ANOVA) que o teor de fibra adicionado não é significativo, porém a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado influenciou significativamente no módulo de elasticidade, sendo este, significativamente menor quando utilizado o agregado reciclado. Esse comportamento foi contrário ao observado pela fibra de aço.

#### 7.1.4. Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão foi determinada aos 28 dias e estes resultados médios e os respectivos desvios padrões são apresentados nas Figuras 50 e 51, para concretos com fibra de aço e de vidro respectivamente.

Figura 50 - Resistência à tração na flexão - traços referências e com adição de fibra de aço



Fonte: Própria

Figura 51 - Resistência à tração na flexão - traços referências e com adição de fibra de vidro AR



Fonte: Própria

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão indicaram que para a adição de fibra de aço existe uma diferença significativa quando avaliado o teor de fibra adicionado, como pode ser observado na Figura 52 que apresenta os resultados da ANOVA com valor-P inferior a 0,05.

Figura 52 - ANOVA fator duplo com repetição para resistência à tração na flexão aos 28 dias

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	0,230249	1	0,230249	1,669101	0,208682	4,259677
% de fibra	1,308164	3	0,436055	3,16101	0,042998	3,008787
Interações	1,219729	3	0,406576	2,947319	0,053163	3,008787
Dentro	3,31075	24	0,137948			
<b>Total</b>	<b>6,068892</b>	<b>31</b>				

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	0,166424	1	0,166424	0,456564	0,505693	4,259677
% de fibra	2,533687	3	0,844562	2,316954	0,101089	3,008787
Interações	0,579032	3	0,193011	0,529501	0,666331	3,008787
Dentro	8,748337	24	0,364514			
<b>Total</b>	<b>12,02748</b>	<b>31</b>				

Fonte: Própria

A ANOVA aplicado para os traços com adição de fibra de vidro AR mostraram que não é significativa a diferença da resistência a tração na flexão em função do tipo de agregado nem dos teores de fibras de vidro.

Para a resistência à tração na flexão, o concreto referência com 30% de agregado reciclado possui resistência, aproximadamente, 4,0% maior que o concreto com 0% de agregado reciclado. Ao contrário do que foi obtido nos ensaios de Topçu e Sengel (2004), ou seja, os autores concluíram que o concreto com agregado reciclado possui resistência à tração na flexão menor (13% - Concreto com 16 MPa - e 27% - concreto com 20 MPa) que o concreto com agregado natural. Santos (2014) concluiu o mesmo que Topçu e Sengel (2004), já que os concretos com agregado miúdo reciclado sofreram um decréscimo da resistência à tração na flexão em comparação com o concreto com agregado natural.

No concreto com 0% agregado reciclado tanto com fibras de aço como com fibras de vidro AR, ocorre um aumento da resistência à tração na flexão em relação ao concreto referência (T00) e a tendência é que, com o aumento do teor de fibra de aço, haja um aumento na resistência à tração na flexão. Silva Júnior et. al (2006), também observou essa tendência, ou seja, afirmou que com o aumento do teor de fibras aumenta, também, a resistência à tração na flexão.

A resistência à tração na flexão, para concretos com 30% de agregado reciclado com adição de fibra de aço, tende a aumentar com o aumento do teor de fibras, embora o traço com 0,25% de adição de fibra (T30A25) possuir resistência menor que a do traço sem fibras (T30), que apresenta uma queda de, aproximadamente, 13,3% em relação ao T30.

Para os concretos com 30% de agregado reciclado e fibra de vidro, o concreto com 0,38% (T30V38) de adição apresentou resistência, aproximadamente, 10% menor que o traço referência (T30). Já os concretos com 0,25% (T30V25) e 0,50% (T30V50) apresentaram resistências similares, sendo 4,36MPa e 4,35 MPa, respectivamente.

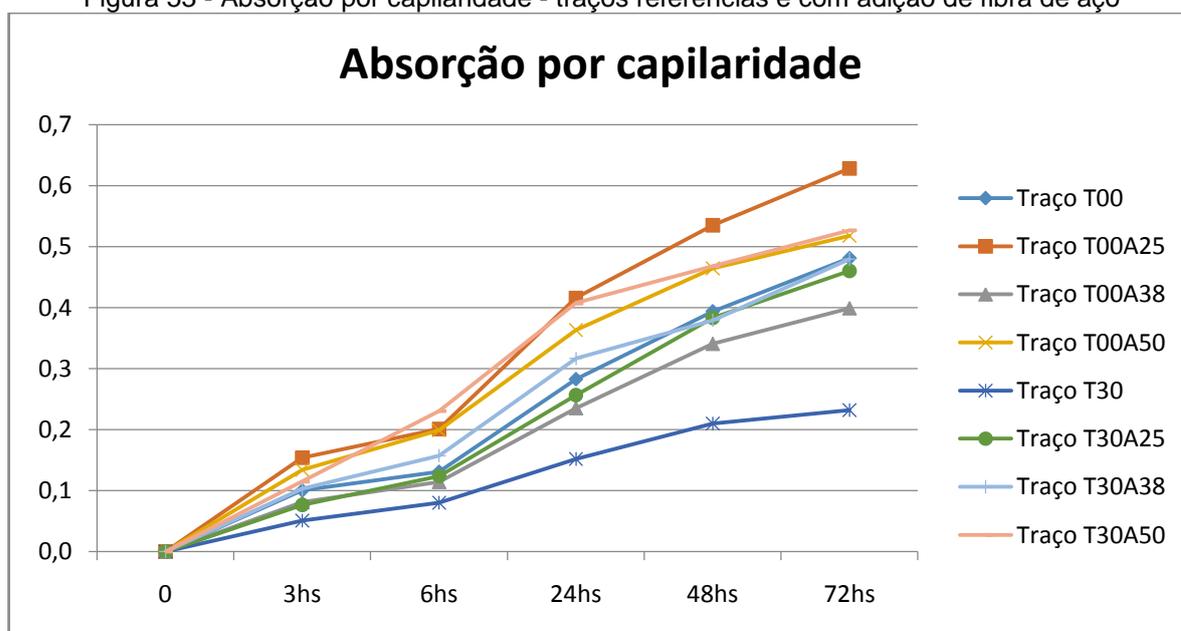
Ao comparar os valores de resistência a tração na flexão, do concreto com agregado natural aos que foram produzidos com substituição de 30% do agregado natural por agregado reciclado, o comportamento não foi muito linear. A

maioria dos traços possuem resistência maior nos traços com 0% de agregado reciclado, exceto os traços referências e com 0,38% de fibra de aço, os quais possuem maior resistência à tração na flexão com 30% de agregado reciclado. Os concretos com 0,25% fibras de vidro obtiveram valores muito similares tanto no uso de agregado natural quanto no uso de agregado reciclado, sendo respectivamente 4,37 MPa (T00V25) e 4,36 MPa (T30V25).

### 7.1.5. Absorção por capilaridade

A absorção por capilaridade para 0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas são apresentadas nas Figuras 53 e 54, para concretos com fibra de aço e de vidro AR, respectivamente.

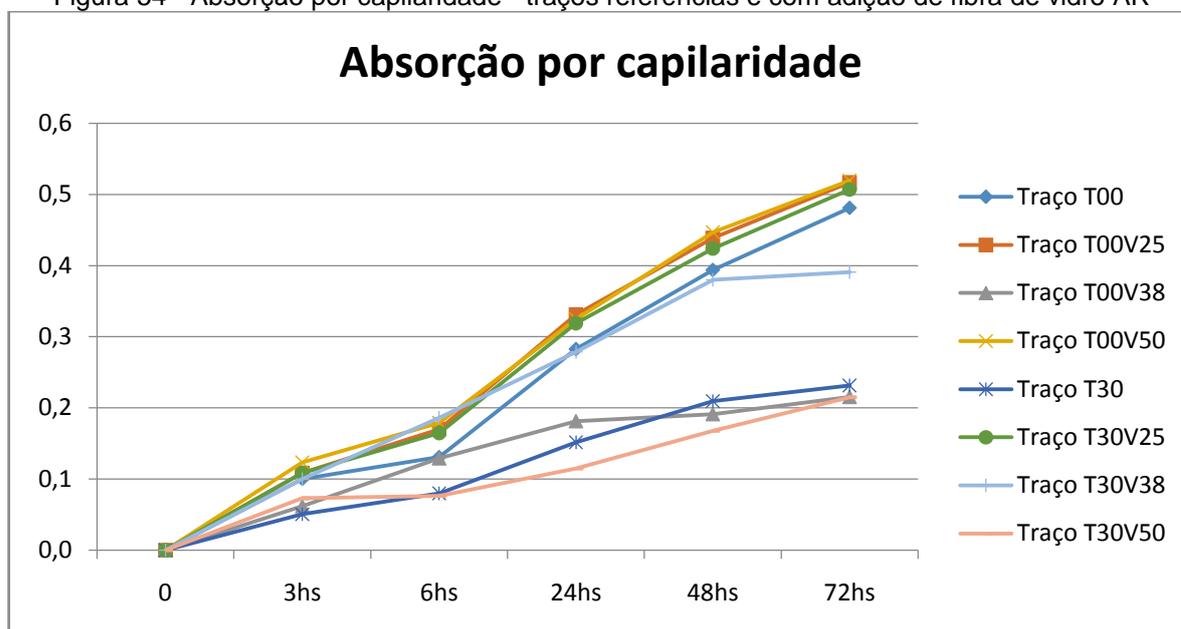
Figura 53 - Absorção por capilaridade - traços referências e com adição de fibra de aço



Fonte: Própria

Para a fibra de aço, quando comparado os traços com agregado reciclado e agregado natural, é possível verificar que os traços referências e 0,25% de fibra, o traço com agregado natural obteve maiores valores, porém esse comportamento é contrário, quando analisamos os traços com 0,38% e 0,50% de fibra, já que os valores mais elevados ocorrem nos traços com agregado reciclado.

Figura 54 - Absorção por capilaridade - traços referências e com adição de fibra de vidro AR



Fonte: Própria

Para a fibra de vidro AR, quando comparado os traços com agregado reciclado e agregado natural, é possível verificar que os traços referências e 0,25% e 0,50% de fibra, os traços com agregado natural obtiveram maiores valores, porém esse comportamento é contrário, quando analisamos os traços com 0,38% de fibra, já que os valores mais elevados ocorrem nos traços com agregado reciclado.

Contudo, quando comparamos todos os traços, independentemente do tipo de fibra utilizado, o traço com 30% de agregado reciclado (T30) esteve entre os traços com menor capacidade de absorção de água por capilaridade. Embora o traço que obteve menor absorção por capilaridade foi o T30V50 (30% de agregado reciclado e 0,50% de fibra de vidro AR).

Observando-se as Figuras 53 e 54, nota-se que os resultados de capacidade de absorção de água por capilaridade entre os concretos com agregado natural e reciclado apresentam diferenças significativas independentemente do tipo de fibra utilizado.

Figura 55 - ANOVA fator duplo com repetição para absorção por capilaridade - Fibra de aço

ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de aço						
RESUMO	0	A25	A38	A50	Total	
<i>0hs</i>						
Média	0	0	0	0	0	
Variância	0	0	0	0	0	
<i>30hs</i>						
Média	0,0754	0,1151	0,0922	0,1245	0,1018	
Variância	0,0012	0,003	0,0002	0,0002	0,0011	
<i>60hs</i>						
Média	0,1054	0,1625	0,1358	0,2144	0,1545	
Variância	0,0013	0,003	0,0009	0,0005	0,0026	
<i>240hs</i>						
Média	0,2172	0,3363	0,2758	0,3853	0,3037	
Variância	0,0086	0,0127	0,0033	0,001	0,0082	
<i>480hs</i>						
Média	0,3018	0,4592	0,3598	0,466	0,3967	
Variância	0,0169	0,0115	0,0007	7E-06	0,0096	
<i>720hs</i>						
Média	0,3563	0,5443	0,4391	0,522	0,4654	
Variância	0,0311	0,0141	0,0032	4E-05	0,0132	
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Horas	1,3072	5	0,2614	55,248	2E-12	2,620654
% Fibra	0,0901	3	0,03	6,3502	0,0025	3,008787
Interações	0,0398	15	0,0027	0,5604	0,8766	2,107673
Dentro	0,1136	24	0,0047			
Total	1,5507	47				

Fonte: Própria

Quando analisada (conforme Figura 55) a absorção por capilaridade em relação às horas ensaiadas, a variação foi significativa, já que o valor-P é inferior a 0,05 (valor-P =  $2 \times 10^{-12}$ ). Com relação a porcentagem de fibra, a absorção por capilaridade obteve valores significativos, também (valor-P = 0,0025).

Figura 56 - ANOVA fator duplo com repetição para absorção por capilaridade - Fibra de vidro AR

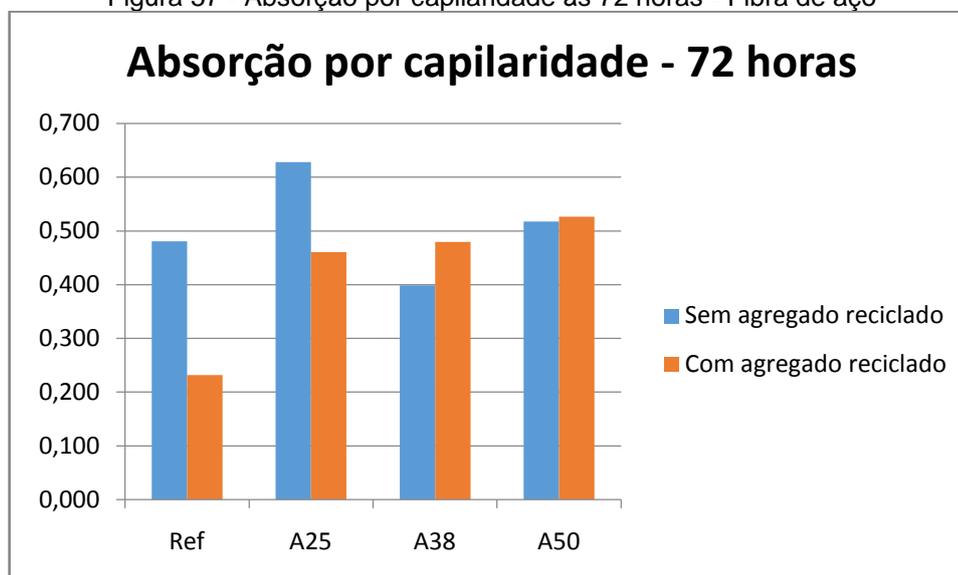
ANOVA fator duplo com repetição - Fibra de vidro AR						
RESUMO	0 h	V25	V38	V50	Total	
<i>0hs</i>						
Média	0	0	0	0	0	
Variância	0	0	0	0	0	
<i>3hs</i>						
Média	0,0754	0,1085	0,081	0,0982	0,0908	
Variância	0,0012	0	0,0007	0,0013	0,0007	
<i>6hs</i>						
Média	0,1054	0,1673	0,1577	0,1278	0,1395	
Variância	0,0013	1E-05	0,0016	0,0053	0,0019	
<i>24hs</i>						
Média	0,2172	0,325	0,23	0,22	0,248	
Variância	0,0086	7E-05	0,0047	0,0221	0,0073	
<i>48hs</i>						
Média	0,3018	0,4315	0,2857	0,3073	0,3316	
Variância	0,0169	0,0001	0,0178	0,039	0,0144	
<i>72hs</i>						
Média	0,3563	0,512	0,3032	0,3672	0,3847	
Variância	0,0311	5E-05	0,0154	0,0464	0,0201	
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Horas	0,8744	5	0,1749	19,652	9E-08	2,620654
% Fibra	0,0552	3	0,0184	2,0692	0,131	3,008787
Interações	0,042	15	0,0028	0,3146	0,9881	2,107673
Dentro	0,2136	24	0,0089			
Total	1,1852	47				

Fonte: Própria

Na Figura 56, a ANOVA indica que os valores obtidos entre as horas ensaiadas (0, 3, 6, 24, 48 e 72 horas), possui variação significativa (valor-P =  $2 \times 10^{-8}$ ). Entretanto, quando analisamos a porcentagem de fibra, essa não obteve variação significativa, já que o valor obtido no valor-P foi de 0,131.

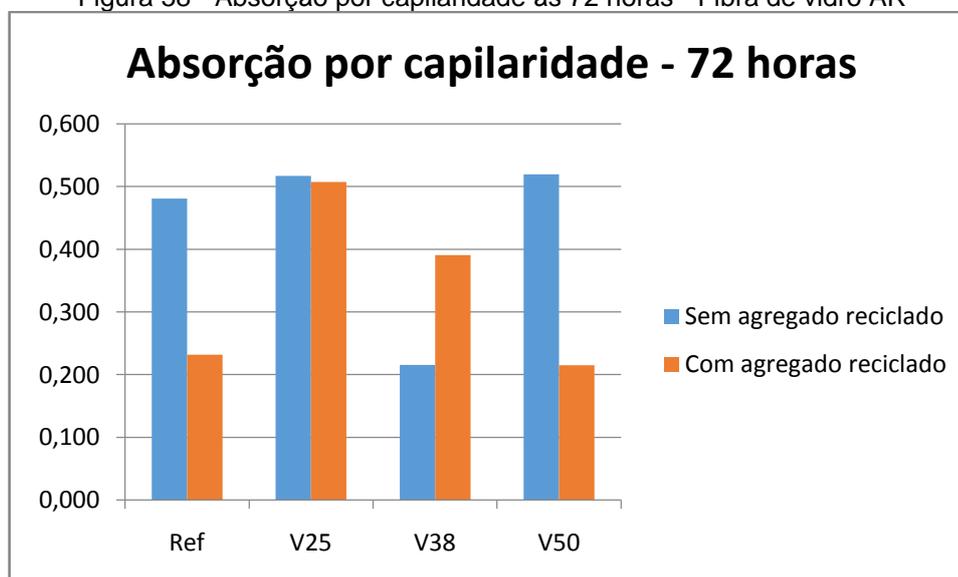
Nas Figuras 57 e 58 são apresentados os valores obtidos na absorção por capilaridade às 72 horas para os traços com fibra de aço e fibra de vidro AR, respectivamente.

Figura 57 - Absorção por capilaridade às 72 horas - Fibra de aço



Fonte: Própria

Figura 58 - Absorção por capilaridade às 72 horas - Fibra de vidro AR



Fonte: Própria

Para os traços referências o agregado reciclado possui menor absorção às 72 horas. Quando utilizado fibra, os traços com 0,25% de fibra de aço e com 0,38% de fibra de em contraposição os traços com 0,50% de fibra vidro AR obtiveram menor absorção com o agregado reciclado, em contraposição os traços

com 0,38% de fibra (Aço e vidro AR) possuem absorção menor para agregado natural. Já os traços com 0,50% de fibra de aço e com 0,38% de fibra de em contraposição os traços com 0,25% de fibra vidro AR obtiveram valores para absorção muito similares.

### 7.1.6. Absorção por imersão e massa específica

A capacidade de absorção de água por imersão, massa específica seca e massa específica de superfície seca estão apresentadas na Tabela 12, através de valores médios e com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 12 - Massa específica e absorção

TRAÇO	Massa específica seca	Sd	Massa específica de sup. Seca	Sd	Absorção	Sd
T00	2,2484	0,0244	2,3884	0,0223	6,2286	0,2186
T00A25	2,3009	0,0250	2,4204	0,0158	5,1937	0,4656
T00A38	2,2697	0,0084	2,3799	0,0068	4,8572	0,2724
T00A50	2,3110	0,0116	2,4095	0,0141	4,2636	0,3545
T00V25	2,3111	0,0273	2,4237	0,0187	4,8718	0,4294
T00V38	2,3832	0,0234	2,4302	0,0227	1,9748	0,1468
T00V50	2,2986	0,0411	2,4103	0,0324	4,8629	0,6342
T30	2,2192	0,0197	2,3641	0,0109	6,5322	0,4501
T30A25	2,2126	0,0124	2,3831	0,0109	7,7071	0,1861
T30A38	2,2643	0,0273	2,3860	0,0267	5,3747	0,7267
T30A50	2,3075	0,0228	2,4112	0,0189	4,4966	0,6357
T30V25	2,2595	0,0132	2,3813	0,0148	5,3907	0,5322
T30V38	2,3153	0,0267	2,3801	0,0238	2,7984	0,1566
T30V50	2,2359	0,0048	2,3757	0,0093	6,2516	0,3245

Fonte: Própria

A massa específica de superfície seca tem valores maiores que massa específica de seca, em todos os traços. A massa específica seca tende a aumentar com o aumento do teor de fibra aço, exceto pelo traço T00A38 (traço com agregado natural e 0,38% de fibra de aço). O comportamento dos traços com fibra de vidro AR tendem a aumentar o valor da massa específica seca com o aumento do teor de fibra, exceto pelos traços com 0,50% de fibra de vidro AR (T00V50 e T30V50). O comportamento para a massa específica de superfície seca possui o mesmo comportamento da massa específica seca, exceto pelos traços com fibra de vidro AR

e agregado reciclado, pois esses mantêm um comportamento constante, com o aumento do teor de fibra.

Quando comparamos os traços referências (com agregado natural e com agregado reciclado), o traço com agregado natural possui menor absorção, aproximadamente 5% menor. A taxa de absorção tende a diminuir com o aumento do teor de fibra de aço, exceto pelo traço T30A25 (traço com agregado reciclado e 0,25% de fibra de aço). A taxa de absorção tende a ser constante para os traços com agregado natural e fibra de vidro AR, exceto pelo traço com 0,38% de fibra. Já com agregado reciclado e fibra de vidro AR, a tendência é de aumentar a taxa de absorção com o aumento do teor de fibra, exceto pelo traço com 0,38% de fibra.

Todos os traços com agregado reciclado possuem taxa de absorção maior que os traços com agregado natural. Os traços com fibra de aço possuem taxa de absorção maior que os traços com fibra de vidro, exceto pelos traços com 0,50% de fibra. A menor taxa de absorção ocorreu no traço T00A38 (com agregado natural e 0,38% de fibra de aço), com 1,9748%, enquanto o traço com maior taxa de absorção foi do traço T30A25 (com agregado reciclado e 0,25% de fibra de aço) com 7,7071%.

As Figuras 59, 60 e 61, mostram a ANOVA aplicada a massa específica seca, massa específica de superfície seca e absorção por imersão, respectivamente.

Figura 59 - ANOVA - Massa específica seca

Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de aço						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	9,13002	2,2825	0,00083		
Agregado reciclado	4	9,00364	2,25091	0,00195		
Referência	2	4,46759	2,23379	0,00043		
A25	2	4,51351	2,25676	0,0039		
A38	2	4,53401	2,26701	1,4E-05		
A50	2	4,61855	2,30927	6E-06		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	0,001996407	1	0,002	2,54392	0,20898	10,128
%Fibra	0,005988698	3	0,002	2,5437	0,23172	9,27663
Erro	0,002354324	3	0,00078			
Total	0,010339429	7				

Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de vidro AR						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	9,24138	2,31035	0,00309		
Agregado reciclado	4	9,02992	2,25748	0,00176		
Referência	2	4,46759	2,23379	0,00043		
V25	2	4,57065	2,28532	0,00133		
V38	2	4,69852	2,34926	0,0023		
V50	2	4,53455	2,26728	0,00197		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	0,005589484	1	0,00559	37,9436	0,00861	10,128
%Fibra	0,014122198	3	0,00471	31,9557	0,00889	9,27663
Erro	0,000441931	3	0,00015			
Total	0,020153613	7				

Fonte: Própria

Figura 60 - ANOVA - Massa específica seca

Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de aço						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i> soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	9,598253	2,399563	0,000348		
Agregado reciclado	4	9,544471	2,386118	0,000375		
Referência	2	4,752538	2,376269	0,000295		
A25	2	4,803479	2,401739	0,000695		
A38	2	4,765928	2,382964	1,86E-05		
A50	2	4,820779	2,410389	1,46E-06		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	0,000361561	1	0,000362	1,671076	0,286672	10,12796
% Fibra	0,001518615	3	0,000506	2,339596	0,251659	9,276628
Erro	0,000649093	3	0,000216			
Total	0,002529269	7				
Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de vidro AR						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i> soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	9,652696	2,413174	0,000341		
Agregado reciclado	4	9,501207	2,375302	6,14E-05		
Referência	2	4,752538	2,376269	0,000295		
V25	2	4,805004	2,402502	0,000898		
V38	2	4,810343	2,405171	0,001258		
V50	2	4,786018	2,393009	0,0006		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	0,002868594	1	0,002869	47,04366	0,006345	10,12796
% Fibra	0,001024442	3	0,000341	5,600131	0,095438	9,276628
Erro	0,000182932	3	6,1E-05			
Total	0,004075968	7				

Fonte: Própria

Figura 61 - ANOVA - Massa específica seca

Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de aço						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i> soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	20,5431	5,13577	0,6786		
Agregado reciclado	4	24,1107	6,02766	1,9486		
Referência	2	12,7608	6,38041	0,0461		
A25	2	12,9008	6,45041	3,1585		
A38	2	10,2319	5,11596	0,1339		
A50	2	8,76017	4,38009	0,0271		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	1,590943995	1	1,59094	2,6893	0,1996	10,128
% Fibra	6,106775262	3	2,03559	3,4409	0,1686	9,2766
Erro	1,774769179	3	0,59159			
Total	9,472488436	7				
Anova: fator duplo sem repetição - Fibra de vidro AR						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i> soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Agregado natural	4	17,938	4,4845	3,2112		
Agregado reciclado	4	20,9729	5,24324	2,8925		
Referência	2	12,7608	6,38041	0,0461		
A25	2	10,2625	5,13126	0,1346		
A38	2	4,77315	2,38657	0,3391		
A50	2	11,1145	5,55724	0,9643		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítica</i>
Tipo de agregado	1,151349102	1	1,15135	10,377	0,0485	10,128
% Fibra	17,97832578	3	5,99278	54,011	0,0041	9,2766
Erro	0,332861385	3	0,11095			
Total	19,46253627	7				

Fonte: Própria

Quando analisada as Figuras 59, 60 e 61, é possível concluir que para a massa específica seca, massa específica de superfície seca e absorção por imersão, para os traços com fibra de aço, não há diferença significativa quando comparado os tipos de agregado, pois os valores-P são superior a 0,05 (valor-P = 0,20898; 0,286672; 0,1996, respectivamente). O mesmo ocorre quando analisado os traços com fibra de aço em relação ao teor de fibra (valor-P = 0,23172; 0,251659; 0,1686, respectivamente).

Para a massa específica seca e absorção por imersão, quando utilizado fibra de vidro AR, existe diferença significativa entre os tipos de agregado (valor-P = 0,00861 e 0,0485) e o teor de fibra (valor-P = 0,00889 e 0,0041). Para a massa específica de superfície seca, com fibra de vidro AR, há diferença significativa em relação ao tipo de agregado (valor-P = 0,006345) e não possui diferença significativa com relação ao teor de fibra (valor-P = 0,095438).

### 7.1.7. Justificativa para escolha traço final

Primeiramente os traços com utilização de fibra de vidro foram descartados, já que na maioria dos ensaios teve comportamento inferior ao da fibra de aço, principalmente com o aumento da adição de fibras. Em seguida foi comparado o comportamento do concreto com agregado natural e com ARCO, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação do concreto sem agregado reciclado e com agregado reciclado

Ensaio	Porcentagem de fibras	Comparação (ARCO em relação ao Natural)
<b>Compressão</b>	0,25%	Diminui
	0,38%	Similar
	0,50%	Aumenta
<b>Tração por compressão diametral</b>	0,25%	Aumenta
	0,38%	Similar
	0,50%	Diminui
<b>Tração na flexão</b>	0,25%	Diminui
	0,38%	Similar
	0,50%	Diminui
<b>Módulo de elasticidade</b>	0,25%	Diminui
	0,38%	Similar
	0,50%	Aumenta

Fonte: Própria

Quando analisada a Tabela 13, observa-se que os concretos com 0,25% e 0,50% de fibras apresentam variações maiores em função do tipo de agregado utilizado, ora tendo uma diminuição das propriedades, ora tendo um aumento. Em

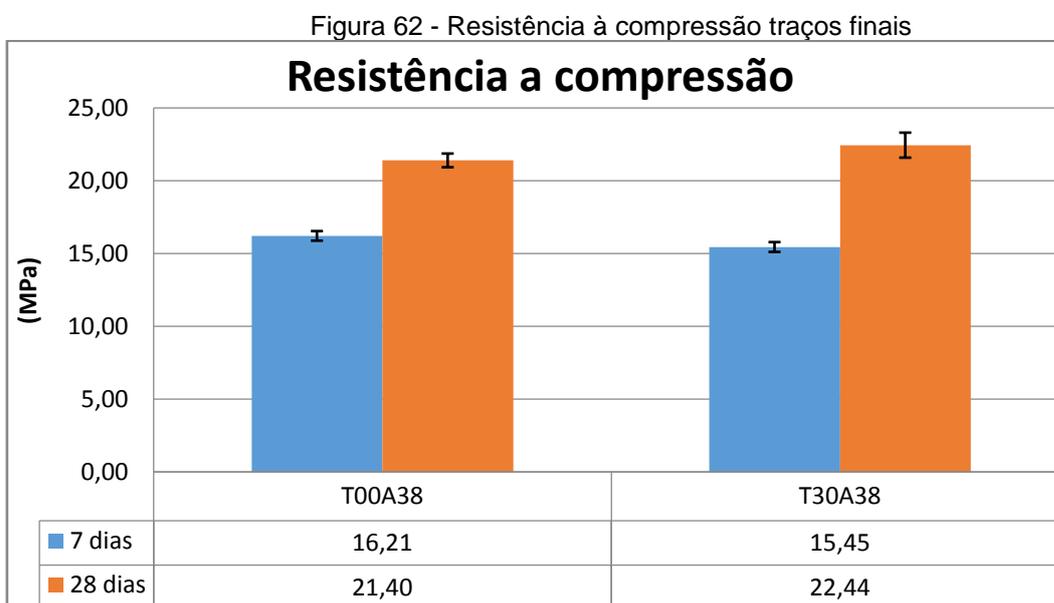
contraposição, os concretos com 0,38% de fibras de aço apresentaram um comportamento mais uniforme, independentemente do tipo de agregado utilizado. Além disso, para a produção do concreto com fibras de aço, teores de 0,50% são mais caros e mais difíceis para a obtenção de uma mistura mais homogênea, justificando a adoção dos traços T00A38 e T30A38 para a etapa experimental final.

## 7.2. Parte experimental - Final

### 7.2.1. Resistência à compressão

A Figura 62 indica a resistência à compressão média e os respectivos desvios padrões nos traços utilizados nessa etapa, ou seja, traços com 0,38% de fibras de aço (T00A38 e T30A38).

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à compressão (aos 7 e 28 dias) indicaram que os traços analisados não possuem diferenças significativas (com valor-P de 0,817932 e 0,376049 para 7 e 28 dias, respectivamente).



Fonte: Própria

Em ambos os traços ocorreu um aumento da resistência a compressão entre 7 e 28 dias, conforme esperado. Embora a resistência a compressão aos 7 dias tenha sido maior para o traço sem agregado reciclado (T00A38) do que no traço T30A38, aos 28 dias o concreto com agregado reciclado (T30A38) obteve uma resistência 5% maior do que o traço apenas com agregado natural (T00A38).

O traço com agregado reciclado (T30A38) pode ter atingido uma resistência mais alta que o T00A38, devido a utilização de agregado reciclado com massa específica de  $2,33 \text{ g/cm}^3$ , considerada alta para agregado reciclado. Segundo Carrijo (2005), os concretos com agregado reciclado com massa específica similar a utilizada nesse trabalho, possuem resistências similares aos concretos sem agregado reciclado. Para Santos (2016), a porcentagem usada (30%) não apresenta efeitos significativos na resistência à compressão.

Alguns autores obtiveram aumento da resistência à compressão em concreto com agregado reciclado, quando comparado ao concreto com agregado natural, como é o caso dos autores Salem e Burdette (1998) apud Etxeberria et al. (2007). Em contraposição alguns observaram diminuição da resistência a compressão do concreto com agregado reciclado, quando comparado com o concreto com agregado natural, conforme os autores Tabsh e Abdelfatah (2009), Kou e Poon(2012) e Marie e Quiasrawi(2012).

Para Armelin (1992) apud Figueiredo (2000) não há consenso sobre o ensaio de resistência à compressão de concretos com adição de fibras.

Aos 7 dias, na primeira etapa, o concreto T30A38 obteve maior resistência à compressão quando comparado com o T00A38, porém na segunda etapa ocorreu o inverso, ou seja, a resistência do T00A38 foi maior que do T30A38. Já aos 28 dias, em ambas as etapas a resistência à compressão do T30A38 foi maior que do T00A38. Apesar da diferença não ter sido significativa nessa etapa final, na etapa inicial a resistência à compressão teve diferença significativa quando comparado o tipo de agregado, aos 28 dias.

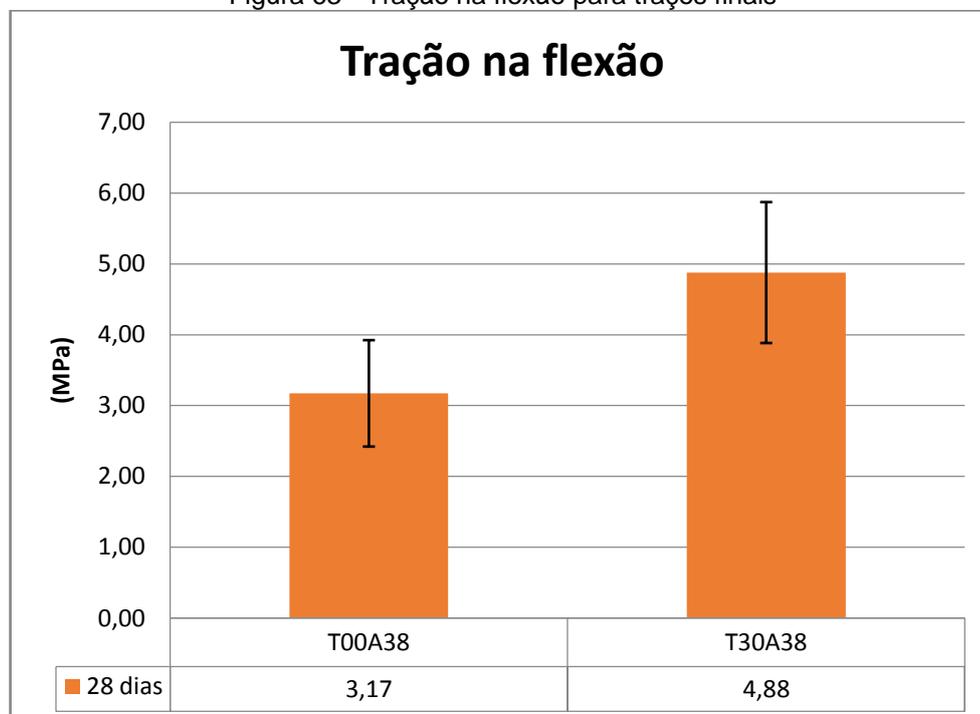
### **7.2.2. Resistência à tração na flexão**

A Figura 63 indica a resistência à tração na flexão média e os respectivos desvios padrões nos traços utilizados nessa etapa, ou seja, traços com 0,38% de fibras de aço (T00A38 e T30A38).

A ANOVA aplicada aos resultados de resistência à tração na flexão, indicou que os traços analisados possuem diferenças significativas (com valor-P de

2,83E<sup>-5</sup>), sendo que o traço com agregado reciclado apresentou média superior ao traço com agregado natural.

Figura 63 - Tração na flexão para traços finais



Fonte: Própria

A resistência a tração na flexão, aos 28 dias, do concreto com agregado reciclado (T30A38) foi 54% maior que no concreto com agregado natural (T00A38). Segundo Salem e Burdette (1998) apud Etxeberria et al. (2007) isso ocorre devido a capacidade de absorção da argamassa existente no agregado reciclado, assim como Sague-Crentsilet al. (2001) apud Etxeberria et al. (2007) que afirmam que indica uma boa ligação entre o agregado e a matriz da argamassa.

Marie e Quiasrawi (2012), obtiveram resultados menores de resistência a tração na flexão para concretos com 20% de agregado reciclado do que para concretos com agregado natural.

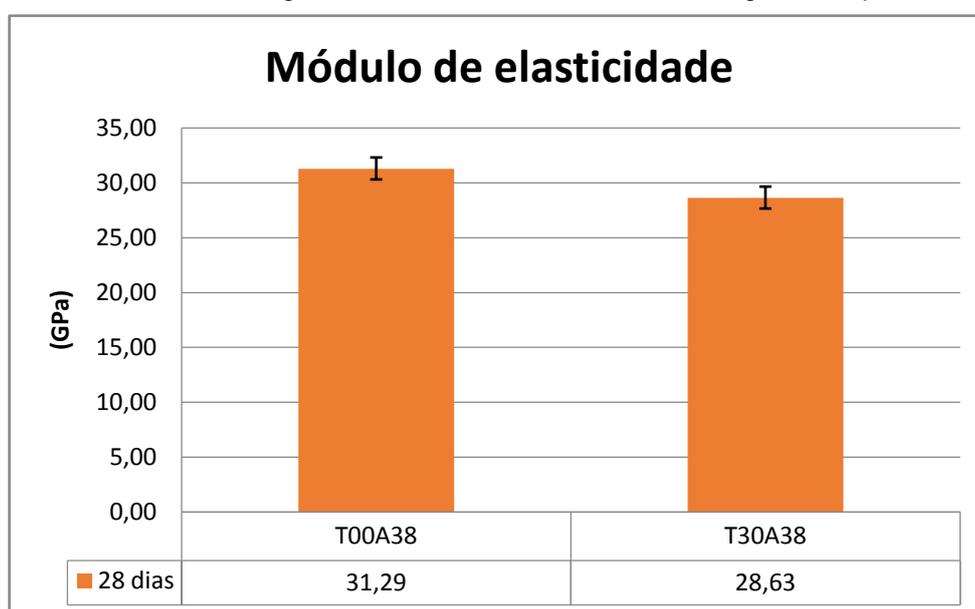
Comparando as resistências à tração na flexão (aos 28 dias) obtidas na primeira etapa e na segunda etapa, ocorreu uma queda da resistência à tração na flexão no T00A38 de 24,5% em relação ao obtido na primeira etapa, para o T30A38 ocorreu um aumento de 13,2% em relação ao obtido na primeira etapa.

### 7.2.3. Módulo de elasticidade

A Figura 64 apresenta as médias do módulo de elasticidade médio e os respectivos desvios padrões nos traços utilizados nessa etapa, ou seja, traços com 0,38% de fibras de aço (T00A38 e T30A38).

A ANOVA aplicada aos resultados de módulo de elasticidade indicou que os traços analisados não possuem diferenças significativas (com valor-P de 0,788375).

Figura 64 - Módulo de elasticidade da segunda etapa



Fonte: Própria

Ao contrário do ocorrido com as resistências a compressão e a tração na flexão, o módulo de elasticidade no concreto com agregado reciclado (T30A38) foi de 8,5% menor que no concreto com agregado natural (T00A38).

Segundo Casuccio et al. (2008) e Araújo et al. (2016), o módulo de elasticidade diminui em concretos com agregado reciclado. Já Benetti (2012), obteve resultados similares nos ensaios, afirmando que o módulo de elasticidade não teve variações significativas quando comparados os concretos referências com os concretos com agregado reciclado.

Comparando módulo de elasticidade (aos 28 dias) obtidas na etapa experimental inicial (tópico 6.1.3) e na etapa experimental final (nesse tópico - 7.2.3),

ocorreu um aumento do módulo de elasticidade no traço T00A38 de, aproximadamente, 0,3% em relação ao obtido na etapa experimental inicial, enquanto o traço T30A38 ocorreu uma queda de, aproximadamente, 4,5% em relação ao obtido na primeira etapa.

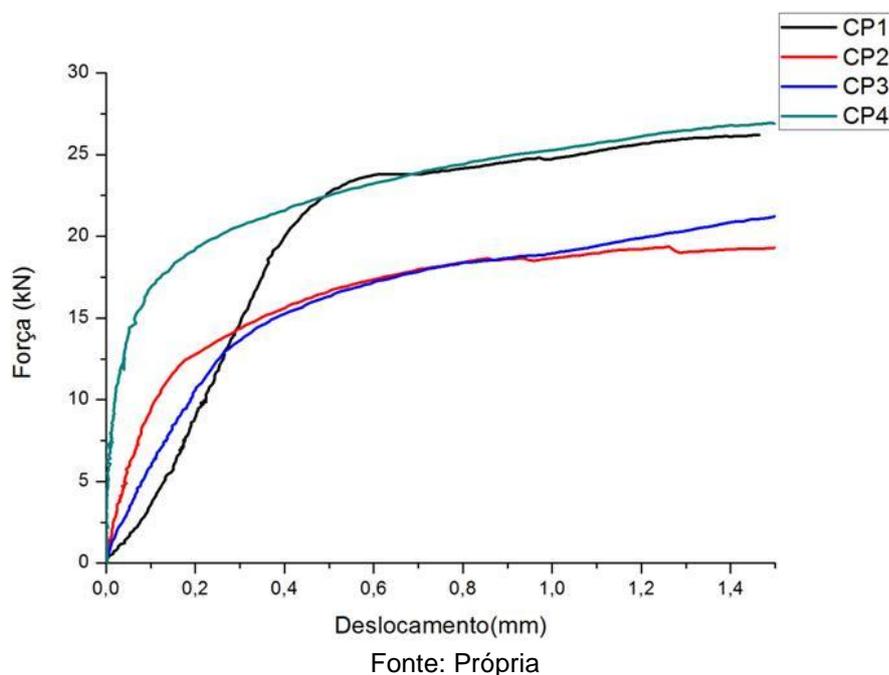
#### 7.2.4. Resistência residual segundo norma ASTM C1399

Os resultados de Resistência Residual são apresentados separadamente para os traços T00A38 e T30A38. Para o ensaio de resistência residual conforme a norma ASTM C1399/C1399M (ASTM, 2015), utiliza-se a segunda parte do ensaio (após a retirada da placa metálica) para os cálculos de resistência residual.

##### 7.2.4.1. T00A38

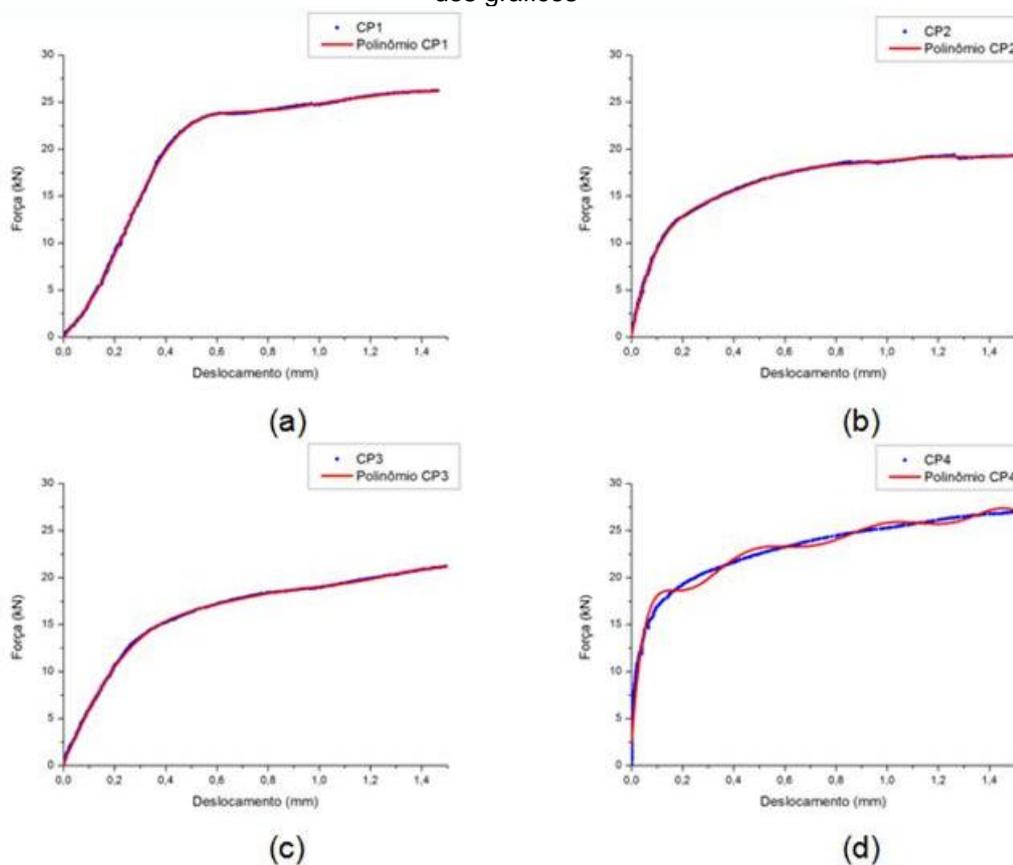
O gráfico, representado pela Figura 65, foi elaborado utilizando apenas 4 dos 6 corpos de provas ensaiados, já que dois foram excluídos devido as diferenças com os demais.

Figura 65 - Gráfico dos dados obtidos no ensaio de resistência residual



Para cada corpo de prova foi criado uma curva de ajuste. Para todos os corpos de prova, a curva que melhor se ajustou foi um polinômio de grau 9. A Figura 66 ilustra como os polinômios ficaram em relação as curvas originais.

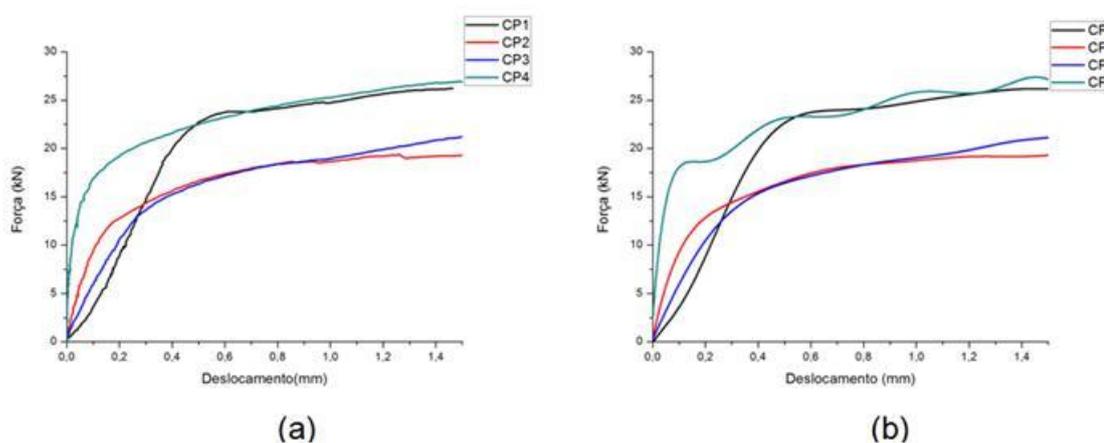
Figura 66 - Mostra os gráficos dos 4 corpos de prova (CP) e os polinômios obtidos para aproximação dos gráficos



Fonte: Própria

Após encontrado os polinômios que melhor representam cada uma das curvas, foi elaborado um novo gráfico com as curvas obtidas, como mostra a Figura 67-b, e para comparar, a Figura 67-a que ilustram as curvas originais limitadas a um deslocamento de 1,5 mm.

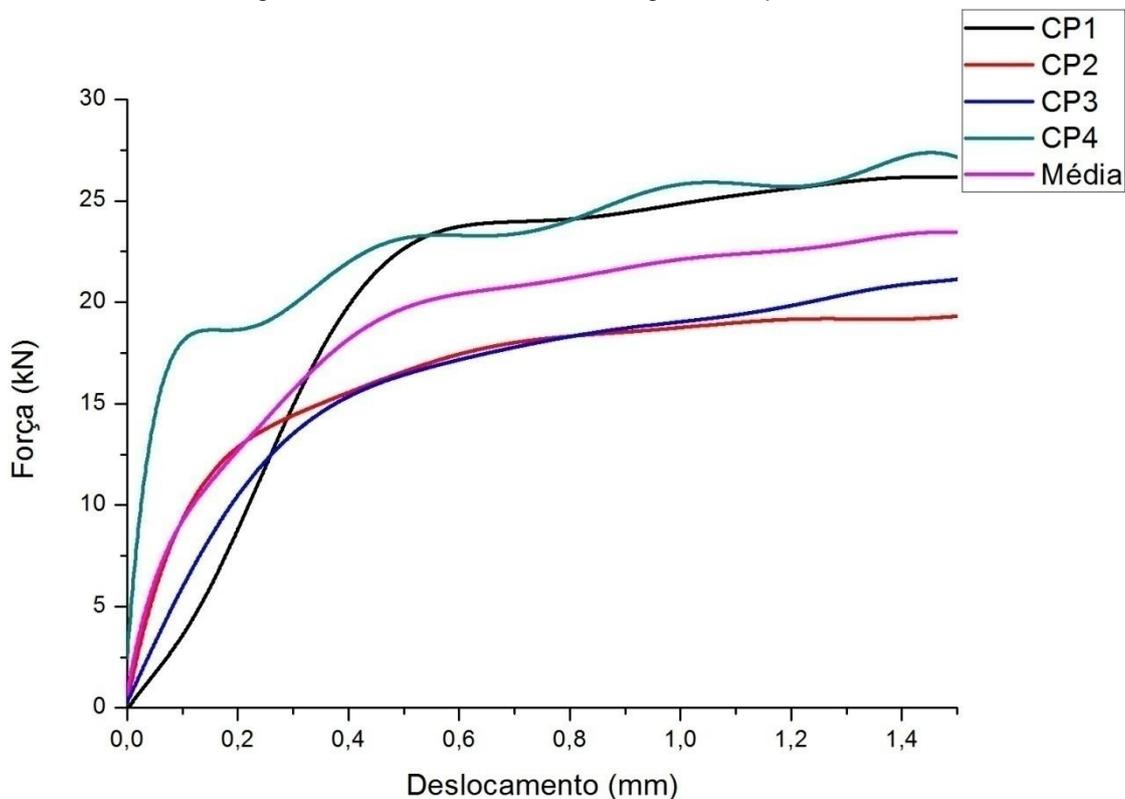
Figura 67 - (a) curva obtida através dos dados experimentais; (b) Curva desenvolvida através dos polinômios obtidos



Fonte: Própria

A Figura 68, apresenta o gráfico com as curvas desenvolvidas pelo polinômio e a média delas.

Figura 68 - Resistência residual segunda etapa



Fonte: Própria

A Tabela 14 apresenta o valor da resistência residual obtida. Os cálculos foram baseados nos polinômios ajustados para cada corpo de prova.

Tabela 14- Valores e cálculos da resistência residual

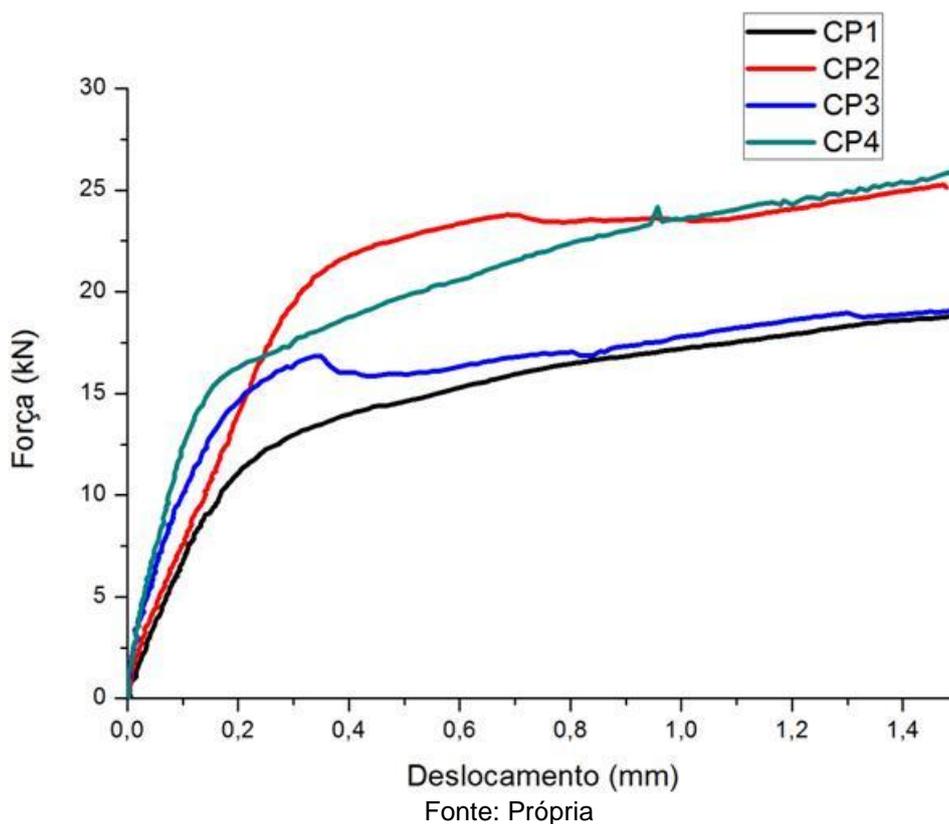
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média
P <sub>0,50</sub> (kN)	22,647	16,587	16,431	23,157	19,706
P <sub>0,75</sub> (kN)	24,021	18,192	18,058	23,618	20,972
P <sub>1,00</sub> (kN)	24,860	18,752	19,043	25,815	22,118
P <sub>1,25</sub> (kN)	25,781	19,191	20,115	25,823	22,728
Média (kN)	24,327	18,181	18,412	24,603	21,381
ARS (MPa)	7,298	5,454	5,524	7,381	6,414

Fonte: Própria

### 7.2.4.2. T30A38

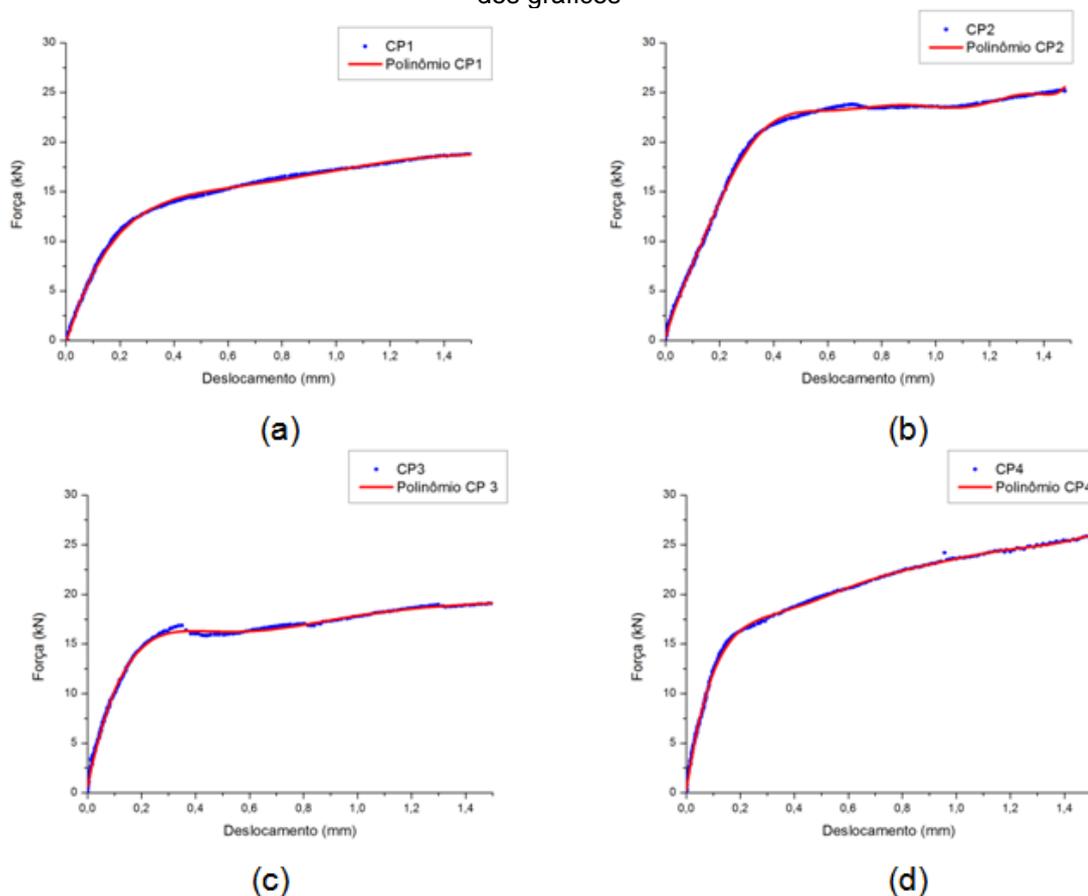
O gráfico, representado pela Figura 69, foi elaborado utilizando apenas 4 dos 6 corpos de provas ensaiados, já que dois foram excluídos devido as diferenças com os demais.

Figura 69 - Gráfico dos dados obtidos no ensaio de resistência residual



Para cada corpo de prova foi criado uma curva de ajuste, para todos a curva que melhor se ajustou foi um polinômio de grau 9. A Figura 70 ilustra bem como os polinômios ficaram em relação as curvas originais, sendo que é mostrado como ficou o ajuste com o polinômio em relação a curva original.

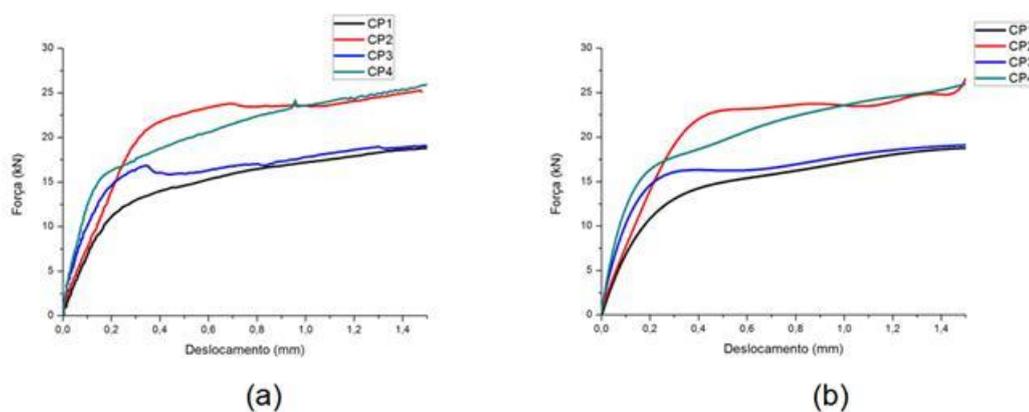
Figura 70 - Mostra os gráficos dos 4 corpos de prova (CP) e os polinômios obtidos para aproximação dos gráficos



Fonte: Própria

Após encontrado os polinômios que melhor representa cada uma das curvas, foi elaborado um novo gráfico com as curvas obtidas, como mostra a Figura 71-a, e para comparar, a Figura 71-b que ilustram as curvas originais limitadas a um deslocamento de 1,5 mm.

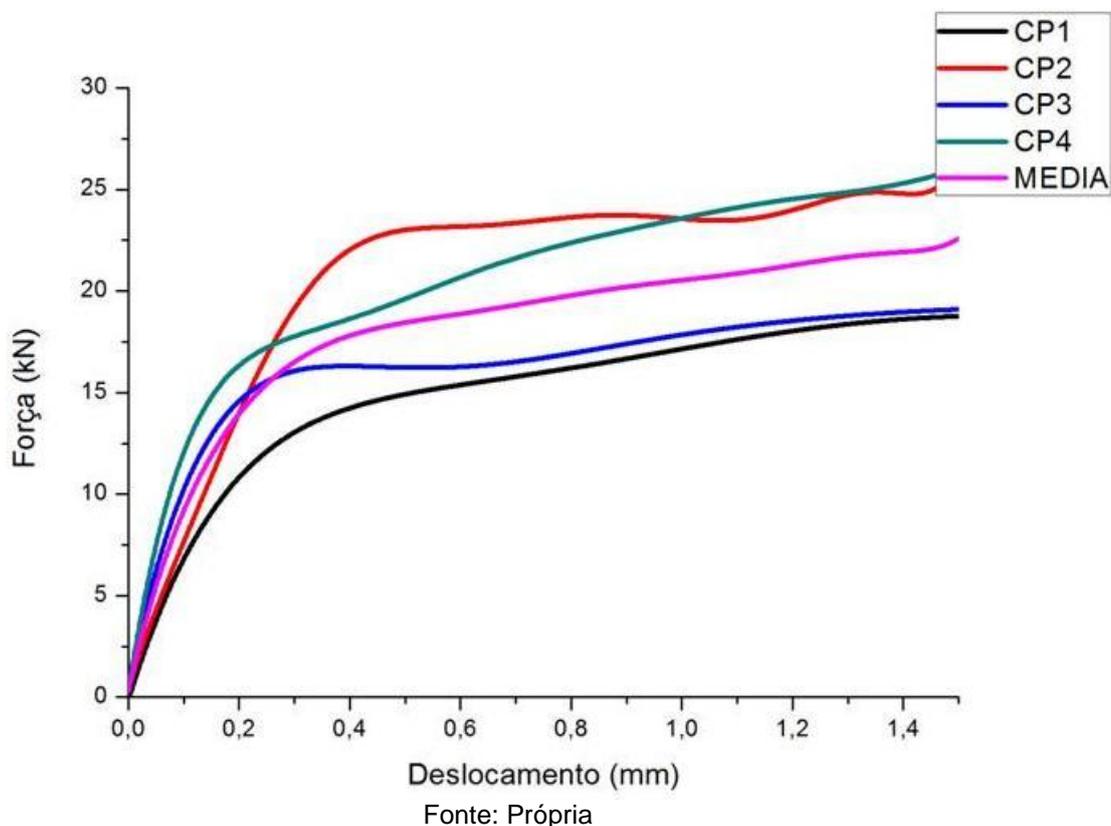
Figura 71 - (a) Curva obtida através dos dados experimentais; (b) Curva desenvolvida através dos polinômios obtidos



Fonte: Própria

A Figura 72, apresenta o gráfico com as curvas desenvolvidas pelo polinômio e a média delas.

Figura 72 - Resistência residual segunda etapa



A Tabela 15 apresenta o valor da resistência residual obtida. Os cálculos foram baseados nos polinômios ajustados para cada corpo de prova

Tabela 15- Valores e cálculos da resistência residual

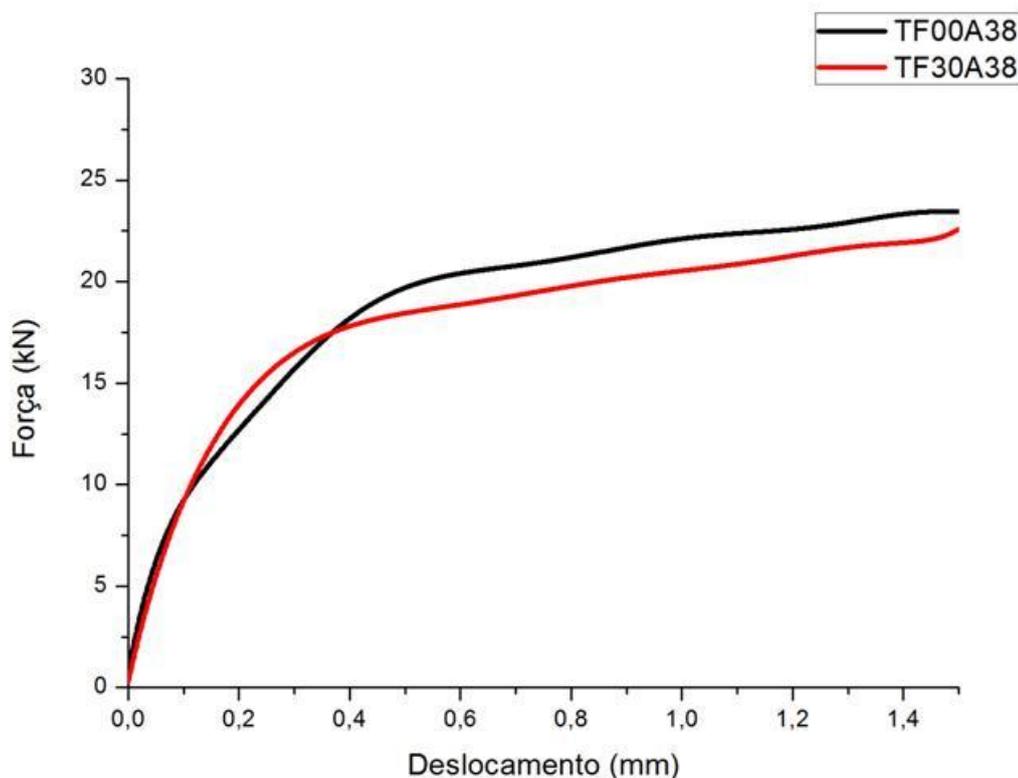
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média
P <sub>0,50</sub> (kN)	14,922	23,009	16,241	19,623	18,449
P <sub>0,75</sub> (kN)	15,996	23,495	16,717	22,028	19,559
P <sub>1,00</sub> (kN)	17,153	23,558	17,850	23,583	20,536
P <sub>1,25</sub> (kN)	18,212	24,393	18,666	24,709	21,495
Média (kN)	16,571	23,614	17,369	22,486	20,010
ARS (MPa)	4,971	7,084	5,211	6,746	6,003

Fonte: Própria

A resistência residual média foi similar para ambos os concretos (TF00A38 e TF30A38), sendo que o TF30A38 é de aproximadamente 6,5% menor que o TF00A38. A Figura 73 ilustra como as curvas são parecidas, mas a curva TF00A38 é um pouco mais alta, ou seja, chegou em forças um pouco maiores.

Através da Figura 73 é possível notar que os valores próximos entre as resistências residuais são validos, já que os gráficos também estão próximos.

Figura 73 - Comparação entre os gráficos médios dos traços TF00A38 e TF30A38



Fonte: Própria

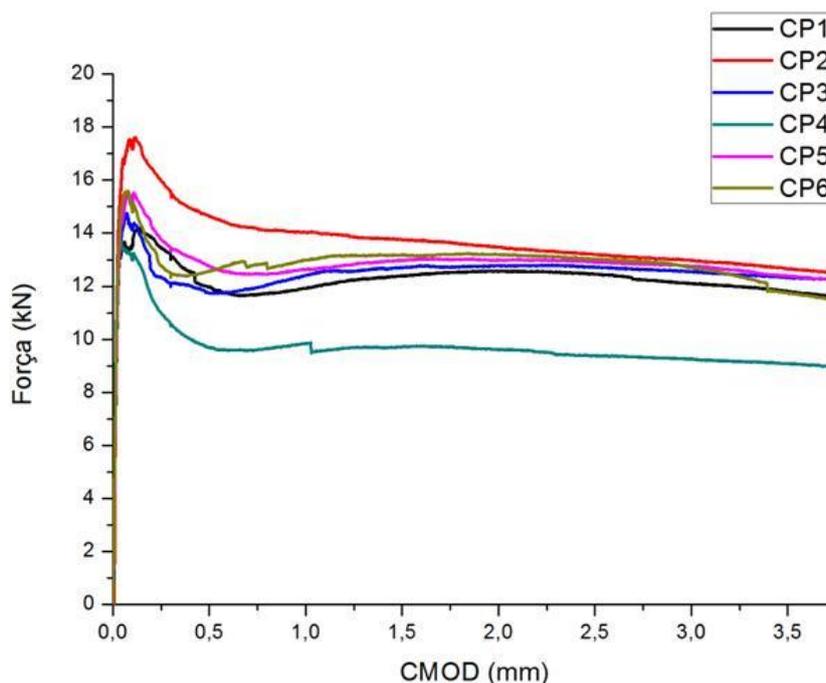
O gráfico representado na Figura 73, mostra a capacidade de resistência, pós-fissuração do concreto com agregado convencional (TF00A38) é maior que do concreto com agregado reciclado (TF30A38).

## 7.2.5. CMOD

### 7.2.5.1. T00A38

A Figura 74 mostra o gráfico CMOD x Carga, elaborado com os dados obtidos através do ensaio da norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005).

Figura 74 - Gráfico CMOD x Carga



Fonte: Própria

As Tabelas 16 mostra o dimensionamento dos corpos de prova obtido através da média de 3 medições, e o  $h_{sp}$  (distância entre a ponta do entalhe e o topo da amostra) foi calculado conforme indicado no rodapé da tabela.

Tabela 16 - Dimensões dos corpos de provas

Dimensões dos corpos de prova (mm)					
	L	b	H	e	$h_{sp}$
CP1	500,00	150,00	148,66	27,33	121,33
CP2	500,00	150,00	150,50	21,67	128,83
CP3	500,00	150,00	150,00	24,50	125,50
CP4	500,00	150,00	150,83	27,83	123,00
CP5	500,00	150,00	150,50	25,83	124,67
CP6	500,00	150,00	150,33	24,46	125,87
Média	500,00	150,00	150,14	25,27	124,87
Dados: $h_{sp} = H - e$					

Fonte: Própria

As Tabelas 17, utiliza o valor de abertura no limite de proporcionalidade, conforme obtido pelo ensaio. Em seguida a carga relativa a esse valor de abertura ( $F_L$ ) é encontrado através do gráfico e com esses dados e os dados da tabela 16 é possível obter os valores de  $f_{ct,L}^f$ , limite de proporcionalidade, através da equação 2.

Tabela 17 - Limite de proporcionalidade

Limite de proporcionalidade			
	CMOD_at_LOP (mm)	F <sub>L</sub> (kN)	$f_{ct,L}^f$ (MPa)
CP1	0,050	13,51	4,59
CP2	0,050	16,67	5,02
CP3	0,050	14,20	4,51
CP4	0,039	13,69	4,52
CP5	0,050	14,54	4,68
CP6	0,050	15,33	4,84
Média	-	14,66	4,69
Notas: LOP = Limite de proporcionalidade CMOD_at_LOP = Abertura no limite de proporcionalidade FL = Carga no limite de proporcionalidade $f_{ct,L}^f$ = É o limite de proporcionalidade			

Fonte: Própria

As Tabelas 18, utiliza o valor da carga referente a abertura (CMOD<sub>x</sub>) obtido através do gráfico. E com esses dados e os dados da tabela 16 é possível obter os valores de  $f_{R,j}$  (resistência à tração na flexão residual correspondente a CMOD) através da equação 3.

Calculando a média entres as resistências residuais médias obtidas em cada uma das aberturas (conforme Tabela 18) obtém-se um valor de 3,90.

Tabela 18 - Resistência residual

Resistência Residual								
	CMOD <sub>1</sub>		CMOD <sub>2</sub>		CMOD <sub>3</sub>		CMOD <sub>4</sub>	
	Carga (kN)	Resistência Residual (Mpa)						
CP1	11,984	4,07	12,393	4,21	12,452	4,23	11,815	4,01
CP2	14,644	4,41	13,757	4,14	13,201	3,98	12,647	3,81
CP3	11,747	3,73	12,698	4,03	12,720	4,04	12,330	3,91
CP4	9,691	3,20	9,710	3,21	9,380	3,10	9,082	3,00
CP5	12,753	4,10	12,988	4,18	12,913	4,15	12,394	3,99
CP6	12,582	3,97	13,193	4,16	13,031	4,11	11,745	3,71
Média	12,23	3,91	12,46	3,99	12,28	3,94	11,67	3,74

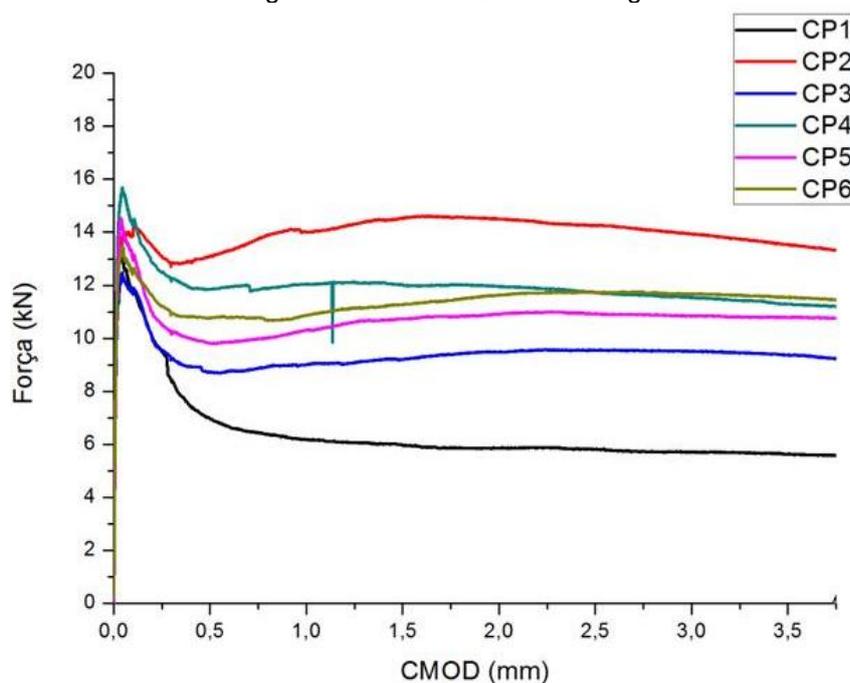
Notas:  
 CMOD<sub>1</sub> = Abertura de 0,5 mm  
 CMOD<sub>2</sub> = Abertura de 1,5 mm  
 CMOD<sub>3</sub> = Abertura de 2,5 mm  
 CMOD<sub>4</sub> = Abertura de 3,5 mm

Fonte: Própria

### 7.2.5.1. T30A38

A Figura 75 mostra o gráfico CMOD x Carga, elaborado com os dados obtidos através do ensaio da norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005).

Figura 75 - Gráfico CMOD x Carga



Fonte: Própria

As Tabelas 19 mostra o dimensionamento dos corpos de prova obtido através da média de 3 medições, e o  $h_{sp}$  (distância entre a ponta do entalhe e o topo da amostra) foi calculado conforme indicado no rodapé da tabela.

Tabela 19 - Dimensões dos corpos de provas

Dimensões dos corpos de prova (mm)					
	L	b	H	e	$h_{sp}$
CP1	500,00	150,00	150,33	24,50	125,83
CP2	500,00	150,00	150,00	24,83	125,17
CP3	500,00	150,00	149,83	24,33	125,50
CP4	500,00	150,00	149,83	25,00	124,83
CP5	500,00	150,00	150,67	25,33	125,34
CP6	500,00	150,00	150,67	24,66	126,01
Média	500,00	150,00	150,22	24,78	125,45
$h_{sp} = H - e$					

Fonte: Própria

As Tabelas 20, utiliza o valor de abertura no limite de proporcionalidade, conforme obtido pelo ensaio. Em seguida a carga relativa a esse valor de abertura ( $F_L$ ) é encontrado através do gráfico e com esses dados e os dados da tabela 19 é possível obter os valores de  $f_{ct,L}^f$ , limite de proporcionalidade, através da equação 2.

Tabela 20 - Limite de proporcionalidade

Limite de proporcionalidade			
	CMOD_at_LOP (mm)	$F_L$ (kN)	$f_{ct,L}^f$ (Mpa)
CP1	0,033	13,78	4,36
CP2	0,048	13,85	4,37
CP3	0,043	12,43	3,94
CP4	0,044	15,66	5,04
CP5	0,038	14,53	4,57
CP6	0,045	13,47	4,20
Média		13,95	4,41
Notas: LOP = Limite de proporcionalidade CMOD_at_LOP = Abertura no limite de proporcionalidade FL = Carga no limite de proporcionalidade $f_{ct,L}^f$ = É o limite de proporcionalidade			

Fonte: Própria

A Tabela 21, utiliza o valor da carga referente a abertura ( $CMOD_x$ ) obtido através do gráfico. E com esses dados e os dados da tabela 19 é possível obter os valores de  $f_{R,j}$  (resistência à tração na flexão residual correspondente a  $CMOD$ ) através da equação 3.

Calculando a média entres as resistências residuais médias obtidas em cada uma das aberturas (conforme Tabela 21) obtém-se um valor de 3,31.

Tabela 21 - Resistência residual

Resistência Residual								
	$CMOD_1$		$CMOD_2$		$CMOD_3$		$CMOD_4$	
	Carga (kN)	Resistência (Mpa)						
CP1	6,962	2,20	5,967	1,89	5,816	1,84	5,645	1,78
CP2	13,102	4,14	14,538	4,59	14,250	4,50	13,531	4,27
CP3	8,718	2,76	9,209	2,92	9,552	3,03	9,379	2,97
CP4	11,856	3,81	12,029	3,87	11,737	3,77	11,292	3,63
CP5	9,814	3,09	10,743	3,38	10,940	3,44	10,787	3,39
CP6	10,766	3,36	11,279	3,52	11,733	3,66	11,550	3,60
Média	10,20	3,23	10,63	3,36	10,67	3,37	10,36	3,28
Notas: $CMOD_1$ = Abertura de 0,5 mm $CMOD_2$ = Abertura de 1,5 mm $CMOD_3$ = Abertura de 2,5 mm $CMOD_4$ = Abertura de 3,5 mm								

Fonte: Própria

Quando comparado os gráficos de  $CMOD$ , pode-se observar que os gráficos do traço T00A38 possuem valores mais similares, já os valores obtidos em T30A38 são mais divergentes, o que é comum, já que o agregado reciclado, por ser produzido a partir de diferentes tipos de concreto e que, portanto, possui características diversas em uma mesma amostra.

O ANOVA aplicado ao limite de proporcionalidade obtido indica que não há uma diferença significativa entre os concretos sem agregado reciclado e com agregado reciclado, como pode ser observado na Figura 76 que apresenta os resultados da análise de variância com valor-P superior a 0,05. Já para a resistência residual, o ANOVA indica que existe diferença significativas entre os traços de concreto (TF00A38 e TF30A38), entretanto para o  $CMOD$  (abertura) indica que a

diferença não é significativa, isso ocorre também para as interações entre traços com mesmo CMOD.

Figura 76 - Anova ensaios CMOD

ANOVA - Limite de proporcionalidade CMOD						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	0,273929	1	0,273929	3,716517	0,077875	4,747225
Dentro dos grupos	0,884471	12	0,073706			
<b>Total</b>	<b>1,1584</b>	<b>13</b>				

ANOVA - Resistência residual CMOD						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de agregado	4,10782	1	4,10782	9,463119	0,003772	4,084746
CMOD	0,215435	3	0,071812	0,165431	0,919037	2,838745
Interações	0,08422	3	0,028073	0,064672	0,978242	2,838745
Dentro	17,36349	40	0,434087			
<b>Total</b>	<b>21,77097</b>	<b>47</b>				

Fonte: Própria

Salvador (2013) obteve valores para o limite de proporcionalidade de 4,39 e 4,40 para concretos com 0,32% e 0,45% de fibras de aço, respectivamente. Esses valores foram inferiores aos encontrados nesse trabalho, porém são próximos.

Para os valores de  $CMOD_1$  e  $CMOD_2$ , esse trabalho obteve valores superiores ao que Salvador (2013) obteve para concretos com 0,32% de fibras. Já para 0,45% de fibras os valores para  $CMOD_1$  foram superiores aos encontrados por Salvador (2013) e  $CMOD_2$  inferiores, conforme mostra a Tabela 22. Com isso, é possível verificar que os valores de Limite de Proporcionalidade (LOP) encontrados nesses trabalhos foram superiores aos encontrados por Salvador (2013). Já para o  $CMOD_1$ , quando utilizado agregado reciclado existe um padrão com os de Salvador (2013), mas quando utilizado agregado natural o valor encontrado nesse trabalho acaba superando o valor encontrado por Salvador (2013) para um teor de aço superior (0,45%) ao utilizado nesse trabalho (0,38%). Por fim, para o  $CMOD_2$ , tanto o concreto com agregado natural quando com agregado reciclado obtiveram valores intermediários, aos obtidos por Salvador (2013) com teores de 0,32% e 0,45%.

Tabela 22 - Comparação dos resultados desse trabalho com o de Salvador (2013)

Fonte	Tipo de agregado	Teor de fibras	LOP	CMOD <sub>1</sub>	CMOD <sub>2</sub>
Salvador (2013)	Natural	0,32%	4,39	2,58	2,69
Própria	Natural	0,38%	4,69	3,91	3,94
Própria	Reciclado	0,38%	4,41	3,23	3,37
Salvador (2013)	Natural	0,45%	4,40	3,60	4,28

Fonte: Própria

### 7.2.6. Resistência residual e Tenacidade segundo ensaio Barcelona Simplificado

Os resultados de Resistência Residual e Tenacidade são apresentados separadamente para os traços T00A38 e T30A38 para o Ensaio Barcelona Simplificado.

O valor do diâmetro do disco de carga (a) utilizado foi de 37,5 mm, conforme Figura 77.

Figura 77 - Diâmetro do disco de carga utilizado



Fonte: Própria

Conforme Monte (2015), foram feitos os cálculos para o modelo constitutivo simplificado baseado no ensaio Barcelona Simplificado. O comprimento da cunha esférica, também foi obtido através de Monte (2015), a qual indica a utilização da Equação 10, utilizando o ângulo de atrito interno ( $\varphi$ ) igual a 65° resultando um comprimento de cunha de 40,25mm.

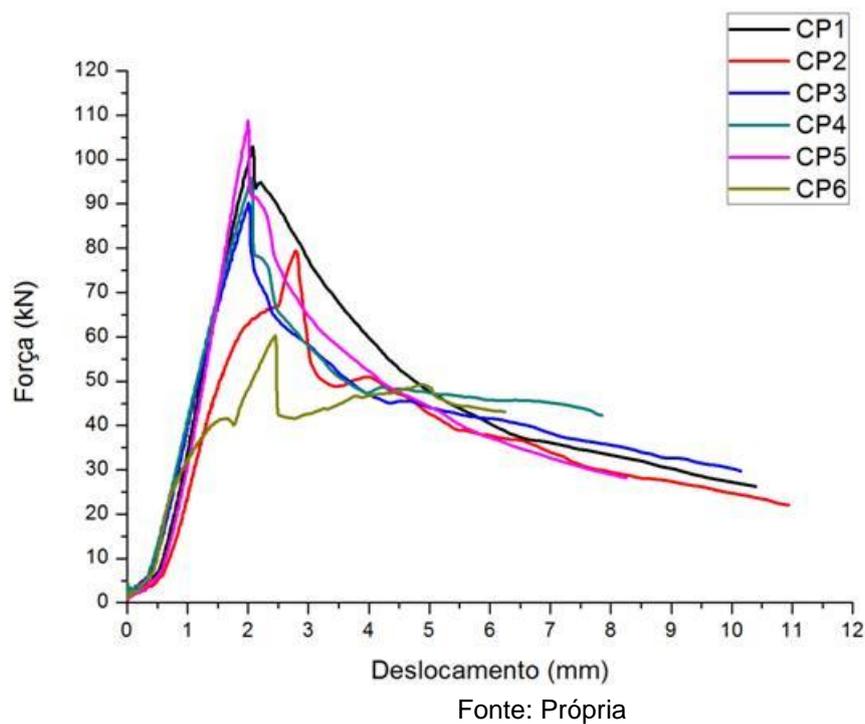
$$l = \frac{a}{2} \times \operatorname{tg} \varphi$$

Equação 10

### 7.2.6.1. T00A38

A Figura 78 apresenta as curvas carga x deslocamento para cada um dos seis corpos de prova ensaiados. Na Figura 68, pode-se observar os corpos de prova após o ensaio.

Figura 78 - Gráficos do Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38



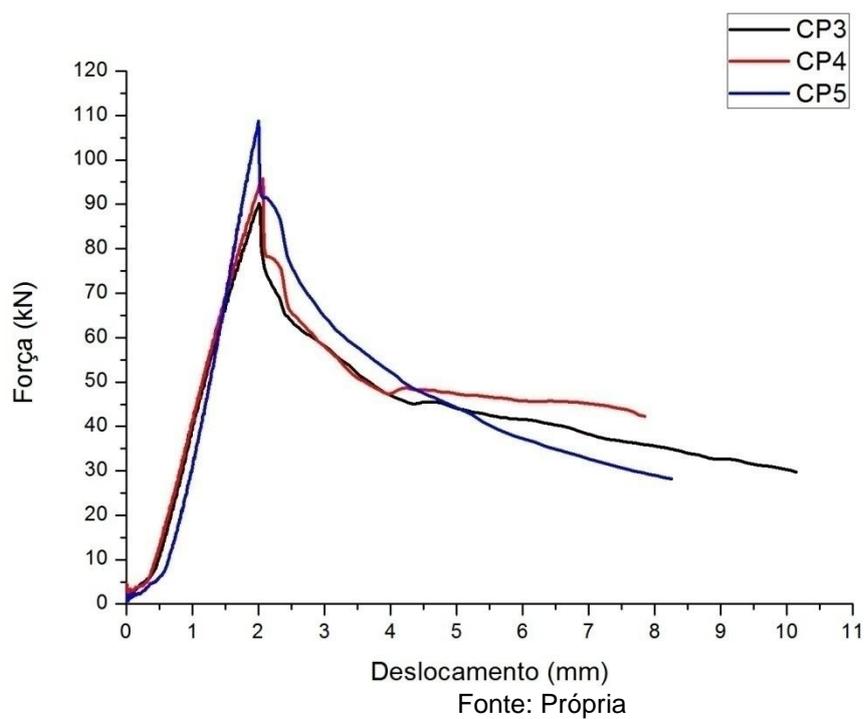
Após analisar os corpos de prova (Figura 79) e os gráficos (Figura 78), foram descartados 3 corpos de provas devido ao não atendimento com o Ensaio Barcelona Simplificado, o qual diz que o corpo de prova deve ser rompido em 3 partes. Com isso as análises foram feitas apenas com os 3 corpos de prova restantes (CP3, CP4 e CP5), conforme ilustrado pela Figura 80.

Figura 79 - Corpos de prova após Ensaio Barcelona Simplificado



Fonte: Própria

Figura 80 - Gráfico com os corpos de prova selecionado

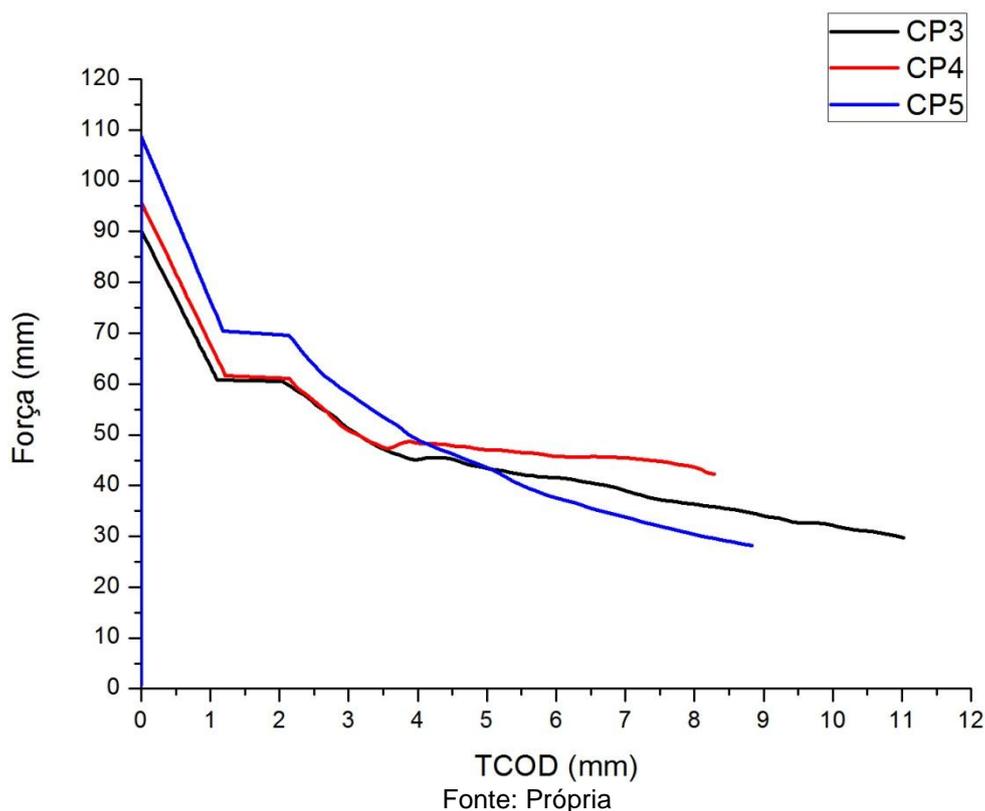


Fonte: Própria

Para que os cálculos do ensaio fossem iniciados é necessário transformar o gráfico força x deslocamento vertical (gráfico obtido no Ensaio Barcelona

Simplificado) em um gráfico de força x TCOD (gráfico obtido no Ensaio Barcelona). Para que isso fosse possível, foi necessário encontrar os valores conforme descrito por Monte (2015), além de utilizar as fórmulas representadas pelas Equações 4, 5 e 6, descritas no Capítulo Materiais e Métodos. Com isso, o gráfico representado pela Figura 81 foi obtido.

Figura 81 - Gráfico Força x TCOD



Para obter os valores de resistência residual e tenacidade, foram utilizados os pontos de deslocamentos 0,5; 1,5; 2,5 e 3,5 mm. Para os cálculos de resistência à tração (resistência residual no ponto de fissuração) e resistências residuais foram utilizadas, respectivamente, as Equações 7 e 8 e os resultados estão apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resistência Residual pelo Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38

TCOD (mm)	CP3		CP4		CP5	
	Força (kN)	Resistência Residual (MPa)	Força (kN)	Resistência Residual (MPa)	Força (kN)	Resistência Residual (MPa)
Pf (0)	90,27	2,27	95,81	2,41	108,79	2,74
0,50	77,07	1,94	81,56	2,05	92,08	2,32
1,50	60,66	1,53	61,32	1,54	69,99	1,76
2,50	55,98	1,41	56,79	1,43	63,65	1,60
3,50	51,64	1,30	47,61	1,20	53,46	1,34

Notas: Pf = Ponto de fissuração  
Resistência à tração para fissuração e para cada ponto de deslocamento considerado é o ponto de Resistência Residual à Tração

Fonte: Própria

A ANOVA aplicado a Resistência Residual mostra que entre as amostras não há diferença significativa, já que o valor-P é superior a 0,05 (valor-P = 0,66745). Porém quando analisada a resistência residual em relação aos valores de TCOD (fissuração; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm) é possível verificar que é significativo já que o valor-P foi de  $2,166E^{-5}$ .

A Tabela 24 é um resumo da Tabela 23, para facilitar as comparações posteriores.

Tabela 24 - Resumo das Médias das Resistências Residuais

Resistência Residual Média (MPa)	
Fissuração	2,47
0,50 mm	2,10
1,50 mm	1,61
2,50 mm	1,48
3,50 mm	1,28
Média Entre as resistências residuais de 0,50 mm a 3,50 mm	1,62

Fonte: Própria

Na Tabela 25 foi calculada a tenacidade no total do trecho entre 0 e 3,5 mm. Sendo que para calcular a tenacidade é necessário calcular a área embaixo da curva força x TCOD, representada pela Figura 81.

Tabela 25 - Cálculo da tenacidade com uso do Ensaio Barcelona Simplificado

Tenacidade	
	Tenacidade (N.m)
CP3	215,44
CP4	224,24
CP5	250,94
Média	230,21
O cálculo da tenacidade foi feito entre o Ponto TCOD=0 e TCOD=3,5mm	

Fonte: Própria

### 7.2.6.1. T30A38

A Figura 82 apresenta as curvas carga x deslocamento para cada um dos seis corpos de prova ensaiados. Na Figura 83, pode-se observar os corpos de prova após o ensaio.

Figura 82 - Gráficos do Ensaio Barcelona Simplificado - T30A38

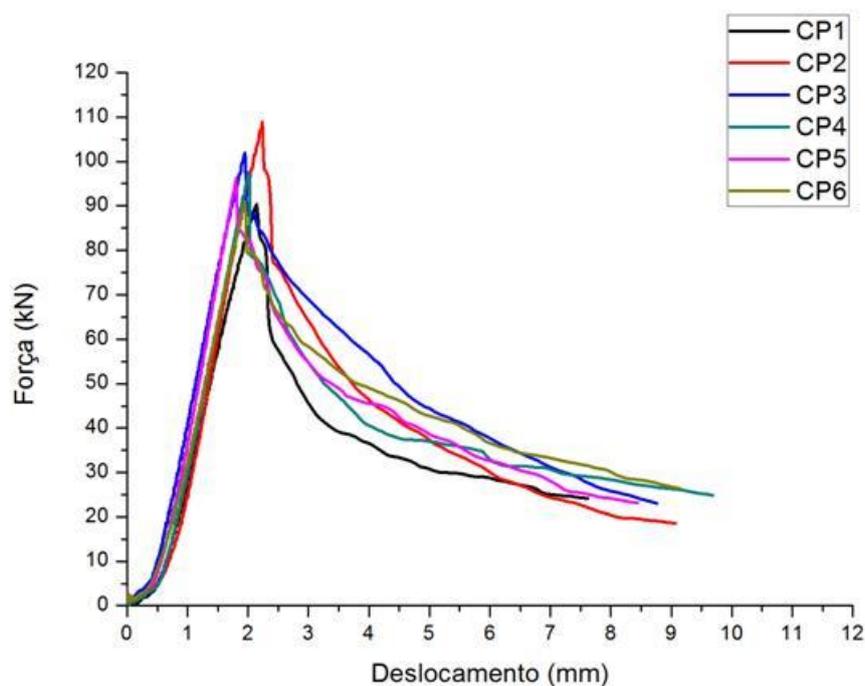


Figura 83 - Corpos de prova após Ensaio Barcelona Simplificado

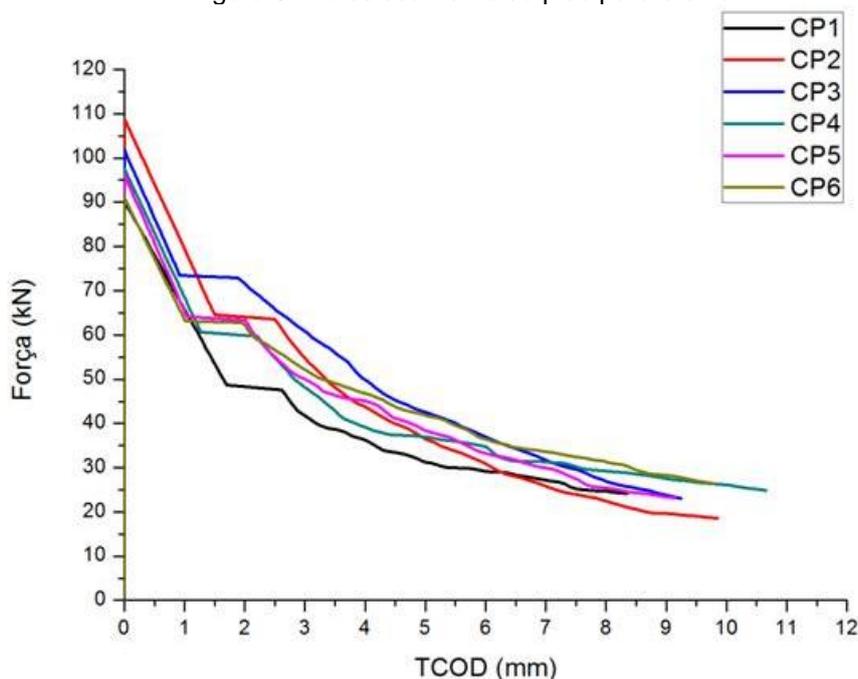


Fonte: Própria

Após analisar os corpos de prova (Figura 83) e os gráficos (Figura 82), não foi necessário descartar nenhum corpo de prova, devido ao não atendimento com o Ensaio Barcelona Simplificado, o qual diz que o corpo de prova deve ser rompido em 3 partes. Com isso as análises foram feitas utilizando todos os corpos de prova, conforme Figura 82.

Para que os cálculos do ensaio fossem iniciados é necessário transformar o gráfico força x deslocamento vertical (gráfico obtido no Ensaio Barcelona Simplificado) em um gráfico de força x TCO (gráfico obtido no Ensaio Barcelona). Para isso foram utilizadas as fórmulas encontradas nos artigos de Monte et al. (2014) e Pujadas *et al.* (2013), representadas pelas Equações 4, 5 e 6, descritas no Capítulo Materiais e Métodos. Com isso, o gráfico representado pela Figura 84 foi obtido.

Figura 84 - Deslocamento do pico para o eixo



Fonte: Própria

Para obter os valores de resistência residual e tenacidade, foram utilizados os pontos de deslocamentos 0,5; 1,5; 2,5 e 3,5 mm. Para os cálculos de resistência à tração (resistência residual no ponto de fissuração) e resistências residuais foram utilizadas, respectivamente, as Equações 7 e 8 e os resultados estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resistência Residual pelo Ensaio Barcelona Simplificado - T00A38

TCOD (mm)	CP1		CP2		CP3		CP4		CP5		CP6	
	Força (kN)	Resist. Resid. (MPa)										
Pf (0)	90,35	2,27	107,13	2,69	101,83	2,56	97,57	2,45	96,16	2,42	91,00	2,29
0,50	77,62	1,95	94,54	2,38	86,22	2,17	82,99	2,09	80,54	2,03	77,09	1,94
1,50	53,45	1,34	64,55	1,62	73,24	1,84	60,37	1,52	63,71	1,60	63,00	1,58
2,50	47,55	1,20	63,53	1,60	65,92	1,66	54,80	1,38	54,92	1,38	56,58	1,42
3,50	38,58	0,97	48,10	1,21	55,84	1,40	42,67	1,07	46,39	1,17	49,01	1,23

Notas: Pf = Ponto de fissuração

Resist. Resid. = Resistência Residual

Resistência à tração para fissuração e para cada ponto de deslocamento considerado é o ponto de Resistência Residual à Tração

Fonte: Própria

A ANOVA aplicada a Resistência Residual mostra que entre as amostras não há diferença significativa, já que o valor-P superior a 0,05 (valor-P = 0,8599). Porém quando analisado a resistência residual em relação aos valores de TCOD

(fissuração; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm) é possível verificar que é significativo já que o valor-P foi de  $1,44E^{-12}$ .

A Tabela 27 é um resumo da Tabela 26, para facilitar as comparações posteriores.

Tabela 27 - Resumo das Médias das Resistências Residuais

Resistência Residual Média (MPa)	
Fissuração	2,45
0,50 mm	2,09
1,50 mm	1,59
2,50 mm	1,44
3,50 mm	1,18
Média Entre as resistências residuais de 0,50 mm a 3,50 mm	1,57

Fonte: Própria

Na Tabela 28 foi calculada a tenacidade no total do trecho entre 0 e 3,5 mm. Sendo que para calcular a tenacidade é necessário calcular a área embaixo da curva força x TCOD, representada pela Figura 84.

Tabela 28 - Cálculo da tenacidade com uso do Ensaio Barcelona Simplificado

Tenacidade	
	Tenacidade (N.m)
CP1	196,23
CP2	249,03
CP3	253,60
CP4	220,42
CP5	221,97
CP6	219,56
Média	226,80
O cálculo da tenacidade foi feito entre o Ponto TCOD=0 e TCOD=3,5mm	

Fonte: Própria

Quando comparamos os valores de TCOD para os dois traços, nota-se que em todos os casos, a média do TF00A38 é superior ao TF30A38, mesmo que haja pouca diferença. Esse comportamento se mantém em relação a Tenacidade, sendo que, a diminuição de tenacidade para o TF30A38 é de aproximadamente 1,5% em relação ao TF00A38.

Figura 85 - ANOVA aplicado a Resistência Residual

Anova - Análise da resistência residual - Ensaio Barcelona Simplificado				
RESUMO	Contagem	Soma	Média	Variância
Fissuração	2	4,9200879	2,46004395	0,000286035
0,50 mm	2	4,193437644	2,096718822	5,17695E-05
1,50 mm	2	3,195118526	1,597559263	0,000277651
2,50 mm	2	2,917992038	1,458996019	0,000798306
3,50 mm	2	2,456340561	1,22817028	0,005409619
TF00A38	5	8,942304045	1,788460809	0,237907993
TF30A38	5	8,740672625	1,748134525	0,264246512

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Valores de TCOD	2,005860163	4	0,501465041	727,3256086	5,65031E-06	6,388232909
Tipo de agregado	0,004065523	1	0,004065523	5,896640247	0,072113257	7,708647421
Erro	0,002757857	4	0,000689464			
Total	2,012683543	9				

Fonte: Própria

A ANOVA aplicado a Resistência Residual para comparação dos traços mostra que o tipo de agregado não é significativo, já que o valor-P foi superior a 0,05, conforme Figura 85. Já a resistência residual em relação aos valores de TCOD (fissuração; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5 mm) é possível verificar que é significativo já que o valor-P foi inferior a 0,05, conforme Figura 85.

Além disso, a ANOVA para a tenacidade mostra que o tipo de agregado não é significativo, já que o valor-P foi superior a 0,05 (valor-P = 0,585342).

### 7.2.7. Comparação entre os métodos de ensaio para determinação da Resistência Residual

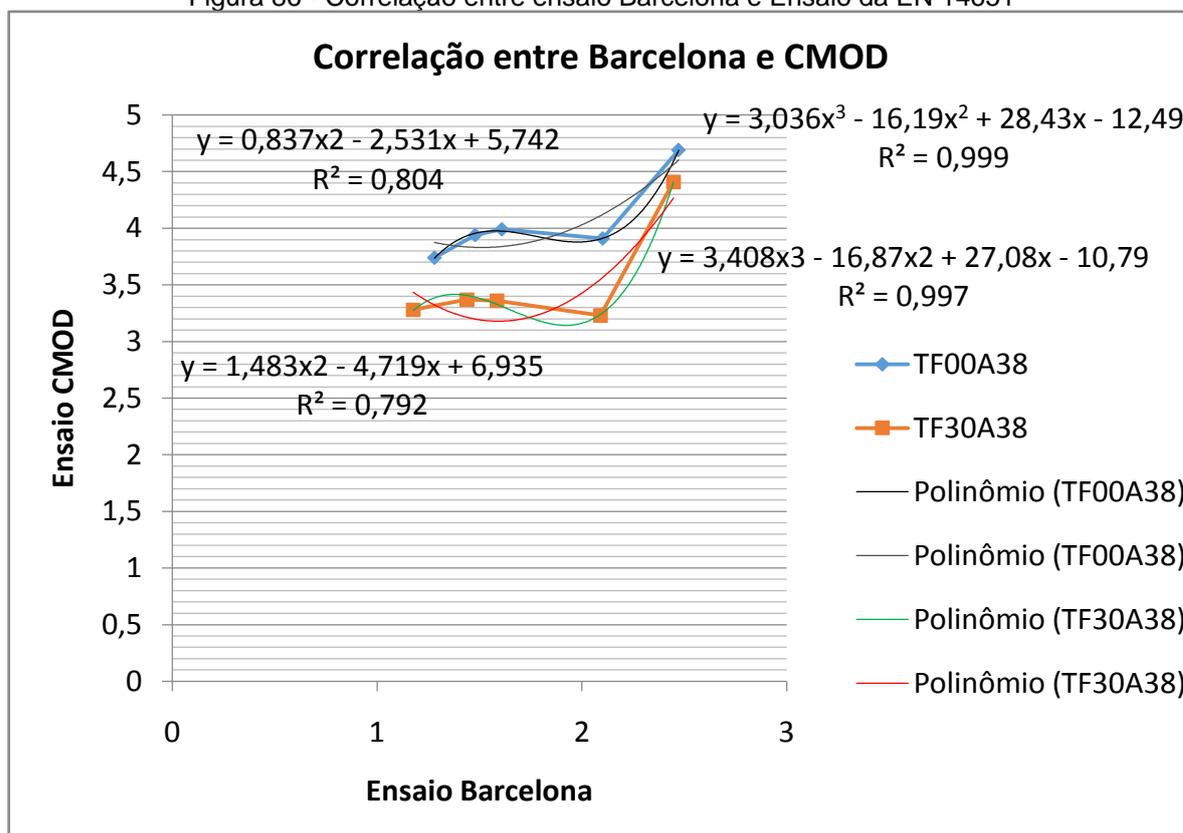
Quando comparamos a resistência residual no Ensaio Barcelona Simplificado e no Ensaio CMOD (EN 14651), é possível notar que existe uma diferença grande entre as médias das resistências residuais obtidas nos dois ensaios, ademais é visível que o ensaio Barcelona gera valores inferiores aos obtidos pelo ensaio da norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), conforme comparativo da Tabela 29. Já o ensaio da norma C1399 (ASTM, 2015) é o que apresenta a maior resistência residual média. Não é possível correlacionar a resistência residual obtida no ensaio da norma C1399 (ASTM, 2015) com os demais, já que nesse ensaio, os cálculos fornecidos pela norma permitem apenas encontrar o valor da resistência residual média. Sendo assim, não é possível comparar pontos como nos outros ensaios.

Tabela 29- Comparativo entre as médias das Resistência Residual (MPa)

	C1399	EN 14651	EBS
TF00A38	6,41	3,90	1,62
TF30A38	6,00	3,31	1,57

Fonte: Própria

Figura 86 - Correlação entre ensaio Barcelona e Ensaio da EN 14651



Fonte: Própria

Segundo Monte et al. (2014) é possível fazer uma correlação linear para a resistência residual, entre os ensaios EBS e o JSCE-SF4 (1984), já que os autores obtiveram valores de  $R^2$  superiores a 0,96. Sendo assim, foi feita a correlação entre o ensaio Barcelona e o ensaio CMOD, norma EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), já que a resistência residual de ambos foi obtida com os mesmos valores de deslocamentos, o que facilitou a correlação, conforme Figura 86. Não foram obtidos valores satisfatórios de correlação linear (para agregado natural o  $R^2$  foi de 0,69 e para o agregado reciclado  $R^2$  foi 0,517). No entanto para uma correlação de segundo grau os valores de  $R^2$  são satisfatórios, próximos de 0,8 e para uma correlação de terceiro grau  $R^2$  está próximo de 1.

### 7.2.8. Comparação entre os métodos de ensaio para determinação da Resistência à tração

A resistência à tração pode ser calculada de várias maneiras, nessa fase final do estudo, a resistência à tração foi obtida por meio dos ensaios de tração na flexão, EN 14651 (EUROPEAN STANDARD, 2005), e EBS. Sendo assim, foi possível comparar os resultados obtidos pelos três métodos de ensaio. A Tabela 30 nos permite visualizar que a resistência à tração obtida nos ensaios de tração na flexão e no ensaio de CMOD (EN 14651) são mais próximos e mais elevados que os obtidos por meio do ensaio EBS.

Tabela 30 - Comparação entre as resistências à tração obtidas

	Tração na flexão	Tração (CMOD)	EBS
TF00A38	3,17	4,69	2,47
TF30A38	4,88	4,41	2,45

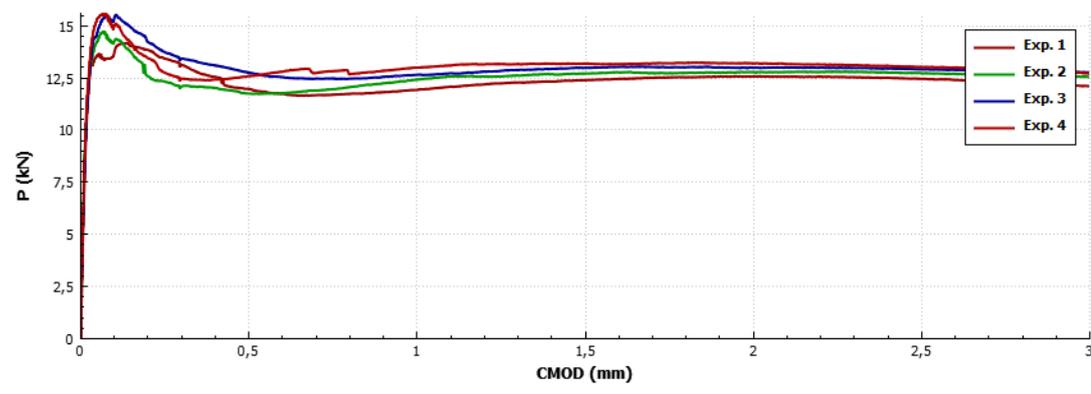
Fonte: Própria

### 7.3. Análise no Programa FitFG - Determinação de curva coesiva

Os resultados dos ensaios experimentais (CMOD) foram utilizados para se determinar os parâmetros de curva coesiva e, conseqüentemente, energia de fratura do concreto analisado. Os parâmetros foram obtidos por análise inversa com auxílio do programa FitFG. Os ajustes foram realizados utilizando-se dois modelos de cálculo: Método dos Elementos Finitos (MEF) e *Cracked-Hinge* (Olesen, 2001).

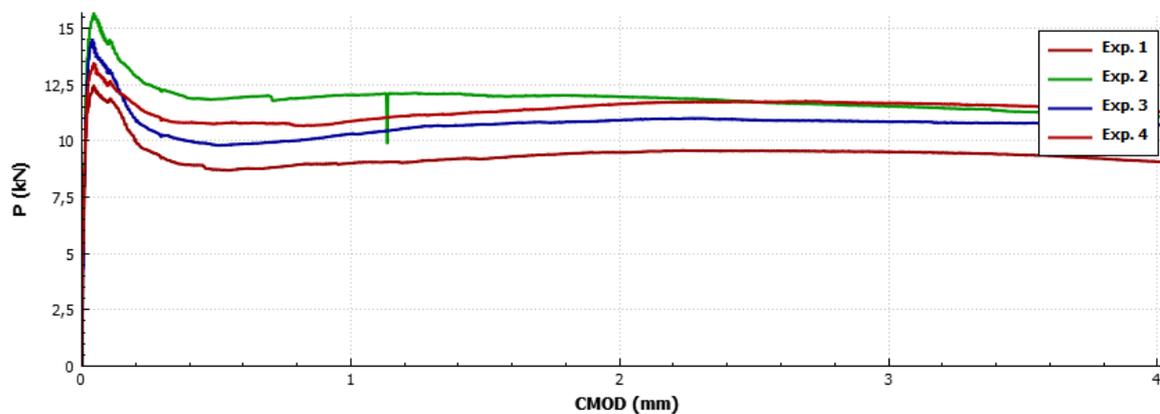
Para isso foram utilizados os dados experimentais obtidos no ensaio de CMOD (EN 14651), mas, como esse método é gráfico e grandes divergências entre o resultados dos corpos de provas pode prejudicar a utilização do programa. Foi necessário excluir as curvas com maior desvio padrão, sendo assim, foram utilizados dados de 4 corpos de provas dos 6 que foram ensaiados, conforme Figuras 87 e 88.

Figura 87 - Gráfico com os CPs do ensaio de CMOD - TOOA38



Fonte: Própria

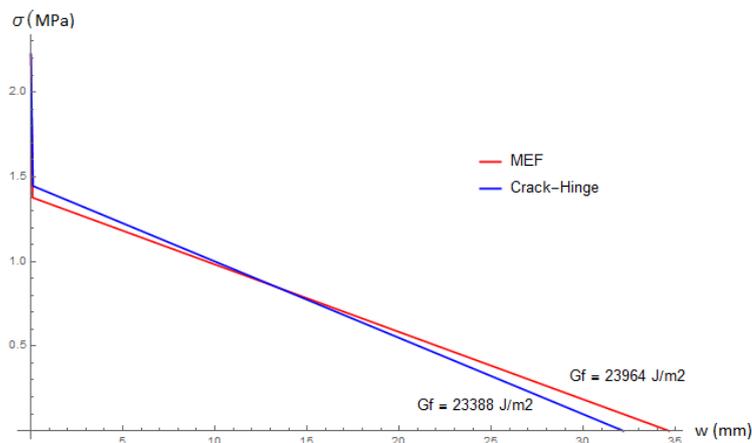
Figura 88 - Gráfico com os CPs do ensaio de CMOD - T3OA38



Fonte: Própria

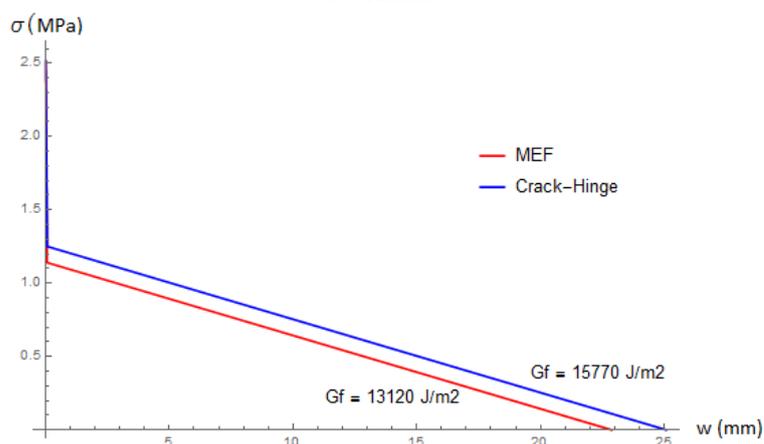
As curvas coesivas obtidas nos ajustes são apresentadas nas Figuras 89 e 90. Os ajustes foram realizados utilizando-se dois modelos de cálculo, o método dos elementos finitos (MEF) e *Cracked-Hinge* (Olesen, 2001). Os valores de resistência a tração e energia de fratura obtidos nos ajustes são apresentados na Tabela 31. Observa-se dessas figuras, assim como da Tabela 31 que os dois métodos levaram a ajustes similares, indicando a boa qualidade do método *Cracked-Hinge*, o qual é semianalítico e mais simples se comparado ao MEF.

Figura 89 - Curvas coesivas ajustadas para os ensaios das vigas em concreto sem agregado reciclado



Fonte: Própria

Figura 90 - Curvas coesivas ajustadas para os ensaios das vigas em concreto com agregado reciclado



Fonte: Própria

Tabela 31 - Valores de resistência à tração e energia de fratura obtidos através de análise inversa

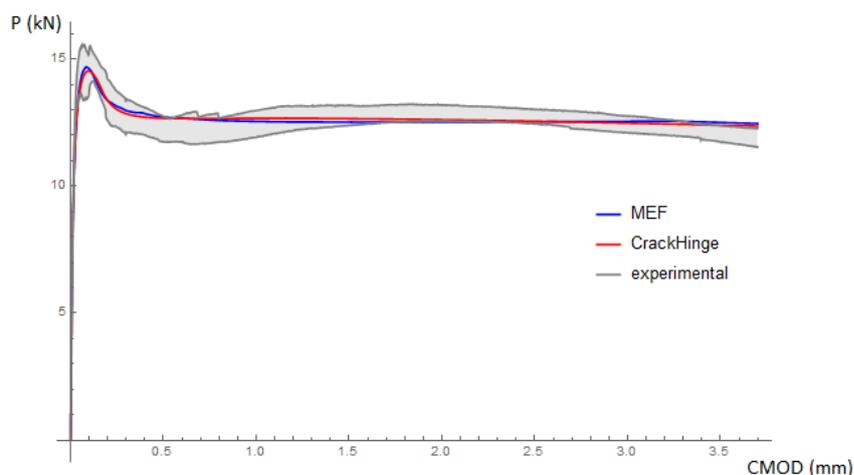
	Tipo de ajuste	Resistência a tração (MPa)	Energia de fratura (J/m <sup>2</sup> )
Concreto sem agregado reciclado	Crack-Hinge	2.2247	23388
	MEF	2.2200	23964
Concreto com agregado reciclado	Crack-Hinge	2.5159	15770
	MEF	2.5159	13120

Fonte: Própria

Os resultados de tração obtido pelo programa (FitFG) foram similares aos valores exigidos pela norma NBR 6118, a qual exige que o valor utilizado para resistência à tração seja de 70% do valor encontrado no ensaio de tração à flexão.

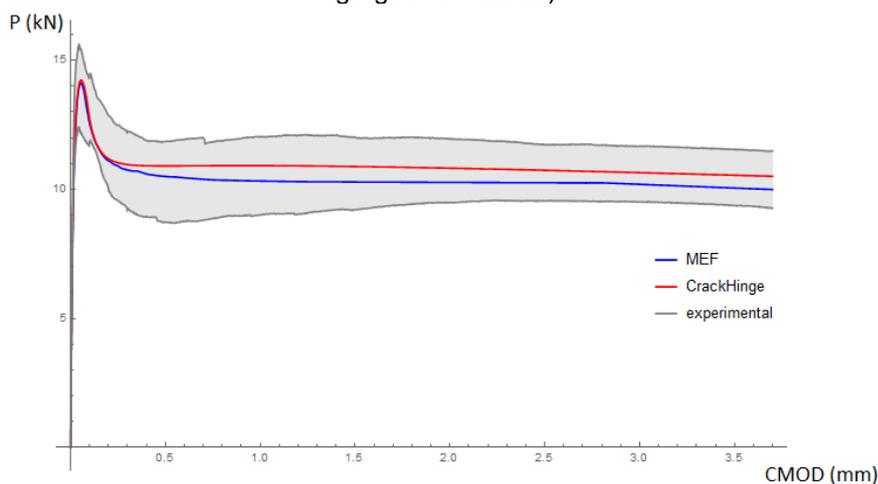
Os resultados de simulação (curva P x CMOD) utilizando-se as curvas coesivas ajustadas são comparados aos resultados experimentais nas figuras 91 e 92.

Figura 91 - Comparação dos resultados de simulação com ensaios experimentais (concreto sem agregado reciclado)



Fonte: Própria

Figura 92 - Comparação dos resultados de simulação com ensaios experimentais (concreto com agregado reciclado)



Fonte: Própria

Os resultados indicam que o concreto com agregado reciclado tem maior resistência a tração, assim como observado nos ensaios de tração à flexão. No entanto, sua energia de fratura se mostra menor do que no concreto sem agregado reciclado. Isso pode ser confirmado, observando-se os gráficos de  $P \times CMOD$  dos ensaios experimentais, em que o trecho pós-pico das vigas em concreto sem agregado reciclado tem valores maiores que das vigas em concreto com agregado reciclado. Observa-se ainda que a faixa de resultados experimentais é mais estreita no concreto sem agregado reciclado.

Segundo Santos (2014), a utilização de agregado reciclado em porcentagens de 25% a 50% acarretam em uma diminuição na energia de fratura do concreto.

## 8. CONCLUSÃO

Para os materiais e condições de ensaio deste trabalho, observou-se em relação ao comportamento físico e mecânico de concreto elaborado com substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado e reforçado com fibras que:

Na Etapa Inicial:

- ✓ Para a resistência à compressão, aos 28 dias, é significativa a diferença entre a utilização de agregado natural e agregado reciclado, tanto para a adição de fibra aço, quanto para a de vidro AR;
- ✓ Existe uma tendência de aumento de resistência à compressão com o aumento do teor de fibras aço. Já para as fibras de vidro AR, só é possível verificar esse comportamento para o concreto com agregado natural, pois quando é utilizado o agregado reciclado, esse comportamento se inverte, ou seja, com o aumento do teor de fibras ocorre diminuição da resistência do concreto;
- ✓ A resistência à tração por compressão diametral tende a aumentar conforme o aumento do teor de fibras (aço ou vidro AR), tanto para utilização de agregado natural como para agregado reciclado;
- ✓ Para a resistência à tração por compressão diametral é possível verificar que existe diferença significativa (segundo ANOVA) quando avaliado o teor de fibras incorporadas;
- ✓ O módulo de elasticidade tende a aumentar quando utilizado fibras de aço no concreto, tanto para agregado natural quanto para agregado reciclado. Já as fibras de vidro AR, tendem a aumentar o módulo de elasticidade quando utilizado agregado natural, mas quando utilizado agregado reciclado existe uma redução do módulo de elasticidade, porém essas alterações não são significativas (segundo ANOVA);

- ✓ A utilização de agregado reciclado ou natural não influenciou o módulo de elasticidade, mas a porcentagem de fibra influencia significativamente nesta propriedade;
- ✓ A resistência à tração na flexão tende a aumentar com o aumento do teor de fibras de aço. Já para a fibra de vidro AR nem o tipo de agregado e nem os teores de fibras são significativos;

#### Na Etapa Final:

- ✓ Os traços analisados não possuem diferenças significativas com relação a resistência à compressão. Já para a tração na flexão essa diferença é significativa e o traço com agregado reciclado possui o maior valor;
- ✓ O módulo de elasticidade para o traço com agregado reciclado teve um valor de 8,5% abaixo do traço sem agregado reciclado, mas apesar disso o ANOVA indica que os traços não possuem diferenças significativas;
- ✓ A resistência residual média, conforme ASTM C1399 (2015), para o concreto com agregado reciclado e para o concreto com convencional (ambos com fibras), foram muito próximas, aproximadamente 6 MPa.
- ✓ O limite de proporcionalidade (LOP), calculado pela EN 14651 (2005), mostrou que os valores obtidos para os concretos com agregado convencional e com agregado reciclado foram similares, sendo que os maiores valores médios pertencem aos traços com agregado convencional;
- ✓ Segundo ensaio da EN 14651 (2005), os resultados obtidos para as resistências residuais foram próximos, apesar de que o concreto com agregado convencional tem os maiores valores médios.
- ✓ Para o ensaio Barcelona Simplificado (EBS), a resistência à tração, a resistência residual média, e a tenacidade estavam muito próximas para o agregado natural e para o agregado reciclado, sendo que para todas essas características o agregado natural teve valores um pouco superior ao do agregado reciclado.

- ✓ Existe uma diferença muito grande entre os valores de resistência residual obtidos nos 3 ensaios (C1399 (2015), EN 14651(2005) e EBS), porém quando feita a correlação de terceiro grau entre os ensaios EBS e EN 14651 obteve-se uma ótima correlação, com  $R^2$  atingindo valores próximos a 1,0;
- ✓ O Programa FitFG obteve curvas coesivas muito próximas, para o agregado reciclado e para o agregado convencional com fibras.
- ✓ Os valores de tração obtidos pelo programa FitFG ficaram muito próximos dos valores exigidos pela norma NBR 6118 (70% do valor da tração na flexão)
- ✓ No Programa FitFG,o concreto com agregado reciclado tem maior resistência a tração. No entanto, sua energia de fratura se mostra menor do que no concreto sem agregado reciclado.

Por fim é possível concluir que, de maneira geral, o uso de 30% de agregado reciclado em substituição ao agregado natural e a adição de fibras de aço não alteram significativamente as propriedades do concreto. Entretanto, o mesmo não foi possível afirmar com adições de fibra de vidro AR.

### **8.1. Sugestão para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros observou-se a necessidade de dar continuidade nos estudos relativos aos tópicos:

- ✓ Avaliar durabilidade dos concretos;
- ✓ Estudar as correlações entre métodos de ensaios.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016. São Paulo, SP: ABRELPE, 2016.

AMADEI, Daysa Ione. Braga et. al. A questão dos resíduos de construção civil: um breve estado da arte. Revista NUPEM, Campo Mourão, v.3, n.5, ago/dez-2011 Disponível em: <http://www.fecilcam.br/revista/index.php/nupem/article/viewFile/72/41>. Acesso em: 10 out. de 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 1399: Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete. Philadelphia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1018: Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete. In: Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1399/C1399M: Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength for Fiber-Reinforced. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1609/C1609M: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). Philadelphia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1699: Standard Test Method for Moisture Retention Curves of Porous Building Materials Using Pressure Plates. Philadelphia, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Philadelphia, 2009.

ARAÚJO, Daniel Lima. et al. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção nas propriedades mecânicas do concreto. REEC - Revista Eletronica de Engenharia Civil, v. 11, p. 16–34, 2016.

ARAÚJO, Daniela Gomes de: Fibra de vidro com resistência alcalina para aplicação em cimento – Cem FIL®, 2010 . Disponível em [http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2010/cobertura\\_paineis/infra/apresentacoes/owens.pdf](http://www.tecnologiademateriais.com.br/mt/2010/cobertura_paineis/infra/apresentacoes/owens.pdf). Acesso em: 21 de jan. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11578: Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: Concreto – Procedimentos para a moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: Concreto - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção da água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009c. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 3p.

BARENBLATT, Grigory The formation of equilibrium cracks in brittle fracture. General ideas and hypothesis, axially symmetrical cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, v. 23, p.55-129, 1959.

BARENBLATT, Grigory. Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, v.7, p. 55-129, Academic Press, New York, 1962.

BENETTI, Joana Kirchner. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. *Fibre reinforced cementitious composites*. UK: Francis and Taylor, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 30 jul. 2017.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, São Paulo, SP, v. 61, n. 358, p. 178-189, Abr./Jun. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00178.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2017.

BRAZ, Mariane Caroline de Araújo; NASCIMENTO, Felipe Bomfim Calvante do. Concreto Reforçado com Fibras de Aço. *Caderno de Graduação – Ciências exatas e tecnológicas*, v. 3, n. 1, p. 43-56, 2015. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/viewFile/2638/1528>. Acesso em: 15 de set. de 2017.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; SCHALCH, Valdir; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho; RIBEIRO, José Luis Duarte. Influence of the type of recycled aggregate from construction and demolition waste on the module of deformation of recycled aggregate concrete. *IBRACON Structures and Materials Journal*, vol. 1, n. 2, p. 171-192, 2008.

CARMO, Luciano Caetano do; ARAÚJO, Daniel de Lima; VANALLI, Leandro; PRADO, Ademir Aparecido do. Ductilidade de Vigas de Concreto Armado Reforçado com Fibras de Aço: Análise Via Modelagem Computacional. *Engenharia Estudo e Pesquisa*, v. 8, p. 5-15, 2006.

CARNIO, Marco Antonio. Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CARRIJO, P. M. Análise da Influência da Massa Específica de Agregados Graúdos Provenientes de Resíduos da Construção e Demolição no Desempenho Mecânico do Concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASUCCIO, M. et al. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 7, p. 1500-1506, 2008.

CEM-FIL®. Anti-Crak ® HP 67/36, 2014. Disponível em: [http://sweets.construction.com/swts\\_content\\_files/20865/589164.pdf](http://sweets.construction.com/swts_content_files/20865/589164.pdf). Acesso em 7 de out. de 2017.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2002.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2004.

DELLA PIETRA, Ivie Ferrari; FIGUEIREDO, Antonio D.; BITTENCOURT, Tulio. Influência do teor de fibras de aço na tenacidade do concreto convencional e do concreto com agregados reciclados de entulho. Anais. São Paulo: [s.n.], 2003.

DELLA PIETRA, Ivie Ferrari; SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de. Concreto com agregados graúdos reciclados reforçado com fibras de aço. Boletim Técnico - EPUSP, 2006.

DIAS, Aniel de Melo; SILVA, Thiago José Vieira; POGGIALI, Flávia Spitale Jacques. O concreto sustentável brasileiro. *Revista CONSTRUINDO*, v. 8, 1a ed., p. 84-97, 2017.

DIAS, Rafael. Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

DONG, Y., Wu, S., XU, S. S., ZHANG, Y. e FANG, S. Analysis of concrete fracture using a novel cohesive crack method. *Appl. Math. Model.* 34, 4219-4231. doi: 10.1016/j.apm.2010.04.019.

ETXEBERRIA, Mirien; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. R.; BIZINOTTO, Marilda Barra. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, n. 37, p. 735-742, 2007.

EUROPEAN STANDARD. EN 14651: Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Méthode. . [S.l: s.n.]. , 2005;

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com fibras de aço. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico PCC/260, 2000.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto com fibras. In: Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, p. 1195-1225.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues. Concreto reforçado com fibras de aço. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/3/tde-18052012-112833/pt-br.php>. Acesso em: 17 set. 2017.

GEA DOS SANTOS, Fabio Luis. Estudo e automação da influência da taxa de carregamento na resposta em fratura quase-frágil. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/258435>. Acesso em: 25 ago. 2018.

GEA DOS SANTOS, Fabio Luis; SOUSA, J. L. A. O. Determination of parameters of a viscous-cohesive fracture model by inverse analysis. Ibracon Structures and Materials Journal 8, p. 669-706, 2015.

GÓIS, Fernanda Alves Pinto; BARBOZA, Aline da Silva Ramos. Avaliação da influência da fração volumétrica de fibras de aço no comportamento de peças de concreto solicitadas por tensões de tração. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

GONÇALVES, Paulo; BRITO, Jorge de. Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications. Magazine of Concrete Research, v. 62, n. 5, p. 339-346, 2010.

GONÇALVES, Paulo; BRITO, Jorge de. Utilização de agregados reciclados em betão. Análise comentada da regulamentação existente. Revista Engenharia Civil, n. 32, p. 73-86, 2008.

GONSALEZ, Alexandra. Descartes dos canteiros representam mais de 50% do material sólido urbano no Brasil. Construção Mercado, n. 190, 2017. Disponível em: <https://construcaomercado.pini.com.br/2017/05/descartes-dos-canteiros-representam-mais-de-50-do-material-solido-urbano-no-brasil-saiba-como-fazer-a-gestao-e-tratamento-de-residuos-de-construcao/>. Acesso em: 17 de out. de 2017.

Grace Construction. AdvaTM cast 525, 2004. Disponível em: [https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva\\_cast525.pdf](https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf). Acesso em 7 de out. de 2017.

GUELLO, Gustavo de Assis. Simulação computacional de estruturas de concreto por meio da mecânica do dano. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GUIMARÃES, D. Avaliação das propriedades de concretos reforçados com fibras de aço para utilização em pisos industriais. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2015.

HORDIJK, A. D. Local approach to fatigue of concrete. Doctoral thesis – Delft University of Technology, The Netherlands, 1991.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - JSCE. JSCE-SF2: Method of Making Specimens for Strength and Toughness Tests of Steel Fiber Reinforced Concrete. Japan: Concrete Library of JSCE, 1984. 6 p.

JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. In: SEMINÁRIO RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental; Departamento de Engenharia de Construção Civil; Escola Politécnica da USP (PCC USP), 2000. Disponível em: [https://www.Manuais\\_tecnicos/2010/reciclagem\\_residuos/CETESB.pdf](https://www.Manuais_tecnicos/2010/reciclagem_residuos/CETESB.pdf). Acesso em: 4 de set. de 2018.

KOU, Shicong; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 69-76, 2012.

KUBISSA, Wojciech. et al. Properties of concretes with natural aggregate improved by RCA addition. *Procedia Engineering*, v. 108, p. 30-38, 2015.

LIMA, Rosimeire Suzuki; LIMA, Rui Reynaldo Rosa. Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Série de Publicações Temáticas do CREA-PR, v. 1, p. 60, 2009. Disponível em: [http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/cartilhaResiduos\\_web2012.pdf](http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/cartilhaResiduos_web2012.pdf). Acesso em: 4 de set. de 2018.

MARIE, Iqbal; QUIASRAWI, Hisham. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, v. 37, p. 243-248, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020>. Acesso em: 7 de set. de 2018.

MEDEIROS, Arthur. Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Roseback et al. Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 4247-4267, 2016.

MOITINHO, B. L. R.; LEITE, M. B. Estudo da produção de concretos reciclados utilizando agregados de argamassa. IV Encontro Nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil. Agosto, 2015.

MONTE, Renata. Caracterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos. Tese (Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MONTE, Renata.; TOALDO, Guilherme Stoll; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Toughness evaluation of fiber reinforced concrete using open-loop test. Revista Matéria, v. 19, n. 2, p. 132-149, 2014.

MOREIRA, Lucia Himori Higa; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico e estrutural. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento De Engenharia de Construção Civil, p. 106, 2010.

NASCIMENTO, Francine Alves Tavares; VIEIRA, Ana Júlia Barbosa; BARROSO, Iuri Rafael Silva; LOPES, Jessé Pimentel. Reutilização e reciclagem de resíduos sólidos gerados na construção civil. Cadernos de Graduação: Ciências exatas e tecnológicas, v. 3, p.141-152, 2015.

NOGUEIRA, André Baltazar et al. Avaliação da reprodutibilidade do ensaio de barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. Anais do 59o Congresso Brasileiro do concreto. IBRACON. 2017.

OLESEN, John Forbes. Fictitious crack propagation in fiber-reinforced concrete beams. Journal of Engineering Mechanics, v. 127, n. 3, p. 272-280, 2001.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. Revista Concreto & Construções, v. XXXVII, n. 53, p. 14-19, 2009.

PELLISSARI, Viviane. Propriedades de concretos produzidos através da utilização de agregados reciclados de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PEREIRA, Marina da Mota. Avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para a determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

PESSOA, F.H.C. Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais. Tese de Doutorado, Publicação G.DM-078/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PORTO, Maria Edelma Henrique de Carvalho. Estudo de viabilidade de implantação de uma usina de Reciclagem de resíduos de construção e demolição no Município de Campos dos Goytacazes – Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: /...pdf/at\_download/file. Acesso em: 06 de ago. de 2017.

PRASAD, M.L.V; RATHISH KUMAR, P. Strength studies on glass fiber reinforced recycled aggregate concrete. Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), v.8, n.6, p. 677-690, 2007

PUJADAS, Pablo et al. New analytical model to generalize the barcelona test using axial displacement. *Journal of Civil Engineering and Management*, v, 19, n. 2, 2013.

SALVADOR, Renan Pícolo. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2013.

SALVADOR, Renan Pícolo; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. *Matéria (UFRJ)*, v. 18, p. 1273-1285, 2013.

SANTOS, Ana Amélia Mota dos. Concreto com agregado graúdo reciclado de concreto: dosagem e produção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana 2016. Disponível em: [http://tede2.uefs.br:8080/bitstream/tede/435/2/CONCRETO%20COM%20AGREGADO%20GRAU%CC%81DO%20RECICLADO%20DE%20CONCRETO\\_DOSAGEM%20E%20PRODUC%CC%A7A%CC%83O.pdf](http://tede2.uefs.br:8080/bitstream/tede/435/2/CONCRETO%20COM%20AGREGADO%20GRAU%CC%81DO%20RECICLADO%20DE%20CONCRETO_DOSAGEM%20E%20PRODUC%CC%A7A%CC%83O.pdf). Acesso em: 20 de set. de 2018.

SANTOS, Daniele Oliveira Justo dos; FONTES, Cintia Maria Ariani; LIMA, Paulo Roberto Lopes. Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal. *Revista Matéria*, v. 22, n. 1, 2017.

SANTOS, Vânia Regina Ferreira dos. Análise do desempenho de pisos táteis, intertravados, produzidos com agregados de resíduos de construção civil - RCC e fibras de aço. 2014. 95 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267701>. Acesso em: 24 ago. 2018.

SENARATNE, Sepani. et al. Recycled Concrete in Structural Applications for Sustainable Construction Practices in Australia. *Procedia Engineering*, v. 180, n. 0, p. 751-758, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.235>. Acesso em: 13 de set. de 2017.

SILVA JÚNIOR, A. C.; REIS, A. P. A.; CRAVO, F. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO. . Goiás: III CONPEEX - Universidade Federal de Goiás. Disponível em: [https://projetos.extras.ufg.br/conpeex/2006/porta\\_arquivos/pibic/0154115-ArlamCarneiroSilvaJúnior.pdf](https://projetos.extras.ufg.br/conpeex/2006/porta_arquivos/pibic/0154115-ArlamCarneiroSilvaJúnior.pdf). , 2006

SILVA, M. I. M. et al. Resposta à resistência à compressão do concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto. *Anais do 59o Congresso Brasileiro do concreto*, n. 1, p. 1-8, 2015.

SPOHR, Rodrigo et al. Estudo das propriedades mecânicas do concreto com agregado graúdo natural e com agregado graúdo obtido de concreto reciclado. *Anais do 59o Congresso Brasileiro do concreto*, n. 1, p. 1-16, 2015.

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

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952016000100075&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952016000100075&lng=en&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 17 de ago. de 2018.

THOMAS, C.; SETIÉN, J.; POLANCO, J. A. Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes. *Construction and Building Materials*, v. 114, n. May 2002, p. 536-546, 2016.

TIGUMAN, Maira Paulina; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Nova técnica de determinação de tenacidade dos compostos reforçados com fibra: ASTM C 1399 (2002). *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento De Engenharia De Construção Civil*, 2005.

TOPÇU, I. B.; SENDEL, S. Properties of concretes produced with waste ceramic tile aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 14, n. 34, p. 1307-1312, 2004.

VEFAGO, Luiz Henrique Maccarini. Fachadas pré fabricadas em argamassa reforçada com fibra de vidro em três estudos de caso na grande Porto Alegre. *Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Porto Alegre*, 2006.

XIE, J.; HUANG, L.; GUO, Y.; LI, Z.; FANG, C.; LI, L.; WANG, J. Experimental study on the compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete modified with silica fume and fibres. *Construction and Building Materials*, v.178, p. 612–623, 2018