

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**  
**Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia (CEATEC)**

**JOÃO VICTOR RODRIGUES MARTINS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS**  
**REFORÇADOS COM FIBRAS E ADIÇÃO DE RESÍDUO DE FRESADO**  
**ASFÁLTICO**

**CAMPINAS**

**2018**

**JOÃO VICTOR RODRIGUES MARTINS**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS  
REFORÇADOS COM FIBRAS E ADIÇÃO DE RESÍDUO DE FRESADO  
ASFÁLTICO**

*Dissertação apresentada como exigência para  
obtenção do Título de Mestre, do Programa de Pós-  
Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana,  
do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e  
Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de  
Campinas.*

*Orientadora:* Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho

*Coorientadora:* Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lia Lorena Pimentel

**CAMPINAS**

**2018**

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

t620.136 Martins, João Victor Rodrigues.  
M386a Análise do comportamento mecânico de concretos reforçados com  
fibras e adição de resíduo de fresado asfáltico/ João Victor Rodrigues  
Martins. - Campinas: PUC-Campinas, 2018.  
199f.

Orientadora: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho.  
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campi-  
nas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-  
Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Inclui anexo.

1. Concreto. 2. Fibras. 3. Vigas de concreto. 4. Concreto asfáltico. I.  
Jacintho, Ana Elisabete Paganelli Guimarães. II. Pontifícia Universidade  
Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de  
Tecnologias. Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III.  
Título.

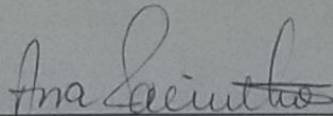
CDD – 22. Ed. t620.136

**JOÃO VICTOR RODRIGUES MARTINS**

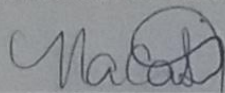
**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS E ADIÇÃO  
DE RESÍDUO DE FRESADO ASFÁLTICO**

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). Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho.

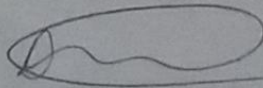
Dissertação defendida e aprovada em 27 de junho de 2018 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de A. Jacintho  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Luiz Carlos de Almeida  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

## AGRADECIMENTOS

Aos meus Amigos e Familiares,  
Por todo apoio, incentivo e compreensão durante a realização deste trabalho.

A minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Ávila Jacintho,  
Por todas as sugestões, ajuda e confiança durante a realização da pesquisa e importantes correções deste trabalho.

A minha coorientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lia Lorena Pimentel,  
Por todo apoio e sugestões durante a elaboração deste trabalho, principalmente durante as etapas iniciais.

Aos Técnicos do Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC Campinas, Igor Citrangulo Pereira, Joventino Manoel Gonçalves Filho e Wesley Rodrigues dos Santos,  
Pela ajuda durante as moldagens, execução de ensaios e sugestões dadas para realização desta pesquisa.

À Sr<sup>a</sup>. Fátima Rodrigues Machado e Sr<sup>a</sup>. Regina Rocha Gerotto, da empresa Farmabase Saúde Animal Ltda,  
Pela amizade, motivação e incentivo durante a realização desta pesquisa.

Ao aluno de Mestrado, João Batista Lamari Palma da Silva,  
Pelo auxílio na montagem das vigas e pela execução dos ensaios.

Ao aluno de Graduação, Hector Henrique dos Santos,  
Pela ajuda durante a preparação dos ensaios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP),  
Pela aquisição de materiais necessários por meio do projeto de auxílio à pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES),  
Por ceder a bolsa de pesquisador para produção deste trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas e a todo seu corpo docente,  
Pela oportunidade e pela disponibilização dos Laboratórios, materiais e demais espaços para realização desta pesquisa.

## RESUMO

MARTINS, J. V. M. Análise do comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras e adição de resíduo de fresado asfáltico. 2018. 144f. Dissertação – Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

O processo de montagem da armadura e do adensamento do concreto em peças estruturais demandam tempo e deslocamento de mão de obra. O uso do reforço com fibras em substituição parcial da armadura transversal poderia reduzir o tempo de fabricação e facilitar o adensamento das peças. Diante de tal cenário, esta pesquisa visou o estudo de concretos reforçados com fibras e de vigas de concreto armado, a fim de verificar seu comportamento. Foram confeccionados traços de concretos reforçados com fibras de aço e traços de concretos com fibras de vidro álcali-resistentes. Ademais foi utilizado o resíduo de fresado asfáltico para substituição parcial do agregado miúdo e graúdo na porcentagem de 15%. A caracterização dos materiais foi realizada conforme as normas da ABNT. Foram realizados ensaios para análise da Resistência a Compressão, da Tração Indireta, do Módulo de Elasticidade, da Tenacidade por meio dos Ensaio Barcelona e ASTM C-1399. A avaliação do comportamento mecânico foi realizada por meio de flexão em quatro pontos em vigas de concreto armado, visando mostrar o seu comportamento aos esforços solicitantes. Os resultados revelam o efeito positivo das fibras para concretos com resíduos em sua composição, principalmente no que diz respeito as fibras de aço. Foi verificada maior atuação das fibras quanto a Resistência Residual do concreto e a sua Tenacidade. Demonstrou-se também a viabilidade da aplicação estrutural do resíduo de fresado asfáltico como substituição parcial de agregados naturais.

**Palavras chave:** Concreto com fibras, Fibras de aço, Fibras de vidro, Resíduo de fresado asfáltico, Ensaio Barcelona.

## ABSTRACT

MARTINS, J. V. M. Analysis of the mechanical behavior of reinforced concrete with fibers and addition of asphalt milling residue. 2018. Dissertação. 144p. – Mestrado em Sistemas de Infra Estrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

The process of assembling the reinforcement and the density of the concrete in structural pieces demand time and displacement of labor. The use of reinforcement with fibers in partial replacement of the transverse reinforcement could reduce the time of manufacture and facilitate the densification of the parts. Given this scenario, this research aimed at the study of concrete reinforced with fibers and reinforced concrete beams, in order to verify their behavior. Traces of concrete reinforced with steel fibers and traces of concrete with alkali-resistant glass fibers were made. In addition, the asphaltic milling residue was used for partial replacement of the small and large aggregate in the percentage of 15%. The material characterization was performed according to ABNT standards. Tests were performed to evaluate the Compressive Strength, Indirect Traction, Elasticity Modulus, and Tenacity through the Barcelona and ASTM C-1399 Tests. The evaluation of the mechanical behavior was performed by means of four-point bending in reinforced concrete beams, aiming to show its behavior to the applicant efforts. The results show the positive effect of the fibers for concrete with residues in their composition, mainly with respect to the steel fibers. It was verified a greater performance of the fibers as the Residual Resistance of the concrete and its Tenacity. It was also presented the viability of the structural application of asphalt milling residue as partial replacement of natural aggregates.

**Key Words:** Fiber Concrete, Steel fiber, Glass fiber, Milled asphalt residue, Barcelona Test.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
JSCE	Japanese Society of Civil Engenieers
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
CRF	Concretos Reforçados com Fibras
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
LEED	Liderança em Design de Energia e Meio Ambiente
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ACI	American Concrete Institute
STF	Supremo Tribunal Federal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
CRFA	Concreto Reforçado com Fibras de Aço
CRFV	Concreto Reforçado com Fibras de Vidro
DNIT	Departamento Nacional de Infra Estruturas de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
UNE	Uma Norma Española
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Método VeBe.....	29
Figura 2.2 - Relação Tensão/ Deformação em diferentes dosagens de concreto com fibras.....	30
Figura 2.3 - Configuração a concentração de tensões em concretos com e sem fibras...	31
Figura 2.4 - Configuração a concentração de tensões em concretos com e sem fibras...	32
Figura 2.5 - Configuração do Ensaio Barcelona.....	37
Figura 2.6 - Configuração geométrica do Ensaio Barcelona.....	38
Figura 2.7 - Distribuição do uso da fibra de aço no mercado brasileiro.....	40
Figura 2.8 - Tipos e Classes das fibras de aço.....	41
Figura 2.9 - Fotografia de microscopia de matriz cimentícias com fibras de vidro.....	44
Figura 3.10 - Tipo de Revestimentos asfálticos.....	55
Figura 3.11 - Partícula de resíduo de fresado asfáltico.....	57
Figura 3.12 - Detalhe de cilindros de fresadoras.....	59
Figura 3.13 - Processo de fresagem asfáltica.....	60
Figura 3.14 - Fotografia de resíduo de fresado asfáltico a beira do acostamento em rodovia.....	61
Figura 4.15 - Esquema do Ensaio de Stuttgart.....	67
Figura 4.16 - Evolução de fissuras em viga de concreto.....	68
Figura 4.17 - Modelo da treliça clássica.....	69
Figura 4.18 - Seções transversais de viga Genérica - Estádio I e II.....	69
Figura 4.19 - Seções transversais de viga Genérica – Estádio III.....	70
Figura 4.20 - Ruptura por flexão.....	71
Figura 4.21 - Domínios dos estados limites últimos (ELU) -seção transversal.....	71
Figura 4.22 - Ruptura das diagonais de compressão.....	72
Figura 4.23 - Ruptura por falha de ancoragem.....	73
Figura 4.24 - Ruptura por força cortante-tração.....	73
Figura 4.25 - Ruptura por força cortante flexão.....	73
Figura 4.26 - Ruptura por flexão da armadura transversal.....	74
Figura 4.27 - Curvas Cargas x Flecha em vigas com e sem fibras.....	76
Figura 5.28 - Separação de materiais.....	82
Figura 5.29 - Organização de corpos de prova.....	84
Figura 5.30 - Corpos de Prova em câmara úmida.....	84
Figura 5.31 - Cura vigas.....	85
Figura 5.32 - Verificação de abatimento por meio de Slump Test.....	86
Figura 5.33 - Fotografia de amostra de resíduo de fresado asfáltico.....	88
Figura 5.34 - Fibras de aço.....	92
Figura 5.35 - Fibras de vidro.....	93
Figura 5.36 - Detalhamento de Vigas de Concreto Armado.....	94
Figura 5.37 - Armaduras de vigas conforme projeto de Barros, 2009 e com armadura reduzida.....	94
Figura 5.38 - Forma de madeira.....	95
Figura 5.39 - Remoção das irregularidades da barra de aço.....	97
Figura 5.40 - Fixação do extensômetro.....	97

Figura 5.41 - Fixação de cabeamento. ....	98
Figura 5.42 - Proteção final dos extensômetros.....	98
Figura 5.43 - Esquema de montagem do ensaio de rompimento das vigas. ....	99
Figura 6.44 - Redução do abatimento em Fibras de Vidro.....	109
Figura 6.45 - Redução do abatimento em Fibras de Aço .....	109
Figura 6.46 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias. ....	114
Figura 6.47 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias.....	115
Figura 6.48 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias. ....	117
Figura 6.49 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias.....	117
Figura 6.50 - Correlação Resist. Tração x Compressão 7 e 28 dias .....	118
Figura 6.51 - Modulo de Elasticidade – 28 dias. ....	120
Figura 6.52 - Pontos de análise ensaio Barcelona .....	122
Figura 6.53 - Curvas Barcelona TREF.....	123
Figura 6.54 - Curvas Barcelona TFRES .....	124
Figura 6.55 - Curvas Barcelona TFVI .....	126
Figura 6.56 - Curvas Barcelona TFCVII .....	127
Figura 6.57 - Resultados Barcelona TFCI .....	128
Figura 6.58 - Curvas Barcelona TFCII .....	129
Figura 6.59 - Curvas de Deslocamento Vertical.....	130
Figura 6.60 - Equações de Tenacidade.....	138
Figura 6.61 - Esquema primeira etapa ensaio ASTM C-1399 .....	140
Figura 6.62 - Correlação entre os Ensaio EBS e C-1399.....	142
Figura 6.63 - Curvas C-1399 TREF.....	143
Figura 6.64 - Curvas C-1399 TFRES.....	144
Figura 6.65 - Curvas C-1399 TFVI .....	144
Figura 6.66 - Curvas C-1399 TFCVII .....	145
Figura 6.67 - Curvas C-1399 TFCI .....	146
Figura 6.68 - Curvas C-1399 TFCII .....	147
Figura 6.69 - Correlação Carga residual ESB x C-1399.....	149
Figura 6.70 - Correlação Resistência residual ESB x C-1399 .....	149
Figura 6.71 - Curvas de tenacidade para diferentes teores C-1399.....	151
Figura 6.72 - Correlação entre Tenacidade ESB e C-1399.....	151
Figura 6.73. Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos.....	153
Figura 6.74 – Curvas flecha vigas com estribo .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.75 - Curvas flecha vigas estribo reduzido.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 6.76 - Curvas extensômetro estribo vigas com todos estribos .....	154
Figura 6.77 - Curvas extensômetro estribo vigas com estribo parcial .....	155
Figura 6.78 - Curvas extensômetro armadura vigas com estribo total .....	156
Figura 6.79 - Curvas extensômetro armadura vigas com estribo total .....	157
Figura 6.80 – TREF CE – início do ensaio.....	158
Figura 6.81 – TREF CE – fim do ensaio.....	159
Figura 6.82 – TREF CE – detalhes fissuras.....	159
Figura 6.83 – TREF SE – início do ensaio .....	160
Figura 6.84 – TREF SE – fim do ensaio .....	160

Figura 6.85 – TREF SE – detalhes fissuras.....	160
Figura 6. 86 – TFRES CE – início do ensaio .....	161
Figura 6.87 – TFRES CE – fim do ensaio .....	161
Figura 6.88 – TFRES CE – detalhes fissuras .....	162
Figura 6.89 – TFRES SE – início do ensaio .....	162
Figura 6.90 – TFRES SE – fim do ensaio .....	162
Figura 6.91 – TFRES SE – detalhes fissuras .....	163
Figura 6.92 – TFVI CE – início do ensaio.....	163
Figura 6.93 – TFVI CE – fim do ensaio.....	163
Figura 6.94 - – TFVI CE – detalhes das fissuras .....	164
Figura 6.95 – TFVI SE – início do ensaio.....	164
Figura 6.96– TFVI SE – fim do ensaio .....	164
Figura 6.97– TFVI SE – detalhes das fissuras .....	165
Figura 6.98 – TFVII CE – início do ensaio .....	165
Figura 6.99 – TFVII CE – fim do ensaio .....	166
Figura 6.100 – TFVII CE – detalhes de fissuras .....	166
Figura 6.101 – TFVII SE – início do ensaio .....	167
Figura 6.102 – TFVII SE – fim do ensaio .....	167
Figura 6.103 – TFVII SE – detalhes fissuras .....	167
Figura 6.104 – TFAI CE – início do ensaio .....	168
Figura 6.105 – TFAI CE – fim do ensaio .....	168
Figura 6.106 – TFAI CE – detalhas fissuras .....	168
Figura 6.107 – TFAI SE – início do ensaio.....	169
Figura 6.108 – TFAI SE – fim do ensaio.....	169
Figura 6.109 – TFAI SE – detalhes fissuras .....	169
Figura 6.110 – TFAII CE – início do ensaio .....	170
Figura 6.111 – TFAII CE – fim do ensaio .....	170
Figura 6.112 – TFAII CE – detalhes fissuras .....	170
Figura 6.113 – TFAII SE – início do ensaio .....	171
Figura 6.114 – TFAII SE – fim do ensaio .....	171
Figura 6.115 – TFAII SE – detalhes fissuras .....	171
Figura 7.116 - Campus I PUC Campinas .....	173

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Principais ensaios para concreto com fibras .....	36
Tabela 5.2 - Consumo Unitário do traço base .....	80
Tabela 5.3 - Quantidades de CP's/ Ensaio .....	80
Tabela 5.4 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo natural .....	87
Tabela 5.5 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo natural. ....	87
Tabela 5.6 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo reciclado. ....	89
Tabela 5.7 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo reciclado. ....	91
Tabela 5.8 - Ensaios para caracterização das fibras de aço e vidro. ....	92
Tabela 5.9 - Ensaios para análise das propriedades mecânicas. ....	99
Tabela 6.10 - Composição granulométrica agregado miúdo natural. ....	101
Tabela 6.11 - Demais ensaios realizados. ....	101
Tabela 6.12 - Composição granulométrica agregado graúdo natural. ....	102
Tabela 6.13 - Demais ensaios realizados. ....	103
Tabela 6.14 - Composição granulométrica agregado miúdo reciclado. ....	104
Tabela 6.15 - Demais ensaios realizados. ....	104
Tabela 6.16 - Composição granulométrica agregado graúdo reciclado.....	106
Tabela 6.17 - Demais ensaios realizados. ....	106
Tabela 6.18 - Verificação de abatimento por meio de Slump Test .....	107
Tabela 6.19 - Classificação das consistências do concreto.....	108
Tabela 6.20 - Dados Climáticos.....	111
Tabela 6.21 - Consumo unitário traços.....	112
Tabela 6.22 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias. ....	112
Tabela 6.23 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias. ....	113
Tabela 6.24 - Resistência a Compressão Diametral – 7 dias. ....	116
Tabela 6.25 - Resistência a Compressão Diametral – 28 dias.....	116
Tabela 6.26 - Modulo de Elasticidade – 28 dias. ....	119
Tabela 6.27 - Parâmetros de Carga TREF .....	123
Tabela 6.28 - Parâmetros de Carga TFRES.....	125
Tabela 6.29 - Parâmetros de Carga TFVI .....	126
Tabela 6.30 - Parâmetros de Carga TFVII.....	127
Tabela 6.31 - Parâmetros de Carga TFAI.....	128
Tabela 6.32 - Parâmetros de Carga TFAII.....	129
Tabela 6.33 - Resistência a Fissuração e Residual TREF .....	132
Tabela 6.34 - Resistência a Fissuração e Residual TFRES .....	132
Tabela 6.35 - Resistência a Fissuração e Residual TFVI.....	133
Tabela 6.36 - Resistência a Fissuração e Residual TFVII.....	133
Tabela 6.37 - Resistência a Fissuração e Residual TFAI.....	134
Tabela 6.38 - Resistência a Fissuração e Residual TFAII.....	134
Tabela 6.39 - Cálculo Tenacidade TREF .....	135
Tabela 6.40 - Cálculo Tenacidade TFRES.....	135
Tabela 6.41 - Cálculo Tenacidade TFVI .....	136
Tabela 6.42 - Cálculo Tenacidade TFVII.....	136
Tabela 6.43 - Cálculo Tenacidade TFAI.....	136

Tabela 6.44 - Cálculo Tenacidade TFAII.....	136
Tabela 6.45 - Valores médios Tenacidade.....	137
Tabela 6.46 - Carga a Fissuração média ASTM C-1399.....	141
Tabela 6.47 - Carga a Fissuração média ESB.....	141
Tabela 6.48 - Parâmetros de Carga TFVI.....	145
Tabela 6.49 - Parâmetros de Carga TFVII.....	146
Tabela 6.50 - Parâmetros de Carga TFAI.....	147
Tabela 6.51 - Parâmetros de Carga TFAII.....	148
Tabela 6.52 - Carga Residual média e Resistência Residual Média.....	148
Tabela 6.53 - Tenacidade média C-1399.....	150
Tabela 6.54 – Flecha e Carga máximas.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 6.55 - Flecha e Carga máximas.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## LISTA DE SIMBOLOS

$f_t$	Força de tração[kN]
$P$	Força aplicada [N]
$T$	Teor de ligante [%]
$P_a$	Peso da amostra antes da extração [g]
$P_b$	Peso da amostra depois da extração [g]
$f_{cj}$	Resistência média do concreto a 28 dias [MPa]
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto a 28 dias [MPa]
$S_d$	Desvio padrão da dosagem [MPa]
$f_f$	Resistência a fissuração [MPa]
$P_f$	Carga aplicada que produz fissuração [N]
$a$	Diâmetro do disco de aplicação de carga [mm]
$H$	Altura do corpo de prova [mm]
$f_{R,\delta p}$	Resistência residual correspondente a um determinado deslocamento vertical [MPa]
$P_{\delta p}$	Carga residual correspondente a um deslocamento vertical [N]
$P_{média}$	Carga residual Média [N]
$ARS$	Resistência residual média [MPa]
$L$	Vão do ensaio [mm]
$b$	Largura do corpo de prova [mm]
$d$	Altura do corpo de prova [mm]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1. Objetivo.....	21
1.2. Justificativa.....	22
1.3. Estrutura do trabalho.....	22
2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF).....	24
2.1. Breve Histórico.....	24
2.2. Utilização nos dias atuais.....	27
2.3. Propriedades no estado fresco.....	28
2.4. Propriedades no estado endurecido e interação fibra-matriz.....	29
2.4.1. Resistência à tração.....	32
2.4.1.3.1. Ensaio Barcelona.....	36
2.5. Dosagem.....	38
2.6. Concreto Reforçado com Fibras de Aço.....	39
2.7. Concreto Reforçado com Fibras de Vidro.....	42
3. RESÍDUO DE FRESADO ASFÁLTICO.....	46
3.1. Breve Histórico sobre os resíduos sólidos urbanos (RSU) e Legislação.....	46
3.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD).....	49
3.3. Resíduo de Fresado Asfáltico.....	53
3.3.1. Breve Histórico e Generalidades.....	53
3.3.2. Composição e Geração.....	56
3.3.3. Descarte e Contaminação.....	60
3.3.4. Reciclagem e Reutilização.....	62
4. VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM FIBRAS.....	66
4.1. Flexão e força cortante em vigas de concreto armado.....	66
4.2. Modos de Ruptura.....	70
4.2.1. Ruptura por Flexão.....	70
4.2.2. Ruptura por Cisalhamento.....	71
4.3. Vigas de Concreto Reforçado com Fibras.....	74
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	78

5.1. Materiais utilizados.....	78
5.2. Consumo Unitário .....	79
5.3. Métodos de Ensaio.....	80
5.4. Informações sobre o clima .....	81
5.5. Processo de produção, moldagem e cura dos corpos de prova .....	81
5.6. Propriedades Analisadas do Concreto no Estado Fresco.....	85
5.7. Caracterização dos Agregados Naturais.....	86
5.7.1. Caracterização do Agregado Miúdo.....	86
5.7.2. Caracterização do Agregado Graúdo .....	87
5.8. Caracterização dos Agregados Reciclados .....	88
5.8.1. Caracterização do Agregado Miúdo.....	89
5.8.2. Caracterização do Agregado Graúdo .....	91
5.9. Caracterização das fibras .....	91
5.10. Processo de Fabricação das Vigas.....	93
5.11. Ensaio do Concreto no Estado Endurecido .....	99
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	101
6.1. Caracterização dos Agregados Naturais.....	101
6.1.1. Agregado miúdo.....	101
6.1.2. Agregado graúdo.....	102
6.2. Agregados reciclados .....	103
6.2.1. Caracterização do agregado miúdo reciclado.....	104
6.2.2. Caracterização do agregado graúdo reciclado.....	105
6.3. Concreto no Estado Fresco .....	107
6.4. Concreto no Estado Endurecido.....	111
6.4.1. Resistência a Compressão Axial .....	112
6.4.2. Resistência a Compressão Diametral.....	115
6.4.4. Ensaio Barcelona .....	120
6.4.5. Ensaio ASTM C-1399 .....	138
6.4.6. Ensaio de flexão em 4 pontos em vigas de concreto armado .....	152
6.4.7. Análise Deformação Estribos .....	153
6.4.8. Análise Deformação Armadura Longitudinal .....	156
6.4.9. Análise Visual das Fissuras .....	158
7. Determinação do impacto ambiental do resíduo de fresado asfáltico .....	173
8. CONCLUSÕES.....	178



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	181
----------------------------------	-----



## 1. INTRODUÇÃO

O forte processo de urbanização e crescimento das demandas de consumo de bens materiais, a partir da metade do século XX, tem aumentado consideravelmente a produção de resíduos sólidos nas grandes cidades. Tal fato foi observado por Campos (2012) que afirma que o Brasil, em termos percentuais, possui um crescimento da geração *per capita* de resíduos sólidos superiores ao crescimento populacional. Também observa que o PIB tem crescido menos do que a geração de resíduos sólidos.

Em 2002 o valor da massa de resíduos sólidos urbanos (RSU) coletada foi em média de 0,75 kg/(habitante/dia) (BRASIL, 2009). Em 2015 a massa chegou à ordem de 0,95 kg/(habitante/dia) (BRASIL, 2016). O crescimento de aproximadamente 26,67% na geração de RSU em um período de cerca de treze anos gera preocupação quanto à disposição correta destes materiais.

Outro fator importante é que grande parte destes resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados pela indústria da construção civil em obras de todos os portes, reformas e na demolição de obras civis. São estes os chamados Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

Segundo Pinto (1999) a disposição incorreta do RCD impacta no ambiente urbano e se torna local propício à proliferação de vetores de doenças, aspectos que irão acentuar os problemas de saneamento nas áreas urbanas. Brasileiro e Matos (2015) também afirmam que a urbanização acelerada resulta num crescimento do setor construtivo e conseqüentemente na exploração de recursos naturais e geração de RCD a níveis alarmantes. Cabral (2007) aponta que o RCD constitui aproximadamente 50% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Diversos estudos (RUIZ, 2017; BRASILEIRO, 2017; SACHET, 2013; CABRAL, 2007; ÂNGULO, 2005) apontam que o concreto é um destino viável para a inserção destes resíduos, que anteriormente seriam descartados em lixões e aterros. Majoritariamente estes materiais são inseridos em substituição aos agregados naturais por sua característica inerte. Dentre estes resíduos tem-se o resíduo de fresado asfáltico.

O resíduo de fresado asfáltico é proveniente da manutenção de vias urbanas e rodovias, sendo gerado em grandes volumes. Segundo Sachet, et al (2013) países desenvolvidos utilizam majoritariamente o resíduo de fresado asfáltico para reincorporação em novas vias na forma de base ou revestimentos por processos específicos. Em detrimento aos países desenvolvidos, o Brasil apresenta um cenário um pouco diferente quanto a reutilização e reciclagem do resíduo de fresado asfáltico. Conforme apresentado por Ruiz (2017) no Brasil não existe demanda suficiente para que este resíduo seja totalmente reincorporado a novas vias e este acaba disposto nas beiras de pistas sob as intempéries. Sua desagregação gera entupimento de sistemas de drenagem e contamina corpos hídricos e o solo.

Sendo assim seu uso em concretos em substituição aos agregados naturais é uma importante forma alternativa para destinação correta deste resíduo. Entretanto a NBR 15116 (2004) não valida o uso de RCD na forma de agregado em concretos estruturais. Portanto, estes são majoritariamente utilizados para fins não estruturais.

Em contrapartida existe uma preocupação com a reincorporação de RCD também em concretos estruturais por questões políticas, econômicas e ambientais. Segundo Brasileiro e Matos (2015) a reincorporação de RCD em concretos estruturais é realizada na Europa desde 1980 com a criação de legislações específicas e por conta da escassez de locais para deposição destes resíduos. Segundo Pinto (1999) a reciclagem de RCD já se consolidou na Europa Ocidental, no Japão e nos EUA. Atualmente, o Brasil avança na criação de legislações que regulamentem o uso do RCD em concretos estruturais na forma de agregados.

Além das questões de alocação destes resíduos, a utilização destes em concretos estruturais demanda, da busca de algumas empresas na obtenção de selos e certificações como o LEED (Liderança em Design de Energia e Meio Ambiente), o processo AQUA (Alta Qualidade Ambiental) e outros em seus projetos o que tem impulsionado a necessidade de buscar soluções para incorporação destes resíduos em novas obras.

O controle tecnológico para o tratamento do RCD viabilizaria seu uso estrutural e atenderia ao anseio do mercado por melhor qualidade da estrutura e materiais com capacidade resistente superior. Segundo Dosho (2007) para promover o reuso dos resíduos de construção se faz necessário alcançar três concepções básicas, sendo estas: garantia da segurança do Produto; diminuição do impacto ambiental; diminuição do custo de construção.

Uma alternativa de reciclagem pouco explorada é o uso de RCD em Concretos Reforçados com Fibras (CRF). Bathia e Chan (2000) verificaram a viabilidade do RCD em concreto projetado com fibras e Pietra e Souza (2006) também observaram a viabilidade da inserção de RCD em vigas de CRF, uma vez que a inserção de fibras aos compósitos cimentícios dá novas características a este material.

Pietra e Souza (2006) afirmam que as fibras conferem ao concreto maior tenacidade, resistência ao impacto e maior resistência a fadiga. Resumidamente pode-se dizer que ocorre um melhor controle da fissuração dos concretos, auxiliando não só em sua questão estética como também evitando patologias estruturais. Figueiredo (2000) afirma que as fibras conferem ao concreto um comportamento pseudo-dúctil ao atuarem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, dificultando a propagação das mesmas.

Alguns estudos, como o de Bathia e Chan (2000) têm apresentado a possibilidade de redução nas taxas de armaduras transversais (estribo ou de malhas de aço soldadas) nas peças estruturais com a adição de fibras, principalmente as fibras de aço (LOPES, 2005). Oliveira e Araujo (2005) afirmam que a armadura transversal evita uma ruptura brusca da estrutura antes que ela alcance a ruína. Sendo assim, em concretos reforçados com fibras o compósito ainda possui uma resistência à tração, mesmo após a fissuração da matriz. Dessa forma, os estudos apontam para a possibilidade de substituição parcial da armadura mínima de flexão recomendada nas normas vigentes. Em que esta poderia ser reduzida devido aos efeitos positivos da fibra.

A utilização das fibras também pode gerar ganhos em tempo de execução das concretagens *“in loco”* ou pré-moldadas, uma vez que as fibras podem atuar no lugar da armadura transversal das peças estruturais, substituindo-a

parcialmente. Figueiredo (2011) apresenta que além das vantagens técnicas a presença das fibras pode reduzir etapas do processo produtivo e de mão de obra, garantindo maior velocidade e produtividade no processo.

Apesar disso, ainda não há um consenso sobre um modelo teórico que possibilite a redução das taxas de armadura transversais com índices de segurança satisfatórios, afirmam Trautwein, et al (2014). Sendo assim, torna-se necessário a obtenção de dados experimentais que validem o uso das fibras.

De posse dessas informações, torna-se interessante o estudo da viabilidade de confeccionar peças e concretos estruturais reforçadas com fibras com a incorporação de resíduos em substituição parcial a agregados naturais.

Esta pesquisa buscou apresentar a viabilidade técnica da substituição parcial de agregados naturais grãos e miúdos por resíduo de fresado asfáltico com compatibilidade granulométrica. Também verificou-se o potencial das fibras de aço e vidro, validando suas propriedades mecânicas no compósito por meio de seis traços com diferentes proporções e tipos de fibras.

Ainda foram confeccionadas vigas em concreto armado submetidas à compressão pontual e analisada sua fissuração e capacidade resistente. Foi utilizado o sensoriamento por meio de sensores para maiores dados da deformação da peça estrutural.

### **1.1. Objetivo**

Em consonância com as ideias expostas anteriormente a presente pesquisa teve como objetivo realizar o estudo da incorporação do resíduo de fresado asfáltico em concretos reforçados com fibras para uso em peças estruturais com armadura transversal reduzida.

Para alcançar este objetivo geral, foram adotados os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterização do resíduo de fresado asfáltico para utilização na forma de agregado de construção civil;
- b) Apresentar o potencial de utilização de resíduo de fresado asfáltico em concretos para fins estruturais;

c) Investigar e comparar resultados obtidos por meio de ensaios que quantifiquem as propriedades mecânicas dos concretos reforçados com fibras e adição de resíduo de fresado asfáltico;

d) Análise das propriedades mecânicas de vigas de concreto armado reforçadas com fibras e adição de resíduo de fresado asfáltico por meio da verificação de sua capacidade resistente e sensoriamento estrutural;

## **1.2. Justificativa**

Este trabalho tem por motivação a melhoria de processos em indústrias de concreto pré-moldado e/ou em montagens *in loco*, no que se refere ao uso dos estribos, com a utilização de fibras no concreto. Criando um maior banco de dados na literatura quanto a possibilidade de redução das armaduras transversais em peças estruturais.

Também se almeja, nesta pesquisa, ampliar o conhecimento acerca do uso de resíduos no concreto para fins estruturais, especialmente o resíduo de fresado asfáltico, visando construções mais sustentáveis e diminuindo o uso de agregados naturais. Tais ações visam diminuir o impacto ambiental causado pela Indústria da Construção Civil.

## **1.3. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em oito capítulos, sendo o Capítulo 1 dedicado a Introdução ao tema, objetivos e justificativa.

O Capítulo 2 explana sobre as generalidades dos Concretos Reforçados com Fibras (CRF) contendo breve histórico desta aplicação e suas principais propriedades mecânicas, bem como detalhes sobre o CRF de Aço e CRF de Vidro de Alta Resistência, seus usos, dosagem e principais características. O Capítulo 3 descreve o Resíduo de Fresado Asfáltico bem como sua classificação, histórico da pavimentação, potencial de geração e incorporação ao concreto. O Capítulo 4 descreve brevemente o tema de vigas de concreto armado, apresentando algumas pesquisas atuais com vigas com CRF.

O Capítulo 5 apresenta o Planejamento Experimental. O Capítulo 6 apresenta as Discussões e Resultados. O Capítulo 7 apresenta uma breve análise da viabilidade econômica para aplicação do resíduo de fresado asfáltico.

O Capítulo 8 apresenta a conclusão sobre a pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim estão dispostas as bibliografias e normas técnicas no qual este trabalho foi baseado.



## **2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS (CRF)**

A utilização de fibras na construção civil apresenta inúmeros benefícios ao compósito cimentício, principalmente no que se diz respeito as propriedades mecânicas no estado endurecido, aprimorando suas resistências quanto a tenacidade, resistência ao impacto e maior resistência a fadiga. Assim, este capítulo apresenta uma breve explanação sobre o histórico deste material bem como suas principais características e dando ênfase nos ensaios realizados nesta pesquisa.

### **2.1. Breve Histórico**

O uso das fibras em compósitos utilizados na construção civil remonta à Antiguidade. Tal situação é observada por Bentur e Mindess (2007) em uma passagem bíblica de Êxodo, onde o Faraó ordena aos hebreus para que não utilizem fibras de palha, a fim de dificultar seu trabalho para a fabricação de tijolos, onde observa-se: “Não deveis ajuntar palha para dar ao povo, para fazerem tijolos, como anteriormente. Que eles mesmos vão e ajuntem palha para si.”. Tal processo da citação vernacular é chamado de adobe.

Essa técnica oriunda da antiguidade possui grande eficiência e ainda é aplicada nos dias atuais em construções sustentáveis. Sua utilização apresenta o início do uso das fibras em compósitos da construção civil, onde nota-se a grande importância das fibras naturais de palha seca para garantir a estabilidade destes tijolos.

Existem diversos exemplos de construções em adobe do período antigo, sendo a Cidadela de Bam, localizada em Kerman, Irã, um dos símbolos do uso desta técnica. Segundo Pires (2013), a cidade foi construída entre os séculos VI a IV a.C. numa importante rota comercial e reconhecida pela sua produção de tecidos, seda e algodão. Foi fortificada com muros inteiramente construídos pelo método de apiloamento de capas de adobe.

O método do adobe ainda foi bastante utilizado na Idade Moderna. Em 1540, em um povoado nos Estados Unidos, foi construída a primeira casa

utilizando o adobe reforçado com palha, afirma a ACI 544.1R (1996). Sendo este o primeiro exemplar americano registrado do uso de compósitos com fibras.

Com o advento da Segunda Revolução Industrial e da incorporação do Cimento Portland no mercado os métodos tradicionais e artesanais de construção foram abandonados. Tal situação também ocorreu com o uso das fibras na construção civil. Segundo Tanesi e Figueiredo (1999), o uso não artesanal de fibras se deu apenas entre o final do século XIX e início do século XX por meio do uso das fibras de um mineral chamado amianto ou asbesto em painéis, telhas e placas de pequena espessura. Segundo a ACI 544. 1R (1996) o uso do amianto surgiu em 1898 por meio do processo Hatschek.

Devido ao efeito cancerígeno, teve sua incorporação em peças para construção civil ou demais usos proibidos na União Europeia, que tem se esforçado para realizar a troca deste material. Segundo a ACI 544. 1R (1996), fibras alternativas ao amianto passaram a ser utilizadas entre 1960 e 1970.

No Brasil, até 2017 apenas o amianto do grupo dos anfíbios tinha sua proibição por meio do artigo segundo da Lei 9.055, 1995. Tal medida se mostrou insuficiente, sabendo dos inegáveis efeitos nocivos da variedade crisotila como afirma o Supremo Tribunal Federal (2012). Sendo assim, em novembro de 2017 a variedade crisotila também foi proibida pelo STF.

O uso de fibras em concreto é recente e se deu principalmente porque o concreto é um material compósito multifase, composto basicamente de um aglomerante e seus agregados misturados em água que passou a ser amplamente utilizado nas construções a partir do século XX. Segundo Ducatti (1993), ao se analisar macroscopicamente e microscopicamente pode-se observar que não existe homogeneidade de distribuição das fases do concreto e nem elas próprias são estruturalmente homogêneas.

O concreto convencional tem grande versatilidade e eficiência na construção civil. Porém, com novas solicitações para melhoria do seu desempenho, surge a partir da década de 50 a iniciativa de associar a este compósito proporções de fibras de aço, sendo seus efeitos estudados a partir de pesquisas sistêmicas.

Segundo Lima (1987), a adição de materiais de diferentes naturezas auxilia no desempenho individual de cada material do ponto de vista físico-químico e resistência mecânica. A utilização destas fibras se deu pelo comum aparecimento de fissuras nas matrizes cimentícias por retração plástica.

*Estas fissuras são responsáveis por gerar não só problemas estéticos, mas também patologias estruturais. No concreto simples, uma fissura impede a transferência de tensões, que se concentram na extremidade da fissura, fazendo com que sua propagação seja rápida e haja a ruptura frágil do material. As fibras de aço, mesmo quando utilizadas em baixos teores, conferem ao concreto um comportamento pseudo-dúctil ao atuarem como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, dificultando a propagação das mesmas. Desse modo, o material passa a ter capacidade portante mesmo após a fissuração do concreto. O nível de tensão que a fibra consegue transferir pelas fissuras depende de uma série de aspectos como o seu comprimento e o teor de fibras (FIGUEIREDO, 2000).*

Na contemporaneidade, as fibras são largamente utilizadas em túneis, contenção de taludes, pisos industriais, lajes, entre outros tipos de obras. Segundo Figueiredo (2011), o uso das fibras em substituição as armaduras transversais reduziriam o tempo de execução de etapas no canteiro. Entre as fibras utilizadas na construção civil destacam-se as fibras de aço, fibras de vidro, fibras de carbono, fibras naturais (cocô, sisal, juta, celulose, entre outras) e as fibras poliméricas (poliéster, nylon, polipropileno, poliamidas, entre outras).

As fibras de aço e as fibras polipropileno são as mais comumente utilizadas, principalmente porque estas promovem uma melhora significativa em diversas propriedades mecânicas da matriz, com destaque para a tenacidade à flexão, a resistência à fadiga e ao impacto, afirma Salvador (2013). Segundo Silva (1970), ocorrem diferenças nas propriedades dos concretos reforçados com fibras quando comparados ao concreto convencional tanto no estado fresco como no estado endurecido, sendo o efeito variado pelo tipo, dimensão, composição, forma e dosagem da fibra analisada.

Esta pesquisa tratou da confecção de concretos reforçados com fibras de aço e fibras de vidro. Sendo dado o devido enfoque nestes materiais ao longo do trabalho.

## 2.2. Utilização nos dias atuais

Segundo Salutes (2006), na contemporaneidade as principais aplicações do concreto reforçado com fibras são:

a) Pavimentos de rodovias, aeroportos e indústrias. Por conta de sua resistência a propagação de fissuras combinada a sua resistência ao impacto e aos ambientes agressivos;

b) Concreto projetado para revestimento de túneis, estabilidade de taludes e reparo de superfícies irregulares ou deterioradas. Por conta da possibilidade de retirada da tela soldada de aço, reduzindo custos e tempo de obras e auxiliar em um cobrimento com maior facilidade;

c) Tubos de concreto para saneamento urbano (NBR 15319:2007). Sua aplicação melhora à resistência ao impacto, abrasão e cavitação das peças;

d) Peças de concreto pré-moldado. As fibras entrariam como complemento da armadura principal garantindo o não aparecimento de fissuras e reduzindo o tempo para montagem de armaduras, já que ocorreria uma diminuição na quantidade de estribos;

e) Entre outras aplicações de menor importância tem-se a construção de caixas forte de bancos, postos policiais blindados ou cabines de segurança, bases de máquinas, juntas de dilatação de tabuleiros de pontes, tampas de caixas de inspeção elétricas, tanque de armazenamento de líquidos entre outros;

Além dos usos apresentados o concreto reforçado com fibras pode ser aplicado em placas de revestimento para atender questões estéticas como foi realizado no Centro Heydar Aliyev localizado no Azerbaijão e projetado pela arquiteta Zaha Hadid. Segundo Kindle (2014), o concreto reforçado com fibras de vidro foi utilizado como solução para revestimento do edifício.

### 2.3. Propriedades no estado fresco

As adições de fibra ao concreto os tornam menos trabalháveis, principalmente pelo formato alongado deste material. Segundo Silva (1990) em geral quanto maior o teor e a relação de aspecto das fibras mais difícil a trabalhabilidade dos compósitos. Assim, a maneira mais adequada de se medir a consistência do concreto fibroso pode divergir em relação ao concreto comum, já que os métodos de abatimento acabam por romper as fibras durante o ensaio.

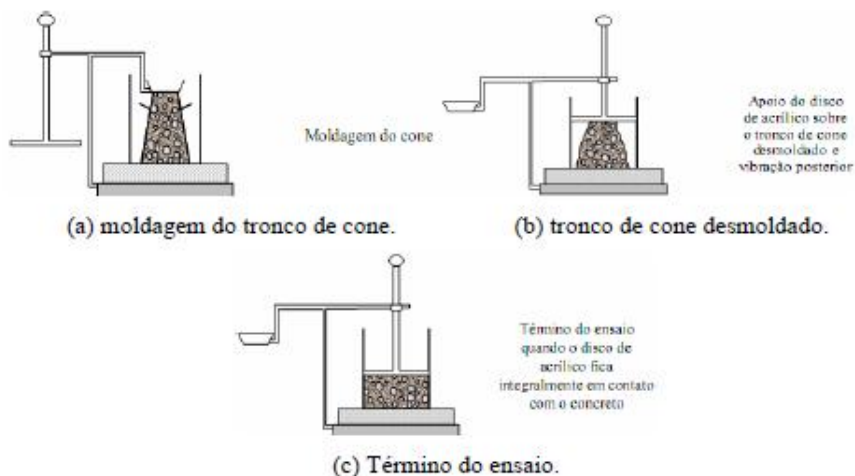
Segundo Junior (2009), a ACI 544.3R-93 recomenda três diferentes métodos para medir a trabalhabilidade do CRF: o primeiro é o *Slump Test* convencional para dosagens de fibra não muito elevadas; o segundo método utilizado é cone Abrams invertido; e o terceiro, e mais indicado para o CRF é o método VeBe.

O ensaio *Slump Test* não foi detalhado por ser amplamente conhecido no meio técnico.

O método do cone Abrams invertido consiste no preenchimento do tronco cone com concreto e adensamento por meio da inserção de vibrador de imersão. O cone é elevado em sua posição invertida e numa superfície plana é medido o espalhamento e o tempo de escoamento.

Em relação ao método VeBe a norma DNIT 64/2004 ME afirma que o Grau VeBe é determinado pelo tempo decorrido para remodelar o concreto no consistômetro VeBe e passá-lo para uma nova forma cilíndrica. A Figura 2.1 apresenta o procedimento do método VeBe, onde tem-se a moldagem do consistômetro VeBe no item “a”. Após o adensamento a forma é removida. Em seguida é realizado o encaixe de uma forma cilíndrica conforme o item “b”. Com auxílio de um cronômetro e uma mesa vibratória é observado o tempo de adensamento total da forma cilíndrica conforme ilustra o item “c”.

Figura 2.1 - Método VeBe.



Fonte: Figueiredo (2000).

Figueiredo (2011) afirma que a alteração das características no estado fresco está intimamente ligada a composição das fibras, teor de dosagem e sua geometria. Ademais, a fibra passa a restringir a mobilidade relativa das partículas, especialmente agregados de maiores dimensões, dificultando a fluidez da mistura. Além disso, a área superficial das fibras demanda água de molhagem, assim são necessárias maiores quantidades de água de molhagem, diminuindo a mobilidade e aumentando a coesão do compósito no estado fresco.

#### 2.4. Propriedades no estado endurecido e interação fibra-matriz

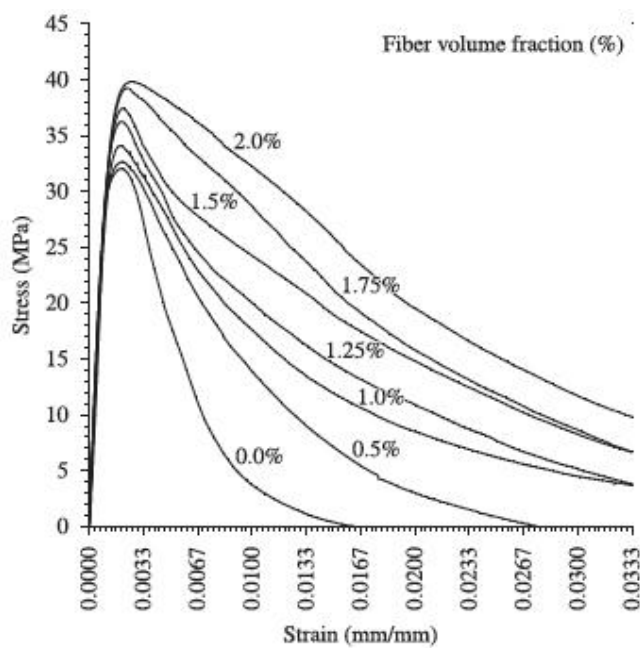
Pietra e Souza (2006) afirmam que as fibras conferem ao concreto maior tenacidade, resistência ao impacto e maior resistência a fadiga. Resumidamente pode-se dizer que ocorre um melhor controle da fissuração dos concretos, auxiliando não só em sua questão estética como também evitando patologias estruturais. Bentur e Mindess (2007) afirmam também que as fibras têm pouco efeito em relação à Resistência a Compressão do concreto.

Diante de tais fatos, observa-se a capacidade das fibras em aprimorar certas propriedades do concreto em seu estado endurecido e inaltera outras, porém a característica em que mais se destaca o CRF é a interação existente entre as fibras e a matriz cimentícias. Salvador (2013) afirma que a ação principal

das fibras no concreto endurecido ocorre após a fissuração da matriz. Tal fato é confirmado na Figura 2.2, onde tem-se a relação típica de tensão por deformação em concreto reforçados com fibras através de resultados obtidos por Marara, *et al* (2011). Observa-se que as fibras passam a criar uma ponte de transferência de tensões e controlar a fissuração, elevando assim a resistência a tensão aplicada

A Figura 2.3 ilustra a distribuição das tensões em concretos com e sem adição de fibras. Bentur e Mindess (2007) afirmam que a eficiência da interação entre as fibras e a matriz cimentícia depende da adesão física e química entre os materiais, do atrito e da ancoragem mecânica devido ao formato das fibras. Afirmam também que a forma mais comum de quantificar a energia de ligação entre fibras e concreto são ensaios arranchamento (single pull-out), onde pode ser previsto o comportamento do concreto pós-fissuração.

Figura 2.2 - Relação Tensão/ Deformação em diferentes dosagens de concreto com fibras



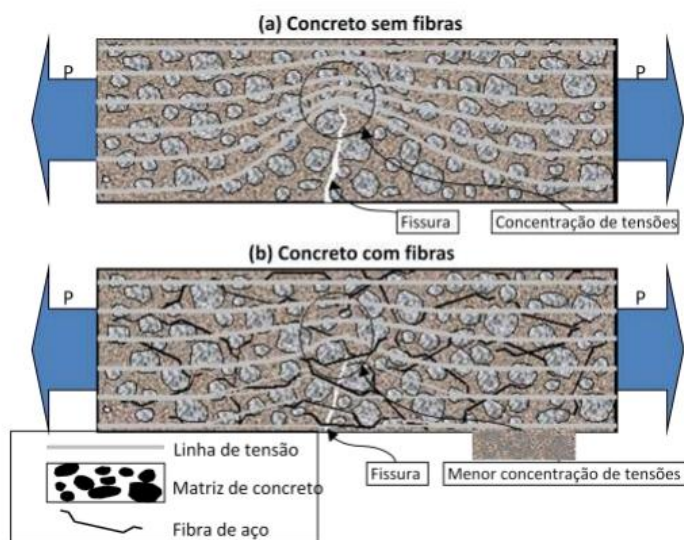
Fonte: Marara, *et al* (2011).

Segundo Neto (2004) a interação entre os materiais compósitos do concreto é determinante para sua resistência.

Quando se adicionam fibras de resistência e módulo de elasticidade adequados e num teor apropriado, o concreto deixa de ter o caráter marcadamente frágil. Isso ocorre pelo fato de a fibra servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, cuja concentração de tensões nas extremidades será então minimizada. Com isso, tem-se uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no compósito que passa a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil (FIGUEIREDO, 2011)

Segundo Bentur e Mindess (2007) muitas vezes é criada no entorno das fibras alterações na microestrutura da matriz denominada zona de transição interfacial. A presença desta microzona confere ao entorno da fibra novas propriedades mecânicas que podem afetar as resistências obtidas no compósito. Este fato pode ser observado na Figura 2.3. Barros (2009) afirma também que para uma boa interação entre os materiais a razão entre o comprimento da fibra e a dimensão máxima do agregado deve ser de 1,50 a 2,00.

Figura 2.3 - Configuração a concentração de tensões em concretos com e sem fibras.



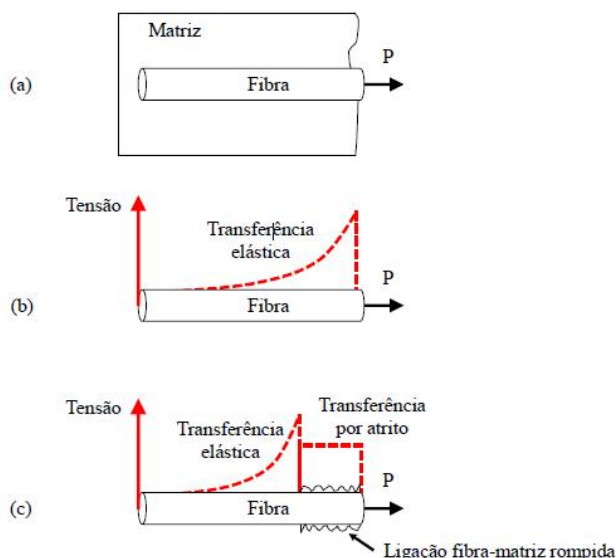
Fonte: Figueiredo (2000).

Também afirmam que os processos de transferência de tensões nas fases pré e pós fissuração são diferentes. Na fase pré-fissuração as tensões são predominantemente elásticas e os deslocamentos entre a fibra e matriz são geometricamente compatíveis. Na fase pós-fissuração ocorre a quebra da interface e o processo de transferência se dá normalmente por atrito gerado no deslizamento da fibra na matriz. A transição entre a transferência elástica e a



transferência por atrito ocorre quando a tensão de cisalhamento, devido a aplicação da carga, supera a tensão de aderência. A Figura 2.4 ilustra esta situação, onde (a) é o compósito sem aplicação de carga, (b) compósito na fase de pré-fissuração e (c) compósito na fase de pós-fissuração.

Figura 2.4 - Configuração a concentração de tensões em concretos com e sem fibras.



Fonte: Adaptado de Salvador (2013).

Nos tópicos que se seguem foi apresentada uma análise mais detalhada das propriedades mecânicas do CRF em seu estado endurecido, cujas resistências são aprimoradas na presença de fibras e utilizadas como fontes de análises desta pesquisa.

#### 2.4.1. Resistência à tração

Segundo Figueiredo (2000) afirma que na inserção de fibras se observa melhor capacidade resistente a tração.

Salutes (2006) afirma que a tração é o mecanismo responsável pela aderência e pela interface matriz-fibras. Se tratando de CRF Mathew, et al (2015) verificaram que a incorporação de fibras pode aumentar a resistência a tração do concreto de forma elevada. Gois (2010) afirma que a resistência a tração está

diretamente ligada a dosagem de fibras presentes no concreto, sendo em dosagens superiores as 1,50% já se observa ganhos relevantes.

Segundo Mehta e Monteiro (2006), quanto maior a resistência à tração do material, menor será o risco de aparecimento de fissuras. Afirmam também que para o material não sofrer com os efeitos da retração plástica deve possuir baixo módulo de elasticidade, alta fluência e elevada resistência à tração. Sendo assim, normalmente em CRF a presença das fibras eleva a resistência à tração do compósito e posterga o aparecimento de fissuras nas peças estruturais.

Mehta e Monteiro (2006) afirmam também que a forma da curva tensão-deformação, o módulo elástico e a razão de Poisson do concreto sob compressão diametral, ou tração indireta são semelhantes àquelas sob compressão axial. Ainda afirmam que existe uma relação entre resistência a tração e resistência a compressão do concreto, sendo a resistência a tração um valor da ordem de 7% a 11% do valor da resistência a compressão.

Esta relação já é esperada, visto que os projetos são realizados com a suposição de que concreto apresenta maior resistência à compressão e menor resistência à tração. Vale lembrar que nem sempre esta relação é obedecida em vista da ampla variedade de dosagens, tipos de materiais empregados, tipos de adições e etc.

Neville e Gerald (2015) destacam a importância da verificação da Resistência a Tração também em canteiros de obras que possuam prensas com menores capacidades de carga, onde é possível realizar, por exemplo, ensaios de tração indireta e com o valor obtido validar a resistência à compressão do compósito.

Segundo Milton (2001) a resistência à tração de um concreto pode ser obtida por meio de três tipos de ensaios: ensaio de tração direta; ensaio de tração por compressão diametral ou tração indireta; e ensaio de tração na flexão. O autor também afirma que as diferentes distribuições de tensões em cada tipo de ensaio geram diferentes resultados para a tração, levando a diversos autores procurar estabelecer relações entre os diferentes tipos de ensaios.

A seguir, tem-se a descrição dos ensaios de avaliação de resistência à tração mais comumente utilizados para o CRF.

#### **2.4.1.1. Ensaios de tração direta**

Segundo Mehta e Monteiro (2006) os ensaios de tração direta são raramente aplicados pela sua complexidade. Os mais utilizados são ASTM C 496 e ASTM C 78, porém existem outros bastante utilizados para obtenção da tração direta, conforme alguns exemplos abaixo.

a) Ensaio com corpo de prova em forma de osso de cachorro (dog-bone test): Este ensaio consiste em produzir corpos de prova com a zona central reduzida ficando em formato de um osso de cachorro. Salutes (2006) afirma que a configuração neste formato permite um melhor controle de estabilidade sempre que as pontas não sejam demasiadamente frágeis e a fissuração esteja distribuída. Quando ocorre uma única trinca e deslocamento lateral o ensaio não se torna favorável para análise pós-fissuração.

b) Ensaio com corpo de prova entalhado: devido a grande maioria dos ensaios de tração para o Concreto Reforçado com Fibras serem associados a tensão uniaxial se tem sugerido a criação de corpos de prova entalhados com diferentes configurações para verificar respostas em pontos determinados. Segundo Salutes (2006), o objetivo deste ensaio é forçar o aparecimento de fissuras ao longo do plano entalhado.

c) Ensaio com corpo de prova cilíndrico entalhado: Segundo Salutes (2006), os ensaios de tração utilizando corpos de prova cilíndricos entalhados se tornam mais interessantes ao se analisar a relação tensão aplicada pela abertura de fissuras, esta que pode ser considerada como uma propriedade mecânica da fratura do material.

#### **2.4.1.2. Ensaios de tração indireta ou Ensaio Brasileiro**

Segundo Salutes (2006), o ensaio brasileiro é um método que consiste em aplicar uma carga externa à compressão em uma das faces cilíndricas do corpo de prova enquanto sua face oposta se encontra completamente apoiada. Thomaz (2004) afirma que o ensaio surgiu por meio de uma ideia do Engenheiro Lobo Carneiro durante a obra de abertura da Avenida Presidente Vargas no Rio de Janeiro em 1943, quando foi necessário deslocar a Igreja de São Pedro para continuidade da obra e evitar que a mesma fosse demolida. Para tal elaborou-se

rolos de concreto com 60 cm de diâmetro que foram instalados abaixo das fundações da igreja a fim de deslocá-la lateralmente.

Ao realizar ensaios para verificação do suporte do concreto dos rolos para o peso da estrutura da igreja o engenheiro notou uma fissura vertical no centro do corpo de prova quando o mesmo era posicionado na posição horizontal entre os pratos da máquina. Após uma análise teórica se propôs em estudar a resistência à tração deste material, surgindo assim o Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral hoje normatizado pela NBR 7222:2011.

#### **2.4.1.3. Ensaios de Tração na Flexão e Tenacidade**

Além da tração, a tenacidade também está entre as propriedades do concreto com fibras de maior destaque, sendo estas intimamente ligadas. Segundo Silva (1990), ao se analisar o rompimento na relação Carga x Deslocamento do concreto reforçado com fibras nota-se uma curva linear até a abertura da primeira fissura. O segundo momento chamado Pós-fissuração tem comportamento não linear até o momento de ruptura do material.

A presença das fibras prolonga o processo de ruptura pela absorção de energia, sendo assim ocorre um considerável aumento da tenacidade. Guimarães (1999) define tenacidade como uma propriedade dos corpos que absorvem grande quantidade de energia antes de se romperem.

Sendo assim, conhecer o momento de abertura de fissuras é extremamente importante para delimitar a tenacidade que ocorre imediatamente após a primeira microfissura. Segundo Milton (2001), a abertura das fissuras ocorre quando a tensão principal máxima atinge a resistência à tração do concreto e para sua análise tem sido adotado dois modelos, sendo respectivamente chamados modelo de fissura discreta e modelo de fissura.

Sua avaliação é realizada por meio de ensaios de tração na flexão com velocidade de deformação controlada. Entre elas tem-se a ASTM C 1018, EN-14651, JSCE SF4 e Ensaio Barcelona. A Tabela 1.1 apresenta os principais ensaios realizados em concretos com adição de fibras.

Tabela 1.1 - Principais ensaios para concreto com fibras

<b>Ensaio</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	<b>Massa Estimada (kg)</b>
ASTM C-018	100x100x350	8,40
NBN 15 – 238	150x150x600	32,40
ASTM C-1399	100x100x400	9,60
EFNARC – VIGA	125x75x550	12,40
RILEM 162 – TDF	125x75x550	12,40
EN-14651	150x150x550	29,70
ENSAIO BARCELONA	150xφ150	6,40

Fonte: Adaptado de Malatesta et al (2009).

#### **2.4.1.3.1. Ensaio Barcelona**

Para o controle tecnológico do concreto com fibras são propostos diversos ensaios para determinação da tenacidade ou da resistência residual pós-fissuração no ensaio de flexão em prismas. Existem alguns ensaios alternativos como é o caso do Ensaio Barcelona.

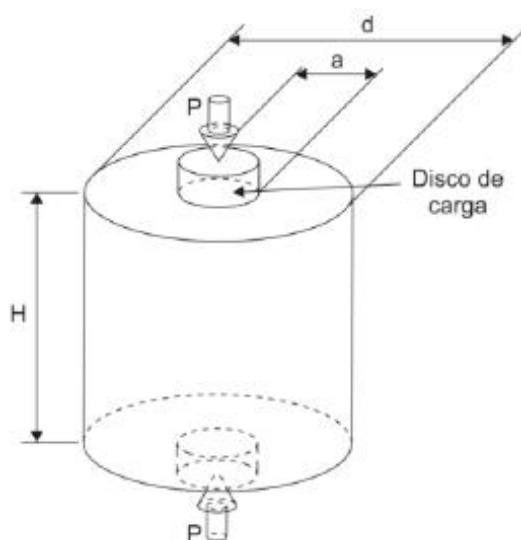
Este ensaio se torna de grande confiabilidade principalmente porque se utiliza de um sistema fechado de controle de velocidade. Conforme afirma Salvador (2013) o método é mais preciso para determinação da tenacidade e da resistência residual pós-fissuração de matrizes cimentícias reforçadas com fibras, pois é baseado em um sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento (*closed-loop*). Utilizando esse sistema, obtém-se uma grande diminuição da instabilidade após rompimento da matriz cimentícia, conferindo maior confiabilidade à caracterização de diferentes fibras para reforço de concreto.

Segundo Monte (2015), o Ensaio Barcelona se trata de uma alteração do ensaio de duplo puncionamento proposto por Chen em 1970 visando a análise da tenacidade em concretos reforçados com fibras. Posteriormente o ensaio foi normatizado na Espanha por meio da AENOR UNE 83515 (2010) para avaliar o comportamento pós-fissuração do concreto reforçado com fibras por meio do duplo puncionamento de corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos, sendo que o diâmetro deste corpo deve ser igual a sua altura e o puncionamento feito por meio de dois discos de cargas centrados nas superfícies superior e

inferior do corpo de prova cilíndrico, sendo que a proporção entre estes deve ser de 1:4 em relação ao diâmetro e de 1:5 em relação à altura.

Ao se aplicar cargas são induzidas tensões de tração sobre os planos que contém o eixo cilíndrico e o corpo de prova se fratura ao redor destes planos (SALUTES, 2006 apud MONTE, 2015). A Figura 2.5 apresenta o esquema de configuração do Ensaio Barcelona.

Figura 2.5 - Configuração do Ensaio Barcelona.



Fonte: Monte, 2015.

Segundo Malatesta (2009) durante o ensaio a carga aplicada produz nas placas uma zona de compressão cônica originando um aumento do diâmetro do cilindro por conta dos esforços de tração perpendiculares as linhas radiais do corpo de prova. Quando esta tensão supera a resistência do concreto ocorre a fissuração do corpo de prova.

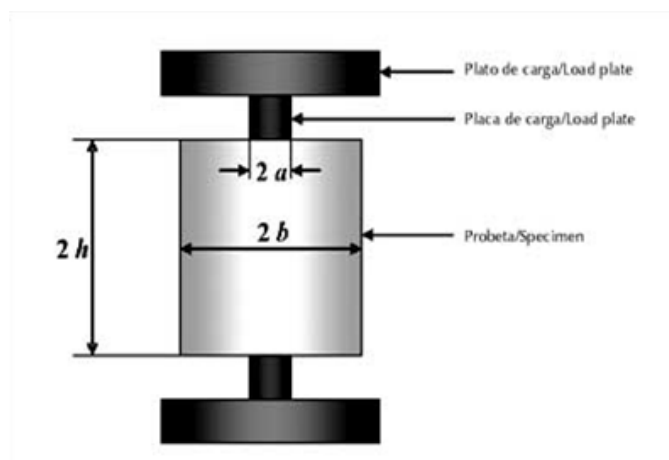
Devido à concentração de tensões nos planos concêntricos no momento do rompimento surgem fissuras radiais perpendiculares ao campo de tensões. Estas fissuras se propagam a partir do centro do corpo de prova, especificamente desde o ponto de aplicação de carga até o anel de sensores no meio do cilindro. Uma vez ocorrida a primeira fissuração aparecem apenas mais uma ou duas outras fissuras.

No caso do Ensaio Barcelona é considerado as dimensões geométricas do corpo de prova e das cunhas baseando-se no modelo elástico de distribuição de tensões usando o modelo de bielas e tirantes proposto por Chen (1970) e Salutes (2003) conforme apresenta a Equação 1.

$$f_t = \frac{P}{9 \times \pi \times a \times h} \quad (1)$$

Em que,  $f_t$  = é a resistência do corpo de prova;  $P$  = é a força aplicada pela cunha e  $a$  e  $h$  as dimensões geométricas propostas na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Configuração geométrica do Ensaio Barcelona.



Fonte: Malatesta et al (2009).

## 2.5. Dosagem

Devido às propriedades das fibras adicionadas ao compósito o processo de dosagem deve ser realizado a fim de aperfeiçoar os benefícios desta adição. Conforme recomenda a ACI 544.1R (1996) deve-se prover uma elevada taxa de argamassa para que as fibras sejam completamente envolvidas e de uma razão em que o comprimento da fibra seja três vezes maior que o diâmetro médio do agregado graúdo.

Comumente são fixados valores em massa por metro cúbico para ser aplicados ao concreto. Segundo Figueiredo (2011), para se garantir a viabilidade econômica e desempenho adequado deve-se aplicar metodologias de dosagem que otimizem o consumo de fibras, sendo esta dosagem diretamente ligada ao uso e aplicação deste concreto, bem como os requisitos de resistência da matriz.

Segundo Figueiredo (2011) os principais métodos para dosagem se baseiam nos seguintes tópicos: consistência plástica, correlação tenacidade x teor de fibras, dosagem da matriz e dosagem da fibra.

Se tratando de concreto com fibras de aço, Bentur e Midess (2007) afirmam que as dosagens a partir de 2% (do volume de concreto) já são suficientes para ação contra a fissuração por retração plástica. Já dosagens acima de 2% até 6% já apresentam reforço estrutural efetivo. No caso de fibras de vidro Baluenga e Hernandez-Olivares (2007) observaram efeitos positivos na fissuração por retração plástica a partir de dosagens de 0,1%.

O uso de CRF com resíduos em substituição aos agregados naturais ainda é pouco explorado. Esta pesquisa visou à utilização de CRF com resíduo de fresado asfáltico em substituição a agregados naturais. O próximo capítulo explana sobre este resíduo.

## **2.6. Concreto Reforçado com Fibras de Aço**

As fibras de aço são elementos descontínuos produzidos com uma variada gama de formatos, dimensões e mesmo de tipos de aço (FIGUEIREDO, 2010). Segundo Furlan (1995) tem sido utilizada em concretos para vencer algumas das suas limitações como a fragilidade, pequena capacidade de deformação e baixa resistência à tração. Geralmente a adição das fibras não visa o aumento de resistência, embora em algumas situações ela ocorra, mas o melhor controle da fissuração e o aumento da ductilidade na etapa posterior à fissuração.

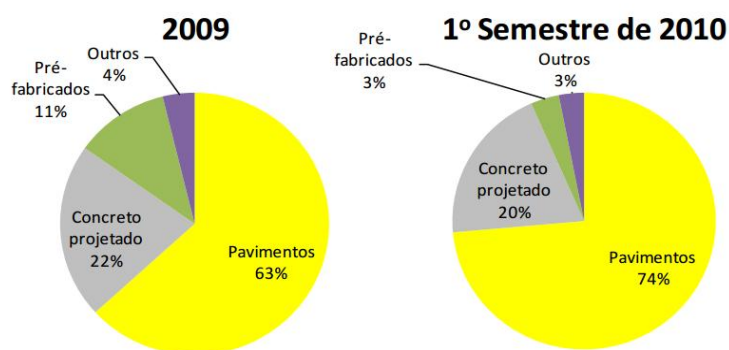
Segundo Kwak, et al (2002), a adição de fibras de aço em vigas de concreto armado visa aumentar sua resistência ao cisalhamento, se adicionadas



em proporções suficientes. Esta adição pode ainda suprimir o aparecimento de fissuras, possibilitando um comportamento mais dúctil.

Figueiredo (2011) afirma que no Brasil as fibras de aço são as mais utilizadas, estando quase em sua totalidade aplicadas a pisos industriais, concreto projetado e peças pré-moldadas respectivamente, conforme ilustra a Figura 2.7. A aplicação é feita de maneira empírica com ausência do controle de qualidade do compósito, bem como não é feito estudo para otimização da dosagem, dado que não ocorre verificação do desempenho deste material.

Figura 2.7 - Distribuição do uso da fibra de aço no mercado brasileiro.



Fonte: Figueiredo, 2011.

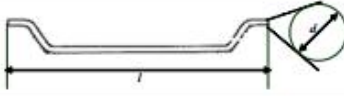
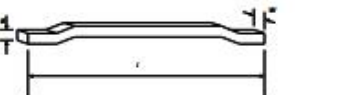
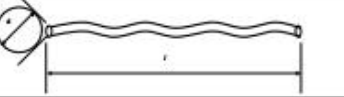
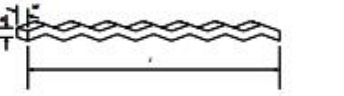
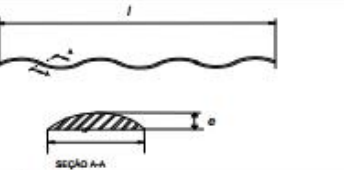
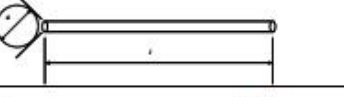
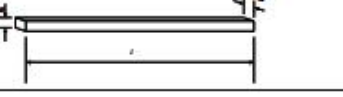
Ainda afirma que tal quadro deve mudar nos próximos anos visto que existem novas demandas de obras, principalmente na área do saneamento básico. Sendo assim se torna necessário o avanço do conhecimento dos concretos reforçados com fibras de aço para que tal tecnologia seja completamente incorporada ao mercado.

Segundo Guimarães (1999), geralmente, as fibras de aço de secção transversal circular possuem diâmetros entre 0,25 mm e 0,76 mm. As fibras de aço com secções retangulares possuem espessura de 0,15 mm a 0,41 mm e larguras de 0,25 mm a 0,90 mm. Figueiredo (2010) também afirma que as fibras de aço possuem extremidades na forma de gancho para aumentar sua ancoragem e têm comprimento variando entre 25 mm (fibras curtas) a 60mm (fibras longas) sendo fornecidas soltas ou coladas em pentes. Estes pentes são

colados com cola solúvel em água em grupos de 10 a 30 fibras para facilitar o manuseio da mistura (GUIMARÃES, 1999).

A Figura 2.8 ilustra os tipos e classes de fibras conforme estabelecido na norma NBR 15530 (2007).

Figura 2.8 - Tipos e Classes das fibras de aço.

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

Fonte: Figueiredo *et al*, 2008 *apud* Figueiredo 2011.

A NBR 15530 (2007) classifica os tipos de fibras de aço de baixo teor de carbono e dispõe sobre os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento. A norma separa as fibras em três tipos básicos em função de sua geometria, sendo denominado de Tipo A as fibras de aço com ancoragem nas extremidades, Tipo C as fibras de aço corrugadas e de Tipo R as fibras de aço retas. A norma ainda as classifica conforme seu processo de fabricação sendo a Classe I oriunda de

arame trefilado a frio, Classe II oriunda de chapa laminada e cortada a frio e Classe III oriunda de arame trefilado e escarificado.

## **2.7. Concreto Reforçado com Fibras de Vidro**

O vidro é uma substância sólida amorfa obtida pelo resfriamento de uma massa líquida à base de sílica. Segundo Alucci et al, 2015 sua origem remonta a antiguidade por volta de 5.000 a.C. quando mercadores fenícios descobriram acidentalmente o novo material ao fazerem uma fogueira sobre a qual apoiaram blocos de nitrato de sódio, material utilizado para segurar as panelas. O fogo unido a areia e ao nitrato de sódio originou um líquido transparente que ao resfriar-se entrava em estado sólido.

Ao longo dos séculos a tecnologia do vidro se aprimorou e este também passou a ser utilizado também em concretos na forma de fibras. Segundo Ferreira e Branco (2009) o Concreto Reforçado com Fibras de Vidro (CRFV) consiste em uma matriz cimentícia na qual são dispersas fibras de vidro. Higuero (2010) afirma que as fibras de vidro são materiais fibrosos e mesmo em seu estado sólido apresentam flexibilidade suficiente para serem utilizados em concretos.

Bentur e Mindess (2007) afirmam que as fibras de vidro produzidas atualmente passam por processo de formação de fios e são divididas em dois tipos: as fibras contínuas vendidas em forma de cordoalhas, mantas ou rolos e as fibras do tipo picada. O segundo tipo é o mais adequado para o uso na construção civil. No caso das mantas ou rolos existe um maior espaçamento entre os fios para que o concreto transpasse o material.

Peruzzi (2002) afirma que embora as fibras de vidro sejam confeccionadas com um material frágil elas possuem propriedades satisfatórias para o emprego na construção civil, como: baixo coeficiente de dilatação térmica, resistência à tração e à vibração, retenção das propriedades mecânicas em altas temperaturas, grande alongamento na ruptura, facilidade de processamento, baixo custo em comparação a outras fibras.

Segundo Arabi, et al (2018) as fibras de vidro possuem características superiores as demais fibras orgânicas e inorgânicas, porém durante a hidratação

do cimento ocorre a degradação destas fibras por conta da baixa resistência ao meio alcalino do concreto. Em vista de evitar esta reação as fibras de vidro são normalmente recobertas com filme polimérico de PVA (Fibras de Vidro Tipo E). Bentur e Mindess (2007) também afirmam que foram desenvolvidas fibras resistentes a alcalinidade sem a necessidade do cobrimento polimérico (Fibras de Vidro Tipo Ar).

Outro fator da necessidade de proteção das fibras de vidro é explicado por Tavares e Giongo (2009), onde afirma que a fibra de vidro apresenta um comportamento estrutural elástico linear sem apresentar fadiga quando submetida a tração, o que torna seu uso em concreto de grande interesse. Entretanto em contato com a água a mesma se torna extremamente reagente e frágil. Assim, estas fibras devem ser cobertas com filme protetor polimérico que aumenta o poder de adesividade da mesma e a protege dos efeitos negativos da presença de umidade.

Bentur e Mindess (2007) abordam que além do cobrimento polimérico foram também realizadas pesquisas para reduzir o nível de alcalinidade dos concretos por meio de adições de sílica ativa, cimento com altos teores de alumina ou ainda de cimentos modificados com polímeros. Tais pesquisas visaram apresentar a viabilidade de utilização do CRFV em longo prazo. A Figura 2.9 apresenta uma imagem de microscopia da fibra de vidro na matriz de concreto.

Figura 2.9 - Fotografia de microscopia de matriz cimentícias com fibras de vidro.



Fonte: Peruzzi (2002).

No mercado existem dois tipos de fibras de vidro mais comumente comercializadas na construção civil, sendo elas a Tipo Vidro-E e Tipo Vidro AR (álcali-resistente).

Segundo Higuero (2010) a fibra de vidro tipo E surgiu em meados de 1930, quando o vidro foi considerado um material do futuro devido às suas propriedades, sendo mais comumente utilizada na indústria têxtil e também na construção civil. Após a criação da fibra de vidro tipo E surgiram outros tipos como a fibra de vidro tipo R utilizada no setor aviação, aeroespacial e bélico, fibra de vidro tipo D utilizada em circuitos eletrônicos e a fibra de vidro tipo C utilizada em materiais resistentes à corrosão, como tubos.

Higuero (2010) afirma que as fibras de vidro Tipo AR foram desenvolvidas especialmente para concretos por volta de 1967 no Reino Unido. São aplicadas principalmente na confecção de placas, telhas e elementos que anteriormente levavam o amianto. Sendo observado que o material não perde suas propriedades ao longo das idades na utilização desta fibra.

Nesta pesquisa foram utilizadas fibras de vidro tipo AR.



### 3. RESÍDUO DE FRESADO ASFÁLTICO

O resíduo de fresado asfáltico é classificado como um resíduo sólido urbano de construção e demolição proveniente do desmonte e manutenção de vias urbanas, rodovias e estradas. A incorporação deste resíduo em concretos na forma de agregado se torna uma maneira alternativa de destiná-lo corretamente e de reduzir a extração de agregados de jazidas naturais. Para tal aplicação primeiramente é necessário conhecer, classificar e apresentar as principais propriedades deste resíduo. Assim, este capítulo apresenta uma breve explanação sobre o histórico deste material bem como a legislação vigente, suas principais características e os resultados apresentados em estudos em que este material foi incorporado ao concreto.

#### 3.1. Breve Histórico sobre os resíduos sólidos urbanos (RSU) e Legislação

Os resíduos sólidos urbanos, ou popularmente “lixo”, tem sua origem diretamente ligada ao processo de organização social e dos processos de urbanização. A palavra lixo tem sua origem no Latim, em sua forma original “Lix”, que significa lixívia ou cinzas e a palavra “resíduo”, também proveniente do Latim, em sua forma original “Residuu” significa sobra.

Segundo Brasileiro e Matos (2015) a preocupação com os impactos ecológicos surgiu apenas após a Revolução Industrial, pois anteriormente a geração de resíduos era pequena e havia uma assimilação ambiental maior. Percebeu-se a partir do século passado por meio de estudos de impacto ambiental que os resíduos haviam se tornado um grande problema para a sociedade e que o crescimento populacional unido a um maior acesso a bens de consumo acabaria por aumentar a produção de resíduos sólidos produzidos no meio urbano. Em vista disso, diversos países passaram a estabelecer formas de solucionar ou amenizar este problema.

Nos anos 70 as políticas de controle de resíduos sólidos buscavam estabelecer normas referentes à forma mais adequada de coleta e, principalmente, de disposição do material descartado.

Nos anos 80 enfatizou-se as formas de pré-tratamento e a destruição desse material. Atualmente a tendência nos países industrializados é o estabelecimento de critérios e incentivos que permitam a implantação de programas de prevenção e redução de resíduos na fonte geradora, assim como programas de recuperação dos recursos dos resíduos (BROLLO, 2001).

Na esfera política global surgiram diversos marcos que consolidam uma sequência de atitudes buscando reduzir os impactos causados pelos resíduos. Segundo Brollo (2001) a Agenda 21 constitui um dos mais importantes marcos desta integração de ideias em nível mundial, buscando alcançar o desenvolvimento sustentável a médio e longo prazo, onde são apontadas algumas propostas específicas para o problema dos resíduos sólidos, com destaque para os seguintes itens:

- a) Reduzir o volume de resíduos gerados por meio do desenvolvimento de tecnologias limpas e análise do ciclo de vida dos novos produtos a serem colocados no mercado;
- b) Reutilização de materiais, com destaque para embalagens;
- c) Recuperar ou extrair substâncias de resíduos que possuam valor comercial;
- d) Reciclar promovendo o reaproveitamento cíclico das matérias-primas;
- e) Tratar resíduos por meio de transformações químicas, físicas ou biológicas, como, por exemplo, a compostagem;
- f) Promover práticas de disposição final ambientalmente segura;
- g) Identificar e reabilitar áreas contaminadas por resíduos;
- h) Ampliar o gerenciamento dos resíduos da coleta a disposição final;

Brollo (2001) afirma que no âmbito federal existem inúmeras iniciativas para a organização de procedimentos visando a proteção ao meio ambiente e o desenvolvimento sustentável, que embora genérica e muitas vezes impraticável pela falta de instrumentos e recursos adequados, tem auxiliado na área de resíduos. Com destaque para a Lei Federal nº5.318/67 que institui a Política



Nacional de Saneamento, a Lei Federal nº6.938/81 que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, a Lei Federal nº9.433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e a Lei Federal nº9.607/98 que institui a Lei de Crimes Ambientais bem como as Resoluções do CONAMA.

Posteriormente, por meio do decreto n. 7.404, de 23 de setembro de 2010 foi regulamentada a Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Esta lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos onde em seu artigo quinto estabelece que:

Os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos são responsáveis pelo ciclo de vida dos produtos (Lei n. 12.305/2010).

Em consonância ao artigo treze, referente a logística reversa, onde está descrito que a mesma é:

O instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (Lei n. 12.305/2010).

O artigo 35 estabelece que a gerência dos resíduos sólidos com a seguinte ordem de prioridade: *não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.*

A NBR 10004 (2004) define resíduos sólidos como materiais nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Sua classificação é realizada conforme o tipo de processo ou atividade que deu origem ao resíduo, em que:

- a) Resíduos de Classe I – Perigosos;
- b) Resíduos de Classe II – Não Perigosos;

- c) Resíduos de Classe II A – Não inertes;
- d) Resíduos de Classe II B – Inertes.

Sendo que os resíduos de Classe I são aqueles que apresentam riscos à saúde humana, os resíduos de Classe II A aqueles que podem ter propriedades combustíveis, biodegradáveis ou solubilidade e os resíduos de Classe II B aqueles que ao serem submetidos a um contato dinâmico e estático em água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tiverem nenhum constituinte solubilizados acima das concentrações aceitas para padrão de potabilidade, com exceção de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Os resíduos sólidos urbanos da Classe II B correspondem a grande parte dos resíduos gerados, tornando imprescindível aplicar as recomendações da Agenda 21 nestes materiais a fim de reduzir os impactos ambientais que os mesmos têm causado. Dentre este tipo de resíduo tem-se os resíduos de construção e demolição foco de reutilização neste trabalho. Vale reforçar que o uso dos resíduos de construção e demolição não se deram somente por conta das novas normas vigentes, mas sim principalmente pelo advento da Segunda Guerra Mundial conforme será tratado no item a seguir.

### **3.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)**

Mesmo com o avanço na área de gestão de obras o setor da construção civil ainda é o responsável pela geração de grande parte dos resíduos sólidos produzidos nos grandes aglomerados urbanos. Cabral (2007) aponta que o RCD constitui aproximadamente 50% dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Segundo Pietra e Souza (2006) no Brasil grande parte dos resíduos de construção e demolição gerados são dispostos em aterros sanitários, bota-foras ou áreas irregulares. Sendo que apenas uma pequena parcela é reciclada na forma de agregado em bases de pavimentos, produção de blocos de concreto e produção de concreto para calçamento. A disposição irregular do RCD causa poluição do ambiente a sua volta como contaminação do solo e das águas, desequilíbrio na fauna existente e conseqüentemente a proliferação de pragas urbanas, assoreamento dos cursos d'água próximos, entupimento de redes de

drenagem, entre outros impactos ambientais. Quando depositados em aterros sanitários são rapidamente contaminados por matéria orgânica perdendo assim suas propriedades e a possibilidade de reaproveitamento.

Existe um crescente investimento do governo federal na construção de aterros sanitários e recuperação de energia, centrais de triagem e de compostagem, infraestrutura e capacitação para organizações de catadores. No entanto, a realidade brasileira demanda muito compromisso dos dirigentes municipais na escolha de soluções adequadas de baixo custo, de tecnologias compatíveis com contexto local e com a implantação da coleta seletiva com remuneração justa do serviço prestado pelos catadores de materiais recicláveis (JACOBI E BESEN, 2011).

Portanto tal cenário tem tornado imprescindível e urgente à gestão e manejo destes materiais. Diversos estudos (RUIZ, 2017; BRASILEIRO, 2017; SACHET, 2013; CABRAL, 2007; ÂNGULO, 2005) apontam que o concreto estrutural é um destino viável para a inserção destes resíduos de construção e demolição, que anteriormente seriam descartados em lixões e aterros, sendo uma tecnologia de baixo custo e compatível ao contexto local. Este uso daria o destino adequado a estes materiais em volumes bem mais expressivos do que estabelecidos na NBR 15116 (2004) aonde seu uso se limitaria em bases e sub-bases de rodovias e concretos sem fins estruturais. Ainda reduziria a extração de matérias primas naturais, tornando a indústria da construção civil menos agressiva ao meio ambiente.

Segundo a Resolução CONAMA 307 (2002), os resíduos de construção civil são classificados como Classe A, sendo delimitados por resíduos de concreto, argamassa, cerâmica provenientes de demolição, novas obras ou reformas que podem ser britados e utilizados novamente na forma de agregados dentro da própria indústria da construção civil. A NBR 15116 (2004) classifica os resíduos de Classe A em duas categorias, sendo a primeira designada de Agregado de Resíduo de Concreto (ARC) obtido do britamento de partes graúdas com no mínimo 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas e a segunda como Agregados de Resíduo Misto (ARM) obtido do britamento de partes graúdas com menos de 90% de fragmentos à base de cimento Portland e Rochas.

Historicamente o uso de resíduos de construção e demolição como agregados em novas edificações e estruturas é realizado desde a antiguidade. Segundo Schulz e Hendricks (1992) apud Leite (2001) foram encontrados registros da utilização de alvenaria britada para utilização de concreto na época dos romanos, sendo que eram utilizadas misturas de argilas, cinzas vulcânicas, cacos cerâmicos e cal para cobertura de pavimentos.

Na atualidade a reincorporação de RCD em concretos estruturais é realizada na Europa desde 1980 com a criação de legislações específicas e por conta da escassez de locais para deposição destes resíduos, segundo Brasileiro e Matos (2015). Pinto (1999) também afirma que a reciclagem de RCD já se consolidou na Europa Ocidental, Japão e EUA.

Atualmente, o Brasil avança na criação de legislações que regulamentem o uso do RCD na forma de agregados de construção para concretos com função estrutural. Além das revisões da NBR 15116 a Resolução CONAMA 448 (2012) define que os geradores devem estabelecer como prioridade a não geração do resíduo e secundariamente a sua redução, reutilização, tratamento e disposição final ambientalmente adequada, ou seja, a destinação final bem como sua gestão fica sob responsabilidade da geradora. A Lei Federal 12.305/2010 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos também coloca o RCD como objetivo de solução por parte dos responsáveis.

A Prefeitura Municipal de Campinas criou em 2004 a Usina Recicladora de Materiais em atendimento a Resolução 307 do Conama e estabelece seu Plano de Gerenciamento de Resíduos, conforme informa Fleming e Lopes no Diário Oficial Municipal (2004). Também afirmam que a usina era uma das mais tecnológicas da época e teria uma capacidade de processar 80 toneladas/hora de resíduos. Tal material é empregado como agregado de construção civil reciclado em diferentes granulometrias e pode ser utilizado em obras públicas.

No âmbito de adequação, a Lei Federal 12.305/2010 reformula em 2011 o seu Plano de Gerenciamento de Resíduos Urbanos por meio do decreto municipal 17.464/2011. Se tratando de RCD o município elencou as seguintes ações a serem estabelecidas em curto e médio prazo:

- a) Cadastramento do gerador e do agente responsável pelo transporte, conforme modelo municipal.
- b) Apresentação de um Plano de Gestão dos Resíduos da Construção Civil, contendo (CONAMA 307): Medidas de não geração dos resíduos; Medidas de redução da geração; Medidas de reutilização e reciclagem; Medidas de segregação na obra, para os resíduos classificados de A e B;
- c) Implementar gerenciamento da Unidade de Reciclagem de Materiais;
- d) Somente aceitar resíduos dos geradores / agentes de transporte, mediante apresentação de manifesto de carga;
- e) Somente receber classes A e B, devidamente separadas;
- f) Fiscalização visual na entrada e na descarga do resíduo.
- g) Implantação de um *software* destinado a gerenciar a movimentação das caçambas;
- h) Eliminar o passivo existente, por meio de seleção, classificação granulométrica e britagem, com reciclagens e reuso dos materiais obtidos;
- i) Dar disposição final adequada aos rejeitos gerados;

Por meio do decreto municipal 18.167/2013 a Prefeitura Municipal de Campinas regulamenta a Lei Municipal 14.418/2012 onde é instituído o Plano Integrado de gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Neste plano são delimitados programas de gerenciamento de resíduos da construção civil, seu transporte e seu uso na forma de agregado de construção dentro do município. O capítulo V da Lei Municipal 14.418/2012 não estabelece uso estrutural para os agregados reciclados, sendo estes destinados a sistemas de drenagem, muros vedações, blocos sem função estrutural, revestimento primário de vias ou subleito e sub-base de vias.

A legislação municipal não estabelece destinação específica para o resíduo de fresado asfáltico. Sabe-se que este resíduo se enquadra dentro da categoria de resíduos de construção civil e estudos apontam a viabilidade de sua incorporação ao concreto.

### **3.3. Resíduo de Fresado Asfáltico**

O resíduo de fresado asfáltico é um RCD proveniente da manutenção de pavimentos flexíveis. Estas manutenções geram grandes quantidades deste material, cujos meios de reciclagem atuais não conseguem absorver a total geração.

Diante de tais informações esta pesquisa buscou apresentar tecnicamente a viabilidade em inserir este resíduo em concretos na forma de agregado, substituindo parcialmente materiais nobres utilizados em traços de concreto estrutural. Abaixo uma breve explanação sobre este material.

#### **3.3.1. Breve Histórico e Generalidades**

A concepção de estradas acompanha o homem desde a Antiguidade, sendo difícil delimitar qual a primeira estrada, trilha ou caminho utilizado pelas antigas civilizações. Porém, segundo Maré (2011) em 390 a.C., com o ataque de Gaulês de Breno a Roma, surgiu a necessidade de criar eixos que permitissem a rápida circulação dos exércitos afim de proteger seu território. Sendo assim, em 312 a.C. durante a época da República Romana o político Ápio Cláudio cria formalmente a primeira via romana, sendo posteriormente intitulada Via Ápia. Esta estrada uniu inicialmente a cidade de Roma à cidade de Cápua e posteriormente se tornou o principal eixo de circulação da Roma Antiga.

A construção de estradas e trilhas com diversos métodos construtivos ocorreu intensamente ao longo da história, porém a partir do século passado a construção das rodovias foi intensificada em muitos países do mundo, principalmente com o advento do surgimento e popularização dos automóveis.

Lessa (2005) afirma que no Brasil a primeira estrada pavimentada foi inaugurada em 1861 por Dom Pedro II ligando a cidade de Petrópolis a Juiz de Fora. Porém as rodovias propriamente ditas só teriam destaque a partir do governo de Washington Luís na década de 20 com a construção da Rodovia que ligava o Rio de Janeiro a Petrópolis.

Segundo o DNIT (2005) a partir dos anos 40 o Brasil passou a adotar as rodovias como sua matriz de transportes, sendo nas décadas de 60 e 70 sua

maior expansão. Paula (2010) afirma que durante o governo de Juscelino Kubitschek foi implementada uma política de atração às indústrias automobilísticas estrangeiras, mas este seguimento se fortaleceu apenas durante a ditadura militar com a desativação de 10 mil quilômetros de linhas férreas que anteriormente transportavam passageiros.

A CNT (2016) afirma que atualmente o Brasil possui uma malha rodoviária de aproximadamente 1.720.756 km, deste montante apenas 211.468 km (12,3%) são pavimentadas. O relatório aponta que, mesmo com a porcentagem relativamente baixa de vias pavimentadas, existe um cenário de crescimento constante destas.

Deve-se também observar que as disparidades econômicas em nosso país são elevadas e algumas regiões apresentam taxas de pavimentação muito maiores que outras. Tem-se como exemplo o município de Campinas, onde a Prefeitura Municipal de Campinas (2017) afirma que em 2017, 87% das vias que cortam a cidade estavam pavimentadas.

Não se atentando a qualidade de tal revestimento, pode-se apresentar com este exemplo as divergências econômicas que o país enfrenta e o grande potencial da cidade de Campinas em gerar resíduos de fresado asfáltico.

Segundo Vilela Filho (2006) o município de Campinas apresenta um crescimento expressivo das áreas pavimentadas a partir do século XX devido a obras de drenagem e reurbanização. Este crescimento veio se consolidando e atualmente grande parte da área municipal está pavimentada.

Segundo a CNT (2017), nas vias pavimentadas são executados pavimentos rígidos, compostos em concreto armado ou flexíveis, compostos por diversas camadas e seu revestimento em material asfáltico. Sendo o último o mais adotado, tanto em rodovias como em vias urbanas.

O DNIT (2005) apresenta os processos adotados para confecção dos revestimentos asfálticos (ou betuminosos) flexíveis no Brasil. A Figura 3.10 ilustra este esquema.

Figura 3.10 - Tipo de Revestimentos asfálticos



Fonte: Adaptado DNIT (2005).

Os diferentes processos pouco influenciarão na composição do fresado, uma vez que se tratam de processos produtivos.

Em relação aos revestimentos flexíveis betuminosos por penetração o DNIT (2015) separa nas categorias invertida ou tratamento superficial betuminoso em que são aplicadas sucessivas camadas de material asfáltico e agregados com igual número de espalhamento e compressão. A segunda categoria chamada direta ou macadame betuminoso, são confeccionadas por camadas de agregados recobertas por betume após a sua compressão. A última camada normalmente é coberta por agregado miúdo.

O DNIT (2005) ainda apresenta os procedimentos por mistura onde os agregados são previamente envolvidos em betume. Podem ser feitos nas usinas ou *in loco* (na estrada). Em ambos os casos a mistura pode ser realizada a frio, onde o material é espalhado na temperatura ambiente ou a quente quando o material é espalhado ainda quente.

Segundo o DNIT (2015) os processos realizados em usina podem ser de cinco tipos, sendo os dois primeiros do tipo pré-misturado de graduação aberta ou graduação densa. Tais denominações devido à granulometria do material. O terceiro tipo é o areia betume, que consiste numa mistura de areia e betume apenas. O quarto tipo é o concreto betuminoso ou asfáltico (CAP) em que se apresenta rigoroso processo produtivo como dito anteriormente. Por último tem-se



o processo *Sheet-Asphalt*, um tipo de areia betume com a rigorosidade produtiva do CAP. O processo realizado na estrada apresenta também o tipo aberto, tipo denso e o areia betume, porém como diferencial é feito *in loco* com menor controle de qualidade.

Os pavimentos flexíveis por calçamento não foram tratados neste trabalho, por não serem foco desta pesquisa.

A CNT (2016) afirma que o pavimento deve suportar as intempéries e o uso da via, sendo que os pavimentos flexíveis necessitam de manutenção periódica e constante para sua restauração e reabilitação. Um processo bastante utilizado principalmente nas rodovias é o método da fresagem a frio que gera grandes quantidades de resíduo.

### **3.3.2. Composição e Geração**

Segundo Bonfim (2007), a ideia de fresar o asfalto surgiu nos Estados Unidos na década de 70 durante a crise do petróleo, onde visou-se a reincorporação do material fresado para restauro de vias. O resíduo seria aquecido e misturado a uma parcela de material virgem para recompor a via danificada. No Brasil o método passou a ser utilizado apenas em meados de 1980. Atualmente a fresagem é uma técnica constantemente aplicada em restauração de pavimentos.

Jonhson (2000) afirma que se tratando de manutenções em pavimentos asfálticos podem ser adotadas medidas preventivas, corretivas e emergenciais. Sendo a primeira adotada para estender a vida útil do pavimento, a segunda adotada quando o pavimento já apresenta alguma falha e a última quando o piso apresenta sérios problemas estruturais que demandam soluções urgentes.

Em todos os tipos de manutenções apresentadas por Jonhson (2000) a fresagem pode ser adotada. Segundo Bernucci et al (2008) a fresagem é indicada para pavimentos com as seguintes patologias: correção de defeitos funcionais superficiais, trincas isoladas superficiais, trincas originárias de problemas estruturais nas camadas inferiores, escorregamento de massa, desgaste e desagregação.

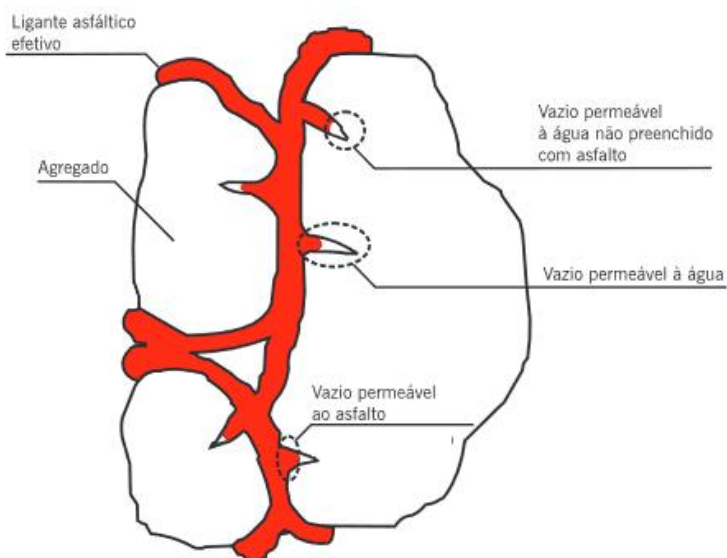
Segundo Sachet (2013), o processo de fresagem consiste no desmonte da superfície do pavimento com máquinas fresadoras de cilindros com pinos. Suas características típicas são a presença de filme asfáltico envolvendo as frações dos agregados bem como grumos resultantes da aglomeração de partículas de diferentes diâmetros por ligante asfáltico que não foram fracionadas durante sua remoção por fresadora.

A CNT (2017) afirma que os agregados utilizados nos revestimentos de pavimentos flexíveis devem possuir propriedades adequadas quanto à durabilidade, resistência e adesividade ao ligante. Quanto aos ligantes afirma que os mais utilizados atualmente são o betume e o asfalto, sendo o primeiro uma mistura de hidrocarbonetos pesados extraídos naturalmente ou fabricado por destilação de petróleo, carvão madeira ou resinas. O segundo é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo por destilação ou obtido de forma natural, tendo também o betume em sua composição.

Brasileiro e Matos (2015) afirmam que cerca de 90% das misturas asfálticas possuem agregados como brita e areia em sua composição.

A Figura 3.11 ilustra a composição do resíduo de fresado asfáltico, onde se observa o ligante envolvendo os agregados e alguns vazios existentes no material.

*Figura 3.11 - Partícula de resíduo de fresado asfáltico*



Fonte: Adaptado de Bernucci, et al (2008).

Segundo Bonfim (2007), a fresagem pode ser realizada de duas formas, a quente ou a frio. Sendo a primeira utilizada quando o fresado é imediatamente reutilizado na restauração do mesmo pavimento fresado. A segunda é a mais utilizada e responsável pela geração do resíduo foco desta pesquisa.

A norma DNIT 159/2011 especifica os procedimentos para fresagem a frio de pavimentos asfálticos. Esta norma classifica a fresagem como uma operação onde é realizado corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento asfáltico por processo mecânico a frio.

Bonfim (2007) afirma que os procedimentos de fresagem podem ser classificados quanto à espessura do corte e quanto à rugosidade. Em relação ao corte pode-se subdividir em tipos superficial, raso e profundo. O corte superficial consiste em uma leve raspagem da via, muitas vezes sem a necessidade de recobrir com nova camada asfáltica. O corte raso é adotado para reparos com espessura média de cinco centímetros em pavimentos com defeitos superficiais ou remendos, bastante utilizados em vias urbanas. O corte profundo é adotado em reparos estruturais, podendo atingir camadas além do revestimento como camadas de ligação, base e até sub-base do pavimento.

Bonfim (2007) ainda exemplifica que em relação à fresagem quanto à rugosidade, pode-se subdividir em tipos padrão, fina e microfresagem. A fresagem padrão é utilizada quando se pretende recobrir a via com nova camada asfáltica. Sendo esta fresagem utilizada desde o surgimento das fresadoras e ainda hoje é a mais utilizada. Os pinos do cilindro se mantem a uma distância média de quinze milímetros.

Em relação à fresagem fina Bonfim (2007) afirma que os pinos do cilindro se mantêm a uma distância média de oito milímetros, resultando numa superfície menos rugosa. Sendo esta bastante utilizada em regularizações de via por não impedir o trafego no decorrer da manutenção. Em relação a microfresagem o cilindro é equipado com dentes de corte com distância média de dois a três milímetros. Esta aplicação dispensa o recobrimento da via com nova camada asfáltica.

A Figura 3.12 apresenta as diferenças existentes entre os pinos utilizados na fresagem padrão (imagem esquerda) e os dentes utilizados na microfresagem (imagem direita).

Figura 3.12 - Detalhe de cilindros de fresadoras.



Fonte: Adaptado de Brock e Richmond (2016).

Em relação às máquinas fresadoras Bonfim (2007) afirma que existem máquinas de pequeno, médio e grande porte. Sendo o cilindro fresador o seu principal componente. Este cilindro é um tambor rígido construído em aço especial onde são fixados dentes ou pinos, conforme necessidade da obra. Outras peças importantes da fresadora são os raspadores que impedem que o fresado se espalhe e a correia transportadora que leva o material fresado por meio de esteira para outro local. É comum nessa operação que um caminhão esteja disposto logo em seguida a esteira para recolher o resíduo gerado na operação.

A Figura 3.13 ilustra o processo de fresagem asfáltica a frio onde tem-se numa primeira posição a máquina fresadora (*Milling Machine*), em seguida uma esteira articulada. Em última posição o caminhão que fará o transporte e alocação deste resíduo em local apropriado. O processo de fresagem a quente é muito semelhante, porém como diferencial a máquina fresadora aquece o material imediatamente após ser removido e em seguida o reincorpora ao pavimento.

Figura 3.13 - Processo de fresagem asfáltica.



Fonte: Acervo técnico da Wirtgen (2016).

Portanto, o fresado asfáltico é constituído principalmente de agregados (britas e areias) e cimento asfáltico de petróleo (CAP) (asfalto ou betume) ou ainda *Sheet-Asphalt* quando proveniente de rodovias de alta rodagem. No caso de ser proveniente de vias urbanas pode ser originário de outros processos anteriormente citados. A CNT (2017) reforça que o CAP é composto por materiais que proporcionam bom desempenho e possuem propriedades físicas superiores.

Observa-se que os diferentes processos de fresagem resultarão em diferentes fases granulométricas.

### 3.3.3. Descarte e Contaminação

Em relação ao descarte do resíduo de fresado asfáltico, a norma DNIT 159/2011 apenas específica que deve ser atendida a CONAMA 307/2002 quanto ao RCD e coloca como procedimento adicional a necessidade de transporte do material fresado para estocagem em área aprovada pelo DNIT em local nivelado e com drenagem adequada.

A norma ET-DE-P00/038 (2006) do DER/SP também recomenda que no caso da não utilização do fresado, o mesmo deve ser estocado em terreno

nivelado com boa drenagem e que permita a remoção do material quando necessário.

A Prefeitura Municipal de Campinas não possui especificação quanto ao descarte do resíduo de fresado asfáltico.

Ruiz (2017) observou que mesmo com a normativa vigente este resíduo acaba abandonado nas proximidades das vias sujeito as intempéries. A Figura 3.14 ilustra o resíduo de fresado asfáltico a beira de acostamento carregado pelas águas pluviais originário de manutenção de rodovia na cidade de Leme, São Paulo.

Figura 3.14 - Fotografia de resíduo de fresado asfáltico a beira do acostamento em rodovia.



Fonte: Ruiz (2017).

A disposição incorreta deste resíduo pode ocasionar os problemas ambientais já citados no caso do RCD e a contaminação do solo, tal questão se dá principalmente por conta do asfalto presente no material.

Nagalli, et al (2016), afirmam que o asfalto presente no fresado asfáltico é constituído por diversos compostos, dentre eles o HPA's (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) que são estruturas constituídas de dois ou mais anéis benzênicos, gerados pela queima de combustíveis fósseis, estes compostos estão ligados ao desenvolvimento do câncer em humanos.

Araújo, et al (2016) afirmam que os contaminantes presentes no asfalto estão ligados a mutações genéticas, desenvolvimento do câncer e anormalidades morfológicas ou funcionais. Também afirma que encapsular o material asfáltico é a melhor solução para evitar a contaminação por meio da lixiviação do material no solo.

Sendo assim, tais contaminantes podem ser liberados no solo no caso da desagregação do resíduo. E tanto por lixiviação como por ação do tempo tais contaminantes acabariam por atingir corpos hídricos. Ao se utilizar tal material como agregado em peças estruturais é evitada esta desagregação, pois o material ficaria conservado dentro da matriz do compósito em processo de encapsulamento do resíduo assim como desenvolvido por Araújo, et al (2016) onde o fresado teve os seus contaminantes isolados, porém utilizando outro método e sem desenvolvimento de risco ao ambiente.

#### **3.3.4. Reciclagem e Reutilização**

Segundo Bonfim (2007), a ideia de fresar o asfalto surgiu nos Estados Unidos na década de 70 durante a crise do petróleo, onde se visou a reincorporação do material fresado para restauro de vias. Com o fim desta crise o resíduo de fresado asfáltico foi deixado em segundo plano.

Segundo Brock e Richmond (2016), por muito tempo o resíduo de fresado asfáltico foi ignorado no processo de reciclagem por ser considerado um material sem valor comercial. Santucci (2007) afirma que apenas após os anos 2000 foi retomado o interesse em reciclar o resíduo de fresado asfáltico devido à nova elevação do custo do asfalto e indisponibilidade de agregados de qualidade.

Dias (2015) informa que o fresado asfáltico, assim como o RCD, pode ser reincorporado as camadas de sub-base, base e do revestimento flexível. Um termo comum para o resíduo que será reciclado na forma de revestimento é RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*).

Santucci (2007) delimita as principais formas de reciclagem do fresado asfáltico como:

a) Mistura a quente em usina, onde o resíduo é totalmente misturado a agregados e ligantes virgens e direcionado ao recapeamento de vias.

b) Mistura a quente *in loco*, onde o resíduo é imediatamente aquecido e misturado a agregados e ligantes virgens e direcionado a equipamentos específico que fará sua aplicação na via.

c) Mistura a frio *in loco*, onde o resíduo é fresado, misturado com emulsificantes e separado em área específica. Posteriormente é direcionado a uma máquina que o mistura a quente.

d) Base e Sub-base, onde o resíduo é misturado a agregados virgens e passa a compor bases e sub-bases de novas vias.

Santucci (2007) também afirma que as possibilidades de reciclagem citadas não conseguem suprir a geração deste material, conforme também foi verificado por Ruiz (2017), em que demonstrou uma possibilidade de geração anual de 144.000 m<sup>3</sup> de resíduo de fresado asfáltico apenas na cidade de Campinas.

O resíduo de fresado asfáltico é um problema não só no Brasil, mas em diversos países, justamente porque a geração é superior às taxas de reciclagem. Mesmo no caso de alguns países desenvolvidos não é possível a reincorporação total desde resíduo.

Segundo Willis (2016) na Dinamarca foram reciclados em 2014, 65% dos resíduos de fresado asfáltico, 64% na França, 100% na Alemanha, 20% na Itália, 85% na Holanda, 70% na Finlândia, 100% na Espanha, 100% na Suécia e 98% na Suíça. Sendo a forma de reciclagem mais adotada as misturas a quente.

Segundo o NAPA (2016) os Estados Unidos da América reciclam cerca de 99% da sua geração de resíduo de fresado asfáltico, sendo também a mistura a quente a solução mais adotada. A geração total estaria em torno de 77,8 milhões de toneladas em 2016.

O Brasil não possui de dados precisos quanto a geração e porcentagem reciclada de resíduo de fresado asfáltico, porém pesquisadores como Ruiz (2017) verificaram a falta de cuidado com este material.

Brock e Richmond (2016) enfatizam que qualquer material que possa ser reciclado possui vantagem econômica em relação a materiais nobres extraídos de



jazidas. O fresado pode ser facilmente triturado e separado granulometricamente por peneiramento. E se observa que este resíduo é composto por materiais nobres conforme informa a CNT (2007).

Por suas características, sua incorporação a concretos estruturais na forma de agregado reciclado é de interesse e se apresenta como forma alternativa para destinação correta deste material.

Os agregados de concreto desempenham um importante papel, influenciando diretamente em sua resistência, estabilidade dimensional e durabilidade. Aitcin (2000) afirma que a resistência do concreto é determinada pelas características da argamassa, agregado graúdo e zona de transição, sendo assim para a mesma qualidade de argamassa, tipos diferentes de agregados graúdos com diferentes tamanhos, formas, textura, mineralogia e resistência podem resultar em concretos de resistências diferentes.

Dosho (2007) também afirma que para promover o reuso dos resíduos de construção na forma de agregados se faz necessário alcançar três concepções básicas, sendo estas: Garantia da segurança do Produto; Diminuição do impacto ambiental; Diminuição do custo de construção.

O uso de fibras em concretos com resíduo também se mostra de grande valia, uma vez que sua inserção auxilia no desempenho do compósito como anteriormente citado. Diversos autores tem realizado este tipo de aplicação (Borges, 2017; Ruiz, 2017; Izquierdo, 2015; Streit, 2014; Martins, 2005).

Diante de tais informações esta pesquisa visou caracterizar o resíduo de fresado asfáltico para que atenda tecnicamente as exigências requeridas para confecção de um concreto estrutural, mostrando que é possível utilizá-lo. Este resíduo foi britado e peneirado para que atingisse granulometria semelhante aos agregados naturais, não sendo necessários procedimentos químicos ou complexos para seu tratamento.

Como hipótese complementar o concreto foi reforçado com fibras, apresentando também a viabilidade de inserção deste material em concretos especiais que demandam maiores cuidados.



#### **4. VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM FIBRAS**

As vigas de concreto armado estão presentes em diversos tipos de obras dos mais variados padrões. Normalmente servem de apoio a lajes e/ou paredes e transferem as cargas aplicadas aos pilares.

Sabendo da importância das vigas na Engenharia Civil esta pesquisa buscou confeccionar modelos reduzidos de vigas de concreto armado reforçadas com fibras e com uso de resíduo de fresado asfáltico em substituição aos agregados naturais. De forma que se analisou o seu comportamento estrutural.

Abaixo segue uma breve descrição do modelo teórico e pesquisas referentes a vigas de concreto armado reforçadas com fibras.

##### **4.1. Flexão e força cortante em vigas de concreto armado**

Segundo a NBR 6118 (2014) as vigas são elementos estruturais lineares (cujo comprimento longitudinal é pelo menos três vezes maior que a seção transversal) em que a flexão é preponderante. Assim, os esforços predominantes são momento fletor e força cortante. Leet, et al (2010) também afirmam que as vigas representam um dos elementos mais comuns encontrados em estruturas. Sendo que quando uma viga é carregada perpendicularmente ao seu eixo longitudinal, forças internas (cortante e momento) desenvolvem-se para transmitir as cargas aplicadas aos apoios.

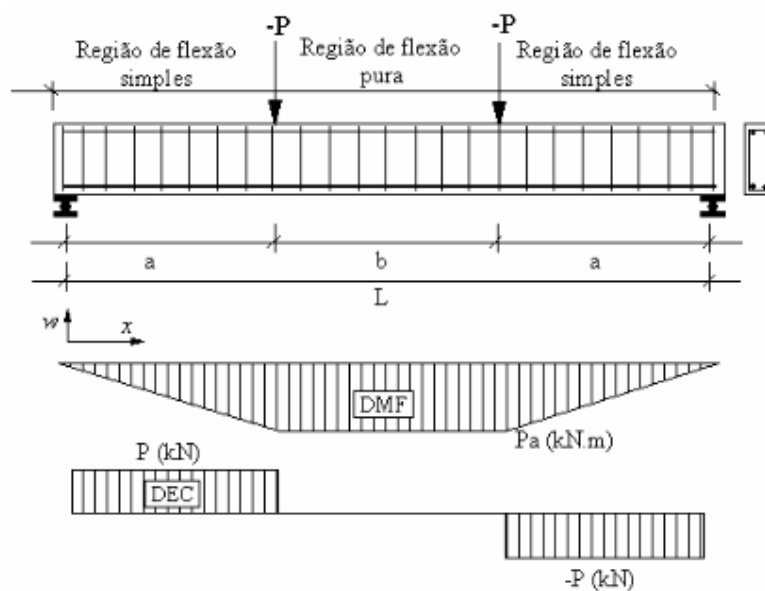
Sendo assim, nestas peças estruturais são previstas armaduras longitudinais e transversais, para combaterem respectivamente os esforços de flexão e cisalhamento atuantes (BARROS, 2009).

No meio do século passado os pesquisadores Leonhardt e Walther (1962) realizaram estudos na Alemanha para verificar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado biapoiadas submetidas a duas cargas concentradas idênticas e equidistantes dos apoios. Este procedimento foi intitulado Ensaio Stuttgart.

Rocha, et al (2004), afirmam que os Ensaio de Stuttgart comprovaram as ideias fundamentais de MÖrsch. Surgindo a partir daí os métodos de dimensionamento hoje utilizados.

A Figura 4.15 apresenta um esquema do Ensaio de Stuttgart, onde tem-se uma viga biapoiada em que a aplicação de duas forças  $P$  de mesma intensidade e equidistante de seu ponto de apoio. Durante o ensaio é aplicada a carga gradativamente até que a viga chega à ruptura. Neste caso observa-se a flexão pura (sem a presença de cisalhamento) no trecho BC e a flexão simples (com cisalhamento) nos trechos AB e CD.

Figura 4.15 - Esquema do Ensaio de Stuttgart

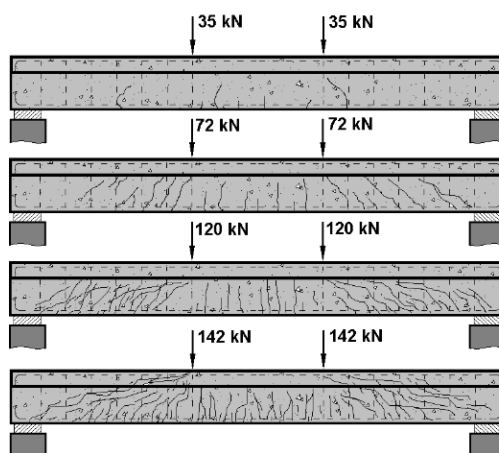


Fonte: Lima Junior, et al (2005).

Pinheiro, et al (2003), exemplificam a atuação das forças de flexão e cisalhamento em uma viga biapoiada submetida a dois pontos de cargas equidistantes. Em um primeiro momento, para pequenas cargas, quando a tensão a tração for inferior a resistência a tração do concreto a viga não se encontra fissurada, ou seja, estaria no Estádio I. Com o aumento do carregamento surgem as primeiras fissuras por flexão, sendo assim, nas áreas fissuradas a viga de encontra no Estádio II, porém os trechos ainda sem fissuras se encontram no

Estádio I. A progressão da aplicação de carga leva a viga completamente ao Estádio II, surgindo fissuras inclinadas correspondentes a trajetória de aplicação de carga. A Figura 4.16 exemplifica esta situação.

Figura 4.16 - Evolução de fissuras em viga de concreto.



Fonte: Pinheiro, *et al* (2003).

Segundo Carelli (2002), uma solução para o comportamento de vigas de concreto armado nas últimas etapas do Estádio II que satisfaz as condições de equilíbrio seria o modelo de treliça proposto por Ritter e Morsch. Neste modelo se insere uma treliça imaginária internamente a peça estrutural, sendo seu banzo superior do concreto comprimido, o banzo inferior a armadura longitudinal e as diagonais comprimidas seriam as bielas de concreto entre as fissuras e as elementos tracionados a armadura transversal ou estribos.

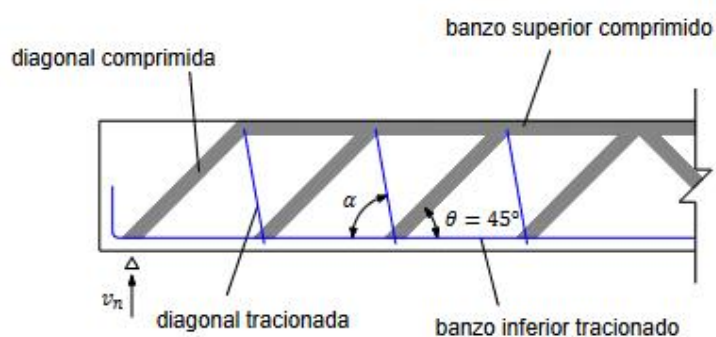
Pinheiro, *et al* (2003) relata que o modelo teórico apresenta imperfeições como o fato das fissuras não surgirem exatamente ao ângulo de  $45^\circ$ , como indica o modelo na Figura 4.16. Sendo assim, devem ser feitas correções por meio dos fatores indicados na NBR 6118:2014.

O modelo da treliça clássica, também conhecido como modelo de Ritter e Morsch considera o elemento estrutural fissurado. Ishihara (2017) descreveu suas principais considerações sendo descritas abaixo e a Figura 4.17 representa o modelo clássico da treliça.

- a) Banzo superior comprimido (cordão de concreto);

- b) Banzo inferior tracionado (armadura longitudinal de tração), paralelo ao banzo superior;
- c) Diagonais comprimidas (bielas) de concreto com uma inclinação  $\theta = 45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural;
- d) Diagonais tracionadas (armadura transversal de cisalhamento) com uma inclinação  $\alpha$  entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural.

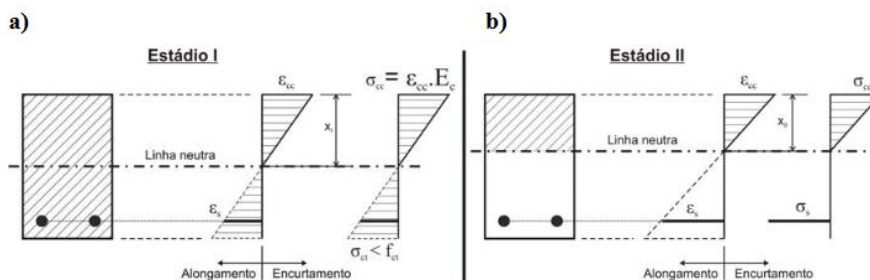
Figura 4.17 - Modelo da treliça clássica.



Fonte: Ishihara (2017).

Barros (2009) apresenta por meio da Figura 4.18 a secção transversal genérica de uma viga, sendo o item “a” a peça não fissurada, ou no Estádio I e o item “b” a peça fissurada ou no Estádio II.

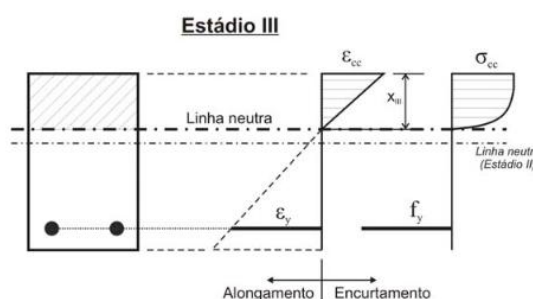
Figura 4.18 - Seções transversais de viga Genérica - Estádio I e II



Fonte: Barros (2009).

A Figura 4.19 apresenta a secção transversal genérica de uma viga, no Estádio III. Tais cortes apresentam a transferência de tensões do concreto para o aço ao longo do aumento da carga aplicada. Sendo no Estádio III dimensionadas as peças estruturais. Marins, et al (2000) afirmam que a armadura deve ser posicionada de forma a “costurar” as fissuras de tração do concreto e quando possível as tensões de tração.

Figura 4.19 - Seções transversais de viga Genérica – Estádio III



Fonte: Barros (2009).

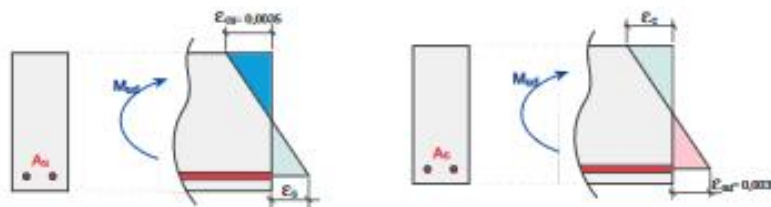
## 4.2. Modos de Ruptura

A ruptura das vigas pode ocorrer por diversos fatores. Seguem abaixo alguns itens de destaque:

### 4.2.1. Ruptura por Flexão

Segundo Holanda e Hanai (2005), em peças estruturais devem ser adotadas as melhores condições para o desenvolvimento de mecanismos de escoamento das armaduras e de ruína por flexão, mais dúctil e que oferece aviso prévio antes de seu rompimento. Marins, et al (2000) apresentam este fato por meio da Figura 4.20, onde tem-se a deformação por encurtamento do concreto ( $E_{cu}$ ) no valor de 0,51% e a deformação por alongamento da armadura mais tracionada ( $E_{su}$ ) quando atinge o valor de 0,010.

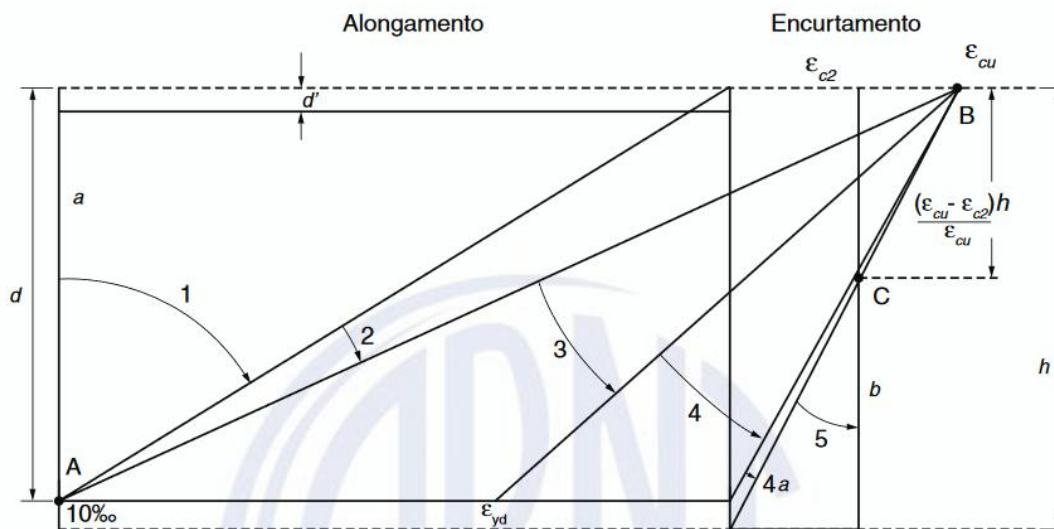
Figura 4.20 - Ruptura por flexão



Fonte: Marins, *et al* (2000).

Pinheiro, *et al* (2003), afirmam que a situação da imagem à esquerda é denominada ruína por esmagamento do concreto e a imagem à direita ruína por deformação plástica excessiva do aço. Tais limites estão descritos na norma NBR 6118:2014, sendo apresentados na Figura 4.21.

Figura 4.21 - Domínios dos estados limites últimos (ELU) -seção transversal



Fonte: NBR 6118:2014.

#### 4.2.2. Ruptura por Cisalhamento

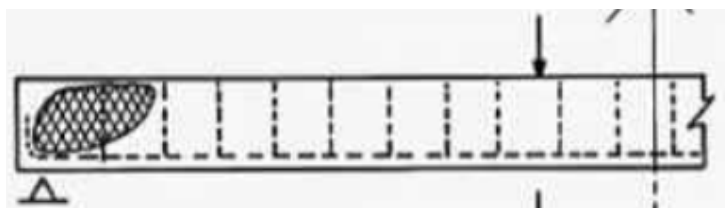
Barros (2009) afirma que a ruptura por cisalhamento causa fissuras inclinadas na região entre o apoio e a carga, quando a resistência do concreto à



tração é atingida, causando uma transferência de esforços antes suportados pelo concreto no Estádio I para as suas armaduras transversais e bielas de compressão. Esta transferência de carga pode ocorrer de diversas formas sendo abaixo descritas conforme descrito por Fusco (2008) em seu livro Estruturas de Concreto..

- a) Ruptura das diagonais de compressão: ocorre em peças com seções pequenas e relação a carga atuante, onde as tensões principais de compressão atingem valores muito elevados. Tal situação ocasiona fissuração das diagonais comprimidas, rompendo a peça de maneira frágil quando solicitada a capacidade resistente total do concreto à compressão e sem que a armadura transversal sofra escoamento. A Figura 4.22 apresenta a situação descrita.

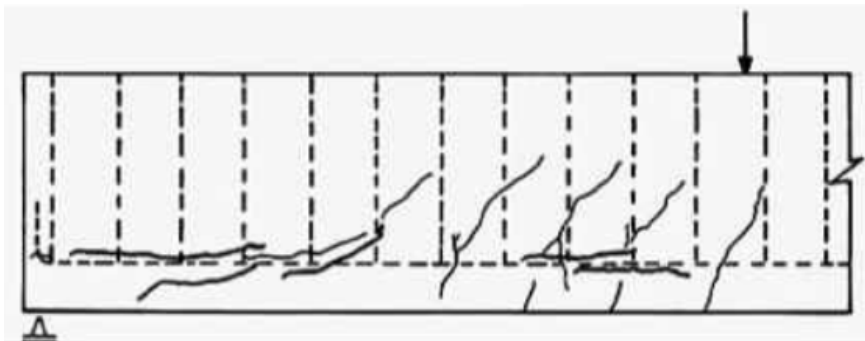
Figura 4.22 - Ruptura das diagonais de compressão



Fonte: Fusco (2008).

- b) Ruptura por falha de ancoragem: Na aplicação das cargas atuantes ocorre um maior recrutamento da armadura longitudinal. No caso de uma falha em sua ancoragem pode ocorrer a ruína na região de encontro da diagonal de compressão junta ao apoio e o banzo tracionado. A Figura 4.23 apresenta a situação descrita.

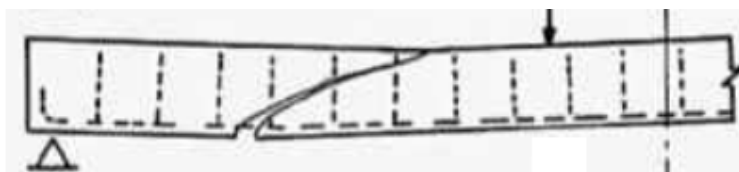
Figura 4.23 - Ruptura por falha de ancoragem



Fonte: Fusco (2008).

- c) Ruptura por força cortante-tração: ocorre quando o escoamento do aço da seção transversal é ultrapassado. Pode ocorrer ruptura dos estribos e esmagamento do banzo comprimido. Tal fato ocorre por armadura transversal insuficiente. A Figura 4.24 apresenta a situação descrita.

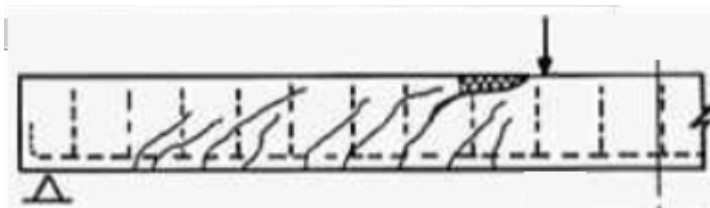
Figura 4.24 - Ruptura por força cortante-tração



Fonte: Fusco (2008).

- d) Ruptura por força cortante na flexão: ocorre em vigas com armadura de cisalhamento insuficiente após o aço atingir seu limite de escoamento. Ocorre uma intensa fissuração, sendo estas inclinadas, planas e acima da linha neutra. Neste caso o concreto pode sofrer esmagamento e romper bruscamente, principalmente na região comprimida. A Figura 4.25 apresenta a situação descrita.

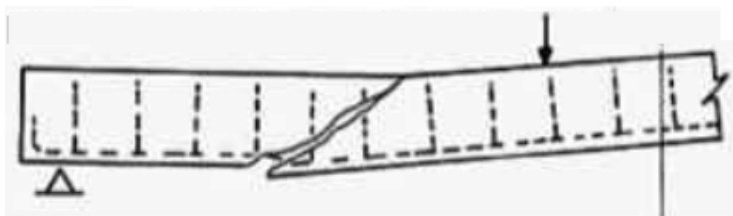
Figura 4.25 - Ruptura por força cortante flexão



Fonte: Fusco (2008).

- e) Ruptura por flexão da armadura transversal: ocorre no caso de espaçamento inadequado e/ou ancoragem incorreta dos estribos. Ocorrem aberturas de grandes fissuras devido a deformação excessiva. A Figura 4.26 apresenta a situação descrita.

Figura 4.26 - Ruptura por flexão da armadura transversal



Fonte: Fusco (2008).

### 4.3. Vigas de Concreto Reforçado com Fibras

Alguns estudos, como o de Bathia e Chan (2000) têm apresentado a possibilidade de redução de armaduras transversais (estribo ou de malhas de aço soldadas) nas peças estruturais com a adição de fibras, principalmente as fibras de aço (Lopes, 2005). Oliveira e Araujo (2005) afirmam que a armadura transversal evita uma ruptura brusca da estrutura antes que ela alcance a ruína. Sendo assim, em concretos reforçados com fibras o compósito ainda possui uma resistência à tração mesmo após a fissuração da matriz, concluindo-se assim que a armadura mínima de cisalhamento recomendada nas normas vigentes poderia ser reduzida devido aos efeitos positivos da fibra.

A utilização das fibras também pode gerar ganhos em tempo de execução das concretagens *“in loco”* ou pré-moldadas, uma vez que as fibras podem atuar

no lugar da armadura transversal das peças estruturais, substituindo-a parcialmente. Figueiredo (2011) apresenta que além das vantagens técnicas a presença das fibras pode reduzir etapas do processo produtivo e de mão de obra, garantindo maior velocidade e produtividade no processo.

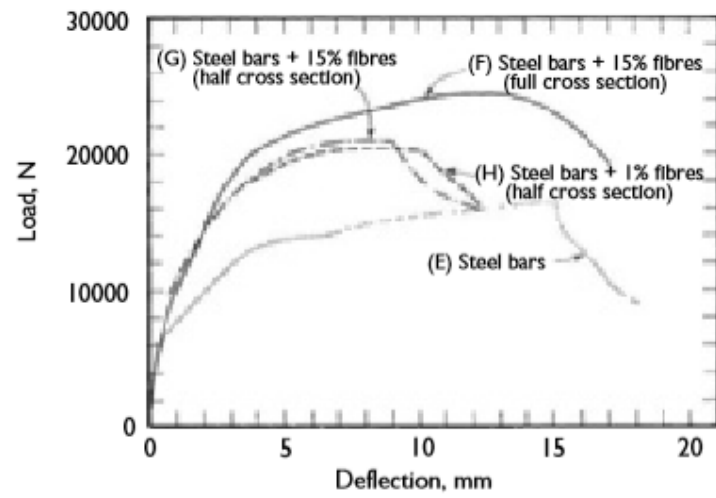
Kwak, et al (2002), afirmam que o aumento da resistência ao cisalhamento e ductilidade de vigas reforçadas com fibras provenientes do pós-fissuração pode reduzir a quantidade de estribos, auxiliando o processo de concretagem.

Apesar disso, ainda não há um consenso sobre um modelo teórico que possibilite a redução das taxas de armadura transversais com índices de segurança satisfatórios, afirma Trautwein, et al (2014). Sendo assim, torna-se necessário a obtenção de dados experimentais que validem o uso das fibras.

A taxa de armadura longitudinal mínima de tração de uma viga deve garantir a ductibilidade das seções transversais. Para isso, é necessária uma armadura capaz de absorver um momento fletor pelo menos igual ao momento último de fissuração.

Porém, Bentur e Mindess (2007) afirmam que mesmo com essa possibilidade de redução da armadura a fibra não é um substituto total do aço, pois estes desempenham diferentes papéis dentro da peça estrutural. A Figura 4.27 apresenta resultados obtidos experimentalmente por Bentur e Mindess (2007) apresentando a capacidade resistente das fibras em vigotas de concreto armado.

Figura 4.27 - Curvas Cargas x Flecha em vigas com e sem fibras.



Fonte: Bentur e Mindess (2007).



## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo trata do programa experimental realizado nesta pesquisa. O mesmo visou à análise das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras e a inserção de resíduos em concretos estruturais, sendo analisados: um traço referência sem fibras e sem resíduos, um traço sem fibras e com resíduo e 4 traços com fibras, uma de aço e outra de vidro álcali resistente (AR), em dois diferentes teores. Os teores foram determinados com base nos estudos desenvolvidos por Ruiz (2017) e Salvador (2013).

Os concretos foram caracterizados quanto a sua resistência à compressão, resistência à tração e modulo de elasticidade. Também foi analisada a tenacidade por meio do Ensaio Barcelona Simplificado e a resistência residual por meio do Ensaio ASTM-C1399. Ainda foram confeccionadas vigas submetidas a flexão em quatro pontos para verificar sua ruína.

Estes experimentos visam dar subsídio ao meio técnico para comprovar a viabilidade da inserção de resíduos em concretos estruturais, apresentar a viabilidade da utilização do Ensaio Barcelona Simplificado como método alternativo na avaliação de concretos com fibras e apresentar o comportamento estrutural de vigas com CRF.

### 5.1. Materiais utilizados

Para o desenvolvimento dos traços de concreto foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Aglomerante: Cimento Portland CP V ARI;
- b) Agregado miúdo: Areia Média Lavada;
- c) Agregado graúdo: Brita 01;
- d) Resíduo miúdo e graúdo: Fresado asfáltico separado granulometricamente por britagem e peneiramento;
- e) Água proveniente da rede de abastecimento pública da cidade de Campinas;

- f) Fibra de aço;
- g) Fibras de vidro tipo AR;
- h) Aditivo: Superplastificante de última geração a base de policarboxilato ADVA Cast 525;
- i) Barras de aço nas bitolas 5,0mm; 6,3mm; 12,5mm.

Não foram realizados testes de aferição de qualidade nos seguintes materiais: Cimento CP V ARI, Água, Fibras de aço, Fibras de vidro e Aditivo Superplastificante. Para todos adotou-se os dados dos fabricantes devido ao seu processo produtivo ser considerado seguro, padronizado e passível de rastreabilidade.

## 5.2. Consumo Unitário

A Tabela 4.2 apresenta o consumo unitário para o traço referência utilizado nesta pesquisa. A proporção deste traço é de 1: 2,3: 2,2 (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo) com relação água/cimento 0,4 e adição de aditivo superplastificante na proporção de 1% da massa de cimento.

A obtenção desta dosagem se deu a partir de uma modificação do traço desenvolvido na pesquisa de Salvador (2013) para  $f_{ck}$  de 35 MPa aos 28 dias.

A princípio foram realizados testes iniciais descritos no capítulo posterior até a obtenção da dosagem acima tratada. Elevou-se também a taxa de argamassa do traço de Salvador (2013) para melhorar a trabalhabilidade deste concreto visando uma melhor moldagem das vigas de concreto armado.

O resíduo de fresado asfáltico foi inserido em substituição aos agregados naturais, na proporção de 15% de suas respectivas massas, para os demais traços confeccionados que serão descritos posteriormente. Esta substituição tomou como base os estudos desenvolvidos por Ruiz (2017) onde se observou baixa alteração das resistências na presença deste resíduo e menor impacto ambiental na devida proporção.



Tabela 5.2 - Consumo Unitário do traço base

Material	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CP V ARI	411,00
Areia média	945,30
Brita 01	904,20
Água	164,40
Aditivo Superplastificante	4,11

### 5.3. Métodos de Ensaio

Para esta pesquisa foram avaliadas as idades de 7 dias e 28 dias. Sendo analisados aos 7 dias apenas Resistência à Compressão e Resistência à Tração. Aos 28 dias foram analisadas Resistência à Compressão, Resistência à Tração, Modulo de Elasticidade. Também foi avaliada a Tenacidade por meio do Ensaio Barcelona Simplificado e Resistência Residual por meio do ASTM-1399 (2010). A Tabela 5.3 exemplifica as quantidades adotadas.

Tabela 5.3 - Quantidades de CP's/ Ensaio.

Ensaio	Quant. CP's		Tipo de CP		
	7 dias	28 dias	Cilindrico 10x20	Cilindrico 15x15	Prismático 10x10x40
Resistência a Compressão Axial	6	8	x		
Resistência a Tração por Compressão Diametral	6	6	x		
Resistência Residual	0	6			x
Módulo de Elasticidade	0	4	x		
Barcelona	0	8		x	

Também foram confeccionadas vigas submetidas à aplicação de carga em pórtico, analisadas aos 54 dias de idade. Sendo confeccionadas 2 vigas por traço. A primeira idêntica a desenvolvida por Barros (2009), onde dimensionou-se a armadura transversal insuficiente para induzir a ruptura por cisalhamento e acentuar a solitação dos estribos. A segunda peça possui apenas armadura transversal construtiva, onde buscou-se realizar comparações com os resultados obtidos na primeira peça. Tal escolha se deu para uma melhor verificação da ação das fibras no concreto. No caso das vigas as idades para ensaio foram determinadas com base no cronograma do laboratório.

Abaixo estão descritos os traços confeccionados e suas características. Sendo para todos, com exceção do TREF, adotada a substituição de 15% dos agregados naturais (miúdo e graúdo) por resíduo de fresado asfáltico.

- a) TREF: Traço de Concreto Referência;
- b) TFRES: Traço de Concreto com resíduo de fresado asfáltico;
- c) TFVI: Traço de Concreto com resíduo de fresado asfáltico e adição de fibra de vidro álcali resistente na proporção de 4,10 kg/m<sup>3</sup>;
- d) TFVII: Traço de Concreto com resíduo de fresado asfáltico e adição de fibra de vidro de álcali resistente na proporção de 6,30 kg/m<sup>3</sup>;
- e) TFAI: Traço de Concreto com resíduo de fresado asfáltico e adição de fibra de aço na proporção de 20 kg/m<sup>3</sup>;
- f) TFAII: Traço de Concreto com resíduo de fresado asfáltico e adição de fibra de aço na proporção de 30 kg/m<sup>3</sup>;

#### **5.4. Informações sobre o clima**

Foram coletadas a temperatura e umidade relativa do ar por meio da estação meteorológica locada na Unicamp (Cepagri). Os dados estão disponíveis sob consulta com a equipe do Cepagri. As concretagens foram concentradas nas datas citadas no período das 14:00 as 18:00, sendo delimitados apenas os dados obtidos as 14:00.

Estes dados foram selecionados para um melhor entendimento da trabalhabilidade do concreto durante o processo de produção.

#### **5.5. Processo de produção, moldagem e cura dos corpos de prova**

Se tratando de um concreto com fibras, a produção foi realizada por meio de uma adaptação da JSCE-SF1 (1984) e do procedimento utilizado por Salvador (2013) em betoneira elétrica de 400L, seguindo a sequência descrita abaixo. Antes da confecção dos concretos foi verificada a umidade superficial dos agregados miúdos naturais por meio de medidor de umidade eletrônico. A

porcentagem de umidade encontrada foi descontada do volume de água definida no traço referência.

Para os outros agregados não foi necessária a aferição da umidade, pois foram previamente selecionados em formas metálicas três semanas antes das moldagens em ambiente coberto e bem ventilado, sendo assim não apresentavam qualquer umidade aparente em sua superfície. Os materiais foram separados em sacos plásticos conforme ilustra a Figura 5.28.

Figura 5.28 - Separação de materiais.



- a) Imprimação da betoneira;
- b) Adição dos agregados e mistura por 1 minuto;
- c) Adição de 33,33% da água e mistura por 0,50 minuto;
- d) Adição de cimento, 66,67% da água e 50% do aditivo e mistura por 2 minutos;
- e) Verificação visual do concreto, adição de 50% do aditivo (se necessário) e mistura por 3 minutos com adição das fibras de forma lenta e manual permitindo a boa distribuição em todo o concreto;
- f) Verificação visual do concreto;
- g) Se necessário, mistura por mais 4 minutos;

Devido ao volume considerável de cada dosagem foi necessário o fracionamento da produção em 3 etapas, sendo realizadas consecutivamente após a finalização da moldagem seguindo o seguinte critério:

- a) Etapa 01: Moldagem da viga sem estribo e corpos de prova cilíndricos;
- b) Etapa 02: Moldagem de corpos de prova cilíndricos e prismáticos;
- c) Etapa 03: Moldagem da viga com estribo e corpos de prova cilíndricos;

O processo de moldagem dos corpos de prova foi adaptado do método JSCE-SF2 (1984) seguindo a sequência abaixo descrita, uma vez que se trata de concreto com fibras. As formas metálicas foram cobertas com óleo mineral por meio de pincel convencional de pintura algumas horas antes da concretagem. A Figura 5.29 ilustra esta etapa.

- a) Preenchimento de 1/3 do corpo de prova e adensamento em mesa vibratória;
- b) Preenchimento do restante da forma e novo adensamento em mesa vibratória;
- c) Acabamento utilizando colher de pedreiro;
- d) Organização dos materiais em local coberto e protegido de intempéries;
- e) Desforma após 24 horas;

Figura 5.29 - Organização de corpos de prova.



Após a desforma os corpos de prova foram identificados e transportados para cura em câmara úmida com umidade superior a 95% e temperatura controlada ( $23^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ) como ilustra a Figura 5.30.

Figura 5.30 - Corpos de Prova em câmara úmida.



O processo de moldagem das vigas foi realizado por meio do preenchimento manual das formas com auxílio de conchas e adensamento em mesa vibratória constante. As formas de madeira resinada foram também recobertas com óleo mineral três horas antes da moldagem para melhor desforma e reaproveitamento posterior dos moldes.

Após a moldagem as vigas foram organizadas em local coberto e protegido das intempéries. Foram desformadas sete dias após a moldagem e identificadas. A cura também foi realizada em local coberto e protegido das intempéries, porém sem controle de temperatura e umidade.

Optou-se por não alocar a viga em câmara úmida devido a possibilidade de danos ao cabeamento instalado para sensoriamento estrutural. A Figura 5.31 apresenta a disposição das vigas.

Figura 5.31 - Cura vigas.



## 5.6. Propriedades Analisadas do Concreto no Estado Fresco

Para análise do concreto no estado fresco foi utilizada a norma NM 67:1998 verificando o abatimento do material conforme ilustra a Figura 5.32.

Figura 5.32 - Verificação de abatimento por meio de Slump Test.



## **5.7. Caracterização dos Agregados Naturais**

### **5.7.1. Caracterização do Agregado Miúdo**

O agregado miúdo utilizado é proveniente do porto de Barretinho, cidade de Roseira, Estado de São Paulo. Separada e pesada em sacos de 20 kg e estocados em área coberta no Laboratório de Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

A Tabela 5.4 apresenta os ensaios utilizados para caracterização do material.

Tabela 5.4 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo natural

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo da partícula	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Classificação	NBR NM 248:2003
Teor de Finos	NBR NM 46:2003
Massa Específica	NBR 9776:2003
Determinação de Impurezas Orgânicas	NBR NM 49:2001
Determinação da Umid. Superficial	NBR 9775:2011

### 5.7.2. Caracterização do Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado é proveniente de britagem de rocha basáltica natural da Pedreira Basalto na cidade de Pedreira. Foi retirado de baía em área aberta e separado previamente em formas metálicas para evitar umidade no material três semanas antes das concretagens. Alguns dias antes da concretagem foram separados e pesados em sacos de 20 kg. O material foi estocado em área coberta no Laboratório de Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

A Tabela 5.5 apresenta os ensaios utilizados para caracterização do material.

Tabela 5.5 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo natural.

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo da partícula	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Classificação	NBR NM 248:2003
Teor de Finos	NBR NM 46:2003
Massa Específica	NBR NM 53:2009
Massa Específica Aparente	NBR NM 53:2009
Absorção de água	NBR NM 53:2009

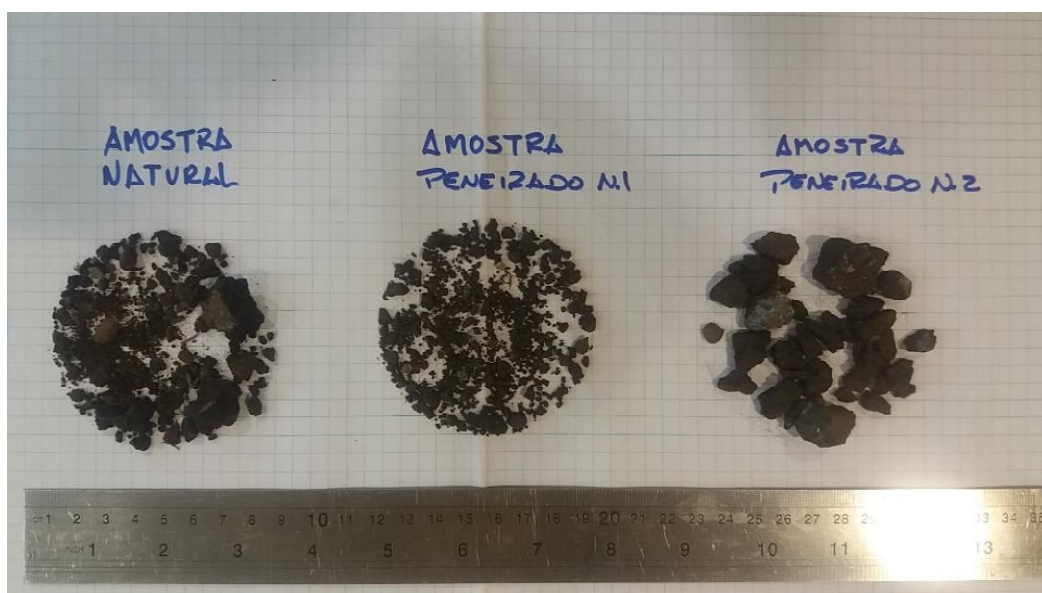


## 5.8. Caracterização dos Agregados Reciclados

O agregado reciclado utilizado foi coletado nas obras viárias da Macrorregião Metropolitana de Campinas, precisamente na rodovia SP-340, próximo à cidade de Aguaí em outubro de 2016. Este resíduo foi retirado por fresagem a frio para serviços de recapeamento na via por uma Fresadora Wirtgen W 1900 com cilindro contendo 162 dentes em camada de espessura média de 3cm. Foram transportados até as instalações da PUC Campinas em sacos plásticos e sacos de rafia. E por fim, dispostos no Laboratório de Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas em área coberta e protegida das intempéries.

O material foi separado granulometricamente por meio de britagem e peneiramento, sendo detalhado o procedimento utilizado a seguir. Após foi espalhado em formas metálicas três semanas antes da concretagem e alguns dias antes da concretagem foi pesado e separado em sacos plásticos. A Figura 5.33 apresenta a amostra coletada e as amostras já separadas na fase miúda e graúda respectivamente.

Figura 5.33 - Fotografia de amostra de resíduo de fresado asfáltico.



### 5.8.1. Caracterização do Agregado Miúdo

Pela propriedade de possuir diversas fases granulométricas o fresado foi peneirado manualmente por peneira de aro com malha de 6,30mm, separando se apenas o material passante e retirada manualmente folhas e outros materiais indesejáveis.

A Tabela 5.6 apresenta os ensaios utilizados para caracterização do material, sendo que foram tomados como base os critérios da NBR 15116:2004 e normas do DNER para escolha dos ensaios.

Tabela 5.6 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo reciclado.

Ensaio	Norma
Composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo da partícula	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Classificação	NBR NM 248:2003
Teor de Finos	NBR NM 46:2003
Massa Específica	NBR NM 53:2009
Massa Específica Aparente	NBR NM 53:2009
Absorção de água	NBR NM 53:2009
Teor de Ligante Asfáltico	Adaptação da DNER-ME 053:1994

A determinação da porcentagem de ligante asfáltico é um importante critério para caracterização do revestimento asfáltico, já que se envolve diretamente com a durabilidade do pavimento. Para a utilização deste resíduo, o conhecimento de tal porcentagem é de grande interesse.

O ensaio DNER-ME 053:1994 é utilizado para tal determinação, onde o fresado é colocado em um extrator centrífugo juntamente com um solvente, comumente utilizada a gasolina. A ação conjunta da energia centrífuga com o solvente gera a segregação entre agregados e ligante. A porcentagem é calculada utilizando a Equação 2:

$$T = \left[ \left( \frac{P_a - P_b}{P_a} \right) \cdot 100 \right] \quad (2)$$

Em que: T= teor de ligante (%); P<sub>a</sub>= peso da amostra antes da extração (g); P<sub>b</sub>= peso da amostra depois da extração (g);

Para um parecer inicial não se utilizou o procedimento DNER-ME 053:1994, uma vez que a porcentagem de fresado asfáltico é um item de importância para o resíduo que será reaproveitado em restauro de revestimento asfáltico de vias. Não sendo este o foco desta pesquisa, uma vez que será utilizado como agregado de construção civil, optou-se por analisar o teor através de meios viáveis realizando uma adaptação do procedimento DNER-ME 053:1994

Foi extraído o teor de ligante por agitação manual em Becker plástico e haste metálica. A princípio foi separada amostra seca de massa de 200 gr. Esta foi misturada a um litro de querosene e agitado manualmente por 5 minutos. O produto foi descartado e repetido o processo por mais três vezes, utilizando apenas 500 gr de querosene nas etapas posteriores. Decidiu-se parar o experimento na quarta tentativa pela desagregação visual do asfalto e notando-se a superfície natural dos agregados que constituem o fresado.

O material foi separado, lavado em água corrente e seco em estufa (110°C +/- 5°C) por 24 horas. Após a amostra foi pesada e verificado o teor de ligantes através dos cálculos apresentados na Equação 2.

Além disso, por se tratar de um compósito, existe uma dificuldade em determinar a massa específica e absorção de água do fresado asfáltico. Assim, Bernucci, et al (2008) recomendam que o valor adotado deve ser a média obtida por meio de um valor ponderado de várias frações da mistura conforme a Equação 3.

$$G_m = \left( \frac{1}{\frac{\%_1}{G_1} + \frac{\%_2}{G_2} + \dots + \frac{\%_n}{G_n}} \right) \quad (3)$$

Em que: G<sub>m</sub>= massa específica média (g/cm<sup>3</sup>); G<sub>1/2/n</sub>= massa específica das frações (g/cm<sup>3</sup>); %<sub>1/2/n</sub>= porcentagem das massas das frações (%);

### 5.8.2. Caracterização do Agregado Graúdo

Pela propriedade de possuir diversas fases granulométricas o fresado graúdo também foi peneirado por peneira de aro com malha de 6,30mm, separando se apenas os materiais retidos e retirados torrões de terra e folhas manualmente.

As partículas superiores a 32 mm foram britadas em britador do tipo mandíbula com fechamento de 1,50 voltas do sistema de regulagem das mandíbulas. Tal regulagem foi obtida através de diversas tentativas para uma melhor regulagem do equipamento para obtenção de agregado granulometricamente semelhante a Brita 01.

O material resultante desta britagem foi novamente peneirado e separado apenas o material retido na peneira. Após foi misturado ao material retido na primeira separação. Tal procedimento foi realizado para obter-se uma curva granulométrica mais semelhante a Brita 01.

A Tabela 5.7 apresenta os ensaios utilizados para caracterização do material, sendo que foram tomados como base os critérios da NBR 15116:2004 e normas do DNER para escolha dos ensaios.

Tabela 5.7 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo reciclado.

Ensaio	Norma
Composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo da partícula	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Classificação	NBR NM 248:2003
Teor de Finos	NBR NM 46:2003
Massa Específica	NBR 9776:2003
Determinação de Impurezas Orgânicas	NBR NM 49:2001
Teor de Ligante Asfáltico	Adaptação da DNER-ME 053:1994

### 5.9. Caracterização das fibras

As fibras de aço e vidro foram caracterizadas conforme a NBR 15530:2007. Sendo verificados os critérios conforme a Tabela 5.8. Os critérios de verificação dimensional e verificação de defeitos foram atendidos.

Tabela 5.8 - Ensaio para caracterização das fibras de aço e vidro.

Ensaio	Norma
Verificação dimensional	NBR 15530: 2007
Verificação de defeitos	NBR 15530: 2007
Dobramento	NBR 15530: 2007

Em relação a dobramento foi realizado manualmente em pino de aço de aproximadamente 3 cm e não ocorreu ruptura das fibras de aço. Em relação as fibras de vidro, observou-se que após serem dobradas elas retornavam a seu formato original, diferentemente das fibras de aço. Uma vez que a norma não contempla o caso das fibras de vidro em específico podemos dizer que tal critério foi atendido.

As fibras de aço utilizadas são apresentadas na Figura 5.34. As características fornecidas pelo fabricante são: Diâmetro de 1 mm; Comprimento de 50 mm; Fator Forma: 50; com ganchos; Resistência à tração superior a 1.100 MPa, Módulo de Elasticidade de 210.000 MPa. Os limites de dosagem não foram especificados pelo fabricante.

Figura 5.34 - Fibras de aço.



As fibras de vidro utilizadas são apresentadas na Figura 5.35. As características fornecidas pelo fabricante são: Tipo AR (Álcali Resistente), Diâmetro de 1 a 2 mm; Comprimento de 36 mm, Fator Forma 67, sem ganchos, Resistência à tração variando entre 1.000 a 1.700 MPa, Módulo de Elasticidade

de 72.000 MPa e limites de dosagem de 15 kg/m<sup>3</sup> conforme recomendação do fabricante.

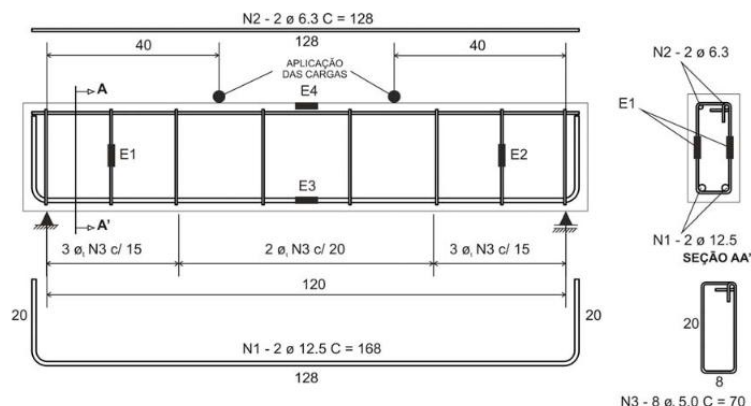
Figura 5.35 - Fibras de vidro.



### 5.10. Processo de Fabricação das Vigas

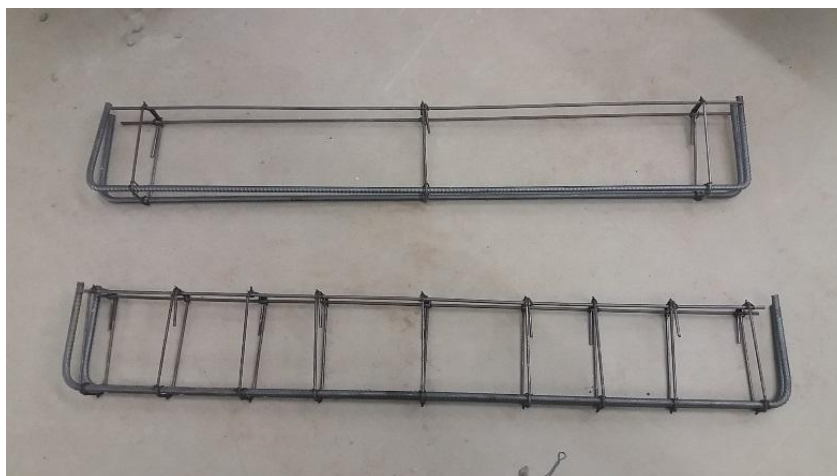
Como anteriormente citado, as vigas foram baseadas no trabalho desenvolvido por Barros (2009). Sendo confeccionadas 2 peças para cada traço. Sendo que a primeira, idêntica a utilizada por Barros (2009), contendo armadura transversal insuficiente para induzir a ruptura por flexão e acentuar a solicitação dos estribos conforme a Figura 5.36 e denominada com a sigla “CE” nesta pesquisa. A outra apenas com armadura transversal construtiva. Como é ilustrado na Figura 5.37 e denominada com a sigla “SE” nesta pesquisa.

Figura 5.36 - Detalhamento de Vigas de Concreto Armado.



Fonte: Barros, 2009.

Figura 5.37 - Armaduras de vigas conforme projeto de Barros, 2009 e com armadura reduzida.



Tal redução foi determinada para melhor verificar a ação das fibras no concreto, uma vez que é de entendimento que as distancias adotadas estão acima dos limites estabelecidos na NBR 6118 (2014) onde se determina que a distância máxima entre os estribos é de 30 cm. A seção transversal da viga possui 14 cm de largura e 26 cm de altura.

A viga possui armadura longitudinal composta por duas barras de aço com 12,50 mm (N1), armadura construtiva (apenas para estruturação da viga) composta por duas barras de aço com 6,30 mm (N2), oito estribos com bitola de 5 mm (N3) para a peça de Barros (2009) e três estribos com bitola de 5 mm para a peça com armadura construtiva (SE).

A viga possui um vão livre de 1,20 m e aplicação de cargas equidistantes e idênticas (mesma intensidade) sob 2 cutelos a 40 cm das faces laterais da peça.

As formas foram confeccionadas com placas de madeira compensada, plastificadas/resinadas e presas por parafusos. As armaduras receberam espaçadores plásticos dos tipos “cadeirinha” e “circular” para manter o cobrimento mínimo de 30 mm em cada face e centralizar a armadura na forma. A Figura 5.38 apresenta a forma utilizada.

Figura 5.38 - Forma de madeira.



Para controle da deformação foram inseridos quatro extensômetros (*strain gates*) por armadura, sendo dois no centro da armadura longitudinal (E3) e dois nos estribos localizados no primeiro terço da peça (E1 e E2) conforme ilustra a Figura 5.36.

Devido as diferentes bitolas das barras foram adotados dois tipos de extensômetros, sendo utilizados na posição E3 o modelo PA-06-250CBA-350-L e utilizados nas posições E1 e E2 o modelo PA-06-50CBA-350L.

Os extensômetros foram conectados ao aquisitor de dados por meio de um cabo do tipo Manga blindado de oito vias para a posição E3, onde foram utilizadas apenas seis vias (três para cada extensômetro) e cabo tipo Manga blindado seis vias para as posições E1 e E2, onde foram utilizadas apenas quatro vias. Estes cabos foram escolhidos pela melhor qualidade na passagem dos dados e por possuir vias reservas caso alguma apresentasse falhas.

A flecha foi medida por meio de transdutor de deslocamento com curso de 50 mm posicionado na parte inferior da viga em seu centro geométrico, sendo



apoiado por base magnética em uma barra metálica sobre os cavaletes de apoio da viga. A carga foi medida por meio de uma célula de carga acoplada ao pórtico.

Todos os sensores (extensômetros, transdutor de deslocamento e célula de carga) tiveram os dados aquisitados por meio de um aquisitor de dados da marca HBM e suas informações recolhidas por meio do Software CatMan. Também foram realizados testes com o software desenvolvido por João Batista Lamari Palma da Silva, aluno de mestrado do Programa de Sistemas de Infra Estrutura Urbana da PUC Campinas. Após os ensaios concluídos e os dados aquisitados foram utilizados os *Softwares Excel e OriginLab* para tratamento e construção das curvas.

Como mais um parâmetro de controle foi realizado o Ensaio de Tração na Barra de aço conforme a NBR 6152 (2013) em barras de aço de bitolas idênticas as utilizadas para fixação dos extensômetros (5 mm e 12,5 mm). Os resultados foram aquisitados e tratados seguindo o mesmo procedimento utilizado nas vigas. Os resultados foram utilizados para realizar comparações entre os resultados de deformação do aço nas vigas e nas barras.

Para instalação dos extensômetros foram realizadas as etapas descritas abaixo.

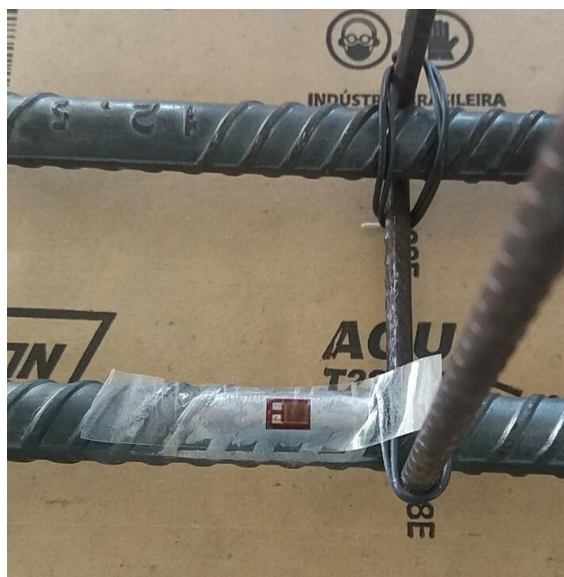
a) Remoção das moças e nervuras das barras de aço por meio de lixamento, sendo utilizados respectivamente, rebolo acoplado a furadeira, lima de aço, lixa de ferro 80 e lixa de madeira 120. Para todas as etapas o lixamento foi realizado em diversos sentidos evitando a formação de fissuras na superfície e de forma a criar uma superfície arredondada, não prejudicando a área de aço da barra. A Figura 5.39 apresenta o procedimento realizado.

Figura 5.39 - Remoção das irregularidades da barra de aço.



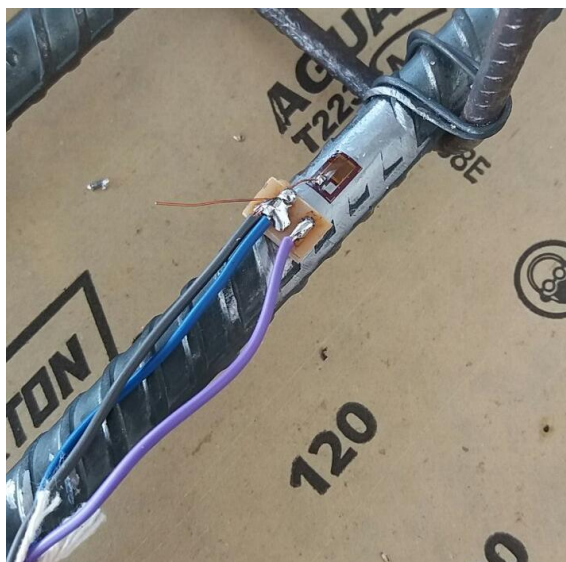
- b) Limpeza da superfície com álcool isopropílico;
- c) Fixação do extensômetro com cola de cura rápida com auxílio de uma fita adesiva incolor. Conforme ilustra a Figura 5.40.

Figura 5.40 - Fixação do extensômetro.



- d) Solda dos pontos de conexão e do cabeamento com estanho. Conforme ilustra a Figura 5.41.

Figura 5.41 - Fixação de cabeamento.



- e) Cobrimento dos sensores e conectores com cola epóxi;
- f) Após 24 horas cobrimento com fita de alta fusão;
- g) Em seguida cobrimento com fita isolante convencional, conforme ilustra a Figura 5.42.

Figura 5.42 - Proteção final dos extensômetros.

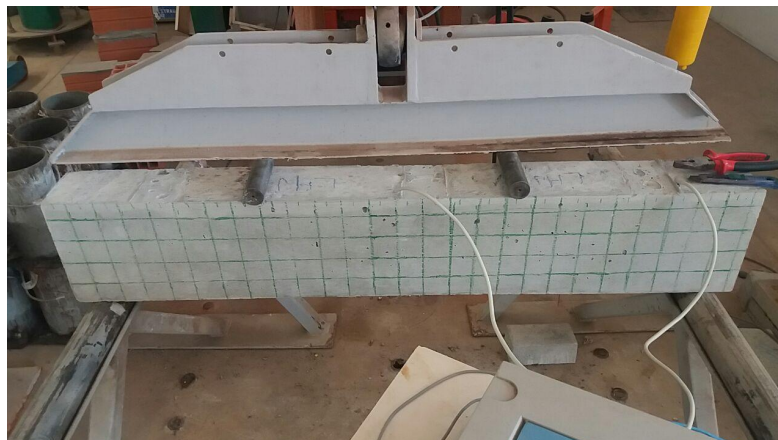


Após estas etapas foram posicionados os espaçadores plásticos na armadura e a mesma foi inserida na forma. Anteriormente foi aplicado óleo mineral na forma com pincel e após a viga foi concretada.

Após sete dias a viga foi desformada e com cinquenta e quatro dias de idade foram rompidas em pórtico conforme metodologia utilizada por Barros

(2009) para flexão a quatro pontos. A Figura 5.43. apresenta o esquema de montagem do ensaio.

Figura 5.43 - Esquema de montagem do ensaio de rompimento das vigas.



Além da aquisição de dados já detalhada, também foi verificada a fissuração da viga por meio de fotografias de forma a verificar o tipo de ruptura conforme a literatura estudada.

### 5.11. Ensaio do Concreto no Estado Endurecido

Para análise das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido serão realizados os ensaios conforme a Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Ensaio para análise das propriedades mecânicas.

Ensaio	Norma/ Procedimento
Resistência a Compressão Axial	NBR 5739:2007
Resistência a Tração por Compressão Diametral	NBR 7222:2011
Módulo de Elasticidade	NBR 8522:2008
Resistência Residual e Tenacidade	Ensaio Barcelona
Resistência Residual	ASTM C-1399
Flexão a 4 pontos em vigas de Concreto Armado	Não há



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trata dos resultados obtidos experimentalmente nesta pesquisa.

### 6.1. Caracterização dos Agregados Naturais

#### 6.1.1. Agregado miúdo

A Tabela 6.10 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo natural. Granulometricamente este material é considerável satisfatório e dentro da faixa compreendida comercialmente como areia grossa. A Tabela 6.11 apresenta outros resultados obtidos.

Tabela 6.10 - Composição granulométrica agregado miúdo natural.

<b>Peneira ABNT</b> [# em mm]	<b>Massa Retida</b> [g]	<b>Massa Retida</b> [%]	<b>Massa Retida Acum.</b> [%]
6,30	36,00	4,00	4,00
4,80	30,50	3,07	6,66
2,40	99,20	9,99	16,65
1,20	156,10	15,73	32,38
0,60	301,80	30,41	62,79
0,30	232,10	23,39	86,18
0,15	100,70	10,15	96,32
Fundo	36,50	3,68	100,00
Total	992,50	100,00	
Módulo de Finura			<b>3,01</b>
Classificação			<b>ZONA 04 (areia grossa)</b>
Diâmetro máximo (mm)			<b>6,30</b>

Tabela 6.11 - Demais ensaios realizados.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>
Teor de Finos	2,03%
Massa Específica	2,68 g/cm <sup>3</sup>
Determinação de Impurezas Orgânicas	Não apresentou
Determinação da Umid. Superficial	0,40%

Tais resultados apresentam que o agregado miúdo é adequado para utilização, tanto por sua composição estar próxima aos limites ideais como pelo teor de finos e massa específica adequadas e ausência de impurezas orgânicas.

Em relação à determinação de umidade superficial, sabendo das variações que podem ocorrer durante os dias, foi realizada a medição apresentada no ato da entrega do lote e nos dias das concretagens foi novamente verificada por meio de medidor de umidade eletrônico e os valores foram corrigidos da quantidade de água dos respectivos traços.

### 6.1.2. Agregado graúdo

A Tabela 6.12 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo natural. Granulometricamente este material é considerável satisfatório e dentro da faixa compreendida comercialmente como brita 01. A Tabela 6.13 apresenta outros resultados obtidos.

Tabela 6.12 - Composição granulométrica agregado graúdo natural.

<b>Peneira ABNT</b> <b> [# em mm]</b>	<b>Massa Retida</b> <b>[g]</b>	<b>Massa Retida</b> <b> [%]</b>	<b>Massa Retida Acum.</b> <b> [%]</b>
32,00	0,00	0,00	0
25,00	23,70	0,37	0,37
19,00	568,30	8,80	9,17
12,50	1575,60	24,41	33,58
9,50	2831,80	43,87	77,45
6,30	1051,00	16,28	93,73
4,80	82,00	1,27	95,00
Fundo	323,00	5,00	100,00
Total	6455,40	100,00	
Classificação		<b>BRITA 01</b>	
Diâmetro máximo (mm)		<b>25,0</b>	

Tabela 6.13 - Demais ensaios realizados.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>
Teor de Finos	0,54%
Massa Específica	2,87 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	1,53%
Massa Específica Aparente	1,58 g/cm <sup>3</sup>

Tais resultados apresentam que o agregado graúdo é adequado para utilização, tanto por sua composição estar próxima aos limites ideais como pelo teor de finos e massa específica adequadas. Impurezas encontradas foram separadas manualmente antes da concretagem.

## **6.2. Agregados reciclados**

Em observação aos critérios estabelecidos por Dosho (2007) para promover o reuso dos resíduos de construção se faz necessário alcançar três concepções básicas, sendo estas: Garantia da segurança do produto; Diminuição do impacto ambiental; Diminuição do custo de construção.

Visando o atendimento destes três critérios foi realizada a caracterização dos agregados reciclados em consonância com os critérios avaliados para os agregados naturais e verificada sua compatibilidade. Como exceção, tem-se a determinação de ligante asfáltico, que não foi realizada nos agregados naturais, uma vez que este componente é inexistente neste material.

Em relação à diminuição do impacto ambiental, foi levantada a provável geração deste resíduo dentro do Campus I da PUC Campinas no caso de uma manutenção geral de suas vias. A sequência metodológica tomou como base os estudos desenvolvidos por Ruiz (2017) que também verificou a diminuição do impacto ambiental na reciclagem deste resíduo.

Por último, em relação à diminuição do custo de construção foi levantado o valor estimado por metro quadrado para confecção unitária de concreto dentro do Campus I da PUC Campinas realizando uma comparação de valores entre o fresado asfáltico e o agregado natural.

Os itens de redução do impacto ambiental e custo foram apresentados em capítulo posterior para melhor linearidade das discussões, uma vez que este item



foi apresentado como critério adicional nesta pesquisa para enriquecimento do trabalho e melhor entendimento deste material também quanto ao seu uso pelo mercado.

### 6.2.1. Caracterização do agregado miúdo reciclado

A Tabela 6.14 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo reciclado. Observa-se que a faixa ficou um pouco abaixo do limite inferior granulométrico para areia grossa, sendo, caracterizada como areia média. Também em relação ao teor de finos e modulo de finura, apresentados na Tabela 6.15, observou-se que o resultado foi um pouco superior ao apresentado pela areia natural.

Tabela 6.14 - Composição granulométrica agregado miúdo reciclado.

<b>Peneira ABNT</b> <b> [# em mm]</b>	<b>Massa Retida</b> <b>[g]</b>	<b>Massa Retida</b> <b> [%]</b>	<b>Massa Retida Acum.</b> <b> [%]</b>
6,30	0,00	0,00	0,00
4,80	0,00	0,00	0,00
2,40	167,70	33,63	33,63
1,20	135,70	27,22	60,85
0,60	76,70	15,38	76,23
0,30	115,60	23,18	99,42
0,15	0,00	0,00	99,42
Fundo	2,90	0,58	100,00
Total	498,60	100,00	
Módulo de Finura		<b>3,70</b>	
Classificação		<b>ZONA 03 (areia media)</b>	
Diâmetro máximo (mm)		<b>4,80</b>	

Tabela 6.15 - Demais ensaios realizados.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>
Teor de Finos	3,20%
Massa Específica	2,24 g/cm <sup>3</sup>
Determinação de Impurezas Orgânicas	Não apresentou
Determinação da Umid. Superficial	Não apresentou
Determinação de Teor de Ligante Asfáltico	26,75%

Tais resultados se devem ao processo de fresagem que neste caso gerou um maior volume de particulado fino, por ser uma raspagem superficial e não uma demolição que envolve a remoção de várias camadas. Portanto, observou-se que fresadoras mais robustas acabam por quebrar o asfalto em partículas maiores, gerando um resíduo mais apropriado para britamento. Equipamentos que realizam a raspagem superficial irão gerar partículas menores e com maior teor de finos, sendo mais facilmente separados granulometricamente por peneiramento, como foi o caso do material utilizado nesta pesquisa. Portanto observou-se um teor de finos 57,63 % superior ao agregado natural.

Em relação a massa específica, observou-se um resultado 16,41% inferior ao agregado natural. Tais resultados provavelmente ocorreram pela presença de ligante asfáltico na composição do fresado que o tornam mais “leve” do que o agregado natural.

Como esperado o material não apresentou contaminação por material orgânico e nem umidade superficial devido ao processo de separação anteriormente citado, em que o material perdeu a pouca umidade retida durante as semanas por evaporação no ambiente.

Em relação ao teor de ligante asfáltico já era esperado este valor, em vista da maior área de contato que este material apresenta e de sua granulometria.

Sendo assim, os resultados estão de acordo com os dados obtidos para a areia natural. Mesmo com as divergências de alguns dos resultados apresentados o uso deste material na forma de agregado miúdo é aceitável.

### **6.2.2. Caracterização do agregado graúdo reciclado**

A Tabela 6.16 apresenta a composição granulométrica do agregado graúdo reciclado. Demais resultados foram apresentados na Tabela 6.17.

Tabela 6.16 - Composição granulométrica agregado graúdo reciclado.

<b>Peneira ABNT [# em mm]</b>	<b>Massa Retida [g]</b>	<b>Massa Retida [%]</b>	<b>Massa Retida Acum. [%]</b>
32,00	0,00	0	0
25,00	0,00	0,31	0,31
19,00	0,31	6,34	6,34
12,50	3,30	0,17	0,17
9,50	35,20	1,80	1,97
6,30	423,50	21,71	23,68
4,80	191,00	9,79	33,47
Fundo	1298,00	66,53	100,00
Total	1951,00	100,0	
Classificação		<b>Brita 01</b>	
Diâmetro máximo (mm)		<b>25,0</b>	

Tabela 6.17 - Demais ensaios realizados.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultados</b>
Teor de Finos	0,84%
Massa Específica	2,65 g/cm <sup>3</sup>
Absorção de água	0,78%
Massa Específica Aparente	1,43 g/cm <sup>3</sup>
Determinação de Teor de Ligante Asfáltico	15,35%

Em relação a composição granulométrica observa-se que os resultados são bastante semelhantes aos apresentados pelo agregado natural, sendo classificados na mesma faixa granulométrica.

O Teor de finos apresentado é 55,56% superior ao agregado natural, tal valor é observado devido ao processo de fresagem como anteriormente citado. Em relação a massa específica observa-se um valor 7,67% inferior ao agregado natural. Tal resultado é bastante semelhante e podemos afirmar que neste caso, devido ao tamanho das partículas o menor peso específico do ligante não se fez tão influente como na fase miúda.

Em relação a absorção de água, como já esperado, tem-se um resultado 49,01% inferior ao agregado natural, provavelmente devido a presença de ligante

asfáltico no entorno das partículas. A massa específica aparente também apresentou variação muito pequena, sendo semelhante ao agregado natural.

O teor de ligante asfáltico é 11,40% inferior a fase miúda devido a menor área de contato resíduo/ ligante como já dito anteriormente.

Sendo assim, os resultados estão de acordo com os dados obtidos para a brita 01 natural. Mesmo com as divergências de alguns dos resultados apresentados o uso deste material na forma de agregado graúdo é aceitável.

### 6.3. Concreto no Estado Fresco

Para caracterização do estado fresco foi adotado o Ensaio Slump Test (NM 67:1998). A caracterização desta etapa é de grande importância em vista que determinará diretamente a trabalhabilidade no processo de moldagem. A Tabela 6.18 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.18 - Verificação de abatimento por meio de Slump Test

Série	Abatimento (mm)
TREF	80
TFRES	65
TFVI	30
TFVII	25
TFAI	30
TFAII	20

Notou-se uma redução da trabalhabilidade entre os traços TREF e TFRES em cerca de 18,75%. Hansen e Narudi (1983) afirmam que concretos com RCD podem necessitar de até 5% de água para atingir a consistência de um concreto referência. Também afirmam que a forma mais angular e superfície áspera do agregado reciclado são motivos que demandam maiores quantidades de água.

Outro fator importante que diferencia o resíduo de fresado asfáltico do RCD comum, é que parte de sua área é recoberta por asfalto, que de certa forma impermeabiliza o material.

Sendo assim, podemos afirmar que uma possível resposta para a redução deste abatimento pode ter ocorrido principalmente por conta da forma deste resíduo e pela ação dos finos presentes em maior quantidade na fração miúda e graúda como já apresentado anteriormente.

Com a adição das fibras houve uma nova redução da trabalhabilidade bastante considerável, sendo respectivamente 53,85%, 61,54%, 53,85% e 69,23% (TFVI, TFVII, TFAI, TFAII) em relação ao TFRES.

Estes valores já eram esperados em vista da ação das fibras no concreto, uma vez que adsorvem a água em sua superfície e dificultam a locomoção dos agregados. Tais propriedades das fibras, unidas a presença do resíduo de fresado asfáltico tornaram o concreto pouco trabalhável mesmo com a taxa de argamassa melhorada em relação ao traço proposto por Salvador (2013).

Para uma melhor parametrização quanto a classificação deste abatimento, utilizou-se a Tabela 6.19 proposta por Andolfato (2002).

Tabela 6.19 - Classificação das consistências do concreto.

<b>Consistência</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
Seca	0 a 20
Firme	20 a 50
Média	50 a 120
Mole	120 a 180
Fluida	180 a 250

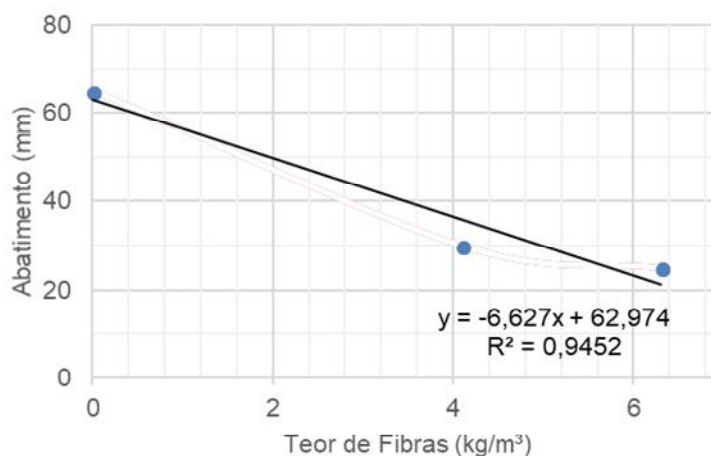
Observou-se que as dosagens TREF e TFRES apresentam consistência média e as dosagens TFVI, TFVII, TFAI apresentam consistência firme e TFAII apresenta consistência seca. A ação das fibras notoriamente reduziu a trabalhabilidade do concreto.

Andolfato (2002) propõe que o abatimento ideal para vigas seja de 50 mm a 100 mm. Sendo assim, apenas TREF e TFRES atenderiam a um uso comercial deste concreto quanto a sua trabalhabilidade. Entretanto, podemos afirmar que estes resultados não causaram qualquer prejuízo na etapa de

moldagem ou demais análises. Somente é interessante, a título de produção em maior escala, realizar uma correção da trabalhabilidade, por meio da adição de maiores teores de aditivo superplastificante, a fim de garantir pelo menos o abatimento de 50 mm proposto na literatura para as dosagens com fibras.

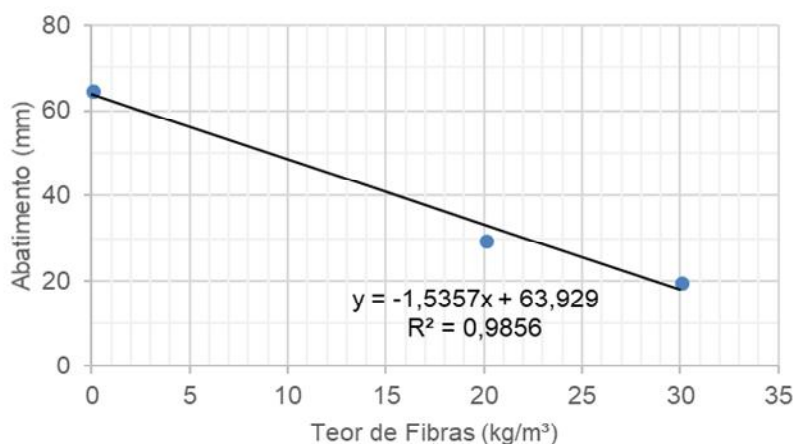
Para uma melhor visualização do efeito das fibras representou-se os resultados através de curvas em gráficos de abatimento por teor de fibras, sendo a Figura 6.44, referente ao comportamento das fibras de vidro e a Figura 6.45, referente ao comportamento das fibras de aço.

Figura 6.44 - Redução do abatimento em Fibras de



Vidro.

Figura 6.45 - Redução do abatimento em Fibras de



Aço

Observou-se que a fibra de vidro, mesmo em menor massa, afetou majoritariamente a queda do abatimento. Sendo assim, podemos afirmar que

altas dosagens de fibra de vidro reduziriam consideravelmente a trabalhabilidade e pode este ser um fato para os limites impostos na dosagem deste material pelo fabricante.

Esta redução no abatimento é observada diante da linha de tendência apresentada para fibra de vidro na Figura 6.44, onde o fator multiplicativo de “x” possui valor bem mais elevado do que o apresentado para a fibra de aço. Sendo assim para dosagens maiores de fibra de vidro a queda do abatimento será mais acentuada se comparada a fibra de aço.

Não é possível realizar demais afirmações quanto aos reais motivos desta maior queda de abatimento nas fibras de vidro, porém observou-se visualmente que este material pode ser mais poroso. Sendo assim, pode ter ocorrido uma absorção de parcela da água livre na mistura pelas fibras, reduzindo assim seu abatimento mesmo em menor dosagem se comparada as fibras de aço. Outro fator bastante preponderante seria o menor peso específico que este material apresenta em comparação com a fibra de aço, sendo assim, o volume aplicado é bem mais expressivo.

A confiabilidade das curvas pode ser afirmada através da regressão linear das equações apresentadas, uma vez que o  $R^2$  foi de aproximadamente 94% para a curva da fibra de vidro e de 98% para a curva da fibra de aço.

Ainda, em vista de criar um melhor cenário para avaliação da trabalhabilidade, coletou-se os dados de temperatura e umidade relativa do ar nas datas das concretagens conforme descrito no capítulo anterior. Tais dados foram coletados em vista de criar um banco de dados para pesquisas posteriores e criar correlações entre o abatimento de concretos e o clima local, uma vez que carecem de literaturas que demonstrem estas relações.

A Tabela 6.20 apresenta os dados coletados, sendo apresentadas as datas de concretagem e suas respectivas dosagens.

Buscou-se concentrar as concretagens em datas com perfil climático mais semelhante possível para evitar demais interferências na trabalhabilidade do concreto, uma vez que imaginamos que possa ocorrer uma forte correlação entre clima (temperatura e umidade do ar) e o abatimento. Portanto, nota-se intervalos elevados, em relação as datas, entre as séries produzidas.

Tabela 6.20 - Dados Climáticos.

Dosagem	Data	Temperatura (°C)	Umidade (%)
TREF	17/01/2018	25,41	68,95
TFRES	23/11/2017	21,62	63,07
TFVI	23/11/2017	21,62	63,07
TFVII	01/02/2018	23,16	61,54
TFAI	16/02/2018	24,16	66,37
TFAII	13/03/2018	26,38	69,32

#### 6.4. Concreto no Estado Endurecido

Em vista de uma melhor análise das capacidades resistentes dos traços confeccionados foi dada ênfase na análise do concreto em seu estado endurecido.

Para determinação final da dosagem, conforme descrito no Capítulo anterior, foram realizados testes piloto com mistura manual utilizando relação a/c 0,6. Foram moldados três corpos de prova cilíndricos e verificada sua Resistência à Compressão. O valor médio obtido foi de 17,42 MPa a 7 dias, estando fora do esperado.

Foi realizado novo teste com mesmo procedimento e número de corpos de prova, porém baixando a relação a/c para 0,50. Obteve-se o resultado médio de 24,53 MPa a 7 dias e 31,45 MPa aos 28 dias, estando ainda fora da resistência esperada.

Em seguida foi realizado um último teste com relação água/cimento (a/c) 0,40 e adição de aditivo Superplastificante em 1% da massa de cimento. Seguindo o mesmo procedimento anterior obteve-se o resultado médio de 41,75 MPa aos 28 dias, estando dentro da faixa de resistência esperada de valores médios superiores a 36,37 MPa para 28 dias.

A partir desta definição foram confeccionados os demais traços, sendo que a Tabela 6.21 ilustra o consumo unitário de materiais por traço.



Tabela 6.21 - Consumo unitário traços.

Material	Consumo (Kg/m <sup>3</sup> )					
	TREF	TFRES	TFVI	TFVII	TFAI	TFAII
Cimento CP V ARI	411,00	411,00	411,00	411,00	411,00	411,00
Areia média	945,3	803,50	803,50	803,50	803,50	803,50
Brita 01	904,2	768,57	768,57	768,57	768,57	768,57
Resíduo miúdo	0	141,79	141,79	141,79	141,79	141,79
Resíduo graúdo	0	135,63	135,63	135,63	135,63	135,63
Água	164,40	164,40	164,40	164,40	164,40	164,40
Aditivo	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11
Fibra de Aço	0	0	0	0	20,00	30,00
Fibra de Vidro	0	0	4,10	6,30	0	0

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados.

#### 6.4.1. Resistência a Compressão Axial

Os resultados médios de resistência a compressão axial estão descritos na Tabela 6.22 para a idade de 7 dias e na Tabela 6.23 para a idade de 28 dias. Por meio dos resultados obtidos notou-se que houve pouca variação na resistência, conforme o esperado, uma vez que a literatura já nos confirma que os resultados de resistência à compressão pouco se alteram na presença das fibras e nesta proporção de resíduo.

Tabela 6.22 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias.

Série	Resist. Compr.	Desvio Padrão
	(MPa)	(MPa)
TREF	39,02	1,70
TFRES	32,05	3,03
TFVI	35,23	3,75
TFVII	43,51	2,69
TFAI	34,02	1,14
TFAII	34,84	0,52

Tabela 6.23 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias.

Série	Resist. Compr. (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
TREF	43,08	0,83
TFRES	38,03	2,04
TFVI	39,68	3,10
TFVII	45,03	1,41
TFAI	39,12	1,36
TFAII	39,60	3,04

Vale ressaltar que a resistência apresentada deve ser superior a resistência característica do concreto estipulada na dosagem como apresenta a Equação (4).

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,65.S_d \quad (4)$$

Em que:  $f_{cm}$  = resistência média do concreto a 28 dias (MPa);  $f_{ck}$  = resistência característica do concreto a 28 dias (MPa);  $S_d$  = desvio padrão da dosagem (MPa); Tais equações estão dispostas na NBR 12.655 (2006).

Sendo assim, tem-se para um concreto com  $f_{ck}$  de 30 MPa, deve-se obter um concreto com  $f_{cj}$  de no mínimo 36,37 MPa aos 28 dias, considerando-se as condições de laboratório e os resultados obtidos para 8 corpos de prova analisados no traço referencia. E observou-se que todas as dosagens apresentaram resultados semelhantes ou superiores a este valor conforme descrito na Tabela 6.23.

Tal parâmetro já nos garante inicialmente que todas as dosagens estão adequadas quanto a Resistência a Compressão, mesmo assim foram analisados os resultados pontualmente na descrição abaixo.

Notou-se uma queda de resistências entre os traços TREF e TFRES devido a ação do resíduo de fresado asfáltico sendo 17,86% aos 7 dias e 11,73% aos 28 dias.

Segundo Jadovski (2005), diversos autores apresentam que pode ocorrer uma queda de resistência significativa na presença de RCD em concretos, sendo de 50% a 70% para traços ricos (1:3 – cimento: agregados) e 60% a 70% para traços médios (1:5 – cimento: agregados). Porém conforme observado por Ruiz

(2017) a substituição dos agregados naturais por resíduo de fresado asfáltico na devida proporção de 15% pouco altera suas resistências.

A baixa variação de resistência entre as dosagens TREF e TFRES podem também estar ligadas a questão de cobertura por ligante asfáltico deste resíduo, como já exemplificado no item que trata do concreto em seu estado fresco.

Mesmo com tal divergência o concreto continua sendo classificado estruturalmente conforme a NBR 6118 (2014). Conforme esperado houve um aumento de ambas as resistências aos 28 dias, o que nos comprova o efeito não deletério deste resíduo nas primeiras idades.

Ainda em relação a este aumento de resistência ao longo das idades, notou-se que ele foi mais expressivo no traço TFRES, porém não existem dados suficientes para associar tal crescimento diretamente a este resíduo.

As Figuras 6.46 e 6.47 apresentam graficamente os resultados obtidos nas idades de 7 e 28 dias respectivamente. Notou-se pouca divergência de valores, como já citado anteriormente e um desvio padrão relativamente baixo.

Figura 6.46 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias.

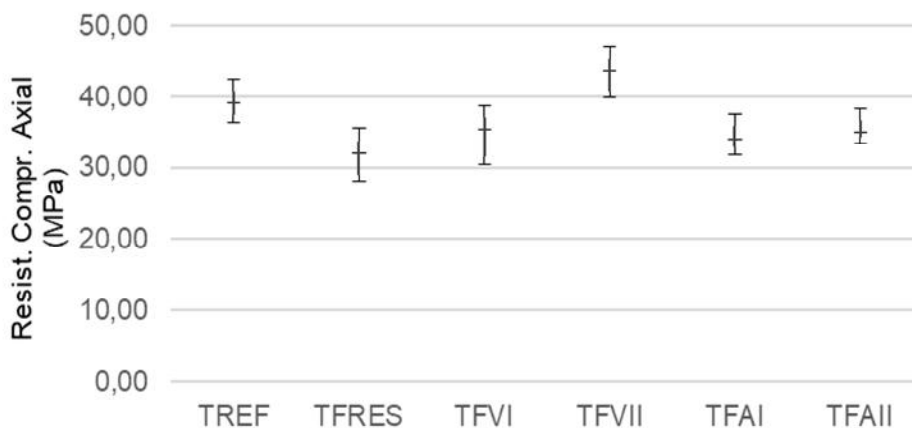
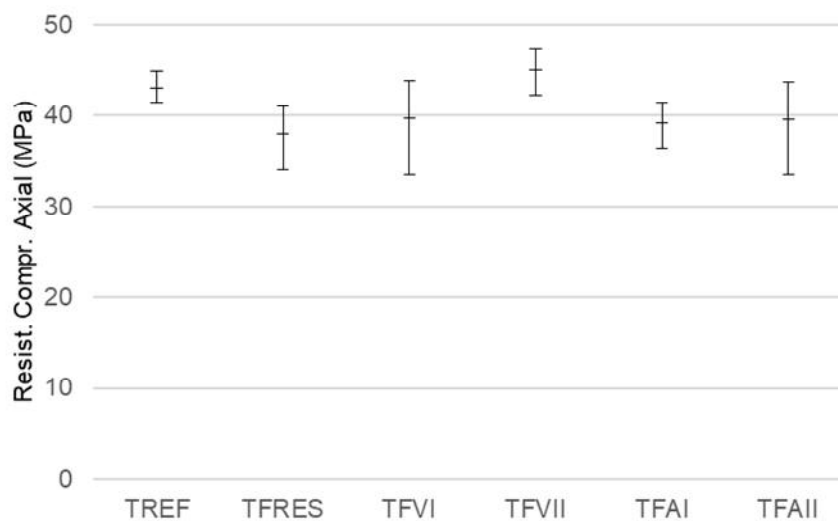


Figura 6.47 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias.



Em observação as dosagens de CRF, notou-se pouca variação em relação ao TFRES, sendo os resultados de 4,34%, 2,87% e 4,13% superiores para os traços TFVI, TFAI e TFALL respectivamente aos 28 dias.

Somente a dosagem TFVII que se destacou em relação aos demais, inclusive a TREF, ficando 18,41% acima do TFRES e 4,53% acima do TREF. Tais resultados podem ter sido obtidos pela dosagem mais elevada de fibras de vidro no traço TFVII, porém não se é possível realizar afirmações precisas.

Vale reforçar que mesmo com esta resistência tendo sido superior os valores ainda são considerados semelhantes aos demais e em análise ao seu desvio padrão pode-se observar que a resistência inferior está próxima a 43,00 MPa.

#### 6.4.2. Resistência a Compressão Diametral

Os resultados médios de resistência a tração por compressão diametral estão descritos na Tabela 6.24 para a idade de 7 dias e Tabela 6.25 para a idade

de 28 dias. Por meio dos resultados obtidos notou-se que houve uma maior variação de resultados principalmente pela ação das fibras no concreto.

*Tabela 6.24 - Resistência a Compressão Diametral – 7 dias.*

<b>Série</b>	<b>Resist. Compr. (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
TREF	4,05	0,21
TFRES	3,02	0,45
TFVI	3,74	0,33
TFVII	4,78	0,68
TFAI	3,46	0,27
TFAII	3,89	0,45

*Tabela 6.25 - Resistência a Compressão Diametral – 28 dias.*

<b>Série</b>	<b>Resist. Compr. (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão (MPa)</b>
TREF	4,76	0,32
TFRES	3,27	0,34
TFVI	3,95	0,48
TFVII	4,49	0,14
TFAI	3,92	0,31
TFAII	4,46	0,33

Observa-se uma queda de resistência se comparados o TREF com o TFRES, sendo de 25,43% aos 7 dias e 31,30% aos 28 dias. Sabendo-se que haverá uma queda de resistência devida ao uso do fresado na resistência a compressão está ação também ocorrerá com a resistência à tração.

Porém, com a adição das fibras estas resistências voltam a se elevar, principalmente quando se observou os resultados apresentados há 28 dias. Analisando os resultados entre TFVI e TFVII observa-se um aumento de 13,67% e no caso das dosagens TFAI e TFAII observa-se um crescimento de 13,76%. Ambos os crescimentos apresentados se deram proporcionalmente, o que mais uma vez nos mostra a ação das fibras que ao terem sua dosagem proporcionalmente aumentada em ambos os traços a melhora apresentada também foi proporcional.

Sabendo que conforme a NBR 6118 (2014) a resistência a tração é cerca de 10% da resistência a compressão pode-se observar que em relação aos dados apresentados de Resistência à Compressão Axial a 28 dias para os traços de maior destaque (TFVII e TFAII) tem-se uma variação negativa de apenas 0,29% no resultado analisando o TFVII e uma variação positiva de 12,63%.

As Figuras 6.48 e 6.49 representam graficamente estes resultados.

Figura 6.48 - Resistência a Compressão Axial – 7 dias.

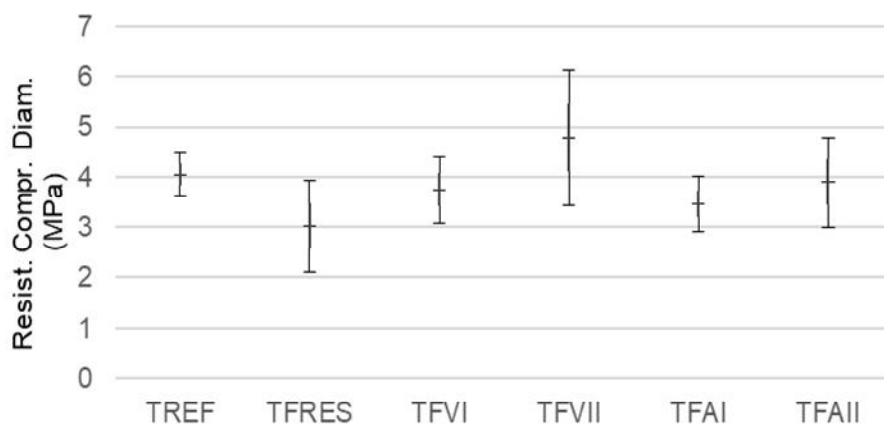
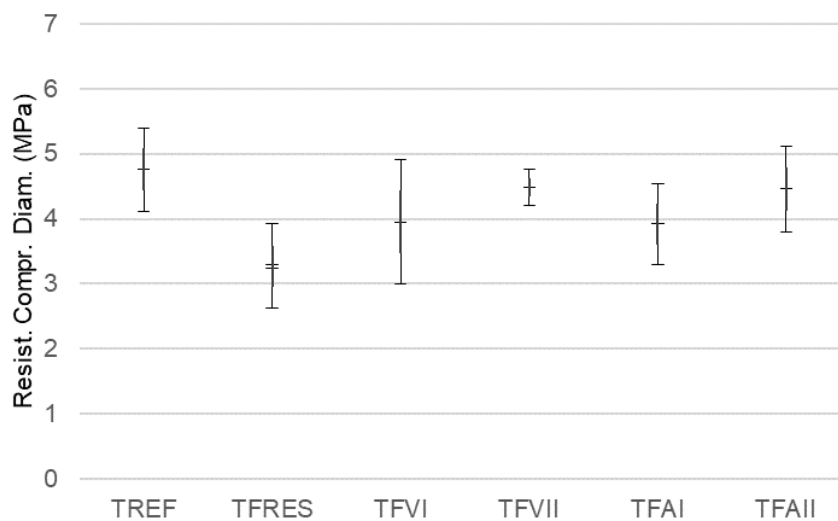


Figura 6.49 - Resistência a Compressão Axial – 28 dias.

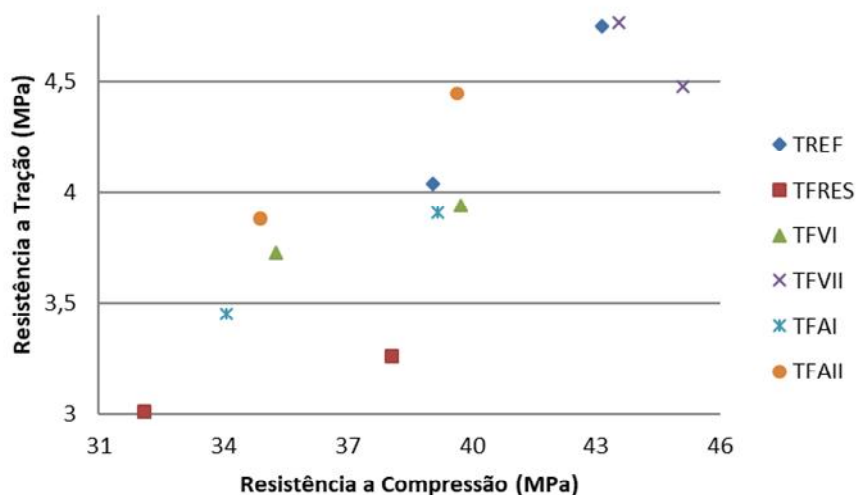


Para melhor entendimento da Resistência a Compressão e Resistência a Tração foram criadas correlações entre os resultados em suas respectivas idades por meio da Figura 6.50.

Observa-se para todos os casos um aumento de ambas as resistências, com exceção da dosagem TFVII que apresentou uma baixa redução da Resistência a Tração.

Em análise ao TREF e TFRES notou-se que a presença do resíduo afetou os resultados, deslocando os respectivos pontos para a zona inferior do Gráfico e reduzindo o coeficiente angular de crescimento das resistências.

Figura 6.50 - Correlação Resist. Tração x Compressão 7 e 28 dias



Conforme esperado a ação das fibras elevou novamente as resistências. Sendo observado que as maiores dosagens de fibras aproximaram o desempenho do concreto com resíduos do concreto referência. Sendo que apresentaram desempenho semelhante ou superior apenas o TFVII e TFAII.

#### 6.4.3. Módulo de Elasticidade

Os resultados médios do Módulo de Elasticidade estão descritos na Tabela 6.26 e apresentados graficamente na Figura 6.51 para a idade de 28 dias. Por meio dos resultados obtidos notou-se que houve uma baixa variação de resultados.

Em relação ao TREF e TFRES observou-se um acréscimo de 0,33%, valor este que apresenta que a presença do fresado não afetou o Módulo de Elasticidade deste concreto. Porém ao se analisar as dosagens com fibras observou-se que ocorre um aumento progressivo com o aumento da dosagem de fibras.

Comparando o TFRES com o TFVI e TFVII observou-se uma queda pouco expressiva de 2,41% e após um acréscimo de 7,78% no Módulo de Elasticidade. Comparando o TFRES com o TFAI e TFAII observou-se um acréscimo de 7,86% e 9,65%.

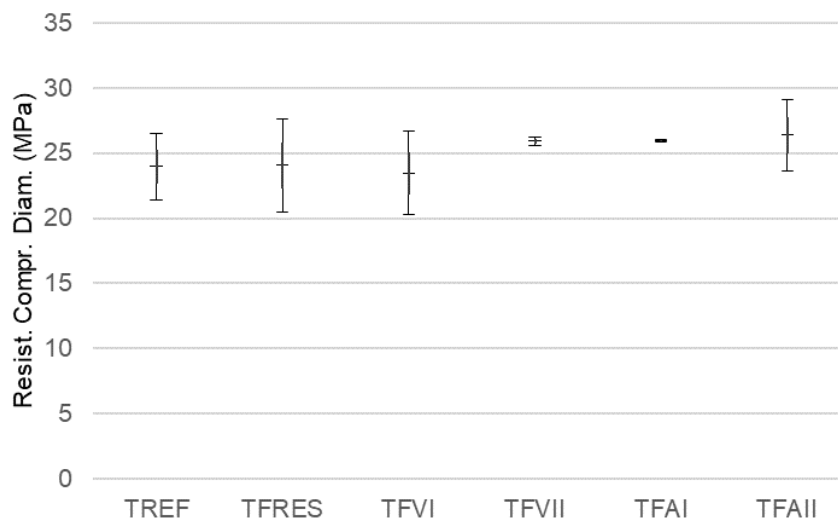
*Tabela 6.26 - Módulo de Elasticidade – 28 dias.*

<b>Série</b>	<b>Mod. Elast. (GPa)</b>	<b>Desvio Padrão (GPa)</b>
TREF	23,96	1,27
TFRES	24,04	1,80
TFVI	23,46	1,61
TFVII	25,91	0,17
TFAI	25,93	0,03
TFAII	26,36	1,35

Porém, tais acréscimos em resistência não representam significativamente alguma melhora no concreto e conforme a literatura estudada o Módulo de Elasticidade é uma propriedade que permanece pouco alterada na presença de fibras.



Figura 6.51 - Modulo de Elasticidade – 28 dias.



#### 6.4.4. Ensaio Barcelona

Para análise da Tenacidade foi utilizada uma simplificação do Ensaio Barcelona (AENOR UNE 83515) proposto por Pujadas, *et al* (2013) denominado Ensaio Barcelona Simplificado (EBS). Sendo utilizados corpos de prova cilíndricos com 15cm de altura e 15 cm de diâmetro moldados no Laboratório de Materiais e Estruturas da PUC Campinas.

São apresentadas, primeiramente, as curvas de cada corpo de prova e dosagem num gráfico de relação carga aplicada por deslocamento vertical. Estas curvas foram construídas com o auxílio do *software OriginLab*. Foram excluídos os corpos de prova que não apresentaram rompimento adequado (formando 3 partes), ou ainda com dimensões que apresentaram divergências elevadas na altura, diâmetro ou superfície muito irregular. Tal exclusão se dá pelo fato de inviabilizar os cálculos posteriores para esta análise.

Foi utilizado equipamento capaz de aquistar a carga aplicada e o deslocamento vertical. Não foi realizada a verificação da abertura diametral (TCOD), uma vez que a literatura nos confirma que é possível realizar este ensaio sem este controle.

Segundo Pujadas, *et al* (2013), o ensaio Barcelona original propõe a utilização de um extensômetro de circunferência (TCOD), porém este equipamento é caro e difícil de ser encontrado na maioria dos laboratórios. Sendo assim, ao invés de se medir o aumento perimetral da amostra é medida apenas o deslocamento vertical e feita uma conversão analítica para os valores de TCOD.

Para esta conversão do deslocamento vertical para TCOD podem ser utilizadas as Equações 5, 6 e 7 abaixo descritas.

$$TCOD = 0 \quad \delta \leq \delta_{cr} \quad (5)$$

$$TCOD = n \times \frac{a \times \delta_{R,0}}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \left( 1 - \frac{F}{F_{cr}} \right) \quad \delta_{cr} < \delta < \delta_{R,0} \quad (6)$$

$$TCOD = n \times \frac{a}{2 \times l} \times \text{sen} \frac{\pi}{n} \times \left[ \delta - \delta_{cr} + \delta_{R,0} \times \left( 1 - \frac{F_{R,0}}{F_{cr}} \right) \right] \quad \delta \geq \delta_{R,0} \quad (7)$$

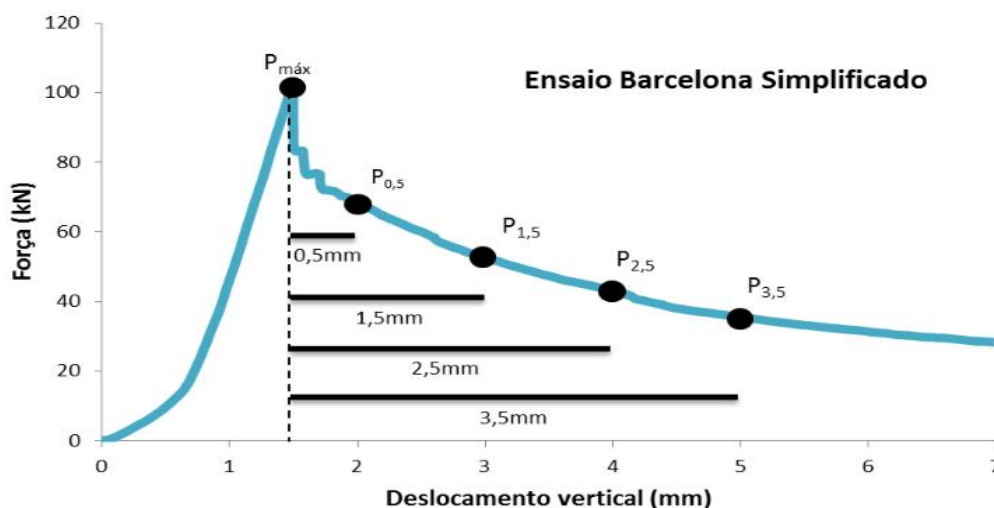
Em que:  $TCOD$  = deslocamento diametral (mm);  $\delta$  = ponto qualquer anterior ao ponto de ruptura (mm);  $\delta_{cr}$  = ponto de ruptura (mm);  $\delta_{R,0}$  = ponto de início da resistência residual (mm);  $n$  = número de planos formados na ruptura (considerar  $n = 3$  - adimensional);  $a$  = diâmetro da cunha (mm) (considerar  $a = 25$  mm);  $l$  = comprimento da cunha (mm) (considerar  $l = a$ );  $F$  = carga aplicada (kN);  $F_{cr}$  = carga no ponto de ruptura (kN);  $F_{R,0}$  = carga na resistência residual (kN)

Pujadas, *et al* (2013) afirmam que por meio de correlações entre o Ensaio Barcelona e o Ensaio Barcelona Simplificado (EBS) foi verificado um erro inferior a 6,70%. Durante o ensaio nota-se três fases distintas de comportamento, sendo a primeira elástica linear (pré-fissuração), transição e resistência residual (pós-fissuração).

Sendo assim, os autores determinam que para ser realizada a análise correta do Ensaio Barcelona Simplificado devem ser desconsiderados os valores antes da carga de fissuração e avaliados somente os valores após este momento.

Em vista de apresentar dados que possam ser futuramente comparados com outras pesquisas e atender aos limites estabelecidos em norma, foram apresentados em tabela os valores respectivos de carga aplicada para os deslocamentos verticais de 0,50mm, 1,50mm, 2,50mm e 3,50 mm após o ponto de ruptura e o próprio ponto de ruptura, conforme estabelecem Pujadas, *et al* (2013). Sendo desconsiderados os valores superiores a 3,50mm após o ponto de fissuração. A Figura 6.52 apresenta esta situação numa curva genérica para um concreto com fibras de aço submetido ao Ensaio Barcelona Simplificado.

Figura 6.52 - Pontos de análise ensaio Barcelona



Fonte: Nogueira, et al (2017)

Após a apresentação das curvas, foi inserida uma tabela apresentando os valores de Resistência à Fissuração e Resistência Residual nos pontos destacados acima. E por último realizado o cálculo da Tenacidade, objetivo deste ensaio.

A Figura 6.53 representa as curvas obtidas para a dosagem TREF. Nota-se o comportamento frágil do material, conforme descrito na literatura, uma vez que após atingir a carga de ruptura o concreto rapidamente perde sua capacidade resistente. Verifica-se que as curvas CP5 e CP4 não ficaram



A Figura 6.54 representa as curvas obtidas para a dosagem TFRES. Observa-se também um comportamento frágil do material, porém como já esperado as capacidades de carga na fissuração foram ligeiramente menores do que as apresentadas no traço referência (TREF). Assim como na dosagem TREF, também observou-se pouco deslocamento vertical. A curva CP1 apresentou deslocamento extremamente baixo e não ficou visível no gráfico.

A curva CP2 apresentou uma queda bastante acentuada após a ruptura e com carga próxima a zero a partir do deslocamento 0,25 mm. A curva CP3 foi a que apresentou melhor desempenho para carga e deslocamento neste caso, porém igualmente a TREF observa-se uma queda acentuada da carga após a ruptura.

A Tabela 6.28 apresenta os parâmetros de carga. Como dito anteriormente observa-se que apenas dois dos corpos de prova apresentaram deslocamento após o ponto de ruptura. Tais resultados já eram esperados em vista que esta dosagem não possui fibras em sua composição.

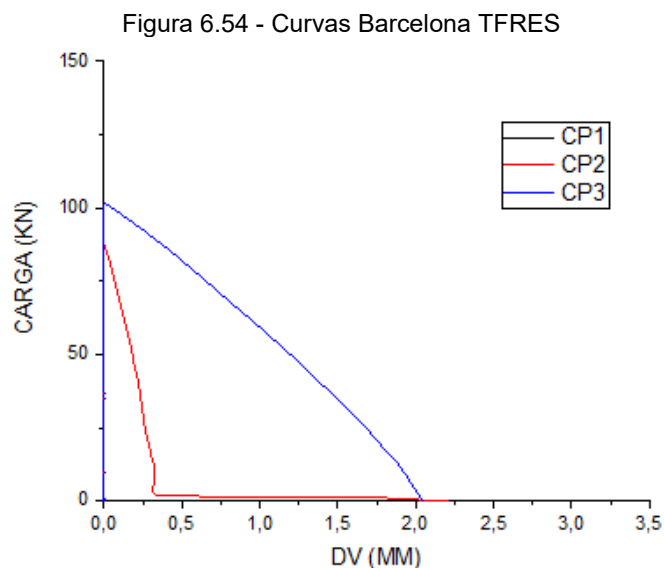


Tabela 6.28 - Parâmetros de Carga TFRES.

Etapa	CP1		CP2		CP3	
	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0,075	77,682	0,011	89,252	0,000	101,498
0,50Pf	0,000	0,000	0,511	1,722	0,500	77,213
1,50Pf	0,000	0,000	1,511	1,139	1,500	32,500
2,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Figura 6.55 representa as curvas obtidas para a dosagem TFVI. Nestes resultados já se observa a ação das fibras, mesmo em baixa dosagem. Podemos realizar tal afirmação mediante as curvas que se deslocaram horizontalmente em sentido direito, apresentando o surgimento da resistência residual através do maior deslocamento apresentado pelo transdutor de deslocamento. Ocorreu também um aumento da carga aplicada se comparado ao TREF e TFRES.

Todas as curvas apresentaram comportamento bastante semelhante, somente com exceção de CP2 que apresentou a ruptura com menor deslocamento.

A Tabela 6.29 apresenta os parâmetros de carga. Observou-se que as cargas na primeira fissura foram superiores as dosagens anteriores.

Figura 6.55 - Curvas Barcelona TFVI

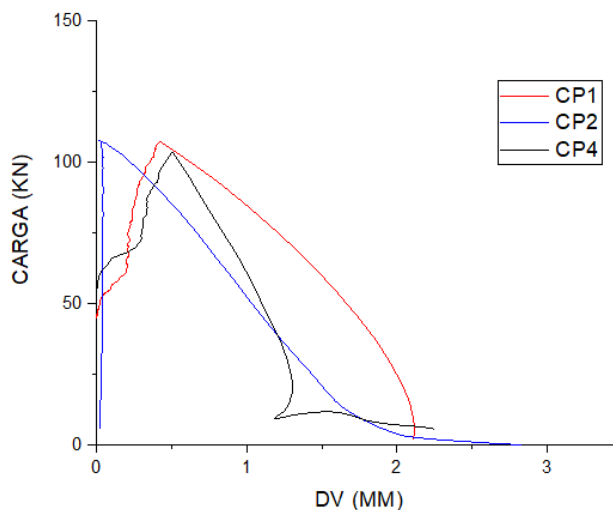


Tabela 6.29 - Parâmetros de Carga TFVI

Etapa	CP1		CP2		CP4	
	Desl. (mm)	Carga (Kn)	Desl (mm)	carga (Kn)	Desl (mm)	carga (Kn)
Fissuração (Pf)	0,424	107,312	0,011	107,780	0,505	103,688
0,50Pf	0,924	83,886	0,511	82,896	1,005	58,501
1,50Pf	1,924	28,596	1,511	18,392	2,005	7,023
2,50Pf	0,000	0,000	2,511	0,912	0,000	0,000
3,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Figura 6.56 representa as curvas obtidas para a dosagem TFVII. Onde observa-se claramente a ação das fibras por meio da elevação das curvas e o surgimento de um patamar nas curvas dos corpos de prova CP6, CP5 e CP3. Nota-se um aumento da carga aplicada e deslocamento se comparado a TFVI. As curvas CP3 e CP5 apresentaram um comportamento bastante semelhante. A curva CP2 apresentou uma queda de carga mais acentuada após a ruptura que as demais e a curva CP6 apresentou o melhor desempenho quanto a carga.

A Tabela 6.30 apresenta os parâmetros de carga. Observou-se que as cargas na primeira fissura se mantiveram semelhantes aos valores obtidos nos demais traços, porém o deslocamento foi bem mais expressivo neste caso se

comparado a TFVI, principalmente no que se diz respeito as cargas aplicadas após a ruptura.

Figura 6.56 - Curvas Barcelona TFVII

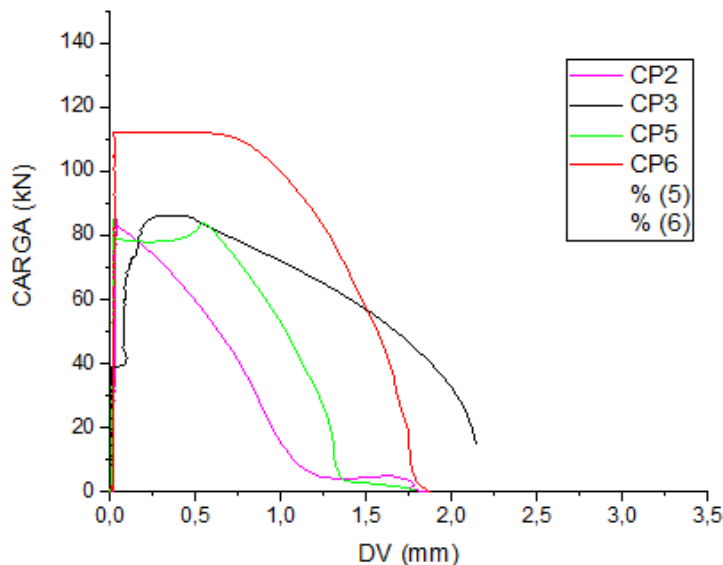


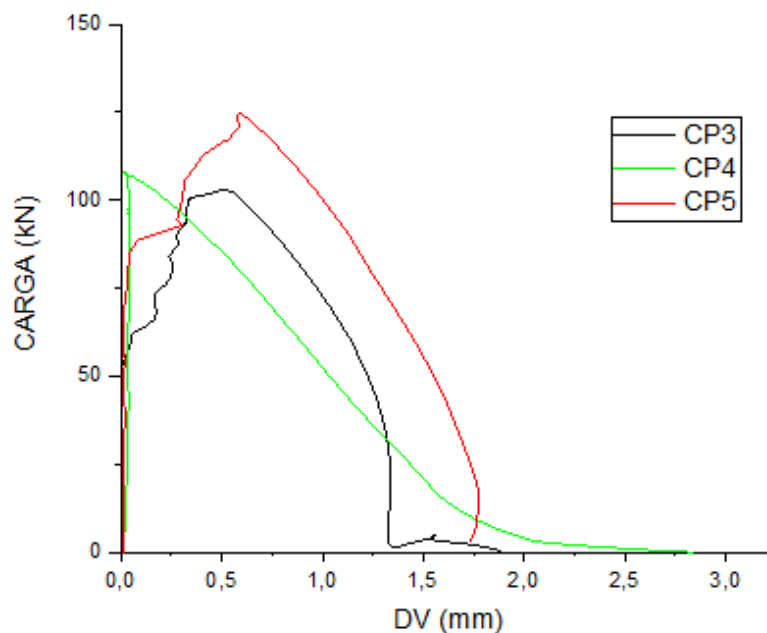
Tabela 6.30 - Parâmetros de Carga TFVII.

Etapa	CP2		CP3		CP5		CP6	
	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (K kN)
Fissuração (Pf)	0,041	84,924	0,384	86,317	0,017	85,117	0,033	112,363
0,50Pf	0,629	45,901	0,884	77,476	0,517	82,668	0,533	112,105
1,50Pf	1,629	5,021	1,884	40,167	1,517	2,686	1,533	52,644
2,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Figura 6.57 representa as curvas obtidas para a dosagem TFAI. Observa-se o efeito da ação das fibras, porém não ocorreu formação de patamar na região da carga de fissuração como em TFVII. Em contrapartida houve uma maior carga de fissuração e o deslocamento vertical foi mais elevado. As curvas CP3 e CP5 apresentaram comportamento bastante semelhante. A curva CP4 apresentou ruptura com deslocamento desprezível e queda de carga mais acentuada.



Figura 6.57 - Resultados Barcelona TFAI



A Tabela 6.31 apresenta os parâmetros de carga. Observa-se que o uso destas fibras elevou os valores da carga de fissuração a valores bem mais expressivos que nas demais dosagens, tendo esta série o melhor desempenho quanto a carga se comparada as demais, porém quanto ao deslocamento TFAI apresentou valores superiores.

Tabela 6.31 - Parâmetros de Carga TFAI.

Etapa	CP3		CP4		CP5	
	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0,514	102,987	0,011	107,780	0,591	124,665
0,50Pf	1,014	68,542	0,511	82,896	1,091	90,461
1,50Pf	0,000	0,000	1,511	18,392	0,000	0,000
2,50Pf	0,000	0,000	2,511	0,912	0,000	0,000
3,50Pf	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Figura 6.58 representa as curvas obtidas para a dosagem TFAII. Observa-se o efeito da ação das fibras, porém não ocorreu formação de patamar na região da carga de fissuração como em TFAI. Em contrapartida podemos afirmar que a queda após a ruptura foi menos acentuada.

Houve uma maior carga na primeira fissura e o deslocamento vertical residual foi maior que todos os demais traços estudados. Sendo assim, esta dosagem apresentou o maior desempenho para as duas características. Nesta dosagem as curvas apresentaram comportamento semelhante, sendo quase sobrepostas.

Tais resultados já eram esperados, devido a maior dosagem de fibras neste traço. As curvas apresentadas na Figura 6.58 se assemelham bastante para outros trabalhos utilizados nesta pesquisa para esta dosagem e tipo de fibra.

A Tabela 6.32 apresenta os parâmetros de carga. Observa-se que CP5 e CP6 apresentam o deslocamento completo para todos os pontos analisados.

Figura 6.58 - Curvas Barcelona TFAII

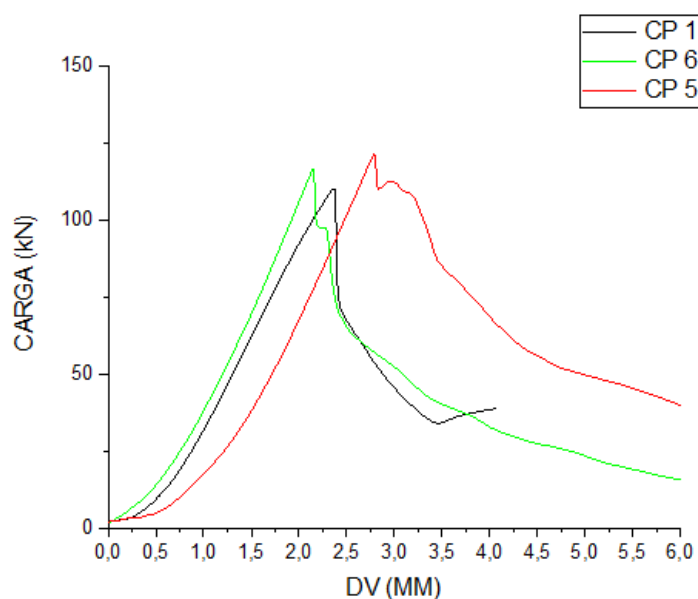
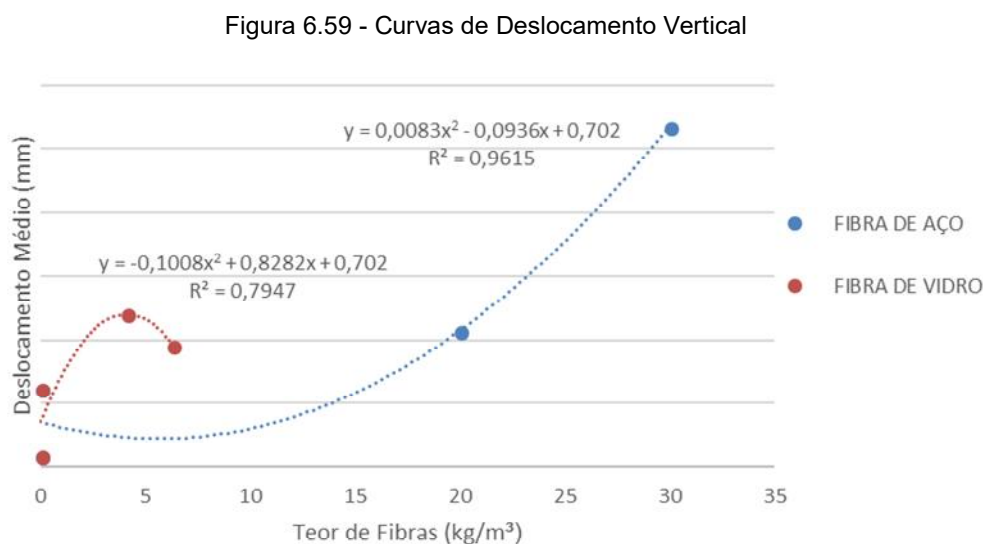


Tabela 6.32 - Parâmetros de Carga TFAII

Etapa	CP1		CP5		CP6	
	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)	Desl. (mm)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	2,198	63,736	2,789	121,930	2,148	116,660
0,50Pf	2,698	38,978	3,289	102,140	2,648	60,959
1,50Pf	3,698	44,424	4,289	61,156	3,648	38,653
2,50Pf	0,000	0,000	5,289	47,644	4,648	26,639
3,50Pf	0,000	0,000	6,289	37,284	5,648	17,874

Em análise mais detalhada do deslocamento vertical, por meio dos dados apresentados foi possível a criação de uma curva com os deslocamentos médios apresentados em um gráfico de relação teor de fibras por deslocamento vertical médio, criando correlações entre os mesmos. A Figura 6.59 apresenta esta situação.



Quando ao deslocamento vertical observa-se um melhor desempenho das Fibras de Aço, como já citado, uma vez que se apresentam em maiores dosagens. A Fibra de Vidro apresentou um pequeno declínio do deslocamento médio em sua maior dosagem. No entanto estudos específicos são necessários para identificar uma relação definitiva entre esses fenômenos.

A regressão linear das equações apresentadas, estão adequadas, uma vez que o  $R^2$  foi de aproximadamente 80% para a curva da fibra de vidro e de 96% para a curva da fibra de aço.

Segundo Monte (2015), a correlação existente entre o deslocamento vertical médio e o aumento do teor de fibras adicionado ocorre principalmente porque a capacidade resistente pós-fissuração também é aumentada, reduzindo assim a diferença entre a capacidade resistente residual do compósito e a resistência da matriz.

A partir das análises anteriores foi possível calcular a Resistência a Fissuração e a Resistência Residual nos pontos determinados. Sendo que o cálculo foi baseado nas Equações 8 e 9 respectivamente abaixo descritas.

$$f_t = \frac{4.P_f}{9.\pi.a.H} \quad (8)$$

$$f_{R,\delta p} = \frac{4.P_{\delta p}}{9.\pi.a.H} \quad (9)$$

Em que:  $f_t$  = resistência a fissuração (MPa);  $P_f$  = carga aplicada que produz fissuração (N); a = diâmetro do disco de aplicação de carga (mm); H = altura do corpo de prova (mm);  $f_{R,\delta p}$  = resistência residual correspondente a um determinado deslocamento vertical (MPa);  $P_{\delta p}$  = carga residual correspondente a um deslocamento vertical (N).

Todas as Tabelas foram construídas de forma que a primeira linha represente os valores de Resistência a Fissuração, valor este correspondente ao momento  $P_f$  das tabelas anteriores. As demais linhas representam a Resistência Residual nos pontos 0,50mm, 1,50mm, 2,50mm e 3,50 mm após o ponto de ruptura respectivamente.

Desta forma a Tabela 6.33 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TREF, em que a primeira linha representa a Resistência a Fissuração e as demais a Resistência Residual. Observa-se neste caso valores coerentes quanto a Resistência a Fissuração e valores desprezíveis quanto a Resistência Residual. Como anteriormente citado, tais resultados eram esperados em vista da ausência de fibras nesta dosagem.

Tabela 6.33 - Resistência a Fissuração e Residual TREF

CP4		CP5		CP6	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
133.589,100	3,362	133.519,000	3,360	90.470,380	2,277
0,000	0,000	0,000	0,000	43.364,500	1,091
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Tabela 6.34 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TFRES. Observa-se neste caso uma baixa Resistência Residual em vista do deslocamento vertical baixo ou inexistente, assim como foi verificado na dosagem TREF. Portanto estes valores são considerados desprezíveis. Como anteriormente citado, tais resultados eram esperados em vista da ausência de fibras nesta dosagem.

Tabela 6.34 - Resistência a Fissuração e Residual TFRES

CP1		CP2		CP3	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
77.682,080	1,955	89.252,320	2,246	101.498,000	2,554
0,000	0,000	1.721,785	0,043	77.213,380	1,943
0,000	0,000	1.139,095	0,029	32.499,590	0,818
0,000	0,000	1.196,045	0,030	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

É possível verificar a notória redução da Resistência a Fissuração entre o TREF e TFRES, sendo em média 28,12% inferior. Tal fato se apresenta pelo uso do resíduo de fresado asfáltico. A queda de resistência apresentada está em conformidade com as demais proporções observadas nos demais ensaios.

A Tabela 6.35 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TFVI. Observa-se neste caso um ligeiro aumento da Resistência a Fissuração, sendo em média 18,67% superior aos valores apresentados em TFRES. Também se observa o aparecimento da resistência residual de forma mais expressiva.

Tabela 6.35 - Resistência a Fissuração e Residual TFVI

CP1		CP2		CP4	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
107.311,600	2,700	107.780,400	2,712	103.688,000	2,609
83.885,750	2,111	82.895,590	2,086	58.501,080	1,472
28.595,910	0,720	18.392,250	0,463	7.022,830	0,177
0,000	0,000	911,550	0,023	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Tabela 6.36 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TFVII. Observa-se neste caso valores de Resistência a Fissuração bastante semelhantes a TFVI.

Tabela 6.36 - Resistência a Fissuração e Residual TFVII

CP2		CP3		CP5		CP6	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
84.923,600	2,137	86.317,480	2,172	85.116,620	2,142	112.363,100	2,827
45.900,910	1,155	77.476,370	1,950	82.667,570	2,080	112.104,600	2,821
5.020,619	0,126	40.166,690	1,011	2.685,704	0,068	52.643,900	1,325
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Também se observa o aparecimento de uma resistência residual de maior expressão ao apresentado por TFVI. Tal fato se deve ao aumento na dosagem de fibras. Porém não houve aumento do deslocamento vertical.

A Tabela 6.37 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TFAI. Observa-se uma melhoria da Resistência a Fissuração quando comparamos com o TFVII e demais traços, sendo em média da ordem de 21,79% superior aos resultados apresentados em TFVII.

Tabela 6.37 - Resistência a Fissuração e Residual TFAI

CP3		CP4		CP5	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
102.986,900	2,591	107.780,400	2,712	124.664,800	3,137
68.542,470	1,725	82.895,590	2,086	90.461,350	2,276
0,000	0,000	18.392,250	0,463	0,000	0,000
0,000	0,000	911,550	0,023	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

A Tabela 6.38 apresenta os valores de Resistência a Fissuração e Resistência Residual da dosagem TFAII. Observa-se neste caso uma instabilidade nos valores de Resistência a Fissuração quando comparamos aos demais. Tais resultados podem ter ocorrido por algum desvio na execução do ensaio, porém não inviabilizam o uso deste material.

Tabela 6.38 - Resistência a Fissuração e Residual TFAII

CP1		CP5		CP6	
Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)	Carga (N)	Resist. (MPa)
63.736,000	1,604	121.930,000	3,068	116.660,000	2,936
38.978,000	0,981	102.140,000	2,570	60.959,000	1,534
44.424,000	1,118	61.156,000	1,539	38.653,000	0,973
0,000	0,000	47.644,000	1,199	26.639,000	0,670
0,000	0,000	37.284,000	0,938	17.874,000	0,450

Notou-se nos dados apresentados uma grande variação de resultados, principalmente na Resistência a Fissuração. Esta variação ocasionou um desvio padrão elevado quando se verificam os resultados médios. Tal questão já era esperada, pois conforme afirmam Morgan, et al (1995), os corpos de prova nunca serão idênticos devido a aleatoriedade interna das fibras durante a moldagem, que resulta em coeficientes de variação da ordem de 20% dependendo do ensaio utilizado.

Além disso, diferentemente de outros ensaios realizados em CRF, o Ensaio Barcelona não apresenta uma chapa metálica de suporte para obtenção

do ponto de fissuração. Tal questão também é um fator a ser considerado na análise da Carga x Fissuração.

Em análise a Resistência Residual nota-se valores bem mais expressivos que os demais traços, tendo resultados tabelados para todos os momentos analisados.

Por último, foi realizado o cálculo da Tenacidade para cada curva e dosagem apresentada. A Tenacidade é expressa em Joules (N.m) sendo determinada a partir da área gerada pelos pontos destacados nas tabelas anteriores.

Sendo assim, foram tomados os pontos utilizados para as demais tabelas e consideradas as áreas de seus respectivos trechos. Estes trechos foram somados e apresentados em forma de tabela. As Tabelas 6.39, 6.40, 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44 apresentam os valores obtidos para as respectivas dosagens (TREF, TFRE, TFVI, TFVII, TFAI e TFAII).

Tabela 6.39 - Cálculo Tenacidade TREF

<b>Trecho</b>	<b>CP4 (N.m)</b>	<b>CP5 (N.m)</b>	<b>CP6 (N.m)</b>
Pf - Pf0,50	33,40	33,38	33,46
Pf0,50 - Pf1,50	0,00	0,00	21,68
Pf1,50 - Pf2,50	0,00	0,00	0,00
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	0,00	0,00
$\Sigma$	33,40	33,38	55,14

Tabela 6.40 - Cálculo Tenacidade TFRES

<b>Trecho</b>	<b>CP1 (N.m)</b>	<b>CP2 (N.m)</b>
Pf - Pf0,50	19,42	22,74
Pf0,50 - Pf1,50	0,00	1,43
Pf1,50 - Pf2,50	0,00	1,17
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	0,60
$\Sigma$	19,42	25,94



Tabela 6.41 - Cálculo Tenacidade TFCVI

Trecho	CP1 (N.m)	CP2 (N.m)	CP4 (N.m)
Pf - Pf0,50	47,80	47,67	40,55
Pf0,50 - Pf1,50	56,24	50,64	32,76
Pf1,50 - Pf2,50	14,30	9,65	3,51
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	0,46	0,00
$\Sigma$	118,34	108,42	76,82

Tabela 6.42 - Cálculo Tenacidade TFCVII

Trecho	CP2 (N.m)	CP3 (N.m)	CP5 (N.m)	CP6 (N.m)
Pf - Pf0,50	32,71	40,95	41,95	56,12
Pf0,50 - Pf1,50	25,46	58,82	42,68	82,37
Pf1,50 - Pf2,50	2,51	20,08	1,34	26,32
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	0,00	0,00	0,00
$\Sigma$	60,68	119,85	85,97	164,81

Tabela 6.43 - Cálculo Tenacidade TFCXI

Trecho	CP3 (N.m)	CP4 (N.m)	CP5 (N.m)
Pf - Pf0,50	42,88	47,67	53,78
Pf0,50 - Pf1,50	34,27	50,64	45,23
Pf1,50 - Pf2,50	0,00	9,65	0,00
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	0,46	0,00
$\Sigma$	77,15	108,42	99,01

Tabela 6.44 - Cálculo Tenacidade TFCXII

Trecho	CP1 (N.m)	CP5 (N.m)	CP6 (N.m)
Pf - Pf0,50	25,68	56,02	44,40
Pf0,50 - Pf1,50	41,70	81,65	49,81
Pf1,50 - Pf2,50	22,21	54,40	32,65
Pf2,50 - Pf3,50	0,00	42,46	22,26
$\Sigma$	89,59	234,53	149,11

Nota-se um valor crescente da tenacidade na presença das fibras. Para uma melhor visualização foram retiradas as curvas que apresentavam valores muito discrepantes e construída uma tabela com os valores médios obtidos para

uma melhor visualização. A Tabela 6.45 apresenta estes resultados médios acumulados.

Tabela 6.45 - Valores médios Tenacidade

<b>Série</b>	<b>Média Tenac. (J)</b>
TREF	40,639
TFRES	22,680
TFVI	101,193
TFVII	107,827
TFAI	94,862
TFAII	157,745

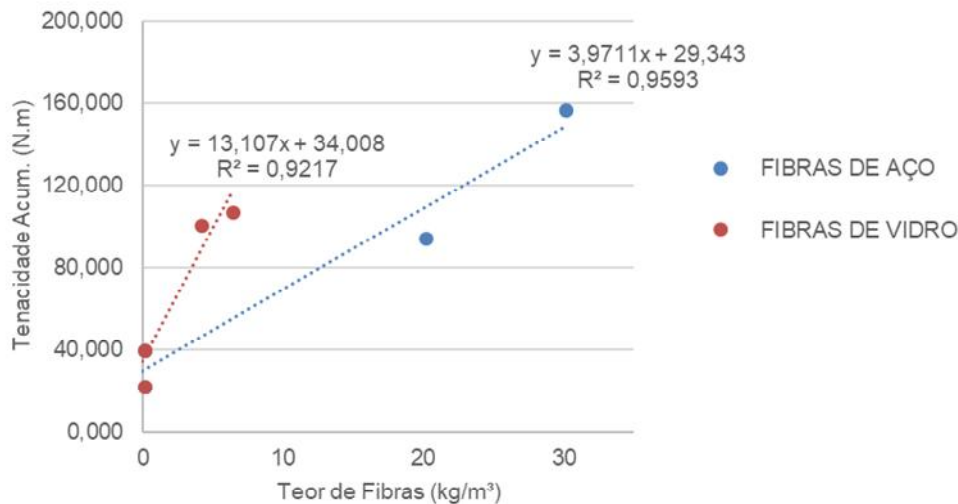
Observa-se uma redução de 44,93% entre os valores de TREF e TFRES. Ao se adicionar fibras no concreto, as taxas atingem valores mais expressivos do que os do concreto referência, sendo respectivamente 148,63%, 165,32%, 133,06% e 257,55% superiores a TREF.

Ao se analisar os traços com fibras verificou-se valores semelhantes, com exceção do TFAII que apresentou o melhor desempenho.

Para um entendimento de melhor qualidade foi construído um gráfico de tenacidade média acumulada pelo teor de fibras na Figura 6.60, onde obtiveram-se duas retas, uma para fibra de vidro e outra para fibra de aço com suas respectivas equações. Fica evidente o aumento da tenacidade com o aumento da dosagem de fibras.

A regressão linear das equações apresentadas, estão adequadas, uma vez que o  $R^2$  foi de aproximadamente 92% para a curva da fibra de vidro e de 96% para a curva da fibra de aço.

Figura 6.60 - Equações de Tenacidade



Outro item a ser observado neste gráfico é o fator multiplicativo de “x”. Para a reta das dosagens de fibra de vidro observou-se um fator maior do que o mesmo fator para a reta da curva de aço. Tais resultados apresentam que a fibra de vidro, mesmo em menor massa, gera uma influência mais expressiva quanto a Tenacidade do que as fibras de aço.

#### 6.4.5. Ensaio ASTM C-1399

Analisou-se a resistência residual do concreto por meio do ensaio ASTM C-1399. Para tal, foram moldados corpos de prova prismáticos nas dimensões de 10 cm x 10 cm x 40 cm e submetidos ao respectivo ensaio.

Foram coletados dados da carga aplicada e seu deslocamento vertical em consonância com o que foi realizado no Ensaio Barcelona Simplificado. O objetivo da execução deste ensaio foi a criação de mais um critério para comparação dos resultados obtidos por meio do Ensaio Barcelona e criar correlações entre estes dois importantes ensaios para caracterização do concreto reforçado com fibras.

Segundo Salvador (2013) o ensaio é realizado em duas etapas sendo a primeira o rompimento da matriz de concreto sobre uma chapa metálica. Esta etapa dispensa a análise dos dados de deslocamento vertical durante o processo. Na primeira etapa é obtido o dado de Carga a Fissuração.

Segundo Figueiredo (2011) a chapa de aço é utilizada para induzir a fissuração do corpo de prova sem a ocorrência do fenômeno chamado instabilidade pós-pico. A instabilidade pós-pico é um fenômeno que consiste no deslocamento abrupto do LVDT no momento da ruptura da matriz do concreto, gerando a leitura de uma carga resistente pós fissuração superestimada até um deslocamento vertical de 0,50mm.

A segunda etapa é realizada sem a chapa metálica e consiste no carregamento do corpo de prova já fissurado. São instalados 2 transdutores de deslocamento (LVDT), sendo o primeiro para medir o deslocamento vertical, onde é necessário atingir o deslocamento vertical de 1,25mm. O segundo é instalado na região central do corpo de prova, se utilizando de um yoke. A Figura 6.61 apresenta o esquema de execução deste ensaio.

Segundo Borges (2017), o yoke é uma peça utilizada para fixação do transdutor de deslocamento de forma que o LVDT fique na altura da linha neutra do corpo de prova. O autor cita que seu uso se dá principalmente para evitar que deformações externas possam influenciar no valor medido. Ademais, estas deformações podem ocorrer devido a esmagamento da superfície inferior do corpo de prova ou torção oriunda de condições inadequadas de moldagem.

Por meio da segunda etapa é possível obter a Resistência Residual do concreto. Segundo Salvador (2013) na segunda etapa devem ser verificados os pontos  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$  e  $P_d$ , com os respectivos deslocamentos verticais de 0,50; 0,75; 1,0 e 1,25 mm.

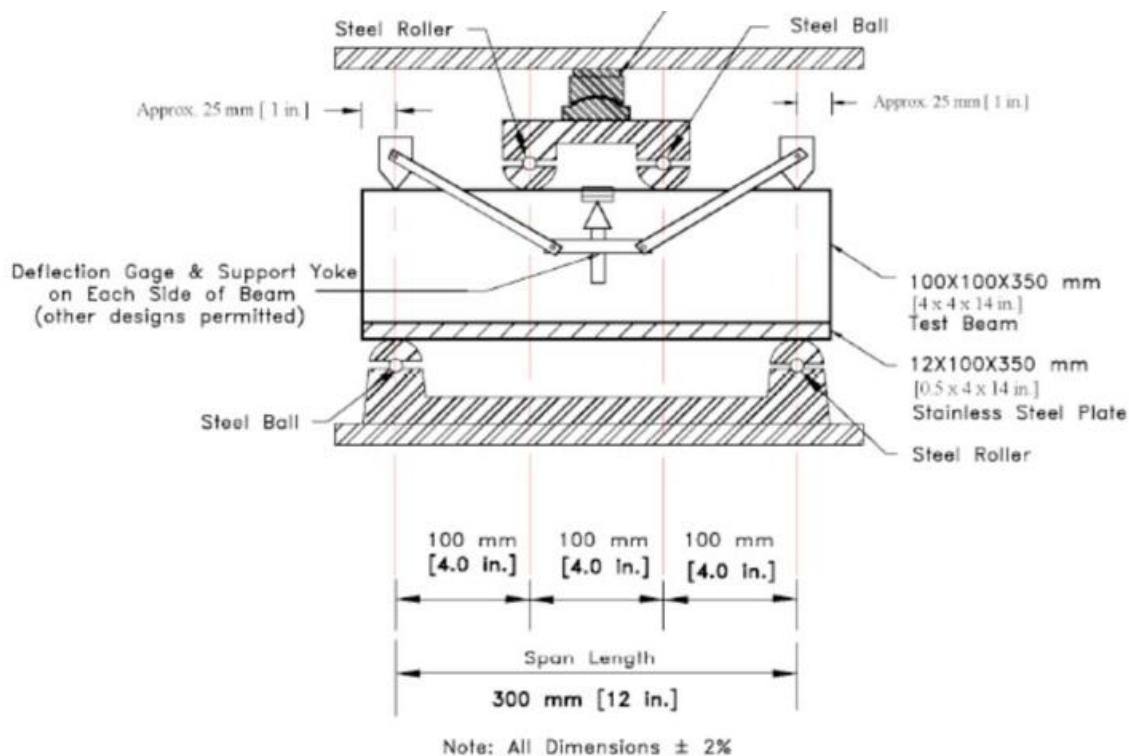
As Equações 10 e 11 apresentam a forma de cálculo para obtenção da Carga Residual média e da Resistência Residual Média segundo a ASTM C-1399 (2010).

$$P_{m\u00e9dio} = \frac{(P_a + P_b + P_c + P_d)}{4} \quad (10)$$

$$ARS = P_{m\u00e9dio} \cdot \frac{L}{b \cdot d^2} \quad (11)$$

Em que:  $P_{média}$  = Carga residual Média (N);  $ARS$  = Resistência residual média (MPa); L = comprimento do vão do ensaio (mm); b = largura do corpo de prova (mm); d = altura do corpo de prova (mm).

Figura 6.61 - Esquema primeira etapa ensaio ASTM C-1399



Fonte: ASTM C-1399 (2010)

A Tabela 6.46 apresenta os resultados obtidos na Carga a Fissuração média pelo Ensaio ASTM C-1399 e a Tabela 6.47 apresenta os resultados obtidos na Carga a Fissuração média por meio do Ensaio Barcelona Simplificado (EBS).

Tabela 6.46 - Carga primeira fissura ASTM C-1399

<b>Série</b>	<b>Média C-1399 (N)</b>	<b>Desvio Padrão (N)</b>
TREF	21.950,888	1.814,624
TFRES	22.839,267	1.829,443
TFVI	23.156,468	4.495,723
TFVII	28.785,633	4.048,478
TFAI	32.646,360	7.704,883
TFAll	41.548,900	27.677,273

Tabela 6.47 - Carga primeira fissura ESB

<b>Série</b>	<b>Média EBS (N)</b>	<b>Desvio Padrão (N)</b>
TREF	124.466,645	22.885,430
TFRES	89.477,467	11.909,556
TFVI	106.260,001	2.239,716
TFVII	92.180,200	13.469,389
TFAI	111.810,700	11.387,0683
TFAll	100.775,333	32.185,049

Nota-se, que os resultados do ensaio C-1399 apresentaram uma menor variação de resultados e uma carga média crescente com o aumento da dosagem das fibras. Tomando-se o TREF como padrão, tem-se variações de +4,04%, +5,49%, +31,14%, +48,72%, +89,28% respectivamente (TREF, TFVI, TFVII, TFAI, TFAll).

Os resultados do Barcelona apresentaram uma variação um pouco mais elevada. Tomando-se TREF como padrão tem-se variações negativas de -28,11%, -14,627; -25,94%, -10,17% e -19,05% respectivamente (TREF, TFVI, TFVII, TFAI, TFAll). Analisando-se o próprio desvio padrão verificamos uma maior variação neste ensaio.

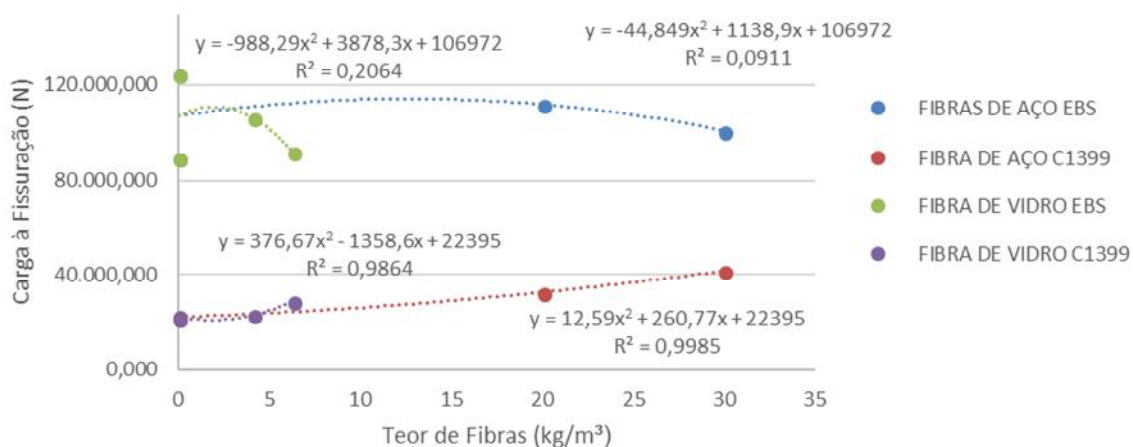
Tais resultados já eram esperados, uma vez que o Ensaio Barcelona não possui a chapa metálica em sua fase de fissuração que confere maior estabilidade ao corpo de prova como exemplificado por Figueiredo (2011) e Salvador (2013).

Estas variações na fase de fissuração também foram observadas por Nogueira, et al (2017). Outro fator a ressaltar é reforçar que estes ensaios visam a

resistência residual do concreto e sua tenacidade, sendo assim a carga a fissuração pode apresentar variações um pouco elevadas que não inviabilizariam o estudo. Esta pesquisa se utilizou destes dados apenas como fator complementar para entender detalhadamente as relações existentes entre estes ensaios.

Em análise final, buscou-se estabelecer graficamente uma correlação entre os resultados médios dos dois ensaios, Sendo assim, foi construído um gráfico de resistência a fissuração por teor de fibras. A Figura 6.62 apresenta os as equações e linhas de Tendência obtidas.

Figura 6.62 – Curvas de Carga a primeira fissura ensaios EBS e C-1399



É possível afirmar que não há correlação clara entre os Ensaio, porém observa-se que o Ensaio ASTM C-1399 apresenta uma correlação de confiabilidade entre os seus resultados apresentados para o concreto com fibras de aço e para o concreto com fibras de vidro.

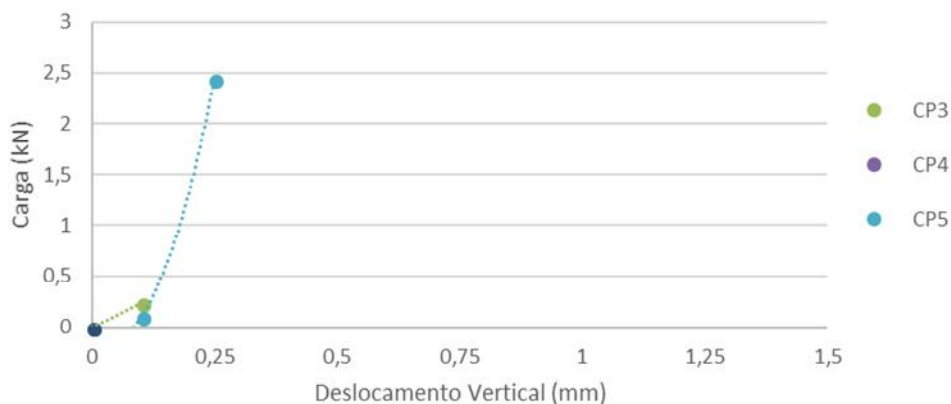
Quanto as linhas de Tendência para ensaio ESB, podemos afirmar que não estão coerentes devido ao baixo valor de  $R^2$  para ambos tipos de fibras.

Tal fato pode ter ocorrido por conta do uso da chapa metálica que estabiliza o corpo de prova no momento da fissuração, como dito anteriormente. Sendo assim, podemos afirmar que os resultados obtidos no ESB apresentam maior padronização quanto a Resistência Residual e não quanto a Carga de Fissuração.

Em seguida foram confeccionados os gráficos de carga aplicada por deslocamento vertical. Os gráficos foram construídos utilizando os *softwares OriginLab e Excel*. Seus resultados foram tabelados e destacados os pontos 0,50; 0,75; 1,0; e 1,25 mm. O ponto de fissuração não foi utilizado para obtenção dos resultados de tenacidade neste ensaio.

A Figura 6.63 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TREF. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou pouca variação de deslocamento para todas as curvas. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos estabelecidos em norma e suas cargas não foi apresentada, pois o deslocamento não atingiu valores coerentes.

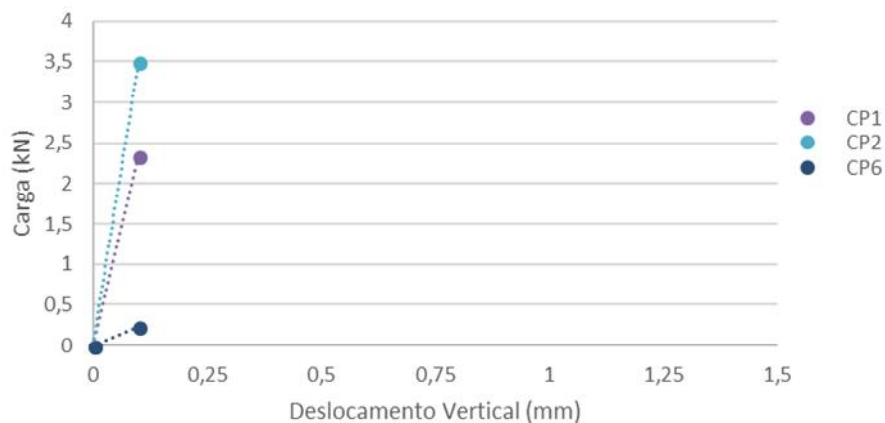
Figura 6.63 - Curvas C-1399 TREF



A Figura 6.64 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TFRES. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou pouca variação de deslocamento, assim como o TREF. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos estabelecidos em norma e suas cargas também não foi apresentada, pois o deslocamento não atingiu valores coerentes.



Figura 6.64 - Curvas C-1399  
TFRES



A Figura 6.65 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TFVI. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou deslocamento vertical moderado, onde nem todos os corpos de prova atingiram o deslocamento máximo estabelecido em norma. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos e cargas está representada na Tabela 6.48.

Figura 6.65 - Curvas C-1399 TFVI

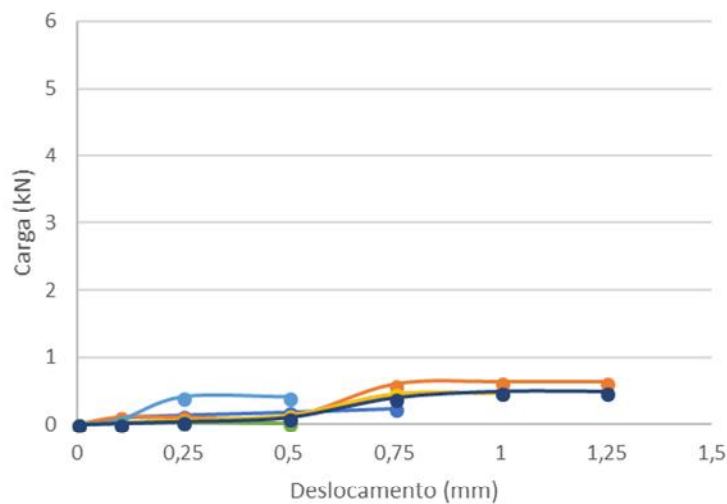


Tabela 6.48 - Parâmetros de Carga TFVI

Etapa	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,50Pf	0,183	0,109	0,188	0,135	0,091	0,020	0,105
0,75Pf	0,236	0,591	0,307	0,451	0,000	0,000	0,390
1,00Pf	0,000	0,626	0,385	0,468	0,000	0,000	0,482
1,25Pf	0,000	0,390	0,412	0,000	0,000	0,000	0,166

As curvas CP1, CP2, CP3 e CP4 apresentaram comportamento bastante semelhante. As curvas CP5, CP6 e CP7 apresentaram pouco deslocamento e menor carga aplicada.

A Figura 6.66 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TFVII. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou deslocamento uma carga resistente superior a TFVI, praticamente todos os corpos de prova atingiram o deslocamento máximo estabelecido em norma. As curvas possuem algumas semelhanças, mas não se sobrepõem. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos e cargas está representada na Tabela 6.49.

Figura 6.66 - Curvas C-1399 TFVII

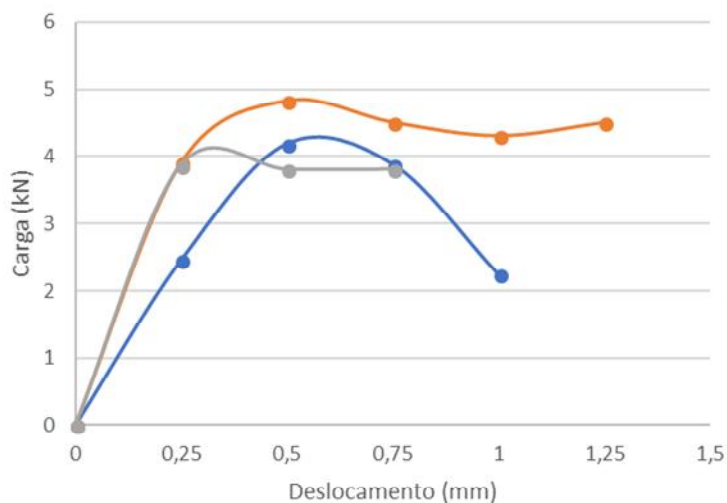


Tabela 6.49 - Parâmetros de Carga TFVII

Etapa	CP1	CP2	CP3
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0	0	0
0,50Pf	4,194	4,833	3,407
0,75Pf	3,889	3,533	3,806
1,00Pf	2,247	4,313	0,000
1,25Pf	0,000	4,511	0,000

A Figura 6.67 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TFAI. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou deslocamento vertical bem mais elevado e carga residual bem mais expressiva que os demais traços. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos e cargas está representada na Tabela 6.50.

Figura 6.67 - Curvas C-1399 TFAI

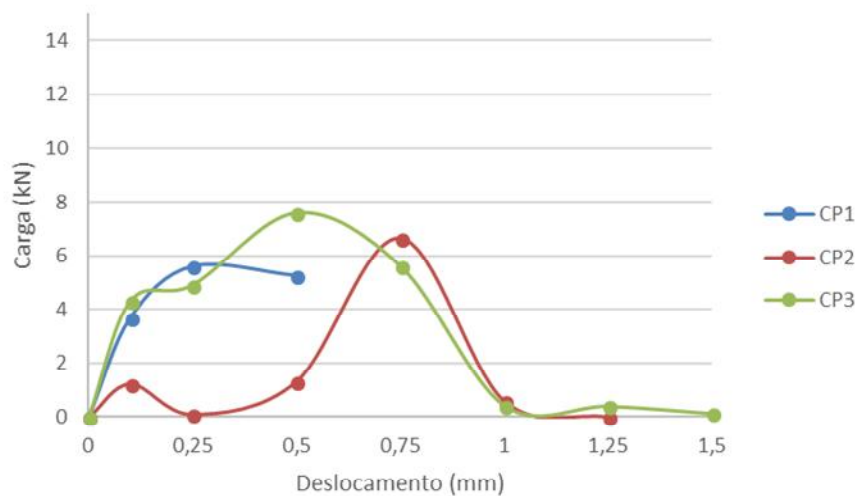


Tabela 6.50 - Parâmetros de Carga TFAI

Etapa	CP1	CP2	CP3
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0,000	0,000	0,000
0,50Pf	5,271	1,318	7,609
0,75Pf	0,000	6,676	5,629
1,00Pf	0,000	0,626	0,433
1,25Pf	0,000	0,010	0,412

A Figura 6.68 apresenta os resultados obtidos para a dosagem TFAII. Observa-se que conforme esperado esta dosagem apresentou deslocamento vertical bem mais elevado e carga residual bem mais expressiva, tendo o melhor desempenho que todos os traços analisados. As curvas CP1 e CP2 apresentaram carga elevada em forma de pico e menor deslocamento. Já as curvas CP3 e CP4 apresentaram um maior deslocamento e uma elevação de carga mais suave, sendo semelhante com as curvas obtidas para TFAI, porém com cargas mais elevadas. A Tabela com os respectivos pontos de deslocamentos e cargas está representada na Tabela 6.51.

Figura 6.68 - Curvas C-1399 TFAII

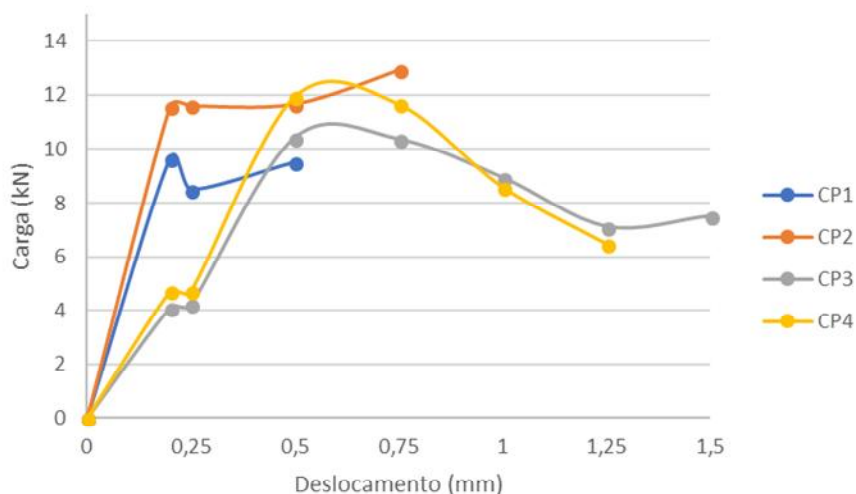


Tabela 6.51 - Parâmetros de Carga TFAII

Etapa	CP1	CP2	CP3	CP4
	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)	Carga (kN)
Fissuração (Pf)	0	0	0	0
0,50Pf	9,516	11,615	10,435	11,930
0,75Pf	0,000	11,680	10,365	11,663
1,00Pf	0	12,925	6,681	8,605
1,25Pf	0	0	7,123	6,493

A partir dos dados obtidos temos na Tabela 6.52. a Carga Residual média e da Resistência Residual Média para os traços TFVI, TFVII, TFAI e TFAII. Os traços TREF e TFRES não apresentaram valores possíveis de serem tabelados.

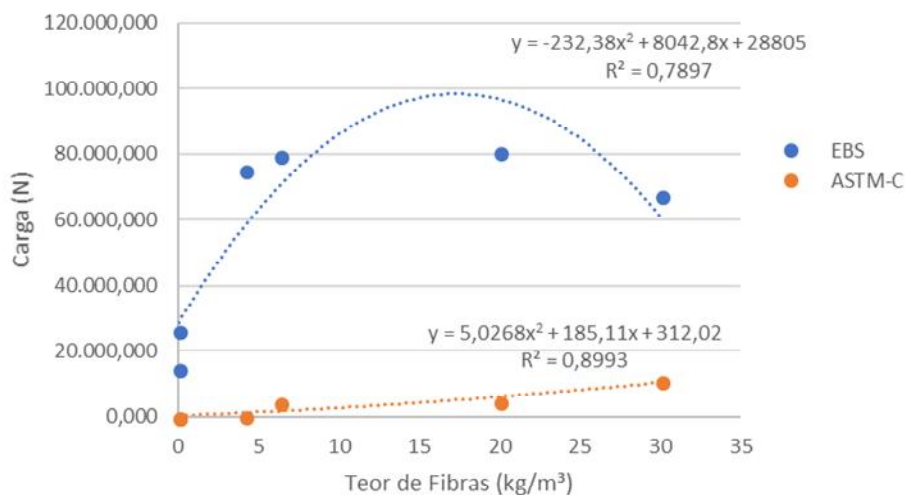
Tabela 6.52 - Carga Residual média e Resistência Residual Média

Etapa	TFVI		TFVII		TFAI		TFAII	
	Carga Res. (N)	Resist. Res. (MPa)	Carga Res. (N)	Resist. Res. (MPa)	Carga Res. (N)	Resist. Res. (MPa)	Carga Res. (N)	Resist. Res. (MPa)
0,50Pf	118,923	0,042	4.145,517	1,450	4.732,866	1,657	10.874,076	3,802
0,75Pf	394,832	0,138	3.669,525	1,254	6.152,653	2,153	11.236,212	3,925
1,00Pf	490,419	0,172	2.156,272	0,755	529,825	0,185	9.403,441	3,2912
1,25Pf	322,567	0,113	0,000	0,000	210,857	0,074	6.808,226	2,383

Os resultados apresentam em média um melhor desempenho das fibras de aço em relação as fibras de vidro. Sendo que TFAII apresentou um desempenho bem superior aos demais traços analisados.

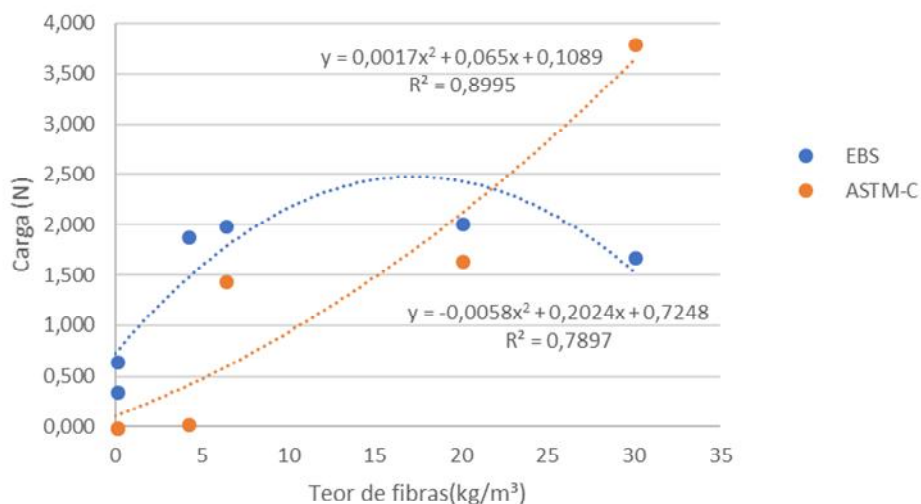
Em posse destas informações é possível realizar correlações destes resultados com os obtidos por meio do ensaio Barcelona no ponto coincidente de 0,5Pf. Para tal comparação foi realizado um gráfico de teor de fibras por carga residual média e outro gráfico de teor de fibras por resistência residual média para o determinado ponto. Sendo intitulados respectivamente Figura 6.69 e Figura 6.70.

Figura 6.69 - Carga residual ESB x C-1399



Observa-se que ambas as curvas apresentam confiança quanto a regressão linear, por ser de aproximadamente 78 % para o EBS e de 89% para o ASTM C-1399. Podemos afirmar que os resultados obtidos no ensaio ASTM possuem resultados crescentes e mais padronizados quanto a Carga Residual no ponto 0,50 mm após a fissuração. Já o ensaio Barcelona, para este ponto apresenta resultados variáveis que ocasionam uma curva em declínio para maiores dosagens. Os resultados não apresentaram correlações claras nestes ensaios para o deslocamento analisado.

Figura 6.70 - Resistência residual ESB x C-1399



Quanto a Resistência Residual, observa-se que ambas as curvas apresentam confiança quanto a regressão linear, por ser de aproximadamente 78 % para o EBS e de 89% para o ASTM C-1399. Podemos afirmar que os resultados obtidos no ensaio ASTM possuem resultados crescentes e mais padronizados. Já o Ensaio Barcelona novamente apresentou uma curva com caráter decrescente nas dosagens mais elevadas para o ponto analisado. Porém é possível observar alguns pontos com valores semelhantes neste caso em que é possível estabelecer-se algumas relações. Como é o caso dos pontos iniciais para os concretos sem fibras (TREF e TFRES) onde ambos se alocam perto do ponto zero. As dosagens TFVII e TFAI apresentaram resultados bem semelhantes e seriam pontos em potencial para criar correlações.

É importante reforçar que os resultados analisados não inviabilizam a análise por qualquer um dos ensaios apresentados, uma vez que observa-se apenas o ponto 0,50 mm após a fissuração na tentativa de criar pontos de correlação entre este dois importantes ensaios de caracterização do concreto com fibras.

A normativa do ensaio ASTM C-1399 não estabelece critérios para avaliar a Tenacidade, sendo este ensaio restrito a análise da Resistência Residual. Porém, adotando-se a metodologia semelhante a utilizada por Salvador (2013), foram comparados os valores obtidos de Tenacidade média entre ASTM C-1399 e EBS para os traços estudados no ponto 0,50 mm após a fissuração. A Tabela 6.53 apresenta os valores obtidos de tenacidade média em todos os pontos.

Tabela 6.53 - Tenacidade média C-1399

<b>Trecho</b>	<b>TFVI (N.m)</b>	<b>TFVII (N.m)</b>	<b>TFAI (N.m)</b>	<b>TFAII (N.m)</b>
Pf - Pf0,50	0,03	1,04	1,18	2,72
Pf0,50 - Pf0,75	0,06	0,98	1,36	2,76
Pf0,75 - Pf1,00	0,11	0,73	0,84	2,58
Pf1,00 - Pf1,25	0,10	0,27	0,09	2,03
$\Sigma$	0,31	3,01	3,47	10,09

Na Figura 6.71 observa-se as linhas criadas a partir dos dados. Tais resultados nos mostram graficamente que os resultados apresentaram resultados crescentes e padronizados. A regressão linear superior a 91% apresenta a confiabilidade nos dados obtidos.

Figura 6.71 - Curvas de tenacidade para diferentes teores C-1399

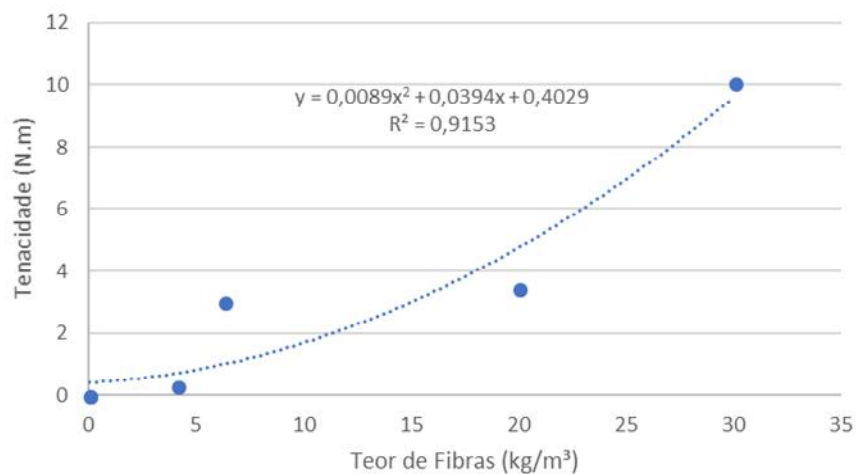
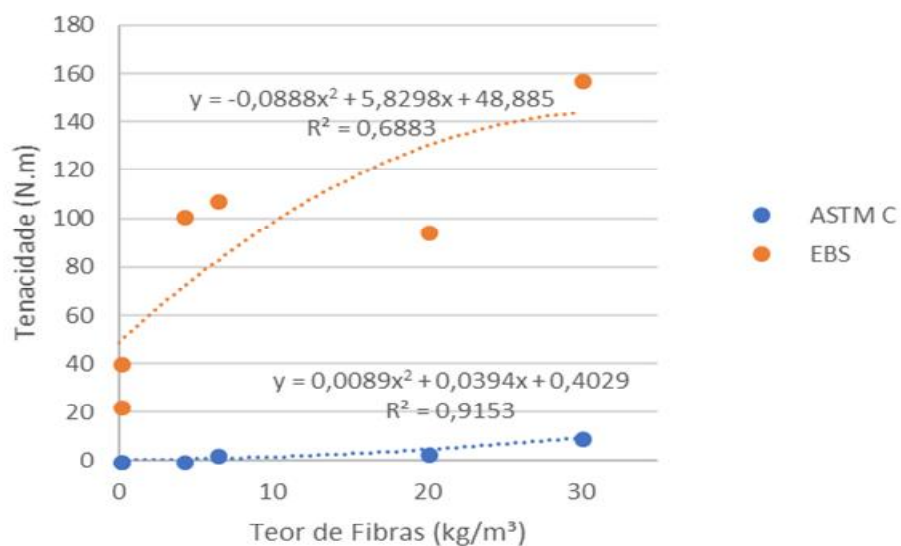


Figura 6.72 foi criada uma correlação entre os ensaios EBS e C-1399.

Figura 6.72 - Tenacidade ESB e C-1399





As correlações criadas não apresentam com uniformidade os resultados, uma vez que no EBS são contempladas a Carga de Fissuração e um maior deslocamento vertical. Sendo assim, no caso da Tenacidade a comparação entre estes dois ensaios não é adequada.

#### **6.4.6. Ensaio de flexão em 4 pontos em vigas de concreto armado**

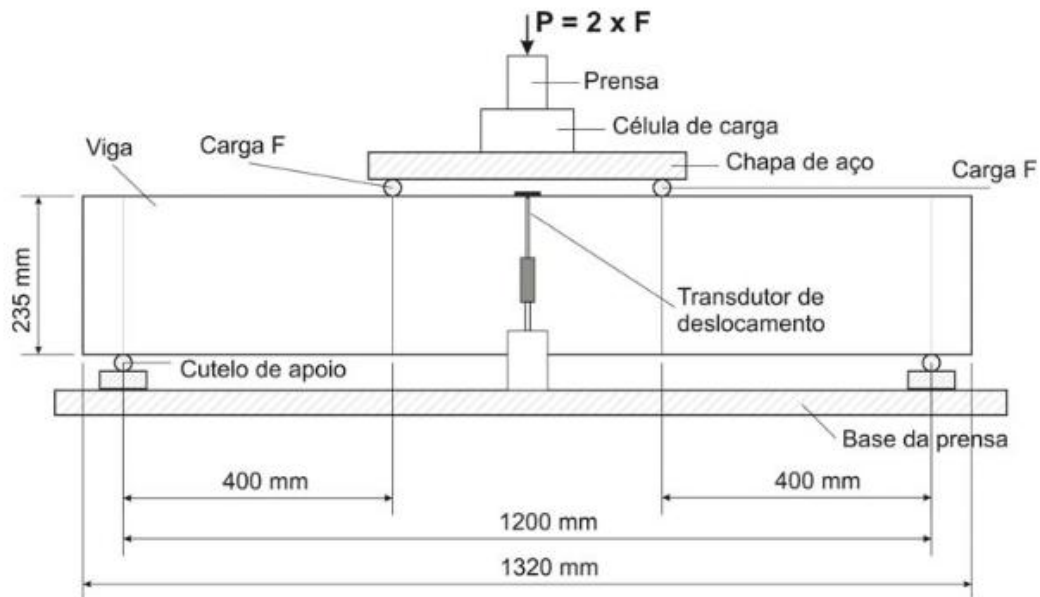
As vigas de concreto armado foram sujeitas à flexão em 4 pontos. Buscando-se uma análise consistente foram analisadas a flecha, carga aplicada até a ruptura, deformação do aço e análise visual, sendo que a flecha foi avaliada através do posicionamento de um LVDT instalado no ponto central da viga em sua face inferior. Com os dados obtidos foi possível construir gráficos de tensão por deslocamento e compará-los aos ensaios EBS e C-1399 buscando correlações.

A carga foi coletada através de uma célula de carga acoplada ao pórtico. A deformação do aço foi obtida através de extensômetros e verificado os respectivos valores de deformação nos diferentes pontos em que foram instalados, conforme descrito no cronograma experimental. Em posse destas informações foi possível construir gráficos de carga por deslocamento e comparar os resultados obtidos com os resultados obtidos na pesquisa de Barros (2009).

Por último foi analisada a fissuração das vigas por meio de fotos, criando comparações com os tipos de ruína especificados no Capítulo 4 deste trabalho. Tais ações visaram o melhor entendimento do concreto reforçado com fibras no âmbito da aplicação estrutural. A Figura 6.73 apresenta o esquema de montagem do ensaio.

Para melhor organização foram intituladas as vigas com armadura transversal total, idênticas as executadas por Barros (2009) com a sigla “CE”. As vigas com armadura transversal parcial, com redução do número de estribos anteriormente descritas no Capítulo 5 foram intituladas pela sigla “SE”.

Figura 6.73. Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos

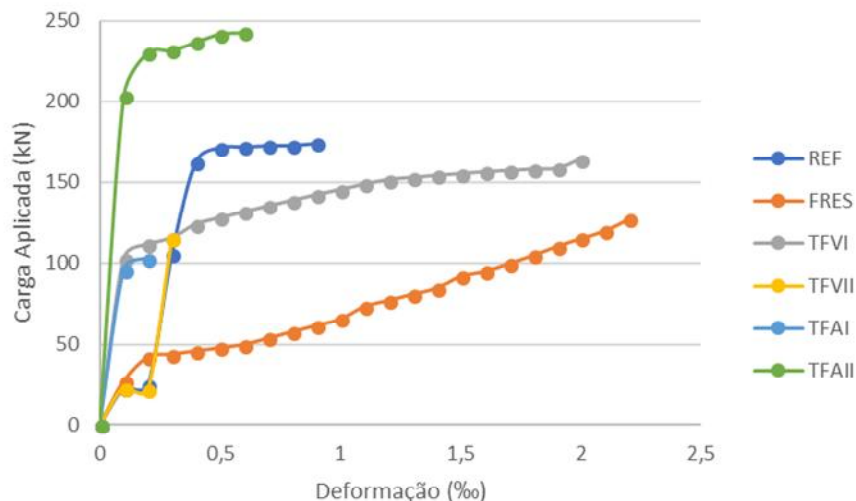


Fonte: Barros (2009)

#### 6.4.7. Análise Deformação Estribos

Para análise das deformações no estribo foram construídos gráficos de deformação por carga aplicada. A Figura 6.76 representa os resultados obtidos para os extensômetros posicionados nos estribos das vigas que possuíam armadura transversal total.

Figura 6.74 - Curvas extensômetro estribo CE



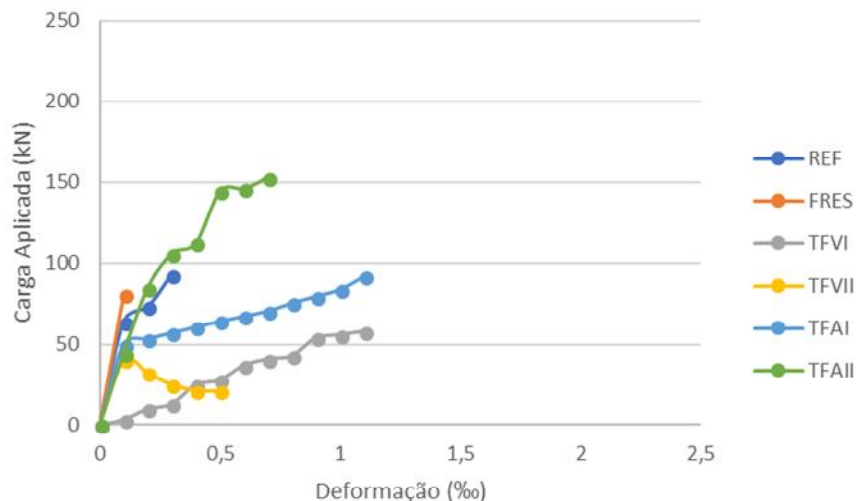
Os dados apresentaram se assemelharam aos obtidos por Barros (2009). Analisando-se primeiramente TREF e TFRES notamos um melhor desempenho, como já esperado, do traço referência TREF, porém a dosagem TFRES apresentou maior deformação.

Ao se observar TFVI já se nota que houve uma capacidade de carga bastante semelhante a TREF e uma menor deformação do aço com maiores cargas. TFVII observa-se que houve um pico de carga com baixa deformação.

TFAI apresentou uma capacidade resistente inferior aos demais, porém como esperado também apresentou pouca deformação do aço com uma maior carga. O TFAII apresentou os melhores resultados, tendo a maior capacidade resistente e proporcionalmente uma menor deformação.

A Figura 6.77 representa os resultados obtidos para os extensômetros posicionados nos estribos das vigas que possuíam armadura transversal reduzida/ parcial.

Figura 6.75 - Curvas extensômetro estribo SE



Os dados apresentaram-se assemelharam aos obtidos por Barros (2009). Analisando-se primeiramente TREF e TFRES notamos um melhor desempenho, como já esperado, do traço referência TREF.

Ao se observar TFVI nota-se uma menor capacidade de carga e uma elevada deformação do aço. TFVII apresentou um ponto de ruptura e após uma queda de capacidade de carga com pouca deformação.

TFAI apresentou uma capacidade resistente semelhante a TREF, porém com maior deformação. O TFAII apresentou os melhores resultados, tendo a maior capacidade resistente e proporcionalmente uma menor deformação.

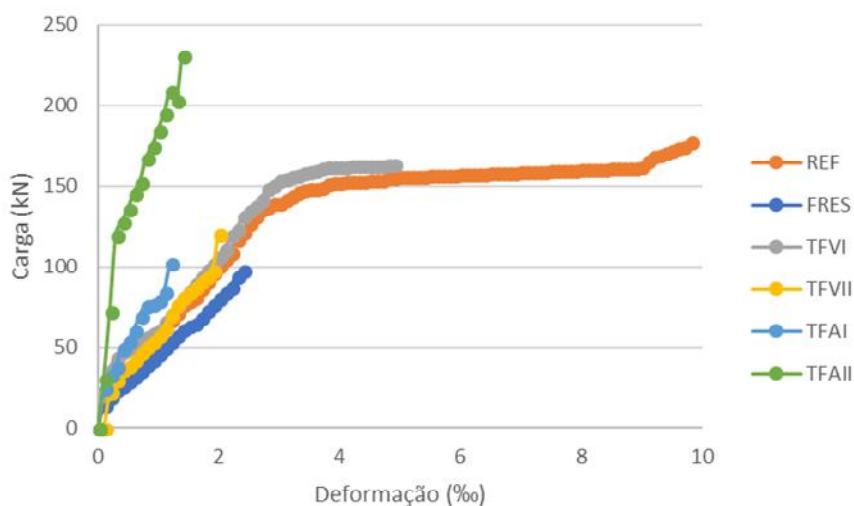
Sendo assim, esperava-se nesta análise observar para os traços TREF e TFRES uma menor capacidade resistente e maior deformação e para os demais traços com fibras esperava-se obter maiores capacidades resistentes e maiores deformações, ou deformações menores, porém com capacidade resistente mais expressiva. Portanto tais análises também apresentaram que os resultados esperados foram coerentes. Sendo necessárias melhores análises para os resultados de TFVI.

Em comparação aos resultados entre as vigas com armadura total e parcial observa-se que no geral ocorreram menores capacidades resistentes e deformações proporcionais.

#### 6.4.8. Análise Deformação Armadura Longitudinal

Para análise das deformações na armadura longitudinal foram construídos gráficos de deformação por carga aplicada. A Figura 6.78 representa os resultados obtidos para os extensômetros posicionados nas armaduras longitudinais das vigas que possuíam armadura transversal total.

Figura 6.76 - Curvas extensômetro armadura CE



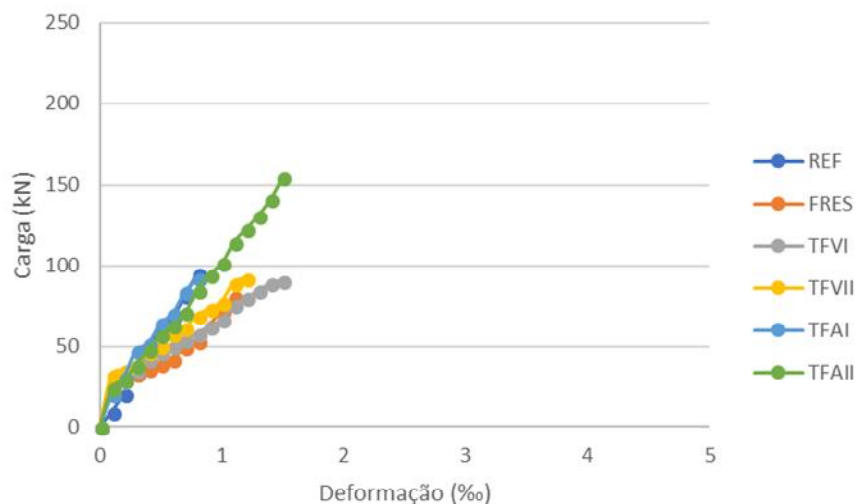
Analisando-se primeiramente TREF e TFRES notamos um melhor desempenho, como já esperado, do traço referência TREF, porém com uma deformação bastante acentuada, se destacando dos demais. Nota-se que a curva obtida para TFRES foi quase sobreposta a TREF.

Ao se observar TFVI já se nota que houve uma capacidade de carga superior a TREF e uma curva bem semelhante, sendo quase sobreposta. TFVII apresentou igualmente uma curva semelhante as demais, porém sua carga resistente foi somente superior a TFRES.

TFAI apresentou uma capacidade resistente semelhante a TFVII, porém como esperado também apresentou pouca deformação do aço com uma maior carga. O TFAII apresentou os melhores resultados, tendo a maior capacidade resistente e proporcionalmente uma menor deformação.

A Figura 6.79 representa os resultados obtidos para os extensômetros posicionados nas armaduras longitudinais das vigas que possuíam armadura transversal reduzida.

Figura 6.77 - Curvas extensômetro armadura SE



Analisando-se primeiramente TREF e TFRES notamos um melhor desempenho, como já esperado, do traço referência TREF.

Ao se observar TFVI observa-se que ocorreu capacidade resistente semelhante a TREF, porém com maior deformação. TFVII apresentou capacidade resistente máxima pouco superior a TFVI, porém com menor deformação.

TFAI apresentou uma capacidade resistente semelhante aos demais, sendo sua curva praticamente sobreposta a curva TREF. A dosagem TFAII apresentou os melhores resultados, tendo a maior capacidade resistente e maior deformação.

Sendo assim, esperava-se nesta análise observar para os traços TREF e TFRES uma menor capacidade resistente e maior deformação e para os demais traços com fibras esperava-se obter maiores capacidades resistentes e maiores deformações, ou deformações menores, porém com capacidade resistente mais expressiva. Portanto tais análises também apresentaram que os resultados esperados foram coerentes. Sendo necessárias melhores análises para os resultados de TFVI.

Em comparação aos resultados entre as vigas com armadura total e parcial observa-se que no geral ocorreram menores capacidades resistentes e deformações proporcionais.

#### 6.4.9. Análise Visual das Fissuras

Através da análise visual das fissuras que as vigas apresentaram após a ruína, foi classificado o tipo de rompimento apresentado para uma melhor análise.

Para melhor organização adotou-se a nomenclatura CE para as vigas com armadura transversal total e SE para as vigas com armadura transversal parcial.

Observou-se a ruína por cisalhamento em todas as vigas, sendo seu tipo descrito abaixo conforme a literatura estudada citada na revisão de literatura desta pesquisa. Ocorreu apenas na viga uma exceção na viga apresentada nas Figuras 6.80, 6.81 e 6.82 onde observou-se ruína por flexão. Demais estudos devem ser realizados para maiores afirmações, porém é possível afirmar através dos resultados obtidos de Resistência a Compressão Axial que esta série apresentou a segunda maior resistência média das demais séries analisadas, sendo este um dos possíveis fatores influenciadores deste resultado.

Figura 6.78 – TREF CE – início do ensaio

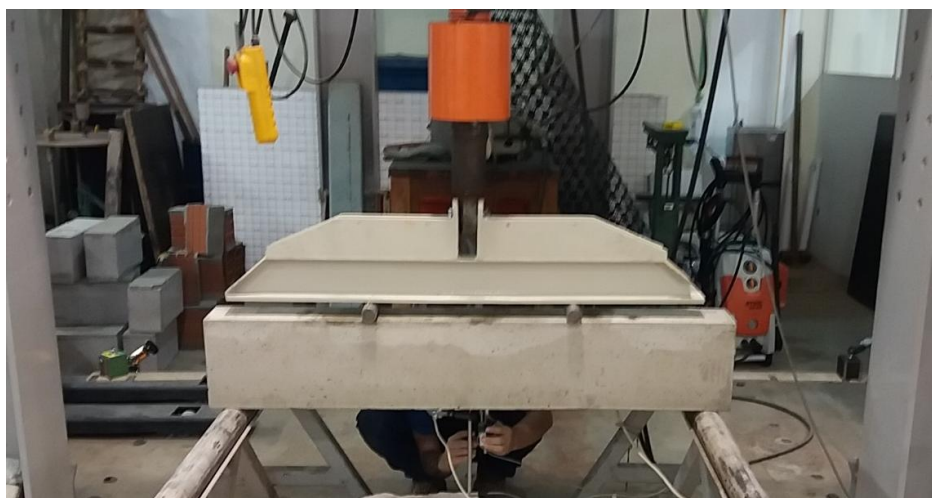


Figura 6.79 – TREF CE – fim do ensaio

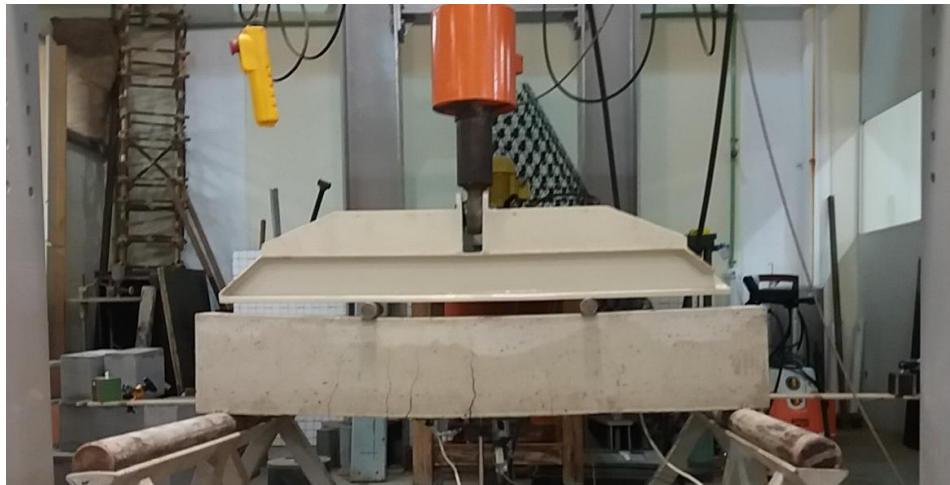


Figura 6.80 – TREF CE – detalhes fissuras



As Figuras 6.83, 6.84 e 685 apresentam o rompimento da viga TREF com armadura transversal reduzida. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.



Figura 6.81 – TREF SE – início do ensaio



Figura 6.82 – TREF SE – fim do ensaio



Figura 6.83 – TREF SE – detalhes fissuras



As Figuras 6.86, 6.87 e 6.88 apresentam o rompimento da viga TFRES com armadura transversal total. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6. 84 – TFRES CE – início do ensaio



Figura 6.85 – TFRES CE – fim do ensaio



Figura 6.86 – TFRES CE – detalhes fissuras



As Figuras 6.89, 6.90 e 6.91 apresentam o rompimento da viga TFRES com armadura transversal parcial. Podemos afirmar que houve ruptura por flexão da armadura transversal.

Figura 6.87 – TFRES SE – início do ensaio



Figura 6.88 – TFRES SE – fim do ensaio



Figura 6.89 – TFRES SE – detalhes fissuras



As Figuras 6.92, 6.93 e 6.94 apresentam o rompimento da viga TFVI com armadura transversal total. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.90 – TFVI CE – início do ensaio

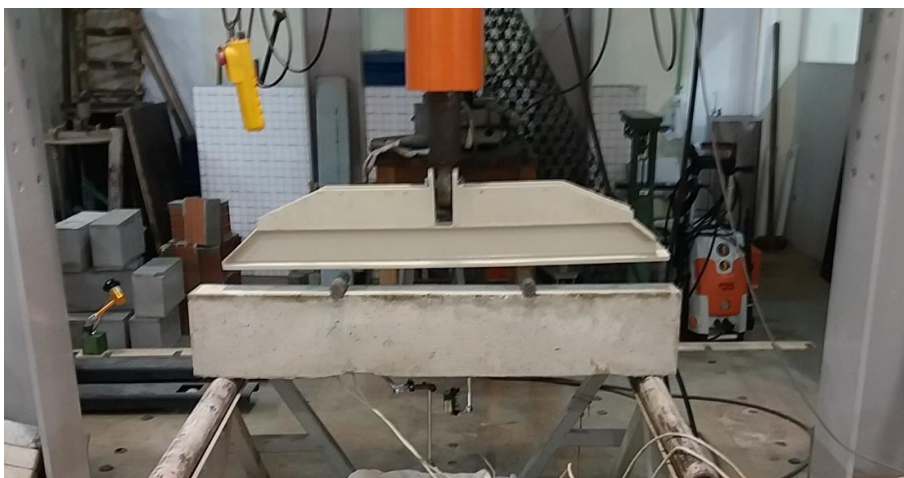


Figura 6.91 – TFVI CE – fim do ensaio



Figura 6.92 - - TFVI CE – detalhes das fissuras



As Figuras 6.95, 6.96 e 6.97 apresentam o rompimento da viga TFVI com armadura transversal parcial. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.93 – TFVI SE – início do ensaio



Figura 6.94– TFVI SE – fim do ensaio



Figura 6.95– TFVI SE – detalhes das fissuras



As Figuras 6.98, 6.99 e 6.100 apresentam o rompimento da viga TFVII com armadura transversal total. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.96 – TFVII CE – início do ensaio



Figura 6.97 – TfvII CE – fim do ensaio



Figura 6.98 – TfvII CE – detalhes de fissuras



As Figuras 6.101, 6.102 e 6.103 apresentam o rompimento da viga TfvII com armadura transversal parcial. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.99 – TfvII SE – início do ensaio



Figura 6.100 – TfvII SE – fim do ensaio



Figura 6.101 – TfvII SE – detalhes fissuras





As Figuras 6.104, 6.105 e 6.106 apresentam o rompimento da viga TFAI com armadura transversal total. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.102 – TFAI CE – início do ensaio



Figura 6.103 – TFAI CE – fim do ensaio



Figura 6.104 – TFAI CE – detalhes fissuras



As Figuras 6.107, 6.108 e 6.109 apresentam o rompimento da viga TFAI com armadura transversal parcial. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.105 – TFAI SE – início do ensaio



Figura 6.106 – TFAI SE – fim do ensaio



Figura 6.107 – TFAI SE – detalhes fissuras



As Figuras 6.110, 6.111 e 6.112 apresentam o rompimento da viga TFAII com armadura transversal total. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.108 – TFAII CE – início do ensaio



Figura 6.109 – TFAII CE – fim do ensaio



Figura 6.110 – TFAII CE – detalhes fissuras



As Figuras 6.113, 6.114 e 6.115 apresentam o rompimento da viga TFAII com armadura transversal parcial. Podemos afirmar que houve ruptura por força cortante-tração.

Figura 6.111 – TFAII SE – início do ensaio



Figura 6.112 – TFAII SE – fim do ensaio



Figura 6.113 – TFAII SE – detalhes fissuras



Pode-se observar nos ensaios das vigas que, mesmo com a adição de fibras, a ruptura das mesmas foi por cisalhamento e não por flexão, como se busca no dimensionamento destes elementos estruturais.



## 7. Determinação do impacto ambiental do resíduo de fresado asfáltico

Em continuidade ao assunto tratado no Capítulo 6, abaixo estão descritos os procedimentos para as verificações propostas por Dosho (2007).

Determinando que o material pode ser aplicado tecnicamente em vista de sua compatibilidade granulométrica, o próximo passo é determinar a diminuição do impacto ambiental. Para tal tem-se como área de estudo o Campus I da PUC Campinas.

Por meio de levantamento realizado no *software Google Earth Professional* foi possível delimitar que o Campus possui aproximadamente 8,52 km de vias asfaltadas de circulação de veículos, desconsiderando áreas de estacionamentos, acessos a prédios e vias externas sob responsabilidade da Prefeitura Municipal de Campinas. A Figura 7.59 apresenta a área em questão delimitada em amarelo.

Figura 7.114 - Campus I PUC Campinas.



Fonte: Google Earth Pro.

Na hipótese de uma manutenção geral nas vias do campus, envolvendo a fresagem do asfalto, sendo realizada por fresadora a frio numa

espessura de 3 cm e considerando que as vias possuem aproximadamente 6,50m de largura tem-se uma geração total de 1.661,40m<sup>3</sup> de resíduo.

No caso da reincorporação deste material na própria via por meio de aquecimento, em melhores condições apenas 80% do material é reabsorvido, portanto há necessidade de alocar cerca de 322,28 m<sup>3</sup> para usos posteriores.

Sabendo que o Campus I não possui vias em expansão para a incorporação deste resíduo na forma de base e sub-base, seu uso em obras civis na forma de agregado para uso estrutural e não estrutural é uma solução para que o mesmo não se tornasse um passivo ambiental. Para tal é necessário a britagem e separação granulométrica deste resíduo que poderia ser realizado em uma unidade de tratamento próxima.

Segundo Petitto (2017), existem duas unidades recicladoras no Município de Campinas, sendo uma pública localizada próximo ao aterro Delta e atua somente produzindo RCD misto, sem separação granulométrica. A segunda é privada, se localiza no distrito de Barão Geraldo e atua produzindo agregados a partir do RCD, porém a partir de esteira seletora consegue separá-los em composições granulométricas comerciais.

A distância entre o Campus I da PUC e a Unidade Recicladora de Barão Geraldo é de 8,7 km.

Diante de tal fato se torna mais interessante o transporte deste material até a usina e seu retorno para a instituição devidamente separado em suas granulometrias. A análise do custo se torna um item adicional a completar esta utilização.

Assim, foram comparados os valores unitários (R\$/m<sup>3</sup>) dos agregados naturais e dos agregados reciclados.

Para verificação de tais custos foi utilizado o material divulgado pela Caixa Econômica Federal por meio do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) em relação ao mês de março de 2018 para o Estado de São Paulo. A Tabela 7.1 representa os valores coletados.

Tabela 7.1 - Custos SINAPI para Agregados naturais.

Item	Código SINAPI	Custo	
		R\$/m <sup>3</sup>	R\$/t
Areia Grossa de jazida	367	65,57	-
Brita 01 de pedreira	4721	47,24	-
Transporte em via pavimentada	72843	-	0,74

Fonte: CAIXA (2018).

Sabendo que a areia grossa utilizada é proveniente da cidade de Roseira, tem-se uma distância de 225,00km até o Campus I. A Brita 01 é proveniente da cidade de Pedreira, tem-se uma distância de 40,6 km até o Campus I. Em posse das massas específicas destes materiais e distâncias a Tabela 7.2 apresenta o custo unitário deste material.

Tabela 7.2 - Custos unitários Agregados naturais.

Item	Custo
	R\$/m <sup>3</sup>
Areia Grossa	232,07
Brita 01	77,28

Em relação ao fresado, devem ser contemplados os custos para britagem e operação na usina e o transporte do material. Em relação ao transporte, foi adotado o custo SINAPI, uma vez que é o mesmo para qualquer tipo de material transportado. A distância total de ida e retorno ao Campus I um total de 17,40km.

Para os custos da moagem e separação granulométrica do resíduo, foram considerados os custos operacionais de uma usina recicladora levantados por Jadovski e Masuero (2006) e corrigido o valor total por meio das tabelas do INPC.

Em observação ao resíduo estipulado em 322,28 m<sup>3</sup> tem-se um total correspondente 721,90 toneladas de resíduo. Considerando que a usina possua um britador de 100 t/h pode-se afirmar que o resíduo levará um dia para ser processado.

Segundo Jadovski e Masuero (2006), para tal equipamento é necessária uma equipe média de um encarregado, dois operadores e dez auxiliares de produção a um custo de R\$ 6,50, R\$ 4,00 e R\$ 2,00 por hora e por colaborador. Ademais, como equipamentos é necessária uma retroescavadeira a um custo de



R\$ 40,00 por hora. O salário de seu operador é de R\$ 4,00/h e seu consumo de combustível é de 8 L/h.

Existem os custos de água e energia que chegam a R\$ 5,60/m<sup>3</sup> e R\$ 0,40/ m<sup>3</sup> respectivamente. Ainda haveria o custo de um funcionário administrativo a R\$ 13,00/h. Custos de internet/ telefonia e materiais de reposição para escritório a um total de 25,91/ dia. E por fim os impostos e tributos federais, estaduais e municipais, sendo PIS/COFINS, ICMS, IR e Contribuição Social.

Sendo assim, o custo de operação para o beneficiamento deste resíduo é de R\$ 8,87/ m<sup>3</sup> desonerado no ano de 2005. Atualizando em valores atuais para março de 2018 por meio da Calculadora do Banco Central do Brasil tem-se o custo de R\$ 17,39. Aplicando os devidos impostos para o ano de 2018 este valor passaria a R\$ 19,13. A Tabela 7.3 apresenta o valor obtido.

Tabela 7.3 - Custos unitários Resíduo Fresado Asfáltico

Item	Custo R\$/m <sup>3</sup>
Beneficiamento do Fresado (miúdo e graúdo)	19,13
Transporte	1,66

Portanto o valor total por metro cúbico deste resíduo retirado e entregue na instituição é de R\$ 48,01. Valor este 79,31% inferior ao agregado natural miúdo e 37,88% inferior ao agregado graúdo natural.

Tais fatores apresentados apresentam a viabilidade econômica da utilização deste material como agregado na construção civil e justificam o uso deste nesta pesquisa.



## 8. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa revelam que:

O resíduo de fresado asfáltico é viável tecnicamente, ambientalmente e economicamente na forma de agregado de construção civil;

Em relação a plasticidade observa-se que o resíduo de fresado asfáltico pouco interfere na trabalhabilidade. Ao se analisar a ação das fibras, foi possível verificar que ambas interferem na trabalhabilidade do concreto, reduzindo seu abatimento. Porém as fibras de vidro ocasionam maior redução.

Em relação às propriedades mecânicas principais (Resistência a Compressão Axial, Resistência a Tração por Compressão Diametral e Modulo de Elasticidade) observou-se que a dosagem de fresado pouco interfere em seus resultados.

Em relação as propriedades mecânicas principais (Resistência a Compressão Axial, Resistência a Tração por Compressão Diametral e Modulo de Elasticidade) observou-se que as dosagens de fibra garantiram o retorno das resistências alcançadas pelo traço referência, porém não apresentaram ganhos expressivos para nenhuma das dosagens.

Em relação a Resistência a Fissuração e Resistência Residual realizada no Ensaio Barcelona Simplificado, observou-se que os traços TREF e TFRES não apresentaram valores expressivos. O uso das fibras determinou um grande potencial residual ao concreto conforme esperado, principalmente nas dosagens TFVII e TFAll, que conseqüentemente possuem as maiores dosagens e os melhores desempenhos. Quanto a Tenacidade observou-se valores coerentes com as demais pesquisas realizadas (Salvador, 2013; Monte,2015), sendo este ensaio aconselhado para tal análise.

Em relação a Resistência a Fissuração e Resistência Residual realizada por meio do ensaio ASTM C-1399 observou-se que os resultados apresentaram maior padronização do que os resultados obtidos pelo EBS (Ensaio Barcelona Simplificado). Também se observou valores inexistentes de Resistência a Fissuração e Resistência Residual nos traços TREF e TFRES. O uso das fibras

ocasionou o surgimento destas resistências, sendo as dosagens com fibras que apresentaram melhores desempenho foram TFAI e TFAII. Este ensaio se mostrou mais adequado para obtenção da resistência residual do que o EBS. Já quando tratamos de Tenacidade o EBS mostrou resultados mais coerentes.

Em relação aos ensaios com vigas com a armadura transversal total, no que diz respeito a ruína, podemos afirmar que majoritariamente ocorreu cisalhamento, sendo somente na dosagem TREF que ocorreu ruína por flexão. Quanto as flechas, observou-se uma maior deformação para as dosagens com fibras, sendo TFAII a que apresentou o melhor desempenho. Quanto a deformação nos estribos observou-se que as dosagens sem fibras apresentaram uma deformação maior para menores cargas resistentes, enquanto que nas dosagens com fibras foi observado o efeito contrário.

Em relação aos ensaios com vigas com a armadura transversal parcial, no que diz respeito a ruína, podemos afirmar que majoritariamente ocorreu cisalhamento. Quanto as flechas, observou-se uma maior deformação para as dosagens com fibras, sendo TFAII a que apresentou o melhor desempenho. Quanto a deformação nos estribos observou-se que as dosagens sem fibras apresentaram uma deformação maior para menores cargas resistentes, enquanto que nas dosagens com fibras foi observado o efeito contrário.

Ao se comparar os resultados obtidos para as vigas com armadura total e parcial podemos afirmar que as dosagens utilizadas não ocasionaram reforço estrutural suficiente para que os resultados obtidos fossem semelhantes ao da armadura total.

A partir de toda a revisão de literatura e resultados obtidos pode-se sugerir para trabalhos futuros:

- a) Análise do ciclo de vida do resíduo de fresado asfáltico para um melhor entendimento quanto a seu impacto ambiental;
- b) Análise da ação deletéria do resíduo de fresado asfáltico em concretos com idades avançadas (superiores a 54 dias);
- c) Replica de todos os ensaios aqui elaborados realizando um *blend* de fibras semelhantes as utilizadas por meio de planejamento

específico e otimização da dosagem por método fatorial de experimentos

- d) Realizar correlações dos ensaios Barcelona Simplificado e ASTM C-1399 com outros ensaios utilizados para avaliação dos concretos com fibras.
- e) Replica das vigas executadas nesta pesquisa, porém com maior gama de teores de fibras para melhor entender as relações de flecha, deformação e carga resistente destas peças.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. AENOR  
UNE 83515. Fibre Reinforced Concrete. Determination of Cracking strength,  
ductility and residual tensile strength. Barcelona Test. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: Agregados –  
Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

\_\_\_\_\_. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação.p. 71. 2004.

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

\_\_\_\_\_. NBR 15530: Fibras de aço para concreto - Especificações. 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. p.238.  
2014.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição  
granulométrica. 2003.

\_\_\_\_\_. NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa  
por meio da peneira 75 um, por lavagem. 2003.

\_\_\_\_\_. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica  
e massa específica aparente. 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa  
específica, massa específica aparente e absorção de água. 2009.

\_\_\_\_\_. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência por  
abatimento no tronco cone. 1998.

AÏTCIN, P-C. Concreto de alto desempenho. Ed. 5. ABCP, São Paulo.2000.

ALMEIDA, L. C. de. Fundamentos de Concreto armado. Notas de Aula. Departamento de Estruturas. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002. Disponível em:<  
<http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Fundamentos.pdf> >. Acesso em 29 de março de 2017.

ALUCCI, M. P. et al. Banco de dados – características térmicas, luminosas e acústicas de vidros e plásticos translúcidos. Banco de Dados. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/deptecnologia/docs/bancovidros/>>. Acesso em 15 de nov. 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R 96: Report on fiber reinforced concrete. Revisão de 2002. Disponível em: <  
<http://indiafiber.com/Files/ACI%20report.pdf>>. Acesso em 19 de janeiro de 2017.

ANDOLFATO, R. P. Controle tecnológico básico do concreto. Livro. Ed. Unesp. Ilha Solteira. 2002. Disponível em: <  
<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/controle-tecnologico-basico-do-concreto.pdf>>. Acesso em 19 de janeiro de 2017.

ARABI, N.; MOLEZ, L.; RANGEARD, D. Durability of Alkali-Resistant Glass Fibers Reinforced Cement Composite: Microstructural Observations of Degradation. Artigo. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2018. Disponível em: <  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01712823/document>>. Acesso em 24 de abril. 2018.

ARAUJO, V. M. de C; *et al.* Avaliação ambiental da utilização de solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) em misturas asfálticas. Artigo. Revista transportes. V. 24. N. 2. 2016.

BALUENGA, G.; HERNANDEZ-OLIVARES, F. Cracking control of concrete modified with short Ar-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. Artigo. Cement and Concrete Research. Elsevier. 2007.

BANTHIA, N.; CHAN, C. Use of recycled aggregate in plain and fiber-reinforced shotcrete. Concrete International, v. 22, n.6. June 2000. P.41-45.

BARROS, A. R. de. Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto adensável reforçado com fibras de aço. Dissertação. Universidade Federal do Alagoas. Maceió. 2009.

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. Livro. Editora Taylor & Francis. Modern Concrete Technology Series. Faculty of Civil Environmental Engineering Technion. Israel. 2. Ed. 2007. Acesso em 24 de abril de 2018.

BERNUCCI, L. B. *et al.* Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Livro. Rio de Janeiro. Editora Abeda. 3. Ed. 2008.

BONFIM, V. Fresagem de Pavimentos Asfálticos. Livro. 3 ed. Editora Exceção. São Paulo. 2007. Disponível em < <http://fremix.com.br/wp-content/uploads/2015/06/Livro-Fresagem-de-Pavimentos-Asfalticos-PT-BR.pdf>>. Acesso em 17 de dezembro de 2016.

BORGES, L. A. Ensaio de compressão de corpo de prova com duplo corte em cunha na avaliação de concretos com baixos teores de fibra de aço. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2017. Disponível em < [https://www.researchgate.net/profile/Leonardo\\_Borges9/publication/312098957\\_Ensaio\\_de\\_compressao\\_de\\_corpo\\_de\\_prova\\_com\\_duplo\\_corte\\_em\\_cunha\\_na\\_avaliacao\\_de\\_concretos\\_com\\_baixos\\_teores\\_de\\_fibra\\_de\\_aco/links/58bdc42345851591c5e9b840/Ensaio-de-compressao-de-corpo-de-prova-com-duplo-corte-em-cunha-na-avaliacao-de-concretos-com-baixos-teores-de-fibra-de-aco.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Leonardo_Borges9/publication/312098957_Ensaio_de_compressao_de_corpo_de_prova_com_duplo_corte_em_cunha_na_avaliacao_de_concretos_com_baixos_teores_de_fibra_de_aco/links/58bdc42345851591c5e9b840/Ensaio-de-compressao-de-corpo-de-prova-com-duplo-corte-em-cunha-na-avaliacao-de-concretos-com-baixos-teores-de-fibra-de-aco.pdf)>. Acesso em 17 de maio de 2018.



BORGES, P. R. *et al.* Incorporação de Resíduo de lã de vidro em concreto. Artigo. Revista Tecnologia Metal, Materiais e Mineração. São Paulo. V. 14, n. 4. 2017. Disponível em < <http://www.tecnologiammm.com.br/files/v14n4/tmm1337.pdf>>. Acesso em 17 de dezembro de 2016.

BRASIL, Lei nº 9.055, de 1 de junho de 1995. Disciplina a extração, industrialização, utilização, comercialização e transporte do asbesto/ amianto e dos produtos que o contenham, bem como das fibras naturais e artificiais, de qualquer origem, utilizadas para o mesmo fim e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 02 de junho de 1995, p. 23371. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9055.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9055.htm)>. Acesso em 19 de janeiro de 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2008. Brasília. 2009. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2009>>. Acesso em 19 de maio de 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento. Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2015. Brasília. 2016. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2015>>. Acesso em 19 de maio de 2017.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Secretaria de Documentação. Amianto: bibliografia, legislação e jurisprudência temática. Brasília, DF, Ago 2012. Disponível em:<[http://www.stf.jus.br/arquivo/cms/bibliotecaConsultaProdutoBibliotecaBibliografia/anexo/Bibliografia\\_Amianto.pdf](http://www.stf.jus.br/arquivo/cms/bibliotecaConsultaProdutoBibliotecaBibliografia/anexo/Bibliografia_Amianto.pdf)>. Acesso em 19 de janeiro de 2017.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. Artigo. Revista Cerâmica. V. 61. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v61n358/0366-6913-ce-61-358-00178.pdf>>. Acesso em 12 de nov. de 2017.

BROCK, J. D; RICHMOND, J. L. Milling and Recycling. Artigo. Technical Paper T-127. ASTEC. 2016. Disponível em <[https://www.roadtec.com/images/uploads/productdocs/t127\\_techpaper\\_millingrecycling.pdf](https://www.roadtec.com/images/uploads/productdocs/t127_techpaper_millingrecycling.pdf)>. Acesso em 17 de dezembro de 2016.

BROLLO, M. J. Política e gestão ambiental em resíduos sólidos. revisão e análise sobre a atual situação no brasil. Anais Congresso. 21° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa. Set. 2001. Disponível em <[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45716681/00b7d5387196a764fe000000.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481969703&Signature=BJKi0IG%2BEXV3XA%2FJdJL8DQMT450%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPOLITICA\\_E\\_GESTAO\\_AMBIENTAL\\_EM\\_RESIDUOS.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45716681/00b7d5387196a764fe000000.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1481969703&Signature=BJKi0IG%2BEXV3XA%2FJdJL8DQMT450%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPOLITICA_E_GESTAO_AMBIENTAL_EM_RESIDUOS.pdf)>. Acesso em 17 de dezembro de 2016.

CAIXA (Caixa Econômica Federal). Tabelas SINAPI. Brasília. 2018. Ed março. Disponível em <[http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria\\_664](http://www.caixa.gov.br/site/Paginas/downloads.aspx#categoria_664)>. Acesso em 16 de abr. de 2018.

CAMPINAS, Campinas está entre as 10 em ranking da revista exame. Notícia. Diário Oficial de Campinas, SP, 19 de outubro de 2017. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/noticias-integra.php?id=32806>>. Acesso em 03 de abril de 2018.

CAMPINAS, Decreto nº 17.464, de 15 de dezembro de 2011. Cria grupo de trabalho para elaboração do plano municipal de gestão integrada de resíduos

sólidos. Plano Municipal de Gestão Integrada. Campinas, SP, 15 de dezembro de 2011. Disponível em: <

[http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/dlu/audiencias/plano\\_municipal\\_residuos\\_solidos.pdf](http://www.campinas.sp.gov.br/arquivos/dlu/audiencias/plano_municipal_residuos_solidos.pdf)>. Acesso em 03 de abril de 2018.

CAMPINAS, Decreto nº 18.167, de 29 de novembro de 2013. Regulamenta a Lei Municipal nº 14.418, de 05 de outubro de 2012, que institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. Diário Oficial. Campinas, SP, 02 de dezembro de 2013. Disponível em: <

<http://www.campinas.sp.gov.br/uploads/pdf/598086791.pdf>>. Acesso em 03 de abril de 2018.

CAMPOS, H. K. T. Renda e evolução da geração *per capita* de resíduos sólidos no Brasil. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. V.17 n.2. abr/jun. 2012. Disponível em < <http://www.scielo.br/pdf/esa/v17n2/a06v17n2.pdf>>. Acesso em 19 de maio de 2017.

CARELLI, J. A. Cisalhamento em vigas de concreto armado com estribos autotravantes. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002. Disponível em: <

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84060/187854.pdf?sequencia=1>>. Acesso em 25 de fev. 2017.

CNT (Confederação Nacional do Transporte). Rodovias 2016. Relatório gerencial. 20 ed. Brasília. 2016. Disponível em: <

[http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2016/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20\(ALTA\).pdf](http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2016/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20FINAL%20-%20WEB%20(ALTA).pdf). Acesso em 03 de abril de 2018.

CNT (Confederação Nacional do Transporte). Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? . 1 ed. Brasília. 2017. Disponível em: <

[http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Estudos%20CNT/estudo\\_pavimentos\\_ao\\_duram.pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Estudos%20CNT/estudo_pavimentos_ao_duram.pdf). Acesso em 03 de abril de 2018.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n°. 307, 5 de Julho de 2002. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/\\_arquivos/36\\_09102008030504.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf)>

Acesso em 13 de nov.de 2016.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n°. 448, 18 de Janeiro de 2012. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>> Acesso em 13 de nov.de 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. DER-SP. ET-DE-P00/038.

Fresagem de pavimento asfáltico. São Paulo. 2006. Disponível em <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-038\\_A.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-038_A.pdf)>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 053:

Misturas betuminosas – percentagem de betume. 1994. Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me053-94.pdf>>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 049: Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. 1994. Disponível em <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/normas/DNER-ME049-94.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME049-94.pdf)>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

\_\_\_\_\_. DNER – ME 195: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. 1997. Disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me195-97.pdf>>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.  
DNIT 064/2004 – ME: Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Metodo de Ensaio. 2004.

DOSHO, Y. Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing method. Journal of Advance Concrete Technology. Vol. 5, n. 1, p. 27-42.

FERREIRA, J. P. J. G.; BRANCO, F.A.B. The use of Glass Fiber-Reinforced Concrete as a Structural Material. Artigo. Experimental Techniques. May/June. 2007.

\_\_\_\_\_. DNIT 159/2011 – ES: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio – Especificação de serviço. Rio de Janeiro. 2011. Disponível em: <  
[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit159\\_2011\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit159_2011_es.pdf)>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

\_\_\_\_\_. DNIT 64/2004 – ME: Pavimento rígido – Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe – Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 2004. Disponível em: <  
[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit064\\_2004\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit064_2004_me.pdf)>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

\_\_\_\_\_. DNIT Manual de Conservação Rodoviária 2 ed. Rio de Janeiro. 2005. Disponível em  
<[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/Manual%20de%20Conservacao%20Rodoviaria.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Conservacao%20Rodoviaria.pdf)>. Acesso em 28 de ago. de 2016.

FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto com fibras de aço. Livro. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.

FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto reforçado com fibras. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011. Disponível em:

<[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../TeseLivreDocenciaAntonioFigueiredo2011.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/.../TeseLivreDocenciaAntonioFigueiredo2011.pdf)>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto: Ciência e Tecnologia. Capítulo 37 – Concreto com Fibras. Livro. 1 ed. Editora IBRACON. São Paulo. 2011.

FLEMING, D; LOPES, P. Unidade Recicladora de Materiais. Diário Oficial. Campinas, SP, 12 de junho de 2004. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/uploads/pdf/672690798.pdf>>. Acesso em 03 de abril de 2018.

FURLAN JUNIOR, S. Vigas de concreto com taxas reduzidas de armadura de cisalhamento: influência do emprego das fibras curtas e de protensão. Tese. Escola de Estruturas de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos. 1995.

FUSCO, P. B. Estruturas de Concreto: Solicitações Tangenciais. Livro. Editora PINI. São Paulo. 2008.

GOÍS, F. A. P. Avaliação experimental do comportamento de concreto flúido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto. 2010. 156p. Dissertação. Universidade Federal de Alagoas, Maceio, 2010.

GUIMARÃES, A. E. P. Análise de pilares de concreto de alta resistência com adição de fibras metálicas submetidas à compressão. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos, 1999. Disponível em: <[http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/estudos/Analise\\_de\\_pilares\\_de\\_concretos\\_de\\_alta\\_resistencia\\_com\\_adic.pdf](http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/estudos/Analise_de_pilares_de_concretos_de_alta_resistencia_com_adic.pdf)>. Acesso em 28 março de 2017.

HANSEN, T. C; NARUD, H. Strenght of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Artigo. Revista Concrete International, v. 5, n.1. 1983.

HIGUERO, V. A. Características físicas y mecânicas de hormigones reforzados com fibras de: vidrio, carbono y aramida. Dissertação. Máster universitario em ingeniaria de las estructuras, cimentaciones y materiales. Universidad Politécnica de Madrid. Madri. 2010. Disponível em: <  
[http://oa.upm.es/3763/1/TESIS\\_MASTER\\_VICTORIA\\_AGUILA\\_HIGUERO.pdf](http://oa.upm.es/3763/1/TESIS_MASTER_VICTORIA_AGUILA_HIGUERO.pdf)>.  
Acesso em 28 março de 2018.

HOLANDA, K. M. A; HANAI, J. B. de. Análise dos mecanismo resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto. Artigo. Cadernos de Engenharia de Estruturas. V. 7. N. 29. São Carlos, 2005. Disponível em: <  
[http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova\\_versao/pdf/cee29\\_79.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/nova_versao/pdf/cee29_79.pdf)>.  
Acesso em 12 novembro de 2017.

ISHIHARA, R. Avaliação de ensaios experimentais de cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal à luz das normas. Dissertação. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2017. Disponível em: <  
[http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/322762/1/Ishihara\\_Ronaldo\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/322762/1/Ishihara_Ronaldo_M.pdf)>. Acesso em 12 novembro de 2017.

IZQUIERDO, I. S. Utilização de pós residuais e fibra de sisal em blocos de concreto. Tese. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015. Disponível em : <  
[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/.../2015DO\\_IndaraSotolzquierdo.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/.../2015DO_IndaraSotolzquierdo.pdf)  
>. Acesso em 12 novembro de 2017.

JABOBI, P. R; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em são paulo: desafios da sustentabilidade. Artigo. Estudos Avançados. V. 25. N.71. 2011. Disponível em:<  
<http://www.scielo.br/pdf/ea/v25n71/10.pdf>>. Acesso em 15 de nov. de 2016.  
JADOVSKI, I. Diretrizes técnicas e económicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Dissertação. Escola de Engenharia.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005. Disponível em:<  
<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10156>>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

JADOVSKI, I; MASUERO, Â B. Estudo dos custos de implantação, operação e manutenção de usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. Anais de Congresso. Ental (Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Florianópolis. 2006. Disponível em:<  
[http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006\\_1842\\_1851.pdf](http://www.infohab.org.br/entac2014/2006/artigos/ENTAC2006_1842_1851.pdf)>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). JSCE-SF1: Method of making steel fiber reinforced concrete in the laboratory. P. 3. 1984. Disponível em:<  
[http://library.jsce.or.jp/Image\\_DB/spec/con\\_lib/no03/CLIno03\\_0045.pdf](http://library.jsce.or.jp/Image_DB/spec/con_lib/no03/CLIno03_0045.pdf)>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (JSCE). JSCE-SF2: Method of making specimens for strenght and toughness tests of stell fiber reinforced concrete. P. 7. 1984. Disponível em:<  
[http://library.jsce.or.jp/Image\\_DB/spec/con\\_lib/no03/CLIno03\\_0049.pdf](http://library.jsce.or.jp/Image_DB/spec/con_lib/no03/CLIno03_0049.pdf)>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

JOHNSON, P. E. A. M. Best Practices Handbook on asphalt pavement maintenance. Livro. Editora Minnesota Technology Transfer Center. 1 ed. University of Minnesota. Minneapolis. 2000. Disponível em:<  
<http://www.cee.mtu.edu/~balkire/CE5403/AsphaltPaveMaint.pdf>>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

JUNIOR, A. R. Comportamento de vigas de concreto com fibras e baixas taxas de armadura longitudinal. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

KINDLE, M. A praça que eclode num centro cultural – zahahadid assina o projeto no azerbaijão. 17 de jan. 2014. Casa Vogue. Disponível em:



<<http://casavogue.globo.com/Arquitetura/Edificios/noticia/2014/01/praca-que-eclode-num-centro-cultural.html>>. Acesso em: 15 de nov. 2016.

KWAK, Y.K, et al. Shear Strenfth of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups. Artigo. Revista ACI Structural Jornal. V. 99, n 4. Julho – Agosto. 2002. EUA. Disponível em: <[http://faculty.washington.edu/eberhard/publications/aci\\_manuscript\\_f99s55.pdf](http://faculty.washington.edu/eberhard/publications/aci_manuscript_f99s55.pdf)>. Acesso em 28 de março de 2017.

LEET, K. M; UANG, C-M; GILBERT, A. M. Fundamentals of Structural Analysis. Livro. Editora East Coast Education. 4 Ed. 2010.

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

LEONHARDT, F; WALTHER, R. Schubversuche na einfeldrigen Stahhilbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. Deustcher Ausschuss fur Stahibeton. Editora Ernst & Sohn. Berlin, 1962.

LESSA, D. Especial Rodovias – As primeiras estradas brasileiras. Reportagem. Editora Radio Câmara. Câmara dos Deputados. Brasília. 2005. Disponível em: <[http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/radio/materias/REPORTAGEM-ESPECIAL/330615-ESPECIAL-RODOVIAS--AS-PRIMEIRAS-ESTRADAS-BRASILEIRAS--\(-05%27-49%22-\).html](http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/radio/materias/REPORTAGEM-ESPECIAL/330615-ESPECIAL-RODOVIAS--AS-PRIMEIRAS-ESTRADAS-BRASILEIRAS--(-05%27-49%22-).html)>. Acesso em 28 de março de 2017.

LIMA JUNIOR, H.C; *et al.* Vigas de concreto reforçadas com bambu Dendrocalamus giganteus. I: Análise Experimental. Artigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 9. N. 4. Campinas Grande. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v9n4/v9n4a31.pdf>>. Acesso em 07 de out.de 2016.

LIMA, A. M. V. Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósito (PRFV). Tese. Universidade do Porto. Porto. 1987.

LOPES, M. M. Substituição Parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto. Tese. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2005.

MALATESTA, S. C. et al. Control de la tenacidade de los hormigones reforçados com fibras usando el ensayo de doble puncionamento (ensayo barcelona). Artigo. Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 24. N. 2. Agosto. 2009. Universidade Politècnica de Catalunya. Barcelona. Espana. Disponível em: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732009000200001](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000200001)>. Acesso em 07 de out. de 2016.

MARARA, K; et al. Compression specific toughness of normal strength steel fiber reinforced concrete (NSSFRC) and high strength steel fiber reinforced concrete (HSSFRC). Artigo. Revista Materials Research. Vol. 14. No. 2. São Carlos. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392011000200017](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392011000200017)>. Acesso em 07 de out. de 2016.

MARÉ, F. L. História das Infra-Estruturas Rodoviárias. Dissertação. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto. 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61562/1/000148960.pdf>>. Acesso em 10 de nov. de 2016.

MARINS, K. R. C.; TAKAHASHI, R. I.; RIBEIRO, T. G. Referência para cálculo de concreto armado. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. Escola Politècnica da Universidade de São Paulo. 2000. Disponível em: <[http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/resumo\\_concreto\\_usp.pdf](http://www.fec.unicamp.br/~almeida/au405/Lajes/resumo_concreto_usp.pdf)>. Acesso em 10 de nov. de 2016.

MARTINS, I. R. de F. Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira. 2005.

Disponível em: <

[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91486/martins\\_irf\\_me\\_ilha.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91486/martins_irf_me_ilha.pdf?sequence=1)>. Acesso em 10 de nov.de 2016.

MATHEW, B. A. *et al.* Investigations on Tensile Properties of High Strength Steel Fibre Reinforced Concrete. Artigo. Indian Journal of Science and Technology. Vol 8. Out. 2015.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: microstructure, properties and materials. McGraw-Hill.ThirdEdition. 2006. California. USA.

MILTON, J. M. DE. Estruturas de concreto: a resistência a tração e energia de fratura do concreto. Rio Grande. Editora Dunas. 2001. Ed. 2. Disponível em: <[http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero\\_02.pdf](http://www.editoradunas.com.br/dunas/Numero_02.pdf)>. Acesso em 10 de nov.de 2016.

MONTE, R.Characterização e controle do comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras para tubos. Tese. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2015.

MORGAN, D. R; MINDESS, S; CHEN, L. Testing and Specifying Toughness for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete. Artigo. Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto. Canada. 1995.

NAPA (National Asphalt Pavement Association). Asphalt Pavement Industry Surley on Recycled Material and Warm-Mix Asphalt Usage 2016. Artigo. 7 anuário NAPA. USA. 2016. Disponível em: <[https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2016\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Executive\\_Sumary.pdf](https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2016_RAP-RAS-WMA_Survey_Executive_Sumary.pdf)>. Acesso em 10 de nov.de 2016.

NETO, B. B. P. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia de fratura do concreto. Tese. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2004.

NEVILLE, A.M.; GERALD, P. E. Concrete Manual. Livro. Editora Internacional Code Concil. 3 ed. 2015.

NOGUEIRA, A. B; *et al.* Avaliação da reprodutibilidade do ensaio Barcelona para controle do concreto reforçado com fibras. Anais de Congresso. 59 Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves. 2017. Disponível em <[https://www.researchgate.net/profile/Antonio\\_Figueiredo4/publication/321194918\\_AVALIACAO\\_DA\\_REPRODUTIBILIDADE\\_DO\\_ENSAIO\\_BARCELONA\\_PARA\\_CONTROL\\_DO\\_CONCRETO\\_REFORCADO\\_COM\\_FIBRAS\\_REPRODUCIBILITY\\_EVALUATION\\_OF\\_BARCELONA\\_TEST\\_AS\\_A\\_CONTROL\\_METHOD\\_FOR\\_FIBER\\_REINFORCED\\_CONCRETE/links/5a14598e0f7e9b925cd507d8/AVALIACAO-DA-REPRODUTIBILIDADE-DO-ENSAIO-BARCELONA-PARA-CONTROLE-DO-CONCRETO-REFORCADO-COM-FIBRAS-REPRODUCIBILITY-EVALUATION-OF-BARCELONA-TEST-AS-A-CONTROL-METHOD-FOR-FIBER-REINFORCED-CONCRETE.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Antonio_Figueiredo4/publication/321194918_AVALIACAO_DA_REPRODUTIBILIDADE_DO_ENSAIO_BARCELONA_PARA_CONTROL_DO_CONCRETO_REFORCADO_COM_FIBRAS_REPRODUCIBILITY_EVALUATION_OF_BARCELONA_TEST_AS_A_CONTROL_METHOD_FOR_FIBER_REINFORCED_CONCRETE/links/5a14598e0f7e9b925cd507d8/AVALIACAO-DA-REPRODUTIBILIDADE-DO-ENSAIO-BARCELONA-PARA-CONTROLE-DO-CONCRETO-REFORCADO-COM-FIBRAS-REPRODUCIBILITY-EVALUATION-OF-BARCELONA-TEST-AS-A-CONTROL-METHOD-FOR-FIBER-REINFORCED-CONCRETE.pdf)>. Acesso em 16 de mai. de 2018.

P. S. DIAS. *ET AL.* Contribuição ao estudo de materiais freados incorporados a um solo argiloso siltoso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis. Artigo. 44° RAPV – Reunião Anual de Pavimentação. Foz do Iguaçu. 2015. Disponível em <[http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal\\_143.pdf](http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_143.pdf)>. Acesso em 16 de nov. de 2016.

PAULA, D. A. de. Estado, sociedade civil e hegemonia do rodoviarismo no Brasil. Artigo. Revista Brasileira de História da Ciência. V. 3. n. 2. Jul/dez. 2010. Rio de Janeiro. 2010.

PERUZZI, A. de P. Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com latex e adição de sílica ativa. Dissertação.

Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2002.

PETITTO, R. M. Análise da viabilidade de aplicação de resíduos de construção civil da região metropolitana de Campinas em argamassa de uso geral por método multicritérios. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas. 2017.

PIETRA, I. F. D.; SOUZA de, U. E. L. Concreto com agregados graúdos reciclados reforçado com fibras de aço. Boletim Técnico. Escola Politécnica da USP. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006. 10p.

PINHEIRO, L. M; et al. Cisalhamento em vigas – capítulo 13. Notas de Aula. Departamento de Engenharia de Estruturas. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos. 2003. Disponível em: < <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/cv714/Cisalhamento.pdf> >. Acesso em 21 de jan. de 2017

PINTO, T de P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese. Doutor em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PIRES, D. R. Tijolos de adobe confeccionados no agreste pernambucano com adição de cola branca. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2013.

PUJADAS, P. *et al.* New analytical model to generalize the Barcelona Test using axial displacement. Artigo. Journal of Civil Engineering and Managemet. Vol 19. 2013.

RESENDE, F. M. Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho. Tese. Edufal. Universidade Federal do Alagoas. Maceio. 2005. Disponível em

<[http://www.usinaciencia.ufal.br/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos\\_caracteristicas\\_usos\\_producao\\_e\\_impactos\\_ambientais.pdf](http://www.usinaciencia.ufal.br/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf)>. Acesso em 8 de ago. de 2016.

ROCHA, A. C; *et al.* Ensaio de Stuttgart – Reprodução em Laboratório. Artigo. 46 Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON. Florianópolis. 2004. Disponível em <  
[http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart\\_artigo\\_ibracon\\_2004\(6\).pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/3922/material/Ensaio%20de%20Stuttgart_artigo_ibracon_2004(6).pdf)>. Acesso em 8 de ago. de 2016.

RUIZ, A. N. Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas. 2017.

SACHET, T. *et al.* Interpretação da perda de resistência em concretos secos com incorporação de fresados asfálticos com apoio de análise microscópica. Artigo. Revista IBRACON Riem, Dez. 2013.

SALUTES, S. R. Ensayo de dobre punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con fibras (ensayo barcelona). Minor Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 2006. Disponível em <<http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3323>>. Acesso em 03 de nov. de 2016.

SALVADOR, R. P. Análise comparativa de comportamento mecânica de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. Artigo. Revista Matéria. Rio de Janeiro. 2013.

SALVADOR, R. P. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2013.

SANTOS, I. M. R. dos. Estudo de dosagens de concreto para aumento da resistência à tração na flexão. Monografia – Especialização. Departamento de Construção Civil. Universidade Tecnológica Federal do Parana. Curitiba. 2014.

SANTOS, R. M. dos. Comportamento de Vigas de Concreto armado reforçadas com CFC sujeitas a carga de impacto. Dissertação. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

SANTUCCI, L. Recycling asphalt pavements a strategy revisited. Artigo. Revista Tech Topic. University of California. Berkeley. 2007. Disponível em <<http://www.techtransfer.berkeley.edu/sites/default/files/technical-topics/2007techttopics%20%281%29.pdf>>. Acesso em 04 de set. de 2016.

SILVA, L. F. e. Comportamento a flexão de placas de argamassa armada com fibras de aço onduladas. Tese. Escola de Estruturas de São Carlos. Universidade Estadual de São Paulo. São Carlos. 1990.

STREIT, F. L. Resíduos de Concreto com fibra de polipropileno: Estudo sobre a sua utilização como agregado graúdo na confecção de concreto. Monografia. Departamento de Engenharia Civil. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/110137/000951955.pdf?sequence=1>>. Acesso em 15 de nov. de 2016.

TANESI, J; FIGUEIREDO, A. D. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (crfp). Livro. Ed. 1. EPUSP. São Paulo. 1999. Disponível em <<http://www.allquimica.com.br/arquivos/websites/artigos/A-000092006526151655.pdf>>. Acesso em 04 de set. de 2016.

TAVARES, D. H; GIONGO, J. S. Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de gfrp. Artigo. Cadernos de Engenharia de Estruturas. São Carlos. V. 11. N. 52. 2009.

THOMAZ, E. C. S. Ensaio de compressão diametral. Notas de Aula. IME. Rio de Janeiro. 2004. Disponível em:

<[http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/compresso\\_diametral.pdf](http://netulio.weebly.com/uploads/9/0/6/6/9066781/compresso_diametral.pdf)>.

Acesso em 08 de dezembro de 2016.

TRAUTWEIN, L. M.; DE ALMEIDA, L. C.; GASPAR, R. A Comparative Study of the Shear Strength Prediction for Reinforced Concrete Beams without Shear Reinforcement. *Applied Mechanics and Materials*, V.584-586, 2014, p. 1135-1140.

VILELA FILHO, L. R. Urbanização e Fragilidade Ambiental na Bacia do Córrego Proença, Município de Campinas (SP). Dissertação. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.

WILLS, X. P. Analysis of the use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Europe. Dissertação. Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale. Politecnico di Milano. Milano. 2016.

WIRTGEN GmbH. Eliminar y granular eficientemente firmes de carreteras. El mundo de las fresadoras em frío de Wirtgen. Brochura técnica. Windhagen. 2016. Disponível em: <[https://media.wirtgen-group.com/media/02\\_wirtgen/media\\_1/media\\_1\\_01\\_cold\\_milling\\_machines\\_2/media\\_1\\_01\\_cold\\_milling\\_machines\\_2\\_00\\_general\\_information/W\\_brochure\\_Cold-Milling-Machines\\_0316\\_ES.pdf](https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_01_cold_milling_machines_2/media_1_01_cold_milling_machines_2_00_general_information/W_brochure_Cold-Milling-Machines_0316_ES.pdf)>. Acesso em 08 de dezembro de 2016.