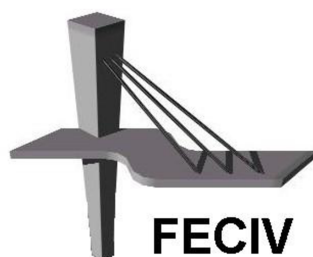


Dissertação DE MESTRADO

**ANÁLISE DE IMAGENS PARA
DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE FIBRAS
PRESENTES NO CONCRETO**

BRUNO MARQUES RIBEIRO



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Bruno Marques Ribeiro

ANÁLISE DE IMAGENS PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE FIBRAS PRESENTES NO CONCRETO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 26/02/2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R484a Ribeiro, Bruno Marques, 1987-
2018 Análise de imagens para determinação da quantidade de fibras
 presentes no concreto / Bruno Marques Ribeiro. - 2018.
 215 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos dos Santos.
Coorientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1110>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Fibras de metal - Teses. 3.
Processamento de imagens - Técnicas digitais - Teses. I. Santos, Antônio
Carlos dos. II. Schmidt, Marcio Augusto Reolon. III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. IV. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro – CRB6/1262



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGE

ATA Nº: 203/2018

CANDIDATO: Bruno Marques Ribeiro

Nº. Matrícula: 11612ECV017

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

TÍTULO: "Análise de imagens para determinação da quantidade de fibras presentes no concreto"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

PROJETO DE PESQUISA: Recuperação e Reforço de Elementos Estruturais

DATA DA DEFESA: 26 de fevereiro de 2018

LOCAL: Sala de Reuniões Prof. Marcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 14h10 - 16h30

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGE, assim composta: Professores Doutores: **Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – FECIV/UFU; Leandro Mouta Trautwein – FEC/UNICAMP e Antonio Carlos dos Santos** orientador do candidato. Ressalta-se que o todos os membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato Aprovado. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos – FECIV/UFU**

Leandro Mouta Trautwein

Membro externo: **Prof. Dr. Leandro Mouta Trautwein – FEC/UNICAMP**

Andrielli M. Oliveira

Membro interno: **Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – FECIV/UFU**

Uberlândia, 26 de Fevereiro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação a minha amada esposa, Bárbara, pelo apoio incondicional, incentivo e confiança na concretização desse trabalho. Você é uma inspiração, sem você nenhuma conquista valeria a pena.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelas bênçãos e oportunidades em minha vida.

A minha esposa, Bárbara, pelo apoio e ajuda em todas as etapas desse trabalho. Por acreditar sempre que tudo daria certo no final. Pelo companheirismo em todos os momentos de felicidades e dificuldades. Sem o seu apoio tudo isso não seria possível.

Aos meus pais, Maria José e Odário, meu orgulho e maiores exemplos, por sempre acreditarem em meu potencial e pelos ensinamentos de que sempre podemos alcançar nossos objetivos pelo caminho da honestidade e persistência.

Ao meu irmão, Júnior, pelo companheirismo e por também acreditar que “é só fazer certo que dará certo”. A minha cunhada, Grazielle, pela ajuda com os ensaios.

A minha sogra, Maria Aldair, um exemplo de crescimento profissional, pelos incentivos e apoio. Ao meu sogro, José Cristóvão, pelo apoio e por sempre estar disposto a usar sua calculadora para me ajudar com os cálculos matemáticos.

A minha cunhada, Ana Clara, pelo apoio e orientações. Ao meu concunhado, Juliano, pela parceria em todos os momentos.

Ao meu grande amigo, Marco Aurélio, pela amizade desde a graduação e por estar sempre disposto a ajudar.

Aos amigos, Cristiam, Cristiano e Bruna, pela ajuda com os ensaios.

Ao meu orientador Professor Antônio Carlos dos Santos por sua orientação e sabedoria.

Ao meu co-orientador Marcio Augusto Reolon Schmidt, pela ajuda com o aprendizado da linguagem de programação em MatLAB.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, que diretamente ou indiretamente contribuíram com esse trabalho.

RIBEIRO, B. M. **Análise de imagens para determinação da quantidade de fibras presentes no concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo estimar a quantidade de fibras presentes em corpos de prova de concreto cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, reforçados com fibras de aço, utilizando o processamento digital de imagens (PDI) das seções transversais dos corpos de prova. O programa experimental consistiu na produção de 192 corpos de prova a partir de três diferentes teores de fibras de aço incorporadas a mistura do concreto (20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³), sendo 64 corpos de prova para cada teor de fibra. Destes, 32 foram desmoldados ainda no estado fresco e as fibras foram separadas e 32 foram cortados transversalmente para obtenção de imagens das seções. A estimativa da quantidade de fibras presentes no concreto foi realizada com a utilização de uma rotina de programação desenvolvida em ambiente MatLAB, que fez a análise da imagem digital da seção transversal do corpo de prova, identificando a segmentação das fibras presentes. Os valores estimados para a quantidade de fibras utilizando o processamento de imagens foram comparados com as quantidades obtidas na desmoldagem dos corpos de prova no estado fresco. Os resultados para estimativa utilizando o PDI foram satisfatórios não havendo variação significativa para as duas formas de estimativas do volume de fibras.

Palavras-chave: Fibras de aço. Processamento de imagens digitais. Compósitos.

RIBEIRO, B. M. **Image analysis to determine the amount of fibers present in concrete.**
MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

This work aims to estimate the amount of fibers present in cylindrical concrete specimens, 100 mm in diameter and 200 mm high, reinforced with steel fibers, using the digital image processing of the cross sections of the specimens. The experimental program consisted of the production of 192 specimens from three different levels of steel fibers (20 kg / m³, 30 kg / m³ and 40 kg / m³). fiber content. Of these, 32 were still demoulded in the fresh state and the fibers were separated and 32 were cut crosswise to obtain images of the sections. The estimation of the amount of fibers present in the concrete was carried out using a programming routine developed in MatLAB environment, which allows the analysis of the digital image of the cross section of the specimen, identifying and segmenting the fibers present. The estimated values for the amount of fibers using the image processing were compared with the quantities obtained in the demoulding of the specimens in the fresh state. The results for the estimation using the PDI were satisfactory, there was no significant variation for the two forms of fiber volume estimates.

Palavras-chave: Steel fibers. Digital image processing. Composite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de fibras e seções mais utilizadas.....	18
Figura 2 – Concentração de tensões no concreto com e sem reforço de fibras.....	22
Figura 3 – Esquema de tensões atuantes na fibra embutida na matriz antes e depois do carregamento	23
Figura 4 – Representação do avanço da fissura e o campo de tensões ao longo do comprimento.....	23
Figura 5 – Classificação do comportamento de concretos com adição de fibras	26
Figura 6 – Comportamento de compósito com teores diferentes de fibras	27
Figura 7 - Curva média de carga por deslocamento em ensaio de tração na flexão.....	28
Figura 8 – Influência da dimensão característica máxima do agregado na consistência de CRFA.....	29
Figura 9 – Distribuições possíveis de tensão de acordo com o comprimento da fibra.....	30
Figura 10 – Classificação das fibras quanto à direção.....	32
Figura 11 – Número de fibras por unidade de volume, ou área de fibra por unidade de volume, em função do volume percentual de fibras e da geometria da fibra	33
Figura 12 – Aumento da resistência à tração para diferentes percentuais de fibras de aço adicionadas a concretos e submetidos a ensaio de compressão diametral	37
Figura 13 – Espectro eletromagnético	44
Figura 14 - Processo de aquisição de imagens digitais	45
Figura 15 - Descrição de imagens matriciais em conjunto de <i>pixels</i>	46
Figura 16 - Amostra de imagens.....	48
Figura 17 – Efeito de contraste da resolução espectral para uma imagem em diferentes bandas.	49
Figura 18 - Conceito de resolução espectral.....	49

Figura 19 - Imagem com níveis de intensidade	51
Figura 20 - Modificações da mesma área em períodos distintos.....	52
Figura 21 - Esquema de vizinhanças	52
Figura 22 - Exemplos de vizinhança-4, vizinhança-8 e componente conectado “C”	53
Figura 23 - Comparação de imagens antes e após equalização de histograma	55
Figura 24 - Comparação de imagens antes e após limiarização	57
Figura 25 – Fluxograma para método Otsu.	59
Figura 26 – Suavização de imagem utilizando filtro de média	62
Figura 27 - Filtros de média e mediana	63
Figura 28 - Máscara para filtro passa-alta	64
Figura 29 – Detecção de bordas em imagens	66
Figura 30 – Aplicação de operadores de derivada.....	68
Figura 31 – Fluxograma para metodologia da dissertação.	74
Figura 32 – Fibras utilizadas como reforço para o concreto	76
Figura 33 – Agregados pesados e condicionados para execução do concreto	80
Figura 34 – Verificação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	81
Figura 35 – Moldagem de corpos de prova.	82
Figura 36 – Processo de separação de fibras para corpos de prova.....	83
Figura 37 – Esquema de corte para corpos de prova.	84
Figura 38 – Serra policorte e corpo de prova posicionado para corte transversal	85
Figura 39 – Retificação para seções transversais dos corpos de prova.	85
Figura 40 – Caixa para controle de exposição na captação de imagens.....	87
Figura 41 – Esquema para aquisição de imagens em corpos de prova.....	88
Figura 42 – Diferentes reagentes aplicados na seção transversal de corpos de prova.....	89
Figura 43 – Diferentes distâncias para posicionamento da lente da câmera em relação ao corpo de prova	90

Figura 44 – Segmentação para diferentes distâncias de captação de imagem.....	91
Figura 45 – Diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens sem a utilização de flash.....	92
Figura 46 – Diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens com a utilização de flash.....	93
Figura 47 – Interface gráfica da rotina para estimativa da quantidade de fibras em compósitos.....	97
Figura 48 – Segmentação para diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens com a utilização de flash.	94
Figura 49 – Fibras utilizadas como reforço para o concreto	96
Figura 50 – Fluxograma de processos para rotina em MatLAB.....	98
Figura 51 – Processo de discretização da imagem para seção transversal de corpo de prova	99
Figura 52 – Realce de bordas utilizando procedimento <i>top-hat</i>	100
Figura 53- Processo de limiarização.....	101
Figura 54 – Áreas determinadas para fibras presentes na seção transversal	102
Figura 55 – Posição das fibras na seção transversal de corte.	102
Figura 56- Validação para o processo de mapeamento de áreas de agregados em corpos de prova de concreto.....	103
Figura 57 – Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 20 kg/m ³ ..	109
Figura 58 – Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 30 kg/m ³ ..	111
Figura 59 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 40 kg/m ³ ...	113
Figura 60 – Desvio para volume de fibras em relação ao esperado Erro! Indicador não definido.	
Figura 61 -Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 20 kg/m ³	116
Figura 62 – Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 20 kg/m ³	117

Figura 63 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pelo PDI, para teor de 20 kg/m ³	117
Figura 64 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 30 kg/m ³	119
Figura 65 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 30 kg/m ³	120
Figura 66 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pelo PDI, para teor de 30 kg/m ³	121
Figura 67 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 40 kg/m ³	123
Figura 68 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 40 kg/m ³	124
Figura 69 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 40 kg/m ³	124
Figura 70 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 20 kg/m ³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem	126
Figura 71 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 30 kg/m ³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem	126
Figura 72 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 40 kg/m ³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem	127
Figura 73 – Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 1 e área média das três seções transversais, considerando teor de fibras de 20 kg/m ³	129
Figura 74 - Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 2 e área média das três seções transversais, , considerando teor de fibras de 20 kg/m ³	130
Figura 75 - Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 3 e área média das três seções transversais, , considerando teor de fibras de 20 kg/m ³	130
Figura 76 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 1 e 2 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m ³	133

Figura 77 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 1 e 3 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m³..... 133

Figura 78 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 2 e 3 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m³..... 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Típicas das Fibras	17
Tabela 2 – Métodos utilizados para determinação da tenacidade.	39
Tabela 3 – Filtros gradiente.....	67
Tabela 4 – Controle de tolerância dimensional para fibras	77
Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo de granulometria média.....	77
Tabela 6 – Caracterização do agregado miúdo de granulometria fina	77
Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo (brita 0).....	78
Tabela 8 - Caracterização do agregado graúdo (brita 1)	78
Tabela 9 – Consumo de materiais para produção do compósito	79
Tabela 10 – Umidade para agregados miúdos.....	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 – Áreas obtidas para agregados presentes em seção transversal de corpo de prova, considerando duas diferentes formas de obtenção da área.	104
Tabela 12 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 20 kg/m ³ ..	107
Tabela 13 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes.	109
Tabela 14 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 30 kg/m ³ ..	110
Tabela 15 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 40 kg/m ³ ..	112
Tabela 16 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 20 kg/m ³	115
Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 20kg/m ³ , utilizando PDI.	116
Tabela 18 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m ³	118

Tabela 19 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 30kg/m ³ , utilizando PDI.	120
Tabela 20 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m ³	121
Tabela 21 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 40kg/m ³ , utilizando PDI.	123
Tabela 22 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação para volume de fibras verificado para desmoldagem e estimativa pelo PDI.....	125
Tabela 23 – Volume de fibras estimada pelo PDI considerando áreas das seções isoladas e área média das três seções, para teor de fibras de 20 kg/m ³	128
Tabela 24 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando área das seções isoladas (teor de fibras 20kg/m ³).	129
Tabela 25 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 20 kg/m ³	131
Tabela 26 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais(teor de fibras 20kg/m ³).	132
Tabela 27 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 30 kg/m ³	134
Tabela 28 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais (teor de fibras 30kg/m ³).	135
Tabela 29 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 40 kg/m ³	136
Tabela 30 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais (teor de fibras 40kg/m ³).	137
Tabela 31 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 20 kg/m ³	168

Tabela 32 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m ³	
.....	170

Tabela 33 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m ³	
.....	172

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 FIBRAS	15
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	15
2.1.1 Fibras de aço como reforço para concretos	18
2.1.2 Interação fibra-matriz	21
2.1.3 Influência do teor, geometria e orientação das fibras no comportamento de compósitos.	24
2.1.4 Características mecânicas do concreto reforçado com fibras.....	34
2.1.4.1 Resistência à compressão	34
2.1.4.2 Resistência à tração.....	36
2.1.4.3 Tenacidade	38
2.1.5 Controle de qualidade para CRF	41
3 ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS	43
3.1 INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	43
3.2 TRANSFORMAÇÕES DE INTENSIDADE E FILTROS ESPACIAIS.....	52
3.2.1 Histograma de imagens	54
3.2.2 Processo de segmentação: Limiarização	56
3.3.3 Filtragem de imagens: filtros passa-baixa e passa-alta.....	60

3.3 APLICAÇÕES DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NA ENGENHARIA CIVIL	69
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS.....	73
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	75
4.2 DOSAGEM, PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	78
4.3 VERIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE FIBRAS PRESENTES NOS CORPOS DE PROVA.....	82
4.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	84
4.5 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DIGITAIS.....	86
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	106
5.1 VOLUME DE FIBRAS OBTIDO NA DESMOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA	107
5.2 VOLUME DE FIBRAS OBTIDO UTILIZANDO O PDI.....	114
5.2.1 Volume de fibras para teor de 20 kg/m ³ utilizando PDI.....	114
5.2.2 Volume de fibras para teor de 30 kg/m ³ utilizando PDI.....	118
5.2.3 Volume de fibras para teor de 40 kg/m ³ utilizando PDI.....	121
5.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA VOLUME DE FIBRAS PELA DESMOLDAGEM E PDI	125
5.2.1 Verificação de volumes estimados utilizando uma imagem de seção transversal para cada corpo de prova.....	127
5.2.1 Verificação de volumes estimados utilizando duas imagens de seção transversal para cada corpo de prova.....	130
6 CONCLUSÕES.....	138
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	139
REFERÊNCIAS	140

APÊNDICE A – CRITÉRIO DE CHAUVENET PARA REJEIÇÃO DE VALORES MEDIDOS	149
APÊNDICE B – VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS COM PDI	168
APÊNDICE C – TESTE-T	174
APÊNDICE D – CÓDIGO MATLAB	186

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material compósito que inclui em sua composição fibras descontínuas distribuídas aleatoriamente na matriz, podendo ser utilizadas para melhoria do comportamento tanto no Estado Limite Último (ELU), atuando em conjunto com a armadura passiva ou ativa no concreto, quanto no Estado Limite de Serviço (ELS), restringindo a abertura e propagação de fissuras, melhorando assim a durabilidade e o desempenho de estruturas em serviço (IBRACON/ABECE, 2016).

Os principais tipos de fibras empregados em reforços de matrizes cimentícias são as de aço, vidro, acrílico, PVA, carbono ou basalto (ACI 544.1R, 2002, MEHTA; MONTEIRO, 2014; IBRACON/ABECE, 2016), apresentando comportamento diferente para as diversas propriedades do compósito a depender do tipo de fibra utilizada. Variações do comportamento quanto à resistência à tração, resistência à compressão, tenacidade (ARAUJO, 2002; GARCEZ, 2005; OLIVEIRA JUNIOR, 2012; ARIF, 2014, ALVES, 2017; VITOR, 2017), e trabalhabilidade (YAZICI *et. al*, 2007; SHIMOSAKA, 2016) tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos.

No Brasil, a ABNT NBR 15530:2007, intitulada “Fibras de aço para concreto – Especificação” define as exigências para adição de fibras de aço como reforço do concreto. Essa mesma norma determina a resistência do aço que deu origem a fibra e sua forma básica como fatores reguladores no desempenho de compósitos com fibras de aço. Também apresenta parâmetros de classificação para fibras de aço de baixo teor de carbono e define limites para tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento. Mais recentemente a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria

Estrutural, no documento de “Prática recomendada IBRACON/ACEBE: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras” (2016), estabeleceu as diretrizes com requisitos para projetos de Estruturas de Concreto Reforçados com Fibras em conjunto com o concreto com armadura passiva ou com armadura ativa.

Os requisitos para o fator de forma mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 15530:2007 inclui variações máximas para comprimento e diâmetro equivalente da fibra, a fim de garantir que o fator de forma da fibra não sofra grandes variações e não prejudiquem o comportamento do concreto reforçado com fibra de aço quanto à resistência pós-fissuração. Associado ao fator de forma surge a preocupação de constatação de que a quantidade de fibras presentes no concreto atende as especificações de projeto, partindo da hipótese que diferentes quantidades de fibras por volume de concreto (kg/m^3) podem provocar variações significativas nas propriedades dos materiais. Estudos apontam que, com volumes de fibras variando de 0,5% a 2% pode ser verificado desde pequenos ganhos de resistência à compressão (MOHAMMADI *et. al* ,2008; ARIF, 2014) até pequenas reduções para resistência com o aumento do teor de fibras (OLIVEIRA JUNIOR; 2012; VITOR, 2017). A literatura também aponta variações no desempenho quanto à resistência à tração e tenacidade em função do teor de fibras utilizados na mistura, apresentando melhoria para essas propriedades a medida que é aumentado o teor de fibras incorporadas à mistura do concreto.

Enquanto controle tecnológico, a verificação da homogeneidade na distribuição das fibras em uma peça de concreto é importante, tendo em vista que a análise da homogeneidade poderá determinar se existe garantia da mudança das propriedades do concreto ao longo de toda peça ou se a variação da homogeneidade para distribuição das fibras pode alterar de forma significativa as propriedades do concreto em diferentes pontos de uma peça concretada.

Diante da dificuldade em se avaliar a quantidade de fibras presentes em concretos, a adoção de técnicas que facilitem a determinação de tal parâmetro surge como uma ferramenta eficaz para o controle de qualidade do material a ser utilizado nas estruturas. A criação de uma ferramenta capaz de processar imagens de seções transversais, identificar e determinar a quantidade de fibras presentes em corpos de prova de concreto auxiliaria tanto para verificar se o teor de fibras por m^3 de concreto exigido em projeto foi garantida quanto para o controle de propriedades pós-endurecimento em compósitos reforçados com fibras de aço, partido da

ideia que a extração de testemunhos em diferentes pontos de uma peça concretada permitiria verificar o teor de fibras ao longo da peça.

Nesse sentido, a análise dos corpos de prova utilizando o processamento digital de imagens (PDI) se tornarem um fator importante, diante da possibilidade do avanço nos estudos das características e propriedades de concretos reforçados com fibras de aço, considerando a evolução quanto à qualidade e resoluções de fotos obtidas por meio de câmeras que capturam imagens digitais.

A técnica da análise de imagem na determinação de informações que anteriormente eram feitas de formas pouco simplificadas já é utilizada em vários trabalhos na Engenharia Civil (BARKSDALE *et al.* 1991; YU *et. al.*, 2006; LEE *et. al.*, 2011; NABAWY, 2013 e outros), partindo do pressuposto da adversidade de se medir diretamente dimensões e detalhes quando comparados com a possibilidade de segmentação de objetos em imagens por meio do PDI.

A utilização do PDI para identificação e segmentação de objetos em uma imagem apresenta a maior dificuldade do processamento em geral, isso devido às diversas condições de exposição que a imagem está sujeita, podendo apresentar ruídos que dificultam esse processo de divisão da imagem em múltiplas regiões. O limiar de corte (*threshold*), que representa o um valor que divide a intensidade dos *pixels* em *pixel* pertencentes ao fundo e *pixel* pertencente a um objeto, pode ser dado por critérios subjetivos ou determinação automática. Critérios foram estabelecidos para determinação do limiar ótimo na segmentação de imagens (OTSU, 1979; PUN, 1980; JOHANNSEN; BILLE, 1982; KAPUR *et. AL.*, 1985), sendo a precisão para cada método função da qualidade da imagem a ser processada.

Especificamente, uma vez que ainda não existe metodologia para a realização dos ensaios de avaliação de quantidade de fibras associadas ao concreto, o presente trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta que utiliza o PDI para estimativa da quantidade de fibras presentes em corpos de prova de concreto cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura), a partir do processamento de imagens das seções transversais dos corpos de prova, criando assim parâmetros para o controle de qualidade de estruturas de concreto reforçada com fibras de aço.

Essa dissertação se agrupa a um conjunto de trabalhos que vem sendo estudado na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia sobre concretos reforçados com

fibras de aço, junto aos trabalhos de Arif (2014) na avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras, Vitor (2017) que estudou a resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço, Alves (2017) na avaliação do efeito de punção em lajes lisas de concreto com fibras com variação do índice de retangularidade, e Pereira (2017) na avaliação da eficiência do ensaio Barcelona simplificado para determinação da tenacidade em concreto reforçado com fibras.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Utilizar o processamento digital de imagens para estimar a quantidade de fibras presentes em corpos de prova de concreto cilíndricos, com dimensões de 100 mm x 200 mm, reforçados com fibras de aço.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) verificar a quantidade de fibras em corpos de prova com três diferentes teores de fibra incorporados a mistura, a partir da separação das mesmas em corpos de prova no estado fresco.
- b) criar rotina em ambiente MatLAB que seja capaz de identificar e determinar a quantidade de fibras presentes em corpos de prova a partir do processamento digital de imagens de seções transversais em compósitos com fibras de aço;
- c) comparar a quantidade de fibras estimada para corpos de prova pela avaliação de imagens digitais com as quantidades obtidas na contagem de fibras pela desmoldagem de corpos de prova no estado fresco.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 trata das considerações iniciais sobre o tema, objetivos gerais, específicos e justificativas para o estudo em questão.

O Capítulo 2 apresenta revisão da literatura sobre fibras e aborda o conceito para materiais compósitos, suas classificações, as principais características do concreto reforçado com fibras de aço, a influência no comportamento de compósitos quanto resistência à tração, resistência à compressão, tenacidade e trabalhabilidade, em função da variação do teor de fibras incorporadas ao concreto.

O Capítulo 3 trata da revisão sobre análise de imagens digitais, apresentando as principais informações sobre fundamentos da imagem digital, transformações de intensidade, filtros espaciais, realce e suavização de imagens.

O Capítulo 4 descreve o planejamento experimental, incluindo materiais e métodos utilizados para execução das dosagens, caracterização dos materiais, moldagem dos corpos de prova, configurações experimentais para obtenção de imagens e etapas para o processamento de imagens digitais.

O Capítulo 5 apresenta os resultados para os ensaios realizados, análise e comparação dos valores obtidos para quantidade de fibras presentes nos corpos de prova.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais sobre o estudo desenvolvido, evidenciando os resultados obtidos e propondo diretrizes para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FIBRAS

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Compósitos são materiais constituídos pela junção de dois ou mais componentes de propriedades individuais distintas, resultando em um material formado por uma matriz, de fase contínua e menos resistente e um reforço, de fase descontínua e mais resistente, que apresenta propriedades não alcançadas pelos materiais constituintes separadamente (CAVALCANTI, 2006; ASTM D3878, 2007; SILVA, 2014; VASILIEV, 2017).

O desempenho apresentado pelos compósitos depende da característica dos materiais que lhe deram origem, assim, diferentes matrizes e reforços podem ser combinados para produzir materiais com novas características que compensam limitações apresentadas por matrizes frágeis (VASILIEV, 2017).

O concreto, enquanto compósito, apresenta uma microestrutura heterogênea e tem propriedades controladas por sua divisão em três fases: pasta de cimento, agregados e zona de transição, com cada uma destas fases apresentando características multifásicas que influenciam na matriz cimentícia quanto à estabilidade dimensional, resistência e durabilidade. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

O comportamento das fases pasta e agregado apresentam desempenhos diferentes para caracterização, sendo que a composição entre as fases não resulta em um material com comportamento correspondente a superposição das características isoladas das mesmas. A

obtenção de concretos com elevadas resistências é dada com o aumento da resistência da interface pasta-agregado, sendo este o maior ponto fraco do concreto, por apresentar menor resistência que as demais fases. (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

O comportamento limitado quanto resistência à tração em concretos, dada pela necessidade de pouca energia para causar propagação das microfissuras presentes na zona de transição entre os agregados graúdos e a matriz, pode ser melhorado com a adição de fibras como reforço para o concreto, que atuarão, principalmente, no controle da propagação de fissuras, quando o material é submetido a esforços de tração ou flexão.

As fibras são elementos descontínuos com comprimento bem maior que o diâmetro da seção transversal, podendo este variar em função do tipo de fibra empregada na mistura. As fibras utilizadas como reforço para concretos são denominadas macrofibras quando possuem comprimento maior que duas vezes o tamanho máximo do agregado e microfibras quando seu comprimento é menor que o diâmetro máximo dos agregados e possuem diâmetro é da ordem dos grãos de cimento

As fibras mais empregadas para reforço de matrizes cimentícia são as de vidro, aço, plástico, materiais naturais e sintéticas. (ACI 544.1R, 2002, MEHTA; MONTEIRO, 2014). As propriedades dos CRF dependem do tipo e das propriedades das fibras utilizadas na mistura, apresentando comportamentos diferentes para compósitos com diferentes tipos de fibras utilizadas.

Em relação à variação no desempenho para CRF de diferentes tipos, Salvador e Figueiredo (2013) observaram as diferenças no comportamento mecânico para concretos reforçados com macrofibra polimérica e fibras de aço. As porcentagens utilizadas para macrofibra polimérica utilizadas foram 0,22, 0,33, 0,50, 0,66, 0,82 e 1,0% em volume e de fibras de aço 0,19, 0,32 e 0,45% em volume para uma matriz de concreto com resistência média à compressão de 35 MPa. Como conclusão ele constatou maiores resistências residuais para concretos com fibras de aço, devido à sua maior rigidez, porém com resultados equivalentes para macrofibra polimérica para teores com equivalência de desempenho em estudo de dosagem.

A escolha do tipo de fibra a ser utilizada como reforço a matriz de concreto pode ser a partir de suas propriedades mecânicas. A tabela 1 apresenta propriedades típicas para diversos tipos de fibras.

Tabela 1 - Propriedades Típicas das Fibras

Fibra	Diâmetro (μm)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Força de Tensão (GPa)	Alongamento até Ruptura (%)
Aço	5,0 – 500,0	200,0	0,5 - 2,0	0,5 - 3,5
Vidro	9,0 – 15,0	70,0 – 80,0	2,0 – 4,0	2,0 - 3,5
Amianto	Crocidolite	0,02 - 0,40	196,0	3,5
	Chrysolite	0,02 - 0,40	164,0	3,1
Prolipropileno	20,0 – 400,0	3,5 – 10,0	0,45 - 0,76	15,0 - 25,0
Aramida (Kevlar)	10,0 – 12,0	63,0 – 120,0	2,3 - 3,5	2,0 - 4,5
Carbono (força elevada)	8,0 – 9,0	230,0 – 380,0	2,5 - 4,0	0,5 - 1,5
Nylon	23,0 – 400,0	4,1 - 5,2	0,75 - 1,0	16,0 - 20,0
Celulose	-	10,0	0,3 - 0,5	-
Acrílico	18,0	14,0 - 19,5	0,4 - 1,0	3,0
Polietileno	25,0 - 1.000,0	5,0	0,08 - 0,6	3,0 – 100,0
Madeira	-	71,0	0,9	-
Sisal	10,0 – 50,0	-	0,8	3,0
Matriz de Cimento (para comparação)	-	10,0 – 45,0	0,003 - 0,007	0,02

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007)

A empregabilidade de fibras como reforços de materiais é observada desde tempos antigos sendo, provavelmente, o relato mais remoto encontrado na bíblia em Êxodo 5, 6-7, onde é feita a menção de fabricação de tijolos de argila reforçados com palha para utilização em construções do Antigo Egito. Ainda pode-se citar a utilização de tijolos cozidos no sol, reforçados com palha na construção da colina elevada a 57 m de altura de Aqar Quf, próximo a Bagdá, datada, aproximadamente, de 3.500 anos.

Hoje as fibras são incorporadas uma grande quantidade de materiais de engenharia com o objetivo de melhorar as propriedades dos compósitos. São várias as propriedades que podem

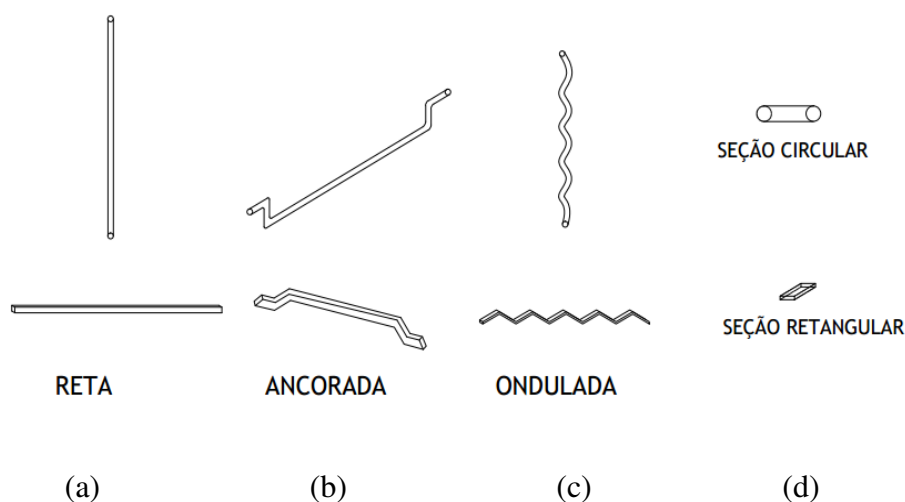
ser melhoradas com a utilização de fibras em materiais compósitos, como a resistência à tração, o módulo de elasticidade, a resistência à fissuração, a durabilidade, a resistência à fadiga, características térmicas, expansão, resistência ao fogo, resistência à impacto e resistência à abrasão ACI 544.1R:2002.

2.1.1 Fibras de aço como reforço para concretos

As fibras de aço são produzidas a partir da trefilação de fios de aço, podendo ser cortados de diversos tamanhos e diâmetros. O processo de fabricação pode produzir diversos tipos de geometria para as fibras, com extremidades dobradas ou alargadas, por exemplo. Os requisitos de fator de forma mínimos para as fibras de aço para concreto, critérios para aceitabilidade no percentual de variação permitida para os comprimentos e diâmetros das fibras são especificados na ABNT NBR 15530:2007.

São diversas as formas de fibras que podem ser utilizadas no concreto, podendo estas ser onduladas, frisadas, ou arredondadas nas extremidades. As fibras de aço para reforço de concretos apresentam razão entre o comprimento e o diâmetro que varia de 20 a 100, sendo suficientemente pequenas para dispersar aleatoriamente em uma mistura fresca de concreto ACI 544.1R (2002). A Figura 1 apresenta os tipos de fibras de aço mais utilizadas e seções mais comuns.

Figura 1 – Tipos de fibras e seções mais utilizadas



(a) fibra reta (b) fibra ancorada (c) fibra ondulada e (d) tipos de seções. Fonte: Adaptado de Naaman, (2003)

A ABNT NBR 15530:2007 estabelece requisitos de formas geométricas, tolerâncias para defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento, além de apresentar parâmetros de classificação para fibras de aço de baixo teor de carbono. As classificações das fibras são dadas em três tipos básicos, sendo:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragens nas extremidades;
- Tipo B: fibra de aço corrugada;
- Tipo R: fibra de aço reta.

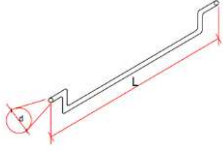
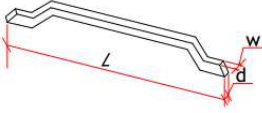
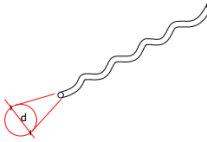
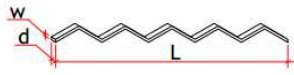
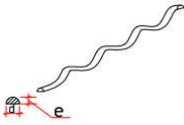


Os tipos de fibras se dividem em três classes distintas, sendo:

- Classe I: fibra proveniente de arame trefilado a frio;
- Classe II: fibra proveniente de chapa laminada cortada a frio;
- Classe III: fibra proveniente de arame trefilado e escarificado.

A geometria, segundo Figueiredo *et. al* (2008), é um dos principais fatores que definem o desempenho do material, sendo representada pelo fator de forma ou relação de aspecto (λ), dado pela relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra. O Quadro 1 apresenta as configurações de geometria para os diversos tipos de classes de fibras previstos na ABNT NBR 15530:2007.

A ABNT NBR 15530: 2007 especifica como 40 o fator de forma mínimo para fibras de aço Classe A do tipo I. O fator de forma máximo para compósitos com fibras de aço para fins estruturais, de acordo com ACI 318 (2014), é igual a 100.

Quadro 1 - Classificação de fibras quanto à geometria e classe da fibra

Tipo (Geometria)	Classe da Fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

d = largura ou diâmetro da fibra, a depender da seção transversal; e = espessura da fibra, w= altura da fibra retangular, L= comprimento da fibra.

Fonte: Adaptado de Figueiredo *et. al* (2008)

Figueiredo *et. al* (2008) destaca que apesar de não tipificar as fibras devido os respectivos desempenhos quanto a trabalhabilidade ou tenacidade, essa classificação permite definir requisitos mínimos que poderão ser relacionados com o desempenho final do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA).

Com relação a concentração de fibras aço empregadas como reforço para concreto, comumente utiliza-se a relação de fibras por volume de concreto reforçado (kg/m^3), com teores de fibras de aço empregados variando conforme a necessidade de alteração das propriedades do compósito. Essa variação de comportamento para as diversas propriedades do CRFA tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos (GARCEZ, 2005; OLIVEIRA JUNIOR, 2012; ARIF, 2014, ALVES, 2017; VITOR, 2017 e outros).

A literatura aponta que as fibras de aço podem ser utilizadas como reforço a tração em concretos devido suas propriedades mecânicas, tendo como seu principal efeito a mudança do modo de ruptura do material. Isso acontece porque as fibras costuram as fissuras que surgem com o aumento dos esforços, conferindo ao compósito uma resposta mais dúctil para o regime pós-pico de carregamento (PASA, 2007; NAAMAN; REINHARDT, 2006; BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

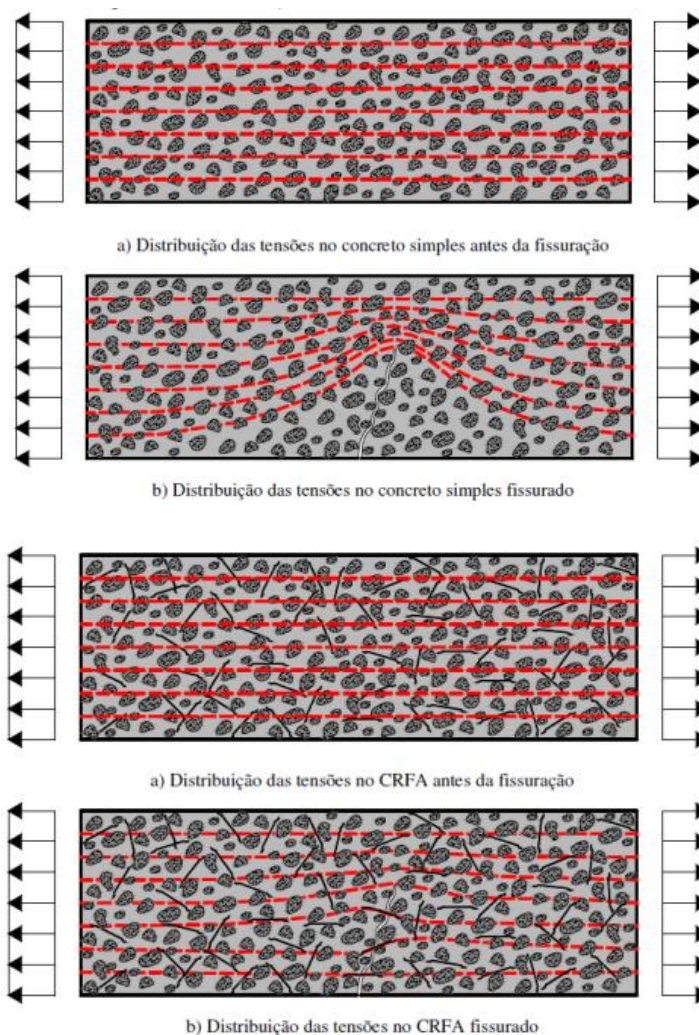
Bentur e Mindess (2007) destacam o papel determinante das estruturas dos compósitos nas propriedades de materiais cimentícios reforçados com fibras, e exaltam a necessidade da análise da estrutura interna dos compósitos, levando em consideração três componentes: a matriz cimentícia; a forma de distribuição das fibras e a estrutura da interface fibra-matriz.

2.1.2 Interação fibra-matriz

O concreto quando susceptível a fissurações trabalha promovendo uma barreira à propagação de tensões. A partir do momento em que as tensões superam a resistência da matriz do concreto ocorre a ruptura abrupta do material, situação análoga a ruptura por fadiga, no qual cada ciclo provoca pequena propagação de microfissuras que, com a concentração de tensões nas extremidades pode provocar o rompimento do material. As fibras de aço incorporadas ao concreto, por possuírem elevado módulo de elasticidade, dificultam a propagação de fissuras, promovendo assim uma redistribuição dos esforços (FIGUEIREDO, 2000).

A Figura 2 apresenta esquematicamente as a propagação de tensões no concreto com concentração de esforços nas extremidades de fissuras para o concreto com e sem reforço de fibras

Figura 2 – Concentração de tensões no concreto com e sem reforço de fibras.



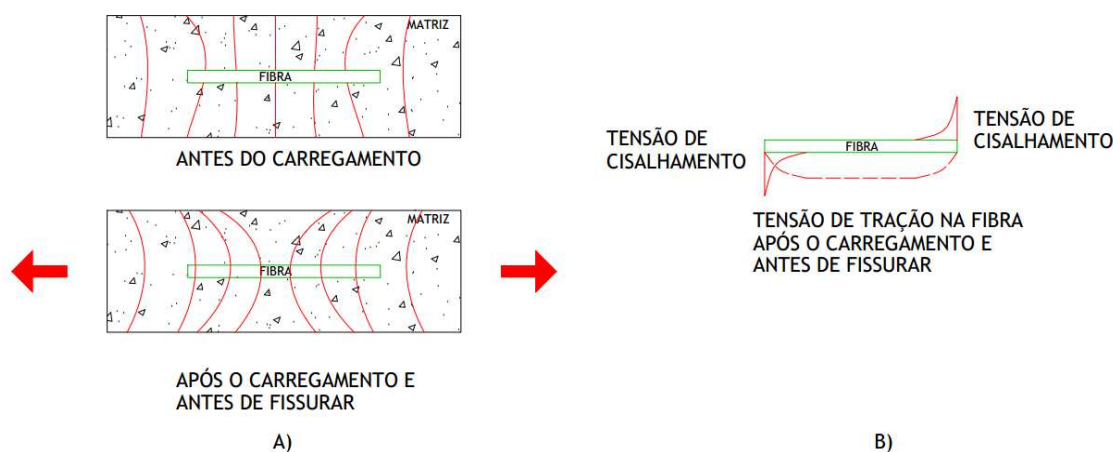
Fonte: Figueiredo (2010) adaptado por Moraes Neto (2014)

O comportamento da interação fibra-matriz para CRFA é dado pelo processo de transferência da força da matriz para as fibras presentes no concreto, sendo caracterizada em dois estágios diferentes: pré e pós fissuração. O comportamento pré-fissuração é dado pela transferência de tensões entre a matriz e a fibra por aderência, com o surgimento de tensões tangenciais ao longo da superfície de contato entre a fibra e a matriz, causada pela diferença de rigidez entre as ambos. (GARCEZ, 2005).

Quando a tensão que garante aderência entre a matriz e a fibra de reforço é superada pelas tensões de cisalhamento interfacial provocadas pelo carregamento, inicia-se o processo de desligamento da fibra da matriz, ocorrendo então a mudança no modo de transferência de tensões de aderência para tensão por atrito (BENTUR; MINDESS, 2007). A Figura 3 ilustra um esquema para as deformações em torno das fibras antes (Figura 3(a)) e após a aplicação

do carregamento, onde a tensão de cisalhamento na interface assume maior valor nas extremidades da fibra e assumindo valor nulo no centro e a distribuição de tensão de tração na fibra apresenta valor máximo no centro (Figura 3(b)).

Figura 3 – Esquema de tensões atuantes na fibra embutida na matriz antes e depois do carregamento

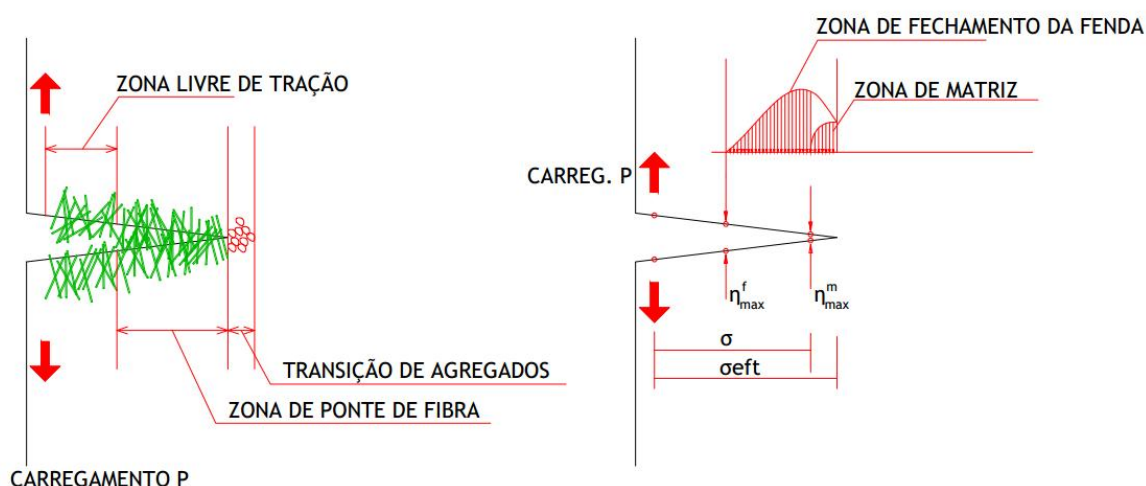


Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007)

No estágio de pós fissuração, ao se aumentar as tensões no concreto é provocado deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. Esse incremento de tensões provoca o aumento de fissuras ao ponto de ocorrer a separação da matriz em vários pontos (GARCEZ, 2005). As fibras então passam a exercer uma ponte de ligação nas fissuras, reduzindo a concentração de tensões nas extremidades. Essa redução na concentração de tensões, de acordo com Figueiredo (2011), diminui significativamente a velocidade de propagação de fissuras no compósito, ou seja, garantindo ductilidade a matriz pós fissuração e alterando o comportamento do material para pseudo-ductil ou não frágil.

Bentur e Mindess (2007) destacam que após a abertura das primeiras fissuras o padrão de fissuramento torna-se complexo, com o aparecimento de microfissuras descontínuas junto à abertura principal. As tensões são transferidas por meio das fissuras, sendo possível identificar três zonas distintas, sendo: zona de tração livre; zona de ponte de fibra, com tensões sendo transferidas pelas fibras e zona de matriz, onde é possível identificar microfissuras em que o bloqueio dos próprios agregados transfere as tensões na matriz. A Figura 4 mostra esquematicamente as três zonas citadas.

Figura 4 – Representação do avanço da fissura e o campo de tensões ao longo do comprimento



Fonte: Adaptado de Bentur e Mindess (2007)

Estudos indicam maior contribuição das fibras em CRFA para o estágio pós-fissuração (FIGUEIREDO *et. al*, 2000; VILLARES, 2001; SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013; SALVADOR, 2013; ARIF, 2014; BANTHIA *et. al*, 2014, VITOR, 2017), ou seja, quanto elas atuam prevenindo com que as aberturas de fissuras se propaguem na matriz frágil, resistindo a esforços solicitantes naquele ponto de abertura. No estágio pré-fissuração as fibras atuam na prevenção do aparecimento prematuro de microfissuras. É possível verificar que no estágio pré-fissuração a influência do teor de fibras na mistura praticamente não influencia na resistência do concreto, situação que segundo Garcez (2005) só apresentaria alterações significativas para altos teores de fibras incorporadas ao concreto.

2.1.3 Influência do teor, geometria e orientação das fibras no comportamento de compósitos.

Devido as fibras trabalharem como ponte de transferência de tensão no estágio pós fissuração, a eficiência quanto à capacidade de reforço provocada pela adição de fibras ao concreto está diretamente relacionada com o teor de fibras utilizadas, sendo este o principal parâmetro de avaliação do comportamento de compósitos (FIGUEIREDO, 2011).

O desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras quando sujeito a esforços de tração pode ser verificado a partir da curva tensão por deformação, podendo apresentar comportamento dado duas formas: *strain-softening* quando a matriz perde progressivamente

a capacidade resistente após o surgimento de fissuras; e *strain-hardening* quando o compósito aumenta a capacidade de resistir após o surgimento de fissuras, fenômeno associado ao surgimento de múltiplas fissuras até atingir a máxima tensão pós-fissuração (NAAMAN, 2003a).

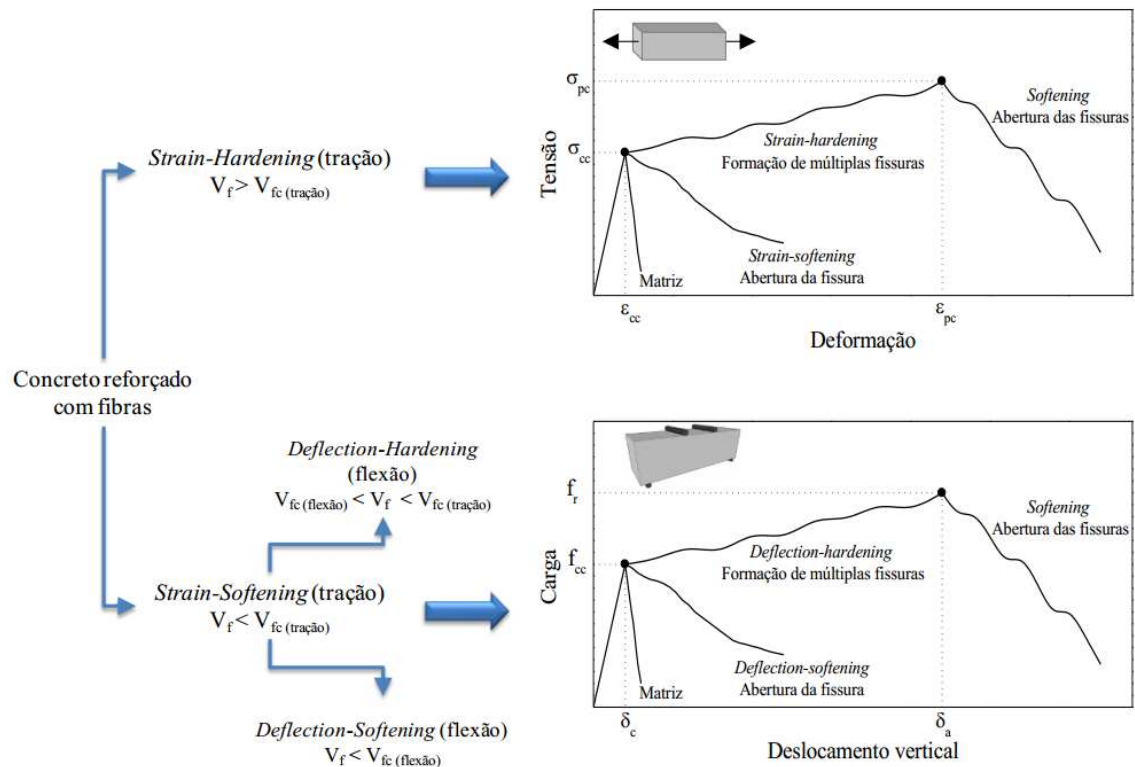
Os compósitos sujeitos a esforços de tração na flexão apresentam comportamento classificado como: *deflection-softening* para em situações que após a ruptura da matriz, a carga de pico do ensaio é superior a resistida pelo compósito. Tal processo é acompanhado da abertura de uma única fissura; e *deflection-hardening*, onde carga resistida pelo compósito após a ruptura da matriz é maior que a necessária para fissuramento da mesma, sendo acompanhado do surgimento de várias fissuras até o máximo valor de carga pós-fissuração (NAAMAN; REINHARDT, 2006).

A Figura 5 mostra as classificações para o comportamento de concretos reforçados com fibras, indicando os estágios de fissuração. No primeiro estágio, em que as tensões atuantes são menores que a tensão de fissuração da matriz (σ_{cc}) a matriz não se encontra fissurada. Para este estágio as fibras não influenciam o comportamento do compósito, já que a tensão necessária para fissuração da matriz não foi atingida, ou seja, o comportamento nesse estágio para o concreto simples e concretos reforçados com fibras de aço tendem a apresentar a mesma resposta.

Quando a tensão atuante supera a σ_{cc} , surgem as primeiras fissuras na matriz, a partir de então o comportamento do concreto reforçado pode se apresentar de duas formas: quando a resistência pós-fissuração é maior que a resistência ao surgimento da primeira fissura (*strain-hardening*), que conduz a formação de múltiplas fissuras; e quando a resistência pós-fissuração é menor que a σ_{cc} (*strain-softening*), situação onde a ruptura irá se desenvolver pela abertura de uma única macrofissura.

Para a situação em que ocorre surgimento de múltiplas fissuras, o processo de formação dessas fissuras é desenvolvido até que a força de atuação supere a resistência ao arrancamento das fibras que atuam como ponte de transferência dos esforços.

Figura 5 – Classificação do comportamento de concretos com adição de fibras



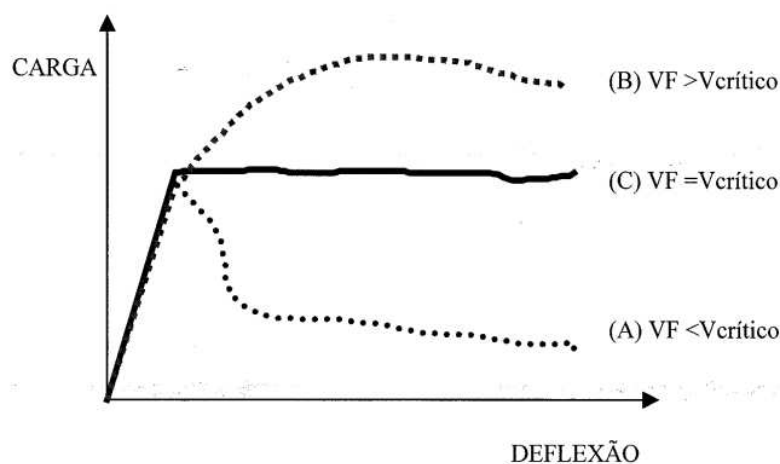
Fonte: di Prisco; Plizzari, Vandewalle (2009)

Esse comportamento para compósitos está relacionado ao V_f utilizado na mistura. Pastas de argamassa com teores de fibra entre 5 e 15% em volume são suficientes para garantirem a produção de compósitos com comportamento *strain-hardening* (SALVADOR, 2013). Para a produção de concretos o comportamento de compósitos depende principalmente do V_f utilizado, sendo o comportamento *hardening* obtido para concretos com V_f superior ao volume crítico (V_{fc}), já concretos dosados com o V_f inferior ao V_{fc} apresentam comportamento *softening* (NAAMAN, 2003b; BENTUR; MINDESS, 2007; DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE, 2009).

O volume crítico é dado pela quantidade de fibras suficientes para manter a mesma capacidade de resistência para um compósito, dada a ruptura da matriz, ou seja, para volumes de fibra maiores que o volume crítico, após o fissuramento os esforços antes suportados pela matriz agora serão transferidos pelas fibras de reforço. (HANNANT, 1978; FIGUEIREDO, 2000; FIGUEIREDO, 2011).

A Figura 6 ilustra o processo do comportamento de compósitos reforçados com fibras utilizando teores abaixo (a), acima (b) e igual ao volume crítico para ensaios de tração na flexão. Quando o V_f é menor que o volume crítico a quantidade de fibras se apresenta insuficiente para resistir aos esforços solicitados, ocorrendo o comportamento *softening* para o compósito e ruptura é dada pelo desenvolvimento de uma fissura única devido ao esgotamento da resistência das fibras. Quando o V_f é maior que o volume crítico a capacidade resistente do compósito é aumentada.

Figura 6 – Comportamento de compósito com teores diferentes de fibras



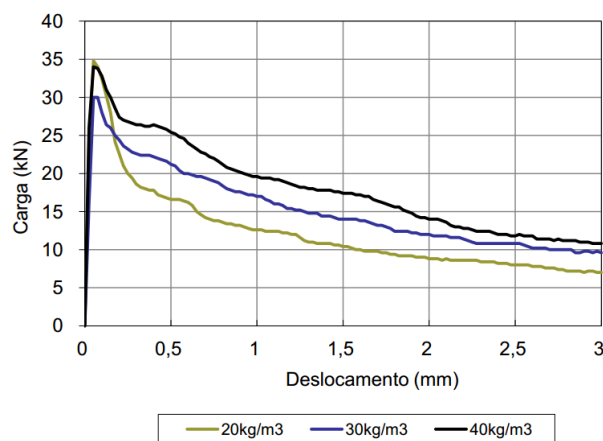
Fonte: Figueiredo (2000)

Arif (2014) em ensaios para verificação do ganho de tenacidade a flexão em CRFA com resistência característica de 30 MPa e 40 MPa e teores de fibras de aço de 30 kg/m³ e 60kg/m³, observou que para teor de fibra de 30 kg/m³ todas as curvas força x deslocamento estavam abaixo do V_{fc} , volume suficientes para manter a mesma capacidade de resistência para o compósito após ruptura da matriz, e 95,46%, para teor de fibra de 60 kg/m³, estavam acima do V_{fc} , indicando que o V_{fc} para o tipo de fibra utilizado estava entre 30 kg/m³ e 60 kg/m³.

De forma geral é observado que após o surgimento das primeiras fissuras, a carga necessária para provocar deslocamentos é maior para concretos que apresentam maiores teores de fibra, dada uma mesma carga de tração na flexão. A Figura 7 apresenta a curva de carga por

deslocamento em ensaio de tração na flexão, com deslocamento controlado utilizando diferentes consumos de fibra.

Figura 7 - Curva média de carga por deslocamento em ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo, Nunes & Tanesi (2000)

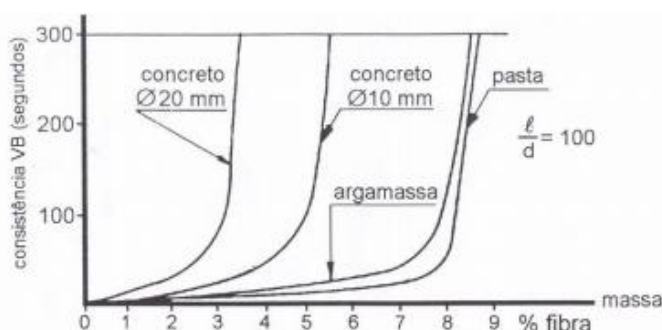
A utilização de altos V_f em CRFA alteram consistência da mistura provocando perda de trabalhabilidade para o compósito (BENTUR; MINDESS, 2007; GROSSI, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A perda de trabalhabilidade da mistura, segundo Figueiredo (2011), está associada a dois fatores: o aumento da área superficial a ser molhada, que sob mesmo teor de água, resulta em uma menor quantidade de água disponível na mistura; e a restrição da mobilidade aos agregados, dificultando a fluidez da mistura. Sob essas condições é recomendado o controle do teor de água ou a utilização de aditivos superplastificantes para adequada trabalhabilidade da mistura.

A trabalhabilidade da mistura também é influenciada pelo fator de forma, por este interferir na dispersão das fibras no concreto. Para o mesmo teor de fibras, as áreas superficiais aumentam quanto menor o diâmetro das mesmas. Em relação ao comprimento, quanto maior o comprimento das fibras, mais consistente se torna a mistura (CARVALHO, 2012). A ABNT NBR 15530:2007 prescreve fator de forma mínimo de 40 para fibra de aço tipo A de classe I.

Yazici *et. al* (2007) verificaram a consistência utilizando ensaio de abatimento do tronco de cone para CRFA com fatores de forma de 45, 65 e 80 e percentuais de fibras de 0,5%, 1,0% e 1,5%. Os resultados apontaram relevante perda de trabalhabilidade para concretos com

fator de forma de 80 e V_f de 1,0% e 1,5%. Foram realizados testes que apontaram pouco efeito do fator de forma em relação a ganhos de resistência à compressão e tração na flexão. A redução da trabalhabilidade em CRFA também é verificada com o aumento da dimensão característica do agregado graúdo. A Figura 8 mostra redução para a consistência da mistura pelo ensaio Vebe para concreto com agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm quando comparado com concreto com agregado de diâmetro máximo de 10 mm, utilizando fator de forma de 100 para fibra incorporada a mistura.

Figura 8 – Influência da dimensão característica máxima do agregado na consistência de CRFA



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

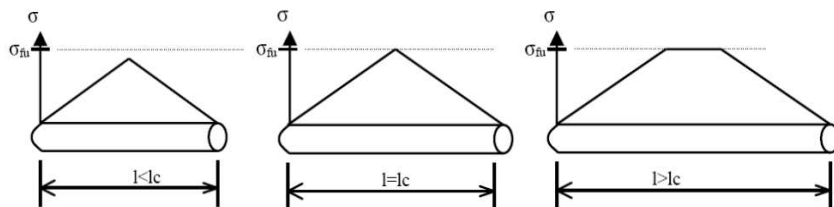
Araújo (2002) comenta que como alternativa usual para melhoria da trabalhabilidade em concretos com fibras é possível utilizar aditivos superplastificante, substituir parte do cimento por pozolanas e aumentar relação água/cimento, porém para esta alternativa, acima de determinado valor torna-se ineficiente a melhoria na trabalhabilidade.

A literatura aponta relação entre o comprimento de fibras utilizadas na avaliação das propriedades mecânicas de compósitos. Para que o reforço seja garantido não apenas a argamassa presente na matriz é necessário que o comprimento das fibras esteja compatibilizado com a dimensão dos agregados, sendo recomendado que o comprimento das fibras seja maior ou igual a duas vezes a dimensão máxima do agregado (FIGUEIREDO, 2011).

O comprimento crítico para fibras refere-se ao comprimento mínimo que fornece resistência igual a carga de ruptura da fibra, ou seja, é o comprimento para garantia da ancoragem da fibra na matriz, de modo que elas escoem antes que sejam arrancadas da matriz, atingindo seu máximo potencial (VILLARES, 2001; BENTUR; MINDESS, 2007; CARVALHO,

2012). A Figura 9 representa a distribuição de tensões em uma fibra para variação do comprimento em relação ao comprimento crítico.

Figura 9 – Distribuições possíveis de tensão de acordo com o comprimento da fibra



Fonte: Figueiredo (2000)

Quando o comprimento da fibra é menor que o comprimento definido como crítico (l_c), o esforço de arrancamento não produz uma tensão superior àquela que as fibras resistem (σ_u para a situação de $l < l_c$). Para esta situação, com a abertura de fissuras, a fibra que atua como ponte de transferência será arrancada do lado de menor ancoragem. Para a situação em que o comprimento das fibras é superior ao comprimento crítico ($l > l_c$) o potencial de reforço é aumentado devido a tendência das fibras atingirem sua máxima resistência à tração, ou seja, a tensão de arrancamento supera a resistência à tração da fibra.

Para uma maior eficiência quanto à resistência do compósito as fibras devem ter comprimentos superiores ao comprimento crítico (VILLARES; 2001), porém, segundo Carvalho (2012), a utilização de elevados comprimentos de fibras na busca de maiores capacidades resistentes para compósitos pode conduzir a inconvenientes como a redução da trabalhabilidade, causada devido ao aumento da área superficial da fibra.

Devido ao comportamento do concreto ser influenciado tanto pelo comprimento da fibra quanto pelo diâmetro, o fator de forma (l/d) foi definido como parâmetro de referência para fibras, sendo que quanto maior o fator de forma melhor a capacidade resistente pós fissuração do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Garcez (2005) avaliou a influência do comprimento de fibras no comportamento dos compósitos à compressão, à tração por compressão diametral e na energia necessária para o surgimento da primeira fissura, utilizando fibras de 30 mm e 50 mm de comprimento. Com relação ao comportamento à compressão, os resultados apontaram acréscimos nos valores obtidos da ordem de 10% com o aumento do comprimento das fibras. Para avaliação da resistência à tração não houve variações significativas nos resultados com o aumento do

comprimento para fibras, mesma situação observada para avaliação da energia necessária para o surgimento da primeira fissura.

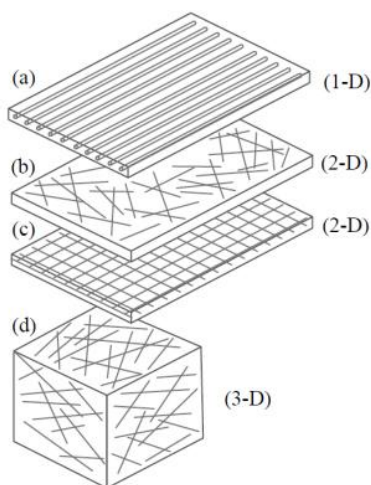
Sovják *et. al* (2017) verificaram o comportamento para energia de fratura em concretos utilizando fibras com teor de 2% em volume para diferentes fatores de forma (50, 59, 72 e 108). Os resultados experimentais apontaram aumento linear para energia de fratura dado com o aumento do fator de forma das fibras.

O incremento na capacidade de suporte de compósitos reforçados com fibras também está relacionado com a inclinação que as mesmas apresentam em relação ao esforço imposto. A uniformidade de fibras no concreto está relacionada com a forma como elas se distribuem no composto, sendo essa forma de dispersão sensível ao processo de mistura (BENTUR E MINDESS, 2007). Machado *et. al* (2015) constataram aleatoriedade para a distribuição de fibras para concretos produzidos em misturadores de eixo vertical planetário utilizando microtomografia de raios X.

Um dos problemas que pode ser gerado pela inadequada mistura do CRFA é a formação de ouriços, que são desenvolvidos pela aglomeração de fibras, produzindo um ponto fraco no compósito devido à alta porosidade no ponto de alojamento do ouriço, e uma redução para homogeneidade de distribuição das fibras (FIGUEIREDO, 2011). De acordo com o ACI 544.3R (2008), outros fatores que podem conduzir a tendência de formação de ouriços são a utilização de elevadas dimensões para agregados e a forma de adição das fibras na betoneira.

As orientações das fibras podem ser alinhadas ou distribuídas aleatoriamente na mistura. A Figura 10 mostra a classificação para fibras quanto sua forma de dispersão matriz como 1D (a), 2D (b) e 3D (c). Condições como energia de compactação, tipo de fibra e trabalhabilidade da mistura interferem na forma de distribuição das fibras na matriz. Segundo Garcez (2005), em algumas situações é possível utilizar técnicas para favorecer a orientação das fibras, visando a busca de condições de melhor desempenho para o reforço.

Figura 10 – Classificação das fibras quanto à direção.



Fonte: Bentur e Mindess (2007)

Os compósitos com fibras apresentam caráter anisotrópico, sendo o sentido das orientações das fibras altamente influente nas propriedades mecânicas e reológicas do compósito. As fibras geralmente se apresentam de forma dispersa em um compósito, porém estas podem apresentar orientações preferencialmente em uma direção em função do processo de mistura e adensamento (FÉLIX, 2002; BERNARDI, 2003).

CRFA adensados com mesa vibratória tentem a provocar um alinhamento das fibras no plano horizontal, já a vibração interna da mistura causa menos influência na orientação das fibras (BENTUR; MINDESS, 2007). Esse alinhamento, segundo Oliveira Júnior (2012), pode ser evitado quando é utilizado fibras com comprimentos de duas a três vezes menores que a menor dimensão do corpo de prova.

Estudos utilizando medidas diretas e indiretas (ROBINS *et. al*, 2003, DUPONT; VANDERWALLE, 2005; GETTU *et. al*, 2005, ABRISHAMBAF *et. al*, 2013) em ensaios destrutivos e não destrutivos (EDGINGTON; HANNANT, 1978; TORRENTS *et. al*, 2012) tem sido feito com o objetivo de identificar a orientação de fibras no concreto. O melhor desempenho para as fibras se dá quando a direção do esforço se apresenta alinhado com a posição da fibra e a o pior desempenho quando a fibra está posicionada perpendicularmente à tensão (BENTUR; MINDESS, 2007; CARVALHO, 2012).

Trabalhos de Willie *et. al*. (2013), que verificou o efeito da orientação e distribuição no comportamento de vigas com CRFA sujeitas à tração na flexão para teores de fibra que variavam de 1,0% a 4,85% em volume, e Pujadas *et. al* (2014), na análise do comportamento

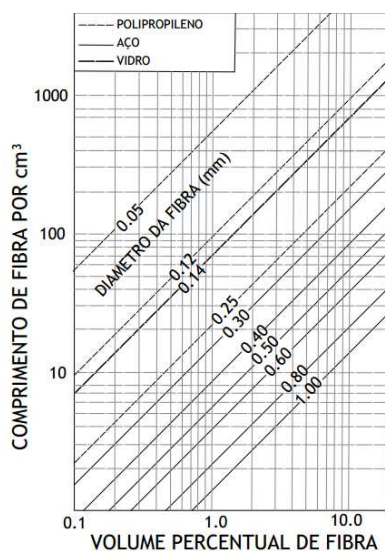
de corpos de prova cúbicos por meio de aplicação de tensões multidirecionais (teste MDPT), constataram variações para o desempenho em CRFA em função da orientação das fibras.

Bentur e Mindess (2007) ressaltam que o espaçamento entre as fibras é um parâmetro geométrico importante no controle do desempenho de compósitos. Assumindo que as fibras se distribuem uniformemente e considerando conceitos estatísticos, o espaçamento entre fibras cilíndricas pode ser calculado conforme a Equação 1:

$$S = \frac{K \times d}{V_f^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo S o espaçamento entre fibras; K , uma constante que varia de 0,8 a 1,12 dependendo da orientação (1D, 2D ou 3D) e suposições de cálculo; d , o diâmetro da fibra; V_f o volume de fibra contido. A partir do gráfico da Figura 11 é possível determinar a quantidade de fibras por unidade de volume, ou área superficial de fibras em relação ao volume de concreto reforçado com fibras, em função do diâmetro das fibras. Ao entrar com o V_f na abscissa, determina-se o número de fibras (ou área de superfície) por unidade de volume.

Figura 11 – Número de fibras por unidade de volume, ou área de fibra por unidade de volume, em função do volume percentual de fibras e da geometria da fibra



Fonte: Bentur e Mindess (2007)

2.1.4 Características mecânicas do concreto reforçado com fibras

A eficácia na melhoria da resistência em concretos com reforço de fibras de aço varia entre as diversas características mecânicas do concreto, sendo os constituintes da matriz, as características geométricas, as propriedades mecânicas das fibras, a composição e o processo de fabricação dos compósitos determinantes para o comportamento dos materiais compósitos (BARROS, 1996b, BENTUR; MINDESS, 2007).

Pasa (2007) afirma que as fibras ressaltam as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas de compósitos, resultando em um compósito com propriedades superiores aos dos materiais constituintes.

Algumas das características mecânicas de concretos reforçados com fibras serão descritas a seguir.

2.1.4.1 Resistência à compressão

De modo geral, a literatura técnica aponta pequenos aumentos da resistência à compressão quanto maior o percentual de fibras no concreto, relatando também uma pequena variabilidade nas resistências para alterações na relação entre comprimento e diâmetro da fibra de reforço (fator de forma). Com relação ao ganho de resistência para CRFA devido a variação do diâmetro da fibra, os resultados também não apresentam ganho de resistência significativo (BARROS, 1996b).

Para utilização de teores normais de fibras ($< 2\%$), a contribuição é considerada muito pequena e pouco melhora com o aumento do teor de fibras incorporadas (BENTUR E MINDESS, 2007). Araújo (2002) enfatiza que apenas para quantias acima de 120 kg/m^3 de fibras espera-se um aumento de resistência à compressão.

Araújo (2002) verificou a resistência à compressão para corpos de prova cilíndricos de $100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ com três diferentes dosagens de concreto reforçado com fibras de aço de comprimento 30 mm , diâmetro de $0,62 \text{ mm}$ (fator de forma igual a 48) e gancho nas extremidades, variando os volumes de fibras acrescidos na mistura com percentuais de 0% , $0,75\%$ e $1,50\%$ em volume. Os resultados para os ensaios apontaram que a adição de fibras

não conduziu a um aumento de resistência à compressão para todos os traços e em situações onde houve aumento este não superou 8%.

Mohammadi *et. al* (2008) verificou o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras de aço para diversos percentuais de fibras longas e curtas (50 mm e 25 mm, respectivamente) acrescentados na mistura do concreto. Os ensaios de resistência à compressão apresentaram resultados mais expressivos para concretos com reforço de 2% em volume de fibras. Os ensaios para esse percentual de fibra curta como reforço proporcionaram um acréscimo na resistência à compressão da ordem de 26% quando comparado com resultados para concreto sem reforço. O melhor desempenho observado para composição de traços com mistura de fibras longas e curtas foi observado no concreto com 35% de fibras longas e 65% de fibras curtas, apontando um incremento na resistência de 19%.

Oliveira Junior (2012) em ensaios de caracterização de concretos verificou a variação da resistência à compressão para concretos com 1% e 2% de fibras na mistura. Os resultados apontaram que a adição de 1% de fibra proporcionou um incremento de 16% na resistência à compressão do concreto e, para adição de 2% de fibra como reforço a resistência, quando comparada com o concreto sem adição de fibras, foi de 13%.

Arif (2014), em ensaios de resistência à compressão aos 28 dias para concretos com resistência característica de 30 MPa e taxa de fibra de 30kg/m³ e 60 kg/m³ verificou ganhos de resistência da ordem de 7% e 15% respectivamente.

Maiores volumes de fibras acrescentadas a mistura de concreto podem resultar tanto em acréscimo quanto em decréscimo para a resistência, sendo o decréscimo observado quando a quantidade de fibras adicionadas na matriz provoca aumento do teor de ar a mistura, situação que conhecidamente causa prejuízos à resistência do concreto (MEDEIROS, 2012). Vitor (2017) verificou redução na resistência à compressão para CRFA com resistência característica de 20 MPa e teores de fibras de 0,64% e 0,77% em volume. Os valores determinados foram 6,17% e 8,69% menores que os obtidos para o concreto sem utilização de fibras. Essas reduções podem estar relacionadas à própria variabilidade dos materiais.

Se tratando da resistência à compressão, segundo ACI (1996), a resistência final é ligeiramente melhorada com aumentos observados que variam de até 15% para 1,5% de acréscimo de fibras. Bentur e Mindess (2007) afirmam que esse aumento de resistência à compressão não ultrapassa 25%, para volumes de fibra incorporadas menores que 2%.

A principal contribuição para o CRFA acontece no incremento da ductilidade no estágio pós fissuração, ou seja, no aumento da capacidade de as fibras trabalharem como ponte de transferência de tensões após o surgimento de fissuras no compósito. Esse aumento de ductilidade, segundo Araújo (2002) é mais efetivo para teores de fibras variando de 0 a 0,7%, do que quando empregado fibras em grandes quantidades.

2.1.4.2 Resistência à tração

O concreto sem reforço apresenta como característica a baixa resistência à tração, causada principalmente devido à baixa resistência da interface pasta-agregado e a presença de vazios na matriz do concreto. O reforço de concretos com fibras pode conduzir a um aumento na resistência a tração do compósito devido as fibras atuarem como pontes de transferência dos esforços, inibindo a formação e reduzindo a abertura de fissuras.

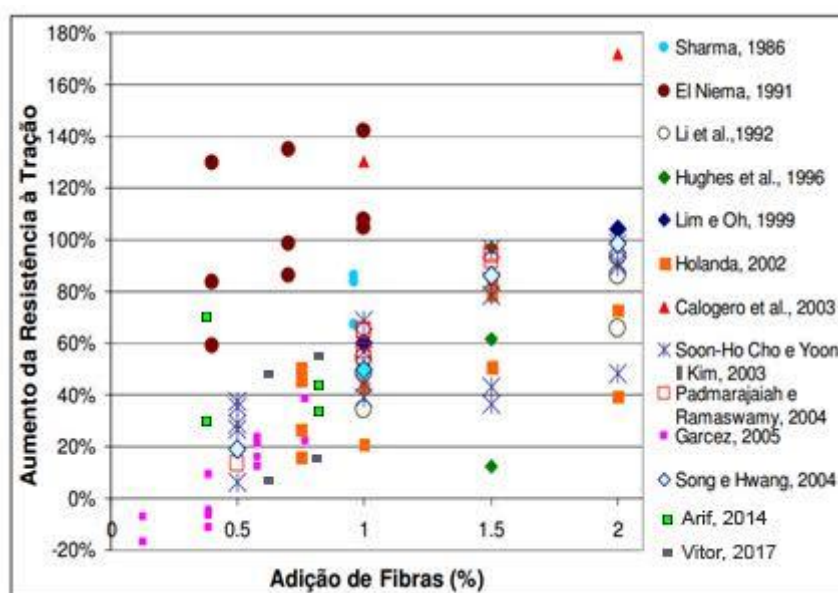
O ganho de resistência devido a incorporação de fibras na mistura do concreto é verificado em elevados percentuais para situações onde as fibras apresentam-se alinhadas na mesma direção das tensões de tração. Para compósitos reforçados com fibras dispostas aleatoriamente na matriz o incremento de resistência se mostra menos eficiente quando comparado com a situação que as fibras se apresentam alinhadas (BENTUR; MINDESS, 2007). Em geral, segundo Bernardi (2003), o ganho de resistência à tração não supera 20% para teores de fibras menor que 2%, que são usualmente utilizados.

O aumento na resistência à tração de compósitos reforçados com fibras também é observado com a variação do fator de forma das fibras utilizadas. De acordo com Barros (1996) a resistência à tração na flexão para compósitos pode ser aumentada em torno de 25% para aumentos do índice de reforço de 40 para 120. O índice de reforço é dado pelo produto do fator de forma pelo volume de fibras.

As fibras contribuem de forma significativa apenas para situações em que o V_f é superior ao volume crítico. Para situações onde não é possível adicionar fibras em teores superiores ao volume crítico a presença das fibras proporciona maior ductilidade no estágio pós-fissuração, porém não apresenta acréscimo significativo de resistência à tração (ARAÚJO, 2002).

A Figura 12 apresenta dados agrupados de experimentos para resistência à tração em ensaios de compressão diametral. É possível verificar que para alguns autores houve ganhos significativos de resistência à tração nos diversos percentuais de teores de fibras adicionadas, contrariando contestações de alguns autores. A conclusão de que a utilização de fibras como reforço não garante um aumento da resistência à tração em concretos reforçados com fibra de aço podem estar relacionadas, segundo Garcez (2005), a presença de ar incorporado quando adicionada fibras a mistura, acrescidas de problemas relacionados a moldagem, distribuição inadequada das fibras na mistura, causando reflexo negativo quanto a resistência à tração para compósitos.

Figura 12 – Aumento da resistência à tração para diferentes percentuais de fibras de aço adicionadas a concretos e submetidos a ensaio de compressão diametral



Fonte: Adaptado de Pasa (2007)

Mohammadi *et. al* (2008) verificou a resistência à tração por compressão diametral para concretos reforçados com fibras de aço, variando a quantidade fibras longas e curtas (50 mm e 25 mm, respectivamente) acrescidas ao concreto e os percentuais de fibras em volume (1%, 1,5% e 2%). A melhor combinação para a composição se deu para um percentual de 2% de fibras empregadas, sendo 100% das fibras acrescidas de 50 mm. Essa composição resultou em um incremento de 86,55% na resistência à tração por compressão diametral. Para composições onde variava o percentual de fibras longas e curtas na mistura o melhor

resultado obtido foi dado com reforço de 2% de fibras em volume, sendo este percentual composto por 65% de fibras longas (50 mm) e 35% de fibras curtas (25 mm). Os resultados de resistência à tração por compressão diametral apontaram um incremento de 59,92% na resistência à tração por compressão diametral, quando comparados com resultados obtidos para concretos sem reforço.

Araújo (2002) verificou a variação da resistência à tração indireta, determinada por compressão diametral, em corpos de prova cilíndricos de 100 mm x 200 mm com três diferentes dosagens de concreto reforçado com fibras de aço de comprimento 30 mm, diâmetro de 0,62 mm (fator de forma igual a 48) e gancho nas extremidades, variando os volumes de fibras acrescidos na mistura com percentuais de 0% 0,75% e 1,50% em volume. Foi verificado acréscimo de resistência da ordem de 87% a 130% para percentuais de acréscimo de 1,5% de fibras em volume.

Garcez (2005) enfatiza que agregados com dimensões maiores combinados com teores elevados de fibras interferem na resistência à tração, devido à maior resistência à deformação e tenacidade apresentado pelas fibras. Garcez (2005) verificou o efeito do aumento da dimensão dos agregados na resistência à tração por compressão diametral para compósitos com teores de fibra de 30 kg/m³, 45 kg/m³ e 60 kg/m³, e agregados de 12,5 mm e 19 mm. Os resultados apontaram maiores resistências à tração para os concretos com agregados de 19 mm para os teores de 45 kg/m³ e 60 kg/m³ e menor resistência para o teor de 30 kg/m³.

Arif (2014) em ensaios utilizando fibras com diâmetro de 0,9 mm e comprimento de 60 mm com gancho nas extremidades observou aumentos para a resistência à tração por compressão diametral de 43,86% para concretos com teor de fibra de 60 kg/m³ e de 73,01% para teor de fibra de 30 kg/m³.

Zhoue Uchida (2017) verificaram o comportamento à flexão pós fissuração para corpos de prova prismáticos cortados em ângulos de 30°, 60° e 90°. Os resultados apresentaram para os ângulos de 0°, 30° e 60° resistência à flexão da ordem de 10%, 40% e 80% daqueles determinados para cortes com ângulo de 90°, indicando dependência linear para a contribuição das fibras na proximidade das superfícies de fratura.

2.1.4.3 Tenacidade

Conforme já apresentado, o reforço de concretos com a utilização de fibras traduz-se em um incremento da capacidade do compósito de absorver energia no estágio pós-fissuração, provocando uma alteração na inclinação descendente do gráfico de tensão por deformação do compósito (PASA, 2007).

O conceito de tenacidade para compósitos é dado pela área abaixo da curva de carga por deflexão e o valor dessa área representa o trabalho dissipado pelo material devido ao carregamento aplicado, até um dado nível de deflexão (FIGUEIREDO, 2000). De acordo com alguns autores essa medida possui como desvantagem a dependência das dimensões dos corpos de prova e do sistema de aplicação de cargas.

A utilização de fibras em matrizes cimentícia promovem melhorias diversas nas propriedades do concreto, apresentando melhorias significativas para tenacidade à flexão e redução da propagação de fissuras. A Tabela 2 mostra um resumo dos principais métodos utilizados na determinação da tenacidade.

Tabela 2 – Métodos utilizados para determinação da tenacidade.

(continua)

Norma ou recomendação	Forma do CP	Dimensões do CP (mm)	Parâmetros Monitorados	Medida da Tenacidade
Norma americana ASTM C1550 (<i>American Society for Testing and Materials</i>)	Painel circular	D= 800 h=75	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
Norma japonesa JSCE SF-4 (<i>Japan Society of Civil Engineers</i>)	Prisma	b=h=100 ou 150 L = 300 ou 450 c= 380 ou 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150
FIB 2010 (<i>Fédération Internationale Du Béton</i>)	Prisma	b=150 h=150 L=500 c=550	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Limite de proporcionalidade (LOP), Resistência residuais para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 m

ASTM C1609 (<i>American Society for Testing and Materials</i>)	Prisma	b=150	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150
		h=150		
		L=450		
		c=500		

Tabela 2 – Métodos utilizados para determinação da tenacidade.

(conclusão)

Norma ou recomendação	Forma do CP	Dimensões do CP (mm)	Parâmetros Monitorados	Medida da Tenacidade
Norma Europeia EFNARC (<i>European Federation of Producers and Applicators of specialist Products for Structures</i>)	Prisma	b= 125 h=75 L=450 c=600	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência residual para valores de deflexão de 0,5 mm a 4 mm
		b=c=600 h= 100 L = 500x500 carga = 100x100		

b = largura do C.P. d = altura do C.P. L = vão livre entre cutelos c = Comprimento do C.P. D = diâmetro do C.P.

Fonte: ARIF (2014)

O ganho de tenacidade em CRFA foi verificado por Araújo (2002), em ensaios que determinaram aumento no índice de tenacidade para três traços de concreto, com percentual de fibras que variavam de 0,75% a 2,0% em volume. Como resultado foi constatado ganho de tenacidade para todas as situações em que foi aumentado o percentual de fibras na mistura.

Arif (2014) verificou a variação para a tenacidade a flexão segundo as normas ASTM C1550:2012, JSCE SF-4 e ASTM C1609 para concretos com resistência característica de 30 MPa e 40 MPa, com teores de fibra de 30 kg/m³ e 60 kg/m³, comprimento 60 mm e diâmetro 0,9 (fator de forma 67). Os resultados dos ensaios apresentaram ganhos de tenacidade à flexão com o aumento da quantidade de fibras por m³ no concreto, para todos os ensaios realizados, apresentando acréscimos de até 96,86%, quando utilizado concreto de 30 MPa e de até 106% para concretos com resistência característica de 40 MPa.

Vitor (2017) comparou o ganho de tenacidade obtido para CRFA com teores de fibra de 0,64% e 0,77% em volume (fibras com 60 mm de comprimento e diâmetro de 0,90 mm), para concretos com resistência característica de 20 MPa e 40 MPa. Foi verificado aumento de tenacidade de 9,26% para V_f de 0,77% quando comparado com o V_f de 0,64% em concretos de 20 MPa. Para concretos de 40 MPa o ganho de resistência foi de 22,0% para comparação dos resultados com os mesmos teores de fibra.

2.1.5 Controle de qualidade para CRF

Figueiredo (2011) enfatiza a ausência de controle da qualidade para compósitos no Brasil, assim como a restrita preocupação do mercado brasileiro na realização de dosagens mais eficientes para otimização de fibras de aço como reforço em concretos.

Segundo Figueiredo (2014) o desafio para a tecnologia de reforço de concretos com fibras será o de criação de um modelo que estabeleça um controle confiável para o dimensionamento, enfatizando que alguns estudos como tem sido feito nessa perspectiva, como a avaliação da tenacidade por meio do ensaio de Barcelona simplificado. Ainda segundo o autor, outros modelos para controle de qualidade deverão ser desenvolvidos para o que seja possível a criação de um programa adequado para o controle da qualidade.

A Prática recomendada comitê IBRACON/ABECE (2016) trata de critérios específicos para homologação e critérios para controle tecnológicos de CRF. As diretrizes tratadas nesse documento pressupõem que controles menos rigorosos na verificação da qualidade para CRF são dadas quando se inclui apenas estudo de dosagem inicial para determinação de resistências para a matriz, formação de lotes e verificação de teores de fibras no concreto. Esse controle deve ser utilizado em situações onde existe capacidade de os elementos da

estrutura redistribuir os esforços. Para situações onde não é possível essa redistribuição de esforços o controle tecnológico deve ser mais rigoroso.

O controle da qualidade para CRF passa pela dosagem eficiente, controle do comportamento mecânico e verificação da devida utilização quantitativa de fibras como reforço, conforme especificações de projeto. O conceito da importância do controle de qualidade se solidifica diante dos resultados apontados em literatura para desempenhos de CRF, onde o comportamento do concreto reforçado não apresenta resposta de melhoria linear, conforme o crescimento do teor de fibras utilizadas na mistura, apresentando situações em que o aumento da taxa de fibras acrescidas no concreto pode inclusive comprometer o desempenho mecânico do compósito.

A utilização do processamento digital de imagens apresenta potencial facilitador para a criação de condições na investigação quantitativa de fibras presentes em corpos de prova cilíndricos.

CAPÍTULO 3

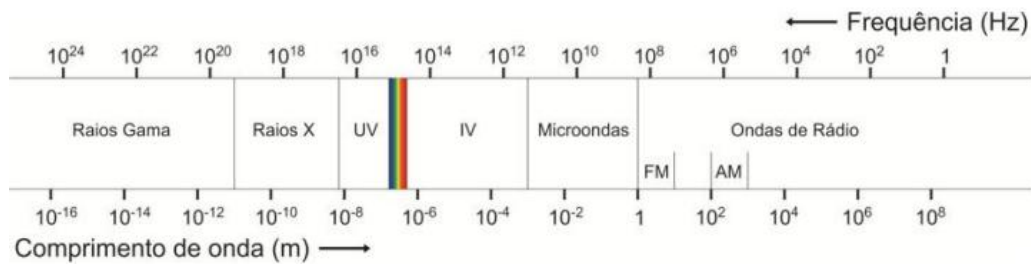
ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS

3.1 INTRODUÇÃO AO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O espectro de energia eletromagnética é a principal fonte de energia para imagens, no entanto pode-se citar outras importantes fontes de energia, como por exemplo, energia ultrassônicas, eletrônicas, acústicas etc. Grande parte das imagens são obtidas a partir da associação de uma fonte de iluminação e a absorção ou reflexão de energia através de objetos. Esta fonte de iluminação pode ser proveniente de uma fonte de energia eletromagnética, como sistemas de raio x, radares, infravermelhos ou a partir de fontes menos comuns, como ultrassom e padrões de iluminação gerados por computadores. Dependendo do tipo de fonte, os objetos podem transmitir ou refletir a energia de iluminação (GONZALES; WOODS, 2009).

O espectro eletromagnético é dividido em intervalo de comprimento de ondas com base em mecanismos geradores de energia eletromagnética e mecanismos de detecção (Figura 13). A banda do espectro eletromagnético visível ao olho humano cobre uma estreita faixa que vai de $0,43\ \mu\text{m}$ a $0,79\ \mu\text{m}$, divididas em regiões violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Figura 13 – Espectro eletromagnético



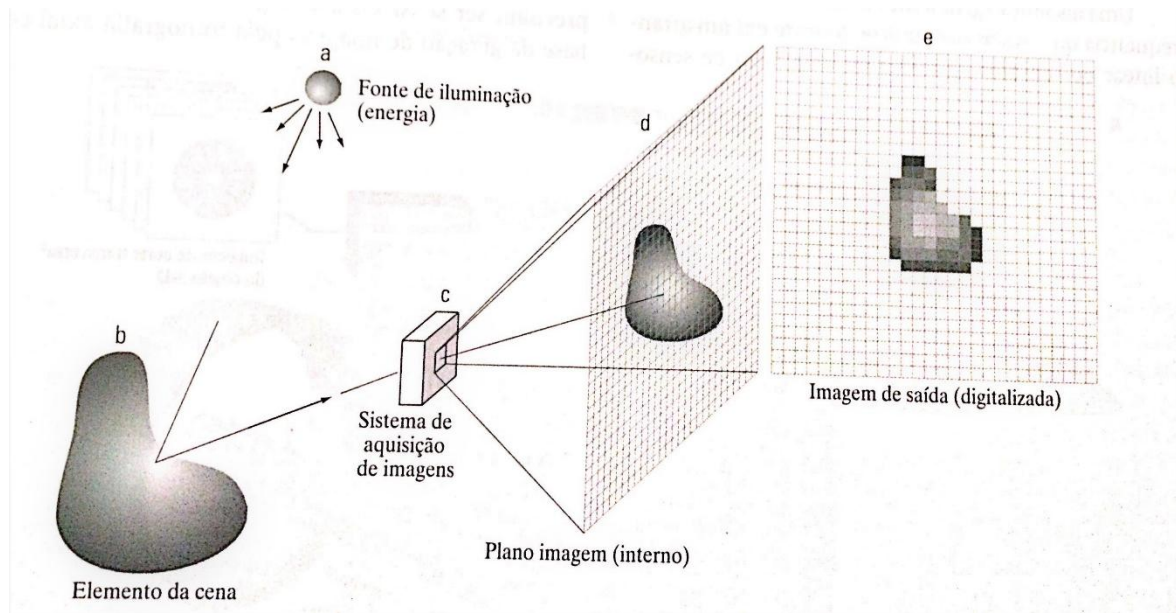
Fonte: Pereira (2014)

As cores visíveis pelos humanos são determinadas pela natureza da luz refletida pelo objeto. A maioria das técnicas de processamento de imagens usam-se de imagens digitais que são representações digitais dos valores de energia radiante que deixa um objeto (radiância), porém é aceito que os valores digitais são representações bem próximas da reflectância, sendo esta a razão entre a radiância e a quantidade de energia que incide no objeto (irradiância), medida em um mesmo instante (MENESES; ALMEIDA, 2012).

O processo de aquisição de uma imagem é dado pela transformação de uma situação tridimensional a uma imagem analógica, por meio da redução de dimensionalidade. Uma imagem digital pode ser definida por uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas espaciais e a amplitude da função é dada pela intensidade de escala de cinza nesse ponto (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALES; WOODS, 2009; GUPTA, 2011).

A Figura 14 apresenta o esquema de uma fonte de iluminação sendo refletida, situação que produz como saídas imagens planas proporcionais a intensidade de luz recebida nos sensores, que coincidem com o plano focal. Os circuitos digitais e analógicos mapeiam estas saídas e as transformam em sinal analógico, que é então digitalizado, produzindo assim a imagem digital.

Figura 14 - Processo de aquisição de imagens digitais



Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

A representação de uma imagem digitalizada por meio de uma reprodução matricial é dada por um conjunto de dados referentes a imagem dispostos de forma espacial em duas dimensões. Segundo Azevedo e Conci (2003), a representação gráfica é formada a partir de valores atribuídos a cada *pixel* que, em conjunto, formam as imagens em dispositivos de saída gráficos. A intensidade de luz atribuída a cada ponto de coordenada tem um valor relacionado ao nível de cinza correspondente àquele *pixel*.

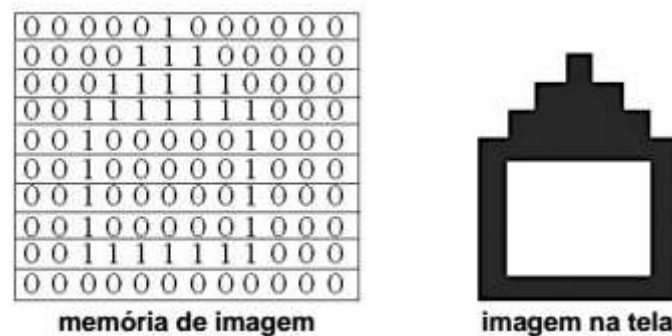
Pixels são constituídos pelo menor elemento não divisível que pode ser identificado em uma imagem digital. O conjunto de dados em uma imagem digital pode ser composto por n bandas individuais, que é resultado de um imageamento multiespectral ou hiperespectral (JENSEN, 2006). Sendo assim, o nível de intensidade de um *pixel* pode ser determinado a partir de suas coordenadas e banda.

Sendo o valor de intensidade de cada *pixel* em uma imagem digital representado pelo nível de radiância naquele ponto, o nível de cinza em uma dada coordenada para uma imagem monocromática será dado por um número que assume um valor dentro de um limite inferior (L_{min}) e um valor superior (L_{max}) para intensidade. Os valores para L_{min} e L_{max} são definidos como $[0, L - 1]$, porém as únicas restrições para definição deste intervalo é que L_{min} deve ser positivo e L_{max} um número finito (GONZALES; WOODS, 2009).

Os valores comumente adotados para o intervalo de possibilidades de níveis de cinza em uma imagem estabelecem $l = 0$ para a cor preta atribuída a uma coordenada da imagem e $l = L - 1$ para a cor branca para a saída da função. Para todos os resultados obtidos dentro deste intervalo definido as correspondências seriam dadas em uma imagem monocromática dada por tons de cinza que variam de preto a branco, sendo a quantidade de intensidades possíveis dada por 2^n , com n igual ao número de bits de uma imagem na referida base (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

A Figura 15 mostra a descrição de uma imagem matricial dada a partir de um conjunto de *pixels* e representada por níveis valores de coordenadas que assume valor igual a zero para *pixels* brancos e igual a um para *pixels* pretos.

Figura 15 - Descrição de imagens matriciais em conjunto de *pixels*



Fonte: Azevedo e Conci (2003)

De acordo com Meneses e Almeida (2012), existem quatro diferentes formas de detecção de um objeto nas imagens, sendo dadas pelas seguintes medições: pela área do campo de visada do sensor; pelo comprimento de onda das bandas; pelos valores numéricos da medida da radiância do alvo; e pela data em que a imagem foi tomada. Em termos de resoluções, estas medições são denominadas de resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal, respectivamente, descritas a seguir.

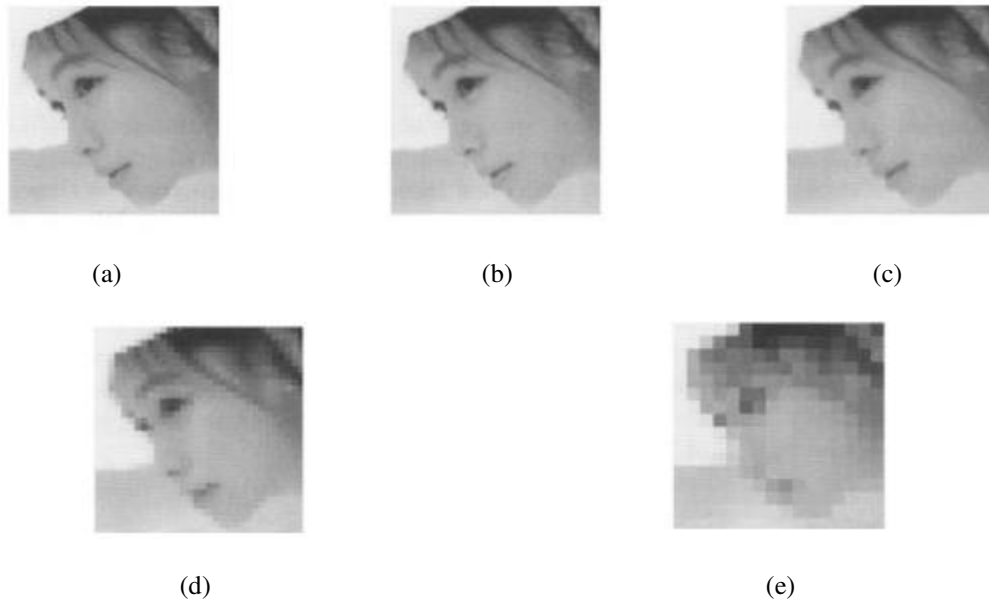
a) Resolução espacial

A resolução espacial está associada à densidade de *pixels* presentes em uma imagem (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008), e determina o tamanho do menor objeto que é possível de identificar em uma imagem, podendo ser representada de várias formas. As medidas de resolução espacial são significativas se forem expressas com relação a unidades espaciais, isto é, a representação do número de *pixels* presente na imagem não necessariamente corresponde uma resolução maior do que uma imagem com menor número de *pixels* (GONZALES; WOODS, 2009).

A discretização de amplitude para uma imagem atribui para cada *pixel* um valor que representa a intensidade de cinza naquela coordenada de domínio espacial. A forma mais comum de apresentação de uma imagem digital é por meio de uma matriz $M \times N$ (sendo M a quantidade de linhas e N a quantidade de colunas da matriz), onde cada elemento da imagem é representada pelo valor da função naquele ponto de coordenadas espaciais. (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

A qualidade da formação da imagem digital torna-se visivelmente estabelecida pela quantidade de discretização para a amostragem e quantização (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999). Ao tomar uma mesma imagem com o valor de “ n ” fixo, dado pela quantidade de níveis de intensidade possíveis de serem assumidos para um determinado *pixel*, e variando os valores de M e N , percebe-se que quanto menor os valores para discretização da amostra, menor a qualidade para a imagem digitalizada. A Figura 16 mostra diferentes resoluções espaciais para a mesma imagem com o valor de “ n ” fixo.

Figura 16 - Amostra de imagens



(a) resolução 256x256; (b) resolução 128x128; (c) resolução 64x64; (d) resolução 32x32; (e) resolução 16x16. Fonte: Acharya e Ray (2005)

b) Resolução espectral

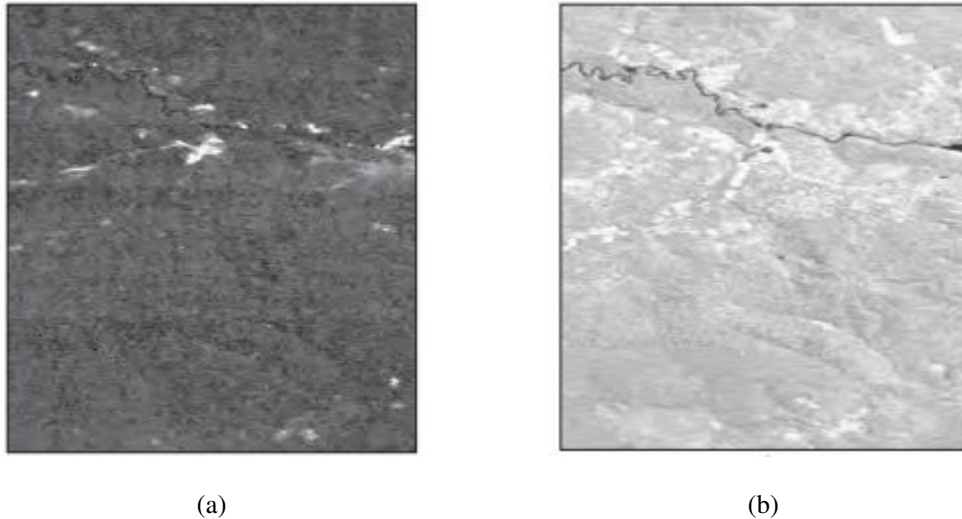
Um objeto, quando sujeito a radiação, pode absorver, refletir ou transmitir a mesma. A parte absorvida geralmente é transformada em calor e a parte refletida se espalha no espaço. A refletância refere-se à capacidade de um objeto de refletir a energia radiante, podendo esta ser diferente para cada tipo de radiação que o atinge (STEFFEN, 2017).

Jensen (2009) define resolução espectral como o número e o tamanho dos intervalos do comprimento de onda (bandas) no espectro eletromagnético. Este, por sua vez, baseia-se nos comprimentos de onda de radiações conhecidas e divide-se em bandas que estão relacionadas com a forma de detecção ou produção das radiações.

A resolução espectral está relacionada a pelo menos três fatores de medidas: o número de bandas do sensor, a largura de comprimento de onda das bandas e as posições das bandas no espectro eletromagnético (NOVO, 2010; MENESES; ALMEIDA, 2012). A Figura 17 ilustra como uma imagem em diferentes faixas de comprimentos de onda pode apresentar diferenças nos contrastes para objetos identificados na imagem. Ambas imagens apresentam a mesma resolução espacial, porém a Figura 17 (a) apresenta menor contraste entre objetos detectáveis que a Figura 17 (b). Isso acontece porque as cores dos diferentes objetos na

Figura 17 (a) apresentam praticamente a mesma refletância para o comprimento de onda da banda, não havendo assim contraste entre os objetos da imagem.

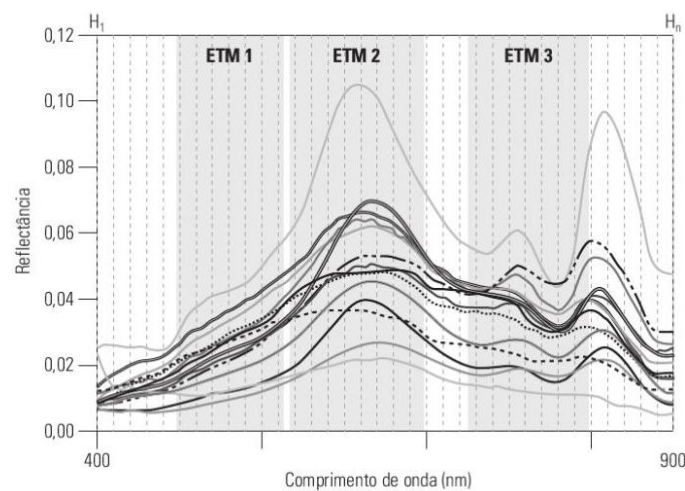
Figura 17 – Efeito de contraste da resolução espectral para uma imagem em diferentes bandas.



(a) menor contraste entre objetos detectáveis; (b) maior contraste em objetos na imagem. Fonte: Meneses e Almeida (2012)

A Figura 18 mostra o espectro de energia refletida por vários objetos em uma faixa de comprimento de onda que varia de 400 a 900 nm. As indicações ETM1, ETM2 e ETM3 representam as bandas do sensor (NOVO, 2010).

Figura 18 - Conceito de resolução espectral



Fonte: Novo (2010), adaptado de Rudorff (2006)

Para imagens que apresentam dificuldade na identificação de elementos de interesse, em função da refletância de diferentes objetos apresentarem similaridades de intensidade, a utilização de classificações orientadas a objetos na segmentação pode apresentar melhores resultados.

c) Resolução radiométrica

A resolução radiométrica é dada a intensidade de radiância para cada *pixel* unitário, sendo que quanto maior a capacidade do detector de diferenciar magnitudes de níveis de radiância, maior será a resolução radiométrica (MENESES; ALMEIDA, 2012). A resposta de saída da intensidade de radiação de entrada no sensor é convertida em um número discreto que representa a intensidade do nível de cinza em uma imagem. A resolução radiométrica também é chamada de quantização, sendo que quanto maior o valor para quantização, maior será a qualidade visual da imagem.

Os valores para quantização das coordenadas de uma imagem são expressos em dígitos binários, e as intensidades de níveis de cinza possíveis são dados conforme a Equação 2.

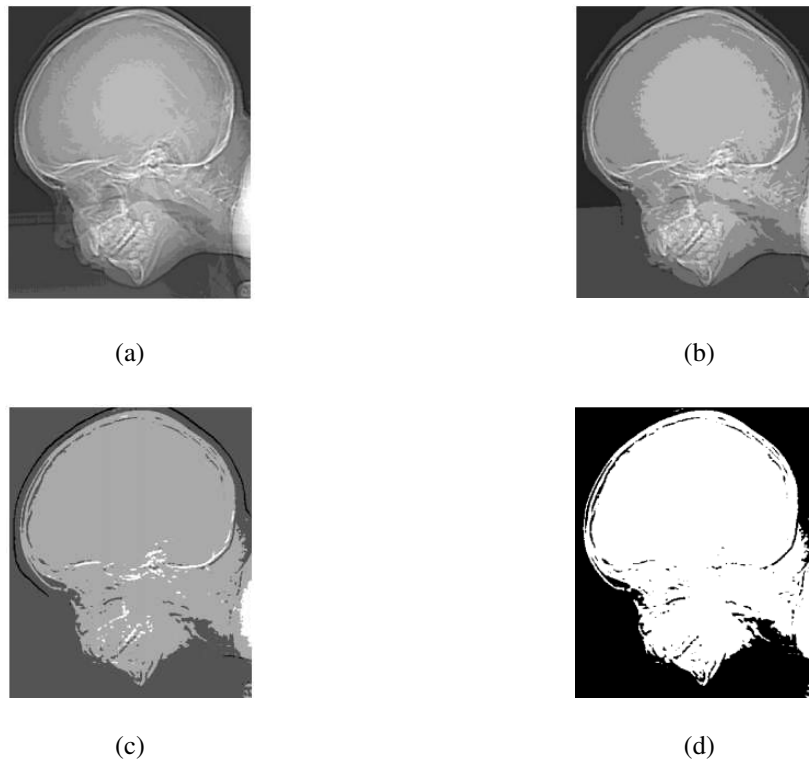
$$L = 2^n$$

Equação 2

Onde: L representa o número de níveis de cinza da imagem e n corresponde a quantidade de bits necessários para se armazenar a imagem digitalizada.

Assim, quanto maior a quantização da imagem, maior será sua qualidade, ou seja, uma imagem de 8 bits, que apresenta 256 (2^8) níveis de cinza possíveis para representar a intensidade de cada *pixel*, resulta em detalhes visuais melhores que os representados na mesma imagem com apenas 4 bits (2^4). A Figura 19 apresenta uma imagem com diferentes níveis de intensidade possíveis, para uma mesma resolução espacial.

Figura 19 - Imagem com níveis de intensidade



(a) intensidade 16 bits; (b) intensidade em 8 bits; (c) intensidade em 4 bits; (d) intensidade em 2 bits. Fonte: Gonzalez e Woods (2009)

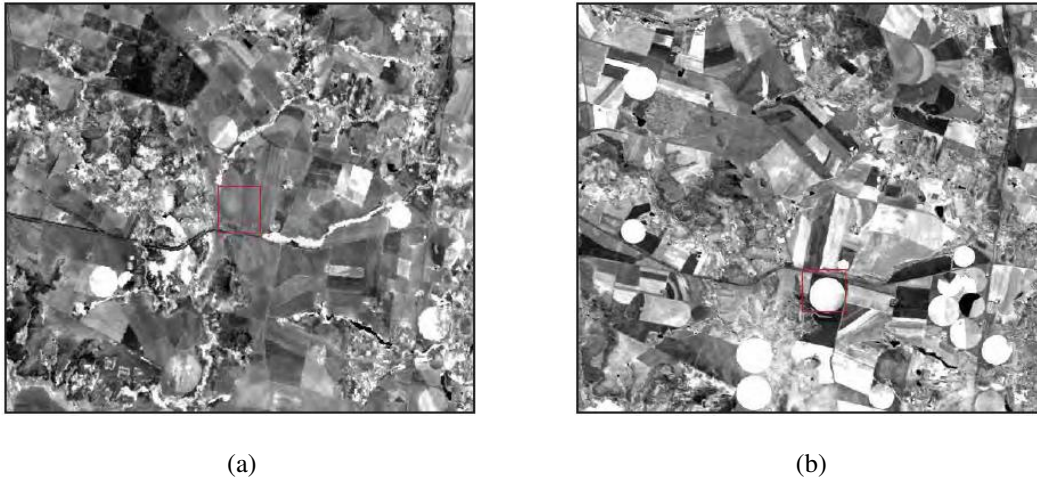
A utilização com baixa quantidade de níveis de cinza para de baixa quantidade de níveis de cinza na quantização pode produzir saídas com diversas imperfeições, como pontos de baixo contraste imperceptíveis e regiões com pontos erroneamente conectados.

d) Resolução temporal

A resolução temporal refere-se à frequência de registro de imagens de um sensor em uma área, a fim de obter dados regularmente para aquisição de características particulares do objeto investigado, sendo fundamental para detecção de mudanças que ocorrem nas cenas capturadas, principalmente quando se trata de alvos dinâmicos (JENSEN, 2009; MENESES; ALMEIDA, 2012).

A Figura 20, representa duas captações de imagens coletadas por satélites em diferentes datas. Observa-se o crescimento de pivôs centrais e modificações de áreas modificadas.

Figura 20 - Modificações da mesma área em períodos distintos

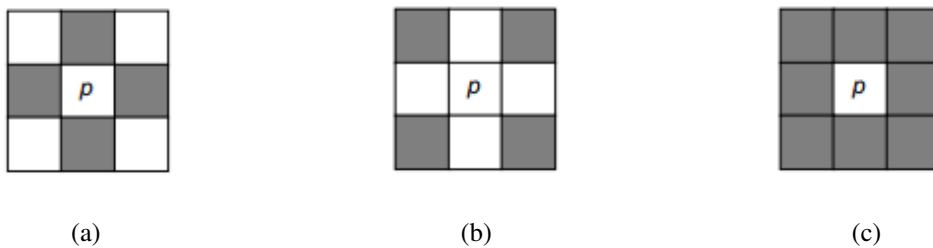


(a) imagem LANDSAT obtida no ano 2000; (b) imagem LANDSAT obtida em 2009. Fonte: Meneses e Almeida (2012)

3.2 TRANSFORMAÇÕES DE INTENSIDADE E FILTROS ESPACIAIS

Um *pixel* “ f ” de coordenadas (x, y) possui oito vizinhanças, isto é, *pixels* adjacentes a ele mesmo. As vizinhanças na horizontal e vertical podem ser descritas a partir das coordenadas $(x + 1, y)$, $(x - 1, y)$, $(x, y + 1)$ e $(x, y - 1)$ e são descritas como “vizinhança-4” ou $N_4(f)$. As vizinhanças diagonais ($N_d(f)$) ao *pixel* “ f ” são dadas pelas coordenadas $(x - 1, y - 1)$, $(x - 1, y + 1)$, $(x + 1, y - 1)$ e $(x + 1, y + 1)$. Os pontos diagonais juntos a vizinhança horizontal e vertical ($N_4(f) \cup N_d(f)$) formam a “vizinhança-8” ou $N_8(f)$ (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). A Figura 21 mostra o esquema de vizinhança para um *pixel*.

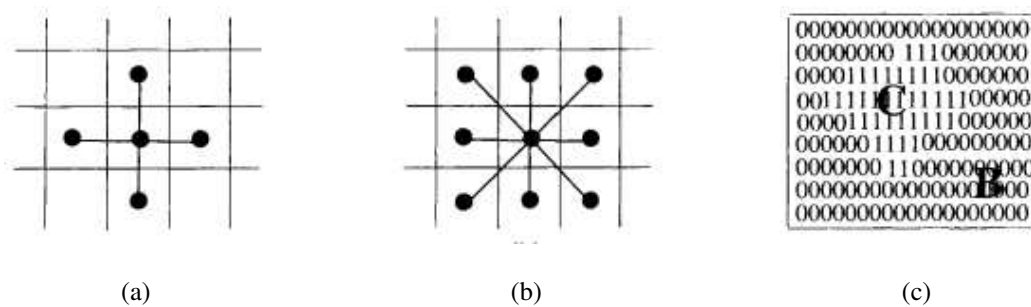
Figura 21 - Esquema de vizinhanças



(a) vizinhança-4; (b) vizinhança diagonal; (c) vizinhança-8. Fonte: Marques Filho e Vieira Neto (1999)

Um conjunto de *pixels* conectados (vizinhança-4 e vizinhança-8) formam um objeto em uma imagem. A Figura 22 mostra um exemplo contendo dois tipos de conectividades e um componente conectado, sendo mostrado na Figura 22(a) a conectividade entre *pixels* de vizinhança-4, na Figura 22(b) conectividade entre *pixels* de vizinhança-8 e na Figura 22(c) apresentado duas regiões (C e B) em uma imagem com apenas dois níveis de intensidade possíveis.

Figura 22 - Exemplos de vizinhança-4, vizinhança-8 e componente conectado “C”.



(a) conectividade entre *pixels* de vizinhança-4; (b) conectividade entre *pixels* de vizinhança-8; (c) regiões do objeto e fundo em uma imagem. Fonte: Acharya e Ray (2005)

Os contornos são *pixels* que ultrapassam uma fronteira predefinida de intensidade, e estão relacionadas com a descontinuidade de intensidade em um ponto da imagem. Os contornos em uma região são dados pela sequência de *pixels* que possuem no mínimo um fundo vizinho (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999), ou seja, que tem um conjunto de componentes de *pixels* que não possui conectividade, formando assim uma fronteira de corte de intensidade para uma sequência de *pixels* adjacentes.

Como já definido, o domínio espacial refere-se ao plano que contém os *pixels* de uma imagem. Os processos aplicados nesse domínio podem ser expressos, segundo Gonzales e Woods (2009), por $g(x, y) = T[f(x, y)]$, sendo $f(x, y)$ a imagem a ser transformada, T um operador aplicado sobre a matriz de *pixels* e $g(x, y)$ a imagem de saída.

A convolução de imagens é o processo de aplicação de máscaras que percorrem todas as coordenadas da imagem *pixel a pixel* alterando os valores de intensidade das coordenadas (RUSS, 1998; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; ALMEIDA MENESES, 2012).

O procedimento de mudança dos valores dos *pixels* da imagem executada no processo de convolução atribui a cada *pixel* em uma nova imagem criada, com a mesma resolução

espacial da imagem de entrada, o valor do resultado da filtragem para cada coordenada. Esse conceito é importante, tendo em vista que a simples substituição do valor de intensidade dos *pixels* alteraria o conteúdo da imagem enquanto a filtragem ainda continua sendo realizada.

A Equação 3 representa o processo de convolução, onde os valores de α e β representam variáveis fictícias para integração:

$$g(x, y) \times f(x, y) = \iint (f(\alpha, \beta) \times g(x - \alpha, y - \beta)) d\alpha d\beta \quad \text{Equação 3}$$

O processo de convolução sobre uma imagem retorna como saída uma imagem melhorada, com realce dos detalhes, melhoria da nitidez e detecção de bordas a partir pontos limítrofes de região com níveis de cinza relativamente diferentes. Alguns exemplos de máscaras que permitem estabelecer regiões de realce e detecção de bordas são os operadores Sobel, de Roberts e Prewitt. O controle das intensidades de níveis de cinza pode ser feito utilizando o histograma das imagens, resultando em significativas melhorias para o contraste de imagens.

3.2.1 Histograma de imagens

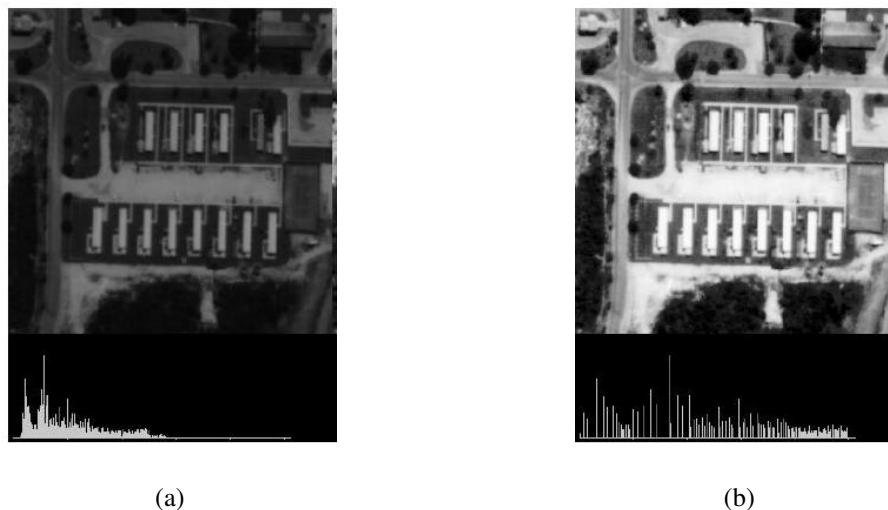
Os sensores de captação de imagem são concebidos para captar uma grande variação de intensidade de radiância refletida, retroespalhada ou emitida, porém muitos objetos distribuídos em uma área não apresentam altos contrastes de refletância. A análise do histograma possibilita que seja avaliado o nível de contraste e brilho em uma imagem, se tornando uma importante ferramenta para verificação da melhor técnica de aprimoramento de imagens. (MENESES; ALMEIDA; 2012).

O histograma de uma imagem representa a frequência de ocorrências de níveis de cinza presente na mesma, sendo possível ter uma descrição global da imagem a partir dele. Uma imagem que apresenta histograma estreito proporciona baixo contraste, característica perceptível pela presença de poucas variações de intensidade de cinza da imagem. Uma imagem com histograma distribuído apresenta alto contraste, devido à presença de uma grande quantidade de níveis de cinza (ACHARYA; JAHNE; 2002; RAY, 2005).

A equalização de histogramas de imagem ajusta a faixa de níveis de cinza presentes na imagem, espalhando a ocorrência de níveis de cinza de forma uniforme ao longo da faixa de intensidades possíveis. Essa técnica baseia-se em uma função de transformação para redistribuir os níveis de intensidade da imagem original (ACHARYA; RAY, 2005).

A saída para a equalização do histograma promove uma readequação para os níveis de cinza dentro do intervalo de quantização da imagem, melhorando o contraste e perceptibilidade nas variações de intensidade, quando comparado com a imagem original. A Figura 23 apresenta uma aplicação para equalização de histograma onde o contraste da imagem é aumentado.

Figura 23 - Comparação de imagens antes e após equalização de histograma



(a) imagem com baixo contraste; (b) readequação dos níveis de cinza no intervalo de quantização da imagem. Fonte: Phillips (2000)

Esse processo difere do orientado a vizinhança, pois as transformações de intensidade em um *pixel* dependem exclusivamente do valor de intensidade de cinza respectivo a coordenada daquele ponto (ALMEIDA; MENESE, 2012). No processo orientado a vizinhança a transformação de intensidade em cada ponto depende dos valores de intensidade da sua vizinhança.

A equalização de histogramas pode conduzir a saturação de intensidades, resultando em imagens com valores de saída saturados, com muito brilho ou valores de intensidade muito escuros (KAUR; KAUR; 2016). Essa situação, que reflete o contrário do esperado para equalização, ocorre devido ao processo de uniformização de intensidades, que agrupa as

barras do histograma de menor ocorrência as de maior ocorrência, provocando perda de contraste em imagens com intensidades predominantes.

Para correção deste problema vários métodos para equalização do histograma que preservam o brilho têm sido propostos, como por exemplo, utilização do bihistograma (KIM, 1997; CHEN; RAMLI, 2003a; OOI, 2009; TANG *et. al*, 2017), decomposição da imagem original em subimagens (WAN *et. al*, 2016) e bihistograma melhorado (CHEN; RAMLI; 2003b).

No processo de análise da imagem a segmentação para identificação de objetos é fundamentada a partir da verificação de similaridade e descontinuidade para intensidades dos *pixels*. A limiarização, que utiliza o princípio de agrupamento de *pixels* por níveis de cinza, é uma importante abordagem no processo de segmentação de imagens.

3.2.2 Processo de segmentação: Limiarização

A limiarização consiste em um método para identificação de fronteiras em uma imagem e separação de regiões, sendo possível assim identificar um objeto e o fundo de uma imagem (RUSS, 1998; ACHARYA; RAY, 2005; GONZALEZ; WOODS, 2009). O processo é dado pela conversão para intensidade 1 dos *pixels* com valores de intensidade de cinza maiores que um limiar pré-definido (*threshold*) e 0 os demais *pixels*, definido por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > t \\ 0, & f(x, y) \leq t \end{cases} \quad \text{Equação 4}$$

Com $g(x, y)$ para intensidade do *pixel* de coordenada (x, y) após a limiarização, t para o limiar de corte e $f(x, y)$ para intensidade de cinza do *pixel* antes da limiarização.

A Figura 24 ilustra uma imagem antes e depois do processo de limiarização.

Figura 24 - Comparação de imagens antes e após limiarização



(a) imagem original; (b) imagem após o processo de limiarização. Fonte: Acharya e Ray (2005)

A limiarização global é executada utilizando um limiar T constante aplicado em uma imagem inteira (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). A determinação do limiar de corte pode ser dada por critérios subjetivos ou por determinação automática. Vários critérios utilizando estatística da imagem (OTSU, 1979; PUN, 1980; JOHANNSEN; BILLE, 1982; KAPUR *et. al*, 1985) foram estabelecidos para determinação automática do melhor limiar para segmentação de imagens.

O método iterativo pode ser utilizado para determinação do limiar global T , onde, inicialmente é estimado um valor inicial, $T = i = 1$, para o limiar, dado pela intensidade de cinza média para a imagem, por exemplo. Então a imagem é segmentada em duas regiões, R_1 e R_2 , sendo todos os *pixels* com intensidade menor que T pertencentes a R_1 e os demais pertencentes a R_2 . Posteriormente é calculado novos valores de intensidade média dentro de cada partição (m_1 e m_2) e então é calculado um novo valor de limiar dado por $T_1 = (m_1 + m_2)/2$, que é comparado com o valor de T . Caso o valor de T_1 apresente diferença significativa ao valor de T o valor de T é incrementado de 1. Esse processo é repetido até que o valor de T não tenha variações significativas para as sucessivas iterações (RIDLER; CALVARD, 1978; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008, XU *et. al*, 2011).

O método de Otsu apresenta como característica a determinação do limiar a partir da minimização da variância intraclasse. A determinação do limiar ótimo (t) é dado pela iteração de todos os valores possíveis para o limiar de corte de separação entre o fundo e os objetos, com cálculo das suas respectivas médias e probabilidades de um *pixel* pertencer ao fundo ou aos objetos. O valor do limiar estabelecido pelo método Otsu é dado pelo mínimo

valor para a soma das variâncias multiplicadas pelo peso, considerando todos os valores possíveis para o limiar. (OTSU, 1979; XU *et. al*, 2011).

A sequência da Equação 5 a Equação 13 descrevem o processo Otsu para determinação do limiar de corte para segmentação de imagens.

Considerando uma imagem digital f , de dimensões $M \times N$, a imagem com histograma p calculado por p_i :

$$p_i = \frac{n_i}{M \times N} \quad \text{Equação 5}$$

Ao se estabelecer um valor k dado por um nível de cinza que divide o histograma da imagem em duas classes (C1 e C2), as probabilidades de k pertencer a cada uma das classes são dadas por $P_1(k)$ e $P_2(k)$, respectivamente.

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k p_i \quad \text{Equação 6}$$

$$P_2(k) = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i \quad \text{Equação 7}$$

$$\mu_1(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k i \times p_i \quad \text{Equação 8}$$

$$\mu_2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} i \times p_i \quad \text{Equação 9}$$

A variância para distribuição de probabilidade para cada limiar pertencente a classe C1 e C2 dada por $\sigma_1^2(k)$ e $\sigma_2^2(k)$.

$$\sigma_1^2(k) = \frac{1}{P_1(k)} \sum_{i=0}^k (i - \mu_1(k))^2 \quad \text{Equação 10}$$

$$\sigma_2^2(k) = \frac{1}{P_2(k)} \sum_{i=k+1}^{L-1} (i - \mu_2(k))^2 \times P_2(k) \quad \text{Equação 11}$$

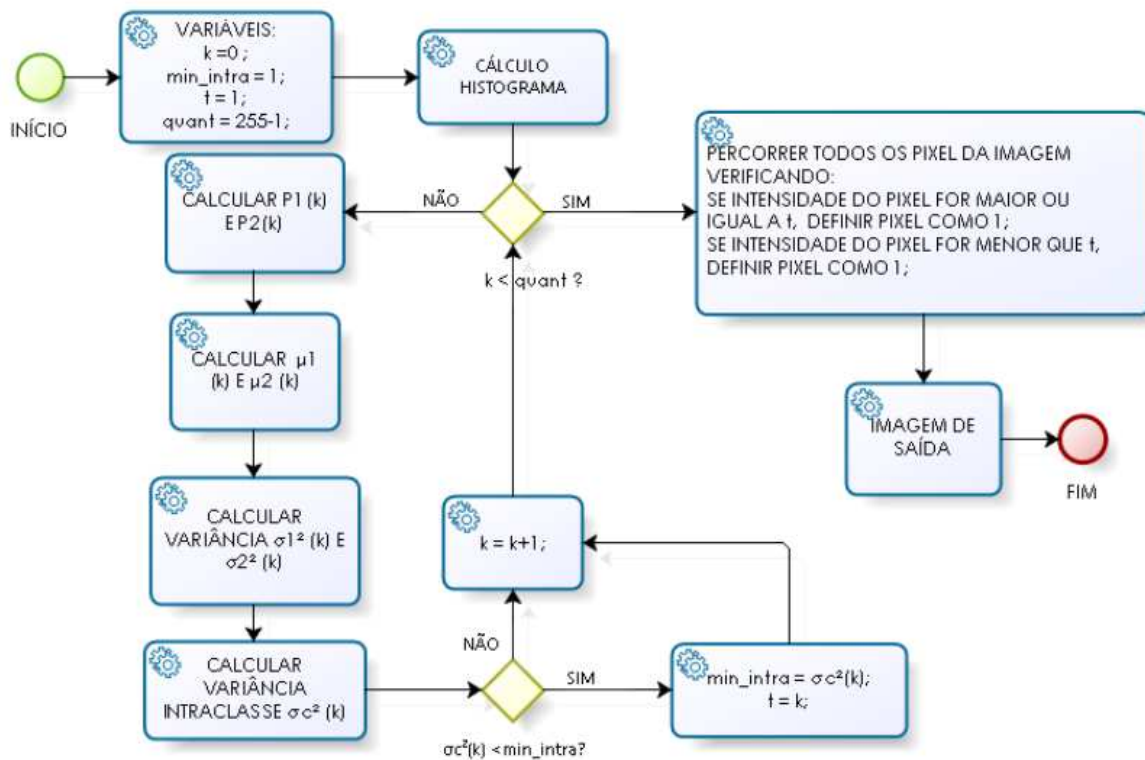
A variância intraclasse em relação aos valores de intensidade de cinza são dadas por $\sigma_c^2(k)$ e o limiar ótimo pelo método de Otsu será dado pelo menor valor para a variância intraclasse.

$$\sigma_c^2(k) = \sigma_1^2(k) \times P_1(k) + \sigma_2^2(k) \times P_2(k) \quad \text{Equação 12}$$

$$t = \min_{0 < k < L-1} \sigma_c^2(k) \quad \text{Equação 13}$$

A Figura 25 ilustra o fluxograma para os processos de determinação do limiar ideal por meio da minimização da variância intraclasse do método Otsu. O resultado apresentado para o processo descrito é o mesmo para utilização de abordagem interclasse, porém, para essa abordagem o valor do limiar ótimo será dado para a máxima variância interclasse.

Figura 25 – Fluxograma para método Otsu.



Fonte: Autor.

O processo de limiarização global funciona bem quando existe um vazio no histograma entre as intensidades relacionadas ao objeto existente na imagem e o fundo, apresentando

desvantagens para situações com ocorrências de ruídos ou de baixo contrastes nas imagens (GONZALESS; WOODS, 2009).

Lee *et. al* (1990) comparou o desempenho relativo à performance de diferentes algoritmos para limiarização global em uma ampla variedade de distribuições para o histograma. Os resultados observados apontaram desempenho satisfatórios para imagens que apresentavam histograma bimodal e pior desempenho para imagens ruidosas.

Para a situação de uma imagem tomada sem condições de controle, passíveis de apresentação de ruídos e pouco contraste, uma solução possível para alterar a forma do histograma da imagem é a suavização antes da limiarização (GONZALESS; WOODS, 2009). A suavização da imagem pode provocar pequena distorção na fronteira entre o objeto e o fundo e, para o caso onde o objeto em que se tem interesse na imagem apresenta pequeno tamanho o processo pode eliminar partes da imagem de forma indesejada. Outras formas para limiarização também são possíveis, partindo do mesmo princípio de correção para o histograma.

Técnicas como a segmentação orientada a regiões (BAATZ; SHAPE, 2000; HAPP *et. al*, 2013), que agrupam *pixels* com similaridades em intensidade, e segmentação baseada em bordas (SENTHILKUMARAN; RAJESH, 2009; LAKSHMI; SANKARANARAYANAN; 2010), que analisa descontinuidades para intensidades de cinza de *pixels* vizinhos, também apresentam resultados satisfatórios na segmentação de objetos de interesse em imagens.

Andrade *et. al* (2003) analisou resultados para segmentação de imagens de alta resolução na classificação espectral *pixel-a-pixel* e classificação orientada ao objeto. O processo de segmentação orientada ao objeto leva em consideração tanto atributos espectrais quanto relações espaciais entre *pixels*, como área e perímetro para objetos. A utilização de parâmetros de forma para segmentação a identificação de objetos na imagem digital apresentou melhores resultados para imagens com uma grande quantidade de formas geométricas.

3.3.3 Filtragem de imagens: filtros passa-baixa e passa-alta

A filtragem de imagens pode ser estabelecida no domínio espacial e no domínio de frequência. A filtragem no domínio espacial refere-se a alterações de intensidade no próprio

plano da imagem, enquanto que a filtragem no domínio de frequência refere-se a modificações de intensidade dentro de uma faixa de frequência utilizando a Transformada de Fourier (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008), sendo essa última não abordada nesse trabalho.

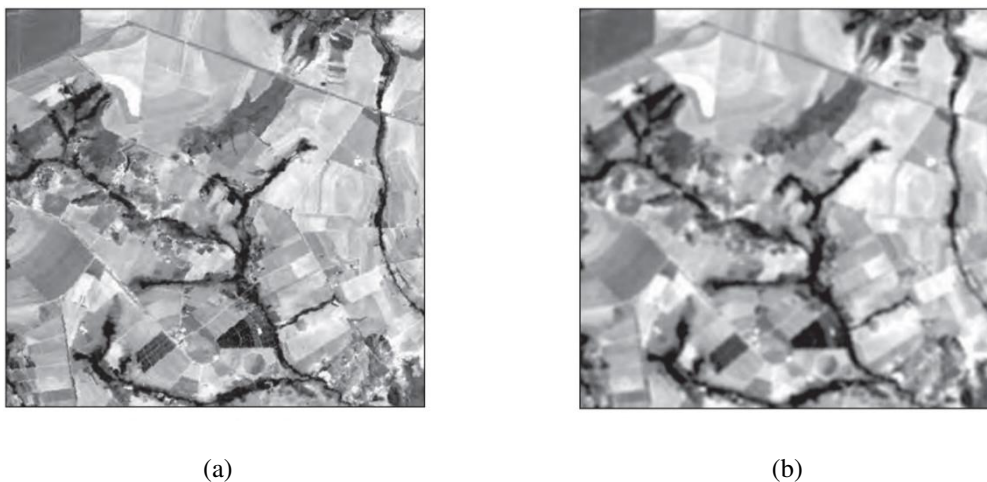
O efeito de um filtro passa-baixa, como os de média e mediana, é a suavização da imagem provocada pela atenuação de altas frequências no histograma (MENESES; ALMEIDA, 2012), processo que resulta na saída para cada *pixel* igual a média das intensidades dos *pixels* presentes na vizinhança do ponto de aplicação da máscara.

Esse procedimento traz como resultado uma imagem com menor nitidez, situação que além de reduzir ruídos presentes também borram as bordas das imagens, devido ruídos e bordas serem caracterizadas por mudança repentina de intensidades (GONZALES; WOODS, 2009).

Um filtro de média possui todos coeficientes da máscara com valor igual a 1 e um fator de normalização, geralmente dado pela soma dos coeficientes da máscara, que preserva o valor médio das intensidades dos *pixels* vizinhos (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

O tamanho do filtro influencia significativamente no resultado de saída da imagem (MENESES; ALMEIDA, 2012), apresentando maior perda de nitidez quanto maior o tamanho da máscara aplicada na convolução. Esse processo reduz o nível de ruído das imagens porque estas representam transições abruptas de intensidade. Assim, ao atribuir o valor de intensidade para os *pixels* como a média de intensidade dos vizinhos as transições abruptas são atenuadas. A Figura 26 apresenta uma imagem suavizada utilizando um filtro passa baixa com máscara 5x5.

Figura 26 – Suavização de imagem utilizando filtro de média



(a) imagem original; (b) imagem filtrada. Fonte: Meneses e Almeida (2012)

A utilização do filtro de média é interessante em situações onde necessita-se suprimir ou atenuar informações irrelevantes em uma imagem, já que o processo tende a fazer com que as intensidades dos objetos menores que o tamanho da máscara utilizada se misturem ao fundo e os objetos maiores sejam mais fáceis de se identificar.

Para situações em que necessite a extração de objetos de pequeno tamanho em relação a imagem, como a proposta deste trabalho ao analisar as fibras presentes em uma seção transversal de concreto, a utilização de filtros que suavizam a imagem melhoraria a qualidade da mesma em situações onde a supressão de ruídos não ocasionasse a exclusão de fibras de concreto, que apresentam pequenos tamanhos em relação a imagem toda. Para tal, o tamanho da máscara precisa ser suficientemente menor que o tamanho das fibras presentes na figura, porém com dimensão suficiente para que os ruídos sejam suprimidos, denotando assim a importância da adequada resolução espacial adotada para as imagens tomadas.

O filtro de mediana faz o ordenamento crescente dos valores de intensidades dos *pixels* vizinhos a coordenada central, então é calculada a mediana e conferido esse valor ao *pixel* central na imagem filtrada. Esses filtros são amplamente utilizados no PDI (COLUMAR *et. al*, 2013) e apresentam resultados satisfatórios para remoção de ruídos sal e pimenta, que são os que apresentam pontos sobrepostos imagem, criando um efeito chuviscado (ACHARYA, RAY, 2005).

Columar *et. al* (2013), analisou o desempenho de dois métodos de restauração de imagem para diversos: um filtro mediano adaptativo e um filtro mediano melhorado. O primeiro

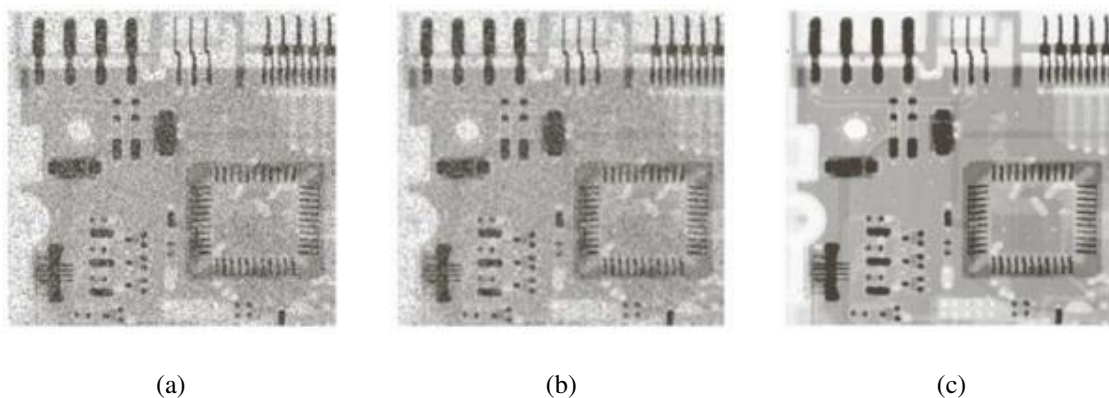
método consistiu na adaptação de um algoritmo para mudança do tamanho da janela da máscara para mediana e o segundo em um algoritmo que compara o valor da mediana para uma janela 3x3, classificando como *pixel* não corrompido quando o resultado da mediana estiver entre $P_{min} < P(x,y) < P_{max}$, $P_{min} > 0$ e $P_{max} < 255$, e como *pixel* corrompido caso contrário. Para o caso do *pixel* considerado como corrompido, se $P_{min} < P_{med} < 255$, o valor do *pixel* ($P(x,y)$) corrompido é atualizado pelo valor do P_{med} . Caso a condição não seja satisfeita o valor atribuído ao *pixel* ($P(x,y)$) é dado pela máxima diferença entre o valor de $P(x,y)$ e os *pixels* adjacentes. Os resultados apontaram que o filtro mediano adaptativo se comportou melhor para menores incidências de ruído na imagem, e o filtro mediano melhorado para imagem com maior incidência de ruídos.

A utilização do filtro de mediana apresenta melhores resultados quando comparados com o desempenho do filtro de média, isso devido a mediana ser menos sensível a *pixels* de valores extremos (ALMEIDA; MENESES, 2012), e por estabelecer para o *pixel* central um valor que é igual a um dos presentes no conjunto de *pixels*. Gupta (2011) comprovou esses resultados no desempenho para filtros de média, mediana e mediana melhorada utilizando

Para situações onde se necessita a segmentação de objetos relativamente pequenos comparados ao tamanho da imagem, esse processo pode ser mais adequado.

A Figura 27 mostra a aplicação do filtro de média e mediana na mesma imagem, com a filtragem para mediana apresentando melhores resultados.

Figura 27 - Filtros de média e mediana



(a) Imagem original; (b) aplicação de filtro de média; (c) aplicação de filtro mediana. Fonte: Gonzales e Woods (2009)

As técnicas de realce de imagens são utilizadas para destacar detalhes como bordas, regiões ou linhas. Os filtros passa-alta ao serem aplicados em uma imagem permitem que sejam passadas as intensidades de altas frequências presentes em imagens, reduzindo as demais. De acordo com Pedrini e Schwartz (2008), como as mudanças repentinas de intensidades estão relacionadas aos elementos de alta frequência, ao deixar passar componentes de alta frequência a imagem se torna mais nítida, porém com o prejuízo de realçar ruídos existentes na imagem original.

Meneses e Almeida (2012) citam que uma característica da máscara de filtros passa alta é a soma algébrica dos coeficientes igual a zero, o que implica que, ao ser aplicada em regiões homogêneas de uma imagem, a saída apresentará resultados próximos ou iguais a zero. A Figura 28 ilustra configurações de máscaras de filtros passa-alta com pesos uniformes.

Figura 28 - Máscara para filtro passa-alta

1/9	-1	-1	-1
	-1	+8	-1
	-1	-1	-1

1/25	-1	-1	-1	-1	-1
	-1	-1	-1	-1	-1
	-1	-1	+25	-1	-1
	-1	-1	-1	-1	-1
	-1	-1	-1	-1	-1

Fonte: Meneses e Almeida (2012)

A depender da máscara utilizada na aplicação de filtros passa-alta os valores resultantes para a convolução podem resultar em intensidades negativas, que são corrigidas automaticamente após a normalização dos valores para a faixa de quantização da imagem.

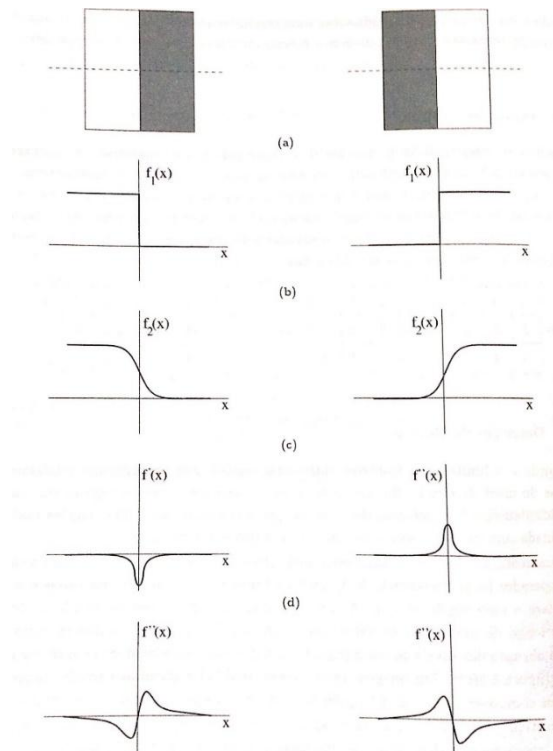
As aplicações de filtros passa-alta tendem a destacar os limites de objetos em uma imagem e atenuar áreas que apresentam intensidade de variação mais suaves. Esse processo apresenta como prejuízo o fato de ao realçar as bordas de objetos em imagens também provocar o realce de discontinuidades, como ruídos presentes na imagem. Assim, a depender da qualidade da imagem analisada o consequente realce de ruídos pode atrapalhar a segmentação de objetos de interesse, especialmente quando esses objetos apresentam tamanhos pequenos em relação a imagem toda. Para o estudo em questão, o controle da

quantidade de ruídos na imagem é fundamental, a fim de que esses não sejam tomados como objetos de interesse.

Os filtros direcionais de borda são filtros passa alta que realçam bordas na direção de implementação do filtro. As bordas em uma imagem são detectadas a partir de operações que identificam mudanças bruscas no nível de intensidade de cinza entre *pixels* (ACHARYA; RAY, 2005)

A Figura 29(a) mostra duas imagens com transições de intensidade de uma região clara para uma escura à esquerda e de uma região escura para uma região clara à direita. Abaixo é representado o gráfico que mostra a mudança brusca de intensidade no ponto de mudança de nível de cinza na imagem (Figura 29(b)), considerando um perfil de varredura horizontal unidimensional, e uma mudança de intensidade suave para a mesma situação apresentada (Figura 29(c)). Os gráficos das Figura 29(d) mostra a primeira derivada para uma varredura horizontal da intensidade de cinza da imagem da Figura 29(a). Observa-se que a primeira derivada para o ponto de transição na varredura horizontal é positiva para a mudança de intensidade da região escura para a clara e negativa para a mudança de intensidade da região clara para a escura. A derivada de segunda ordem apresenta um cruzamento em zero, indicando que há uma mudança de sinal na mudança de intensidade de cinza, ponto que determina uma borda em uma imagem. Diante disso, pode-se detectar bordas em uma imagem a partir da magnitude da primeira derivada de intensidades de cinza (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Figura 29 – Detecção de bordas em imagens



Fonte: Pedrini e Schwartz (2008)

A derivada de uma função contínua representa a taxa de mudança da função em um determinado ponto e, como uma imagem é função dos valores de intensidade para os *pixels*, a taxa de mudança de intensidade de cinza é representada pela primeira derivada. As derivadas em relação aos respectivos eixos (Equação 14) são combinadas em um cálculo vetorial para cada *pixel* obtendo assim a intensidade do gradiente para qualquer direção da imagem (Equação 15) (MENESES; ALMEIDA, 2012).

$$\Delta_1 = \frac{d}{dx} f(x, y); \quad \Delta_2 = \frac{d}{dy} f(x, y); \quad \text{Equação 14}$$

$$|\Delta| = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} \quad \text{Equação 15}$$

A magnitude de um gradiente pode ser aproximada em um ponto $f(x, y)$ podem ser implementadas por meio de máscaras 2x2 ou 3x3 (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Os

filtros mais utilizados são os de Roberts, Sobel e Prewitt, os quais são representadas pelas máscaras mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Filtros gradiente

Operador	Vertical	Horizontal
Roberts	$\begin{bmatrix} 0 & +1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Sobel	$\begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix}$
Prewitt	$\begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 \\ +1 & -2 & +1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 \\ -1 & -2 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$

Fonte: Meneses e Almeida (2012)

O Filtro de Roberts é um operador que utiliza a operação do módulo do gradiente a partir de uma operação cruzada. Esse método apresenta como prejuízo na implementação, segundo Russ (1998), a ampliação de ruídos na imagem devido as diferenças de um único *pixel* e o resultado ser deslocado pela metade de um *pixel* nas direções x e y. Gonzales e Woods (2009) complementam que o fato de não apresentarem um centro de simetria e dependendo da direção, algumas bordas podem ser mais realçadas que outras, para o mesmo tamanho de magnitude.

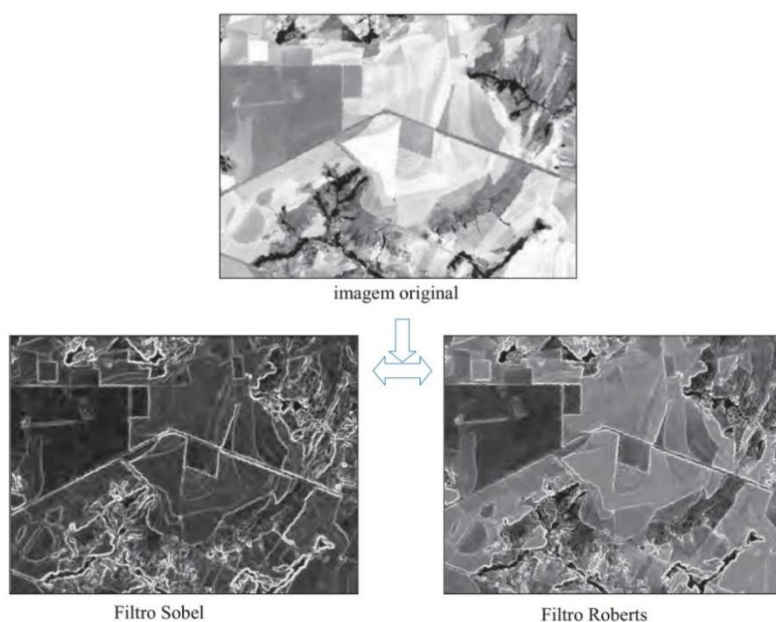
De acordo com Russ (1998), o operador Sobel uma máscara na direção vertical que detecta as variações de intensidade no sentido vertical da imagem e uma máscara na direção horizontal, que avalia as variações no sentido horizontal da imagem. A utilização deste operador consiste na aplicação das máscaras horizontais e verticais na vizinhança de cada *pixel* da imagem de entrada, sendo o resultado da aplicação dos operadores Sobel dado pelo gradiente (∇f), resultando na saída de imagens com linhas realçadas para regiões mais escuras que o fundo. Vicent e Folorunso (2009) destacam que o operador Sobel apresenta menor sensibilidade ao ruído quando comparado com o operador de Roberts devido a menor

sensibilidade ao ruído é dada devido a máscara Sobel ser do tipo 3x3 enquanto o filtro de Roberts apresenta uma máscara 2x2, proporcionando assim resultados mais precisos.

O operador Prewitt é semelhante ao operador Sobel, porém com maior ênfase aos *pixels* próximos do centro da máscara. Por ser um operador do tipo 3x3 também apresenta melhor detecção de bordas em relação ao operador de Roberts. (RULANINGTYAS; AIN, Khusnul, 2009)

As Figura 30 apresenta resultado para aplicação de operadores de Sobel e Roberts para a mesma imagem. No resultado da aplicação do operador foi adicionado uma imagem de fundo de 30% da imagem original (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Figura 30 – Aplicação de operadores de derivada



Fonte: Meneses e Almeida (2012)

É possível verificar as formas de identificação dos elementos a partir dos dois tipos de filtros aplicados. A utilização das duas máscaras do operador Sobel (vertical e horizontal) compõe um resultado que realça as linhas mais escuras que o fundo sem o realce de regiões isolados. O operador Roberts resulta em baixos valores de nível de cinza para regiões que apresentam limites suaves e altos valores de intensidade para regiões com limites bem definidos.

3.3 APLICAÇÕES DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS NA ENGENHARIA CIVIL

O processamento digital de imagens tem sido utilizado na engenharia civil, assim como em outras áreas de atuação, como base para ferramentas que permitam a simplificação de tarefas, com o objetivo de produzir resultados e levantamento de informações que anteriormente eram feitas de formas pouco simplificadas e com a necessidade de despendido maior de tempo para obtenção de resultados. O processamento digital de imagem, enquanto suporte que permite a obtenção de detalhes de cenas obtidas a partir de imagens digitalizadas, oferece meios que permitem expandir os métodos existentes para obtenção de dados, nas mais diversas áreas de atuação da engenharia civil, como na análise da micro estrutura de concretos, apoio para detecção de fissuras em pavimentos, medição de deformações estruturais, análise de concreto fresco e endurecido e análise da forma de agregados presentes em uma mistura.

Barksdale *et al.* (1991) dividiram amostras peneiradas de agregados em diferentes tamanhos de intervalo, obtiveram a projeção da área de cada agregado e mediram manualmente a altura de cada partícula. Esse procedimento tinha como objetivo a obtenção de parâmetros que permitisse o desenvolvimento de uma técnica, por meio do processamento digital de imagens, que auxiliasse na verificação dos parâmetros de forma, superfície e rugosidade de partículas de agregado. Os dados obtidos da área de cada agregado foram processados junto as alturas obtidas manualmente e analisado os parâmetros de forma das partículas.

Bonifazi *et. al* (1995) utilizou o processamento digital de imagem em uma rotina de automatização para caracterização da morfologia de grãos e a influência destes no comportamento mecânico para solos granulares. Foi feita a comparação da distribuição estatística para diferentes parâmetros obtidos no processamento digital de imagens e teste de resistência ao cisalhamento direto. O procedimento adotado pelos autores foi dado pela tomada de imagens de uma quantidade partículas de quartzo, utilizando de um microscópio estéreo Wild-Leica com amplitude pré-definida.

Antes da tomada de imagens as partículas de quartzo foram cuidadosamente dispersas em um plano de vidro. Esse procedimento facilitou o processamento digital das imagens, já que com as partículas perfeitamente separadas, situações como a união de áreas que representam

diferentes objetos na imagem e que dificultariam a segmentação dos agregados ficam fora da análise para o escopo do trabalho. Partindo dessas premissas, Bonifazi *et. al* (1995) utilizaram a limiarização e segmentação para isolar as formas que representam os agregados na imagem. A automatização do processo permitiu aumentar a quantidade de amostras analisada, melhorando a significância dos resultados obtidos.

O processo adotado pelos autores foi facilitado devido as condições de exposição bem controladas e os histogramas para as imagens obtidas apresentarem vales que separam as intensidades que representam o fundo e os agregados bem definido. Essa situação é bastante favorável para determinação do limiar de corte na binarização de imagens.

Yu *et. al* (2006) propuseram um estudo para inspeção e medição de fissuras que fornece dados para avaliação quanto à segurança de estruturas de concreto. O processo utilizado pelos autores consiste em um sistema de robô móvel que obtém imagens a partir de uma câmera capaz de obter uma resolução de 0,3 mm/pixel, a uma distância fixada e com velocidade de até 5 km/h. O sistema de processamento digital das imagens distingue as fissuras das áreas não fissuradas a partir das diferenças de intensidade para os *pixels* que fazem parte do fundo da imagem e os que fazem parte da fissura. Os autores apontaram como limitador para automação total do processo a dificuldade de obtenção de resultados precisos, para os diferentes ambientes de captação das imagens.

A situação de aquisição de imagens em condições passíveis de grande variabilidade quanto a exposições de iluminação e distância de captação podem gerar imagens de saída com padrões de contraste e níveis de ruídos que demandam diferentes formas de tratamento, para obtenção de resultados satisfatórios. Para o estudo realizado neste trabalho, procurando evitar grande variabilidade nas condições de exposição, a distância de captação de imagens e condições de iluminação serão controladas.

Yu *et. al* (2006) utilizou em seu trabalho o processo de equalização do histograma para espalhamento de intensidades dentro de uma faixa para quantização dos *pixels* definida e assim obter imagens como melhor contraste. As informações das aberturas de fissuras foram extraídas utilizando operadores Sobel e Laplacian.

Lee *et. al* (2011) desenvolveram uma técnica de processamento de imagem para detecção e análise automática da largura, comprimento, orientação e padrão de fissuras. Para tal foram tiradas fotos de vários padrões de fissuras em estruturas de concreto. O procedimento utilizado no processamento das imagens incluía inicialmente a correção para o brilho da

imagem. Esse procedimento foi necessário, segundo os autores, devido a não uniformidade do brilho para o fundo da imagem, sendo necessário uma normalização inicial. A técnica utilizada para tal normalização foi dada por uma operação do tipo $(A+B)-B-A$ entre a imagem original (A) e um elemento de estrutura circular com raio de 15 *pixels* (B).

Posterior ao controle do brilho, as imagens foram binarizadas utilizando a limiarização e efetuado processo de redução ruído com máscara de suavização 3x3. A análise automática da largura para aberturas de fissuras foi dada a partir de um algoritmo que aplica intensidade igual a zero para *pixels* do interior da fissura, deixando visível apenas os limites de abertura. Então, é aplicado uma máscara 3x3 para determinação da largura para a fissura.

O procedimento utilizado por Lee *et. al* (2011) na redução de ruídos imagem foi feito utilizando a análise de vizinhança para *pixels* com uma máscara 3x3 em um processo de convolução. Nesse procedimento foi adotado como 1 para o centro da máscara em situações onde 5 ou mais vizinhos possuíam pixel igual a 1, e em caso contrário, foi atribuído valor de 0, que representa a desabilitação daquele *pixel* considerado como ruído na imagem.

Cabe ressaltar que mascaras de suavização podem causar a consideração de objetos de interesse como sendo ruídos para a imagem, mais especificamente para situações onde a máscara utilizada no processo de convolução se apresenta maior que o objeto de interesse. Essa falha na supressão de ruídos da imagem não ocorreu no experimento de Lee *et. al* (2011), tendo em vista que a abertura de fissuras observada foi da ordem de 0,8 a 1,5 mm de largura., situação que se assemelha as dimensões que objetos que precisarão ser isolados em imagens para o estudo feito nesse trabalho.

Nabawy (2013) utilizou o processamento digital de imagens para análise de micrografias na determinação da porosidade e permeabilidade de arenitos altamente porosos. Em seu experimento foram analisadas amostras de arenito altamente porosas por meio de imagens captadas com um microscópio Leica Qwin 500. Estudo semelhante utilizando o processamento digital de imagem para determinação da porosidade e permeabilidade em material já havia sido publicado no trabalho de Berryman e Blair (1986).

O procedimento utilizado por Nabawy (2013) no processamento das imagens foi dado a partir da aplicação de uma máscara mediana 4x4 e um filtro polinomial 2x2 na imagem original. Esses filtros provocam suavização de contornos, reduzindo a quantidade de ruídos presentes na imagem. O processo sucedeu com a binarização da imagem e então a medição das dimensões dos grãos para definição de parâmetros de alongamento. A determinação da

porosidade bidimensional foi feita por meio da análise da imagem processada, onde as áreas das partículas dos grãos definidas com nível de intensidade 1 foi relacionada com a área total da foto.

Kuity e Das (2016), partiram do pressuposto de que misturas de asfalto apresentam partículas de agregado que podem variar de 19 mm a valores tão pequenos que equipamentos de obtenção de imagens comuns não seriam capazes de obter detalhes dos agregados, representados por uma gama de distribuição de tamanhos na mistura. Assim, os autores utilizaram equipamentos com diferentes capacidades de aproximação de amostras (câmera, scanner e microscópio eletrônico de varrimento (MEV)) para captação de imagens em mistura de asfalto e comparar volumes de fração calculados com as áreas dos agregados obtidos no processamento de imagens tomadas pelos 3 diferentes equipamentos de captação. As imagens foram tomadas a partir de uma distância de 20 cm entre lente da câmera e a amostra, com a finalidade de manter o mesmo tamanho para os *pixels*, e os valores dos diâmetros para os agregados foram controlados dentro de faixas, sendo: diâmetros entre 5,5 mm a 8,0 mm para as imagens obtidas com o scanner e diâmetros variando entre 1,5 e 3 para imagens obtida pelo MEV.

O processamento das imagens obtidas foi dado a partir da importação das imagens em uma plataforma, limiarização e identificação dos agregados, detecção dos limites para cada agregado e obtenção de uma estimativa para a fração de áreas. Os resultados apontaram na comparação entre fração de volume calculada e fração da área estimada resultados bem próximos, com variações significativas quando utilizadas imagens obtidas pelo MEV.

São diversas as utilizações para processamento digital de imagens na Engenharia Civil, nos mais diversos campos de atuação. O processamento de dados a partir de imagens permite a obtenção de informações acerca de uma multiplicidade de amostras, possibilita uma ampliação na análise de dados observados e uma melhoria na significância dos resultados obtidos. A análise de informações por meio da investigação de dados em imagens bidimensionais tem trazido bons resultados e ainda apresenta uma gama de possibilidades para estudo e ampliação de resultados de difícil investigação.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental para esse trabalho apresenta os materiais utilizados, traço para concreto, a metodologia para moldagem e a preparação dos corpos de prova, as condições utilizadas na tomada de imagens e as etapas utilizadas no processamento de imagens digitais.

A metodologia estabelecida teve com o objetivo identificar e determinar a quantidade de fibras presentes em corpos de prova de concreto, a partir da aquisição de imagens digitais de seções transversais em corpos de prova cilíndrico com dimensões 100mmx200mm (diâmetro x altura).

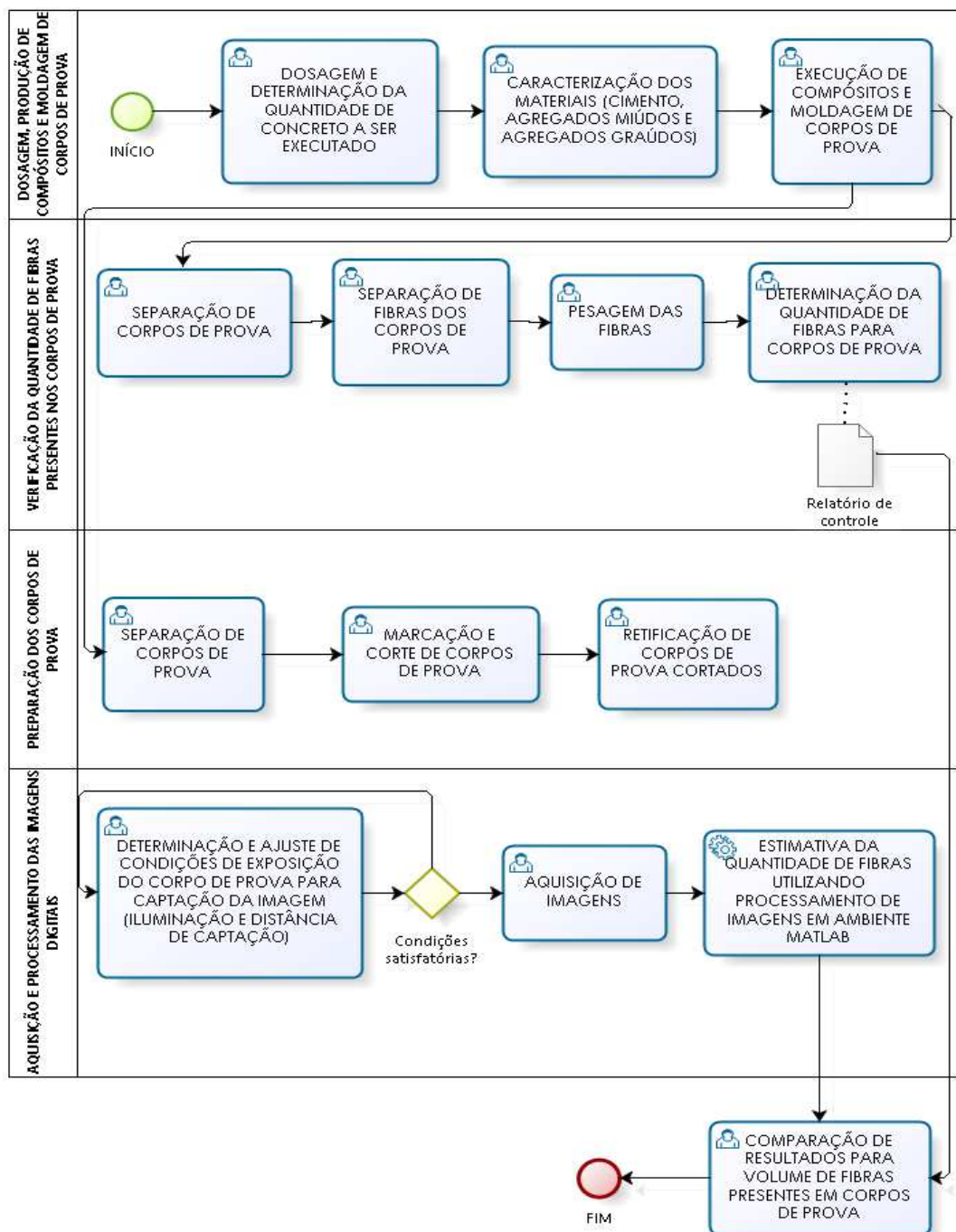
A parte experimental desse trabalho consistiu na produção de corpos de prova a partir concretos com três teores de fibras de aço incorporadas (20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³), corte transversais destes corpos de prova em alturas estabelecidas, obtenção de imagens das seções transversais sob condições de exposição controladas e, a partir destas imagens, estimar a quantidade de fibras presentes nos corpos de prova. A produção do concreto foi realizada no Laboratório de Materiais e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

A estimativa da quantidade de fibras presentes no concreto foi feita utilizando-se uma rotina de programação desenvolvida em ambiente MatLAB que faz a análise da imagem digital da seção transversal do corpo de prova, identifica e faz a segmentação das fibras presentes. A

partir da área de fibras existente na seção transversal do corpo de prova a quantidade de fibras no concreto é estimada.

O fluxograma apresentado na Figura 31 detalha todas as etapas para a metodologia realizada neste trabalho.

Figura 31 – Fluxograma para metodologia da dissertação.



Fonte: Autor

A metodologia, conforme apresentada no fluxograma da Figura 31, foi dividida em quatro etapas: dosagem, produção de compósitos e moldagem de corpos de prova; verificação da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova; preparação de corpos de prova; e aquisição e processamento das imagens digitais.

A etapa de composição dos materiais e concretagem foi dada pela definição da quantidade de concreto a ser produzido para cada teor de fibra utilizado, caracterização dos materiais, execução e concretagem dos corpos de prova. Após a moldagem, os corpos de prova foram divididos em dois grupos de iguais quantidades. O primeiro grupo foi utilizado para a etapa de verificação da quantidade de fibras presentes no concreto e o segundo grupo foi utilizado na etapa de preparação de corpos de prova.

A etapa de verificação da quantidade de fibras presentes no concreto foi feita a partir da separação das fibras nos corpos de prova recém moldados, pesagem e comparação dos pesos obtidos com a quantidade esperada para o volume de concreto dos corpos de prova.

A preparação das amostras foi dada pela marcação e corte transversal dos corpos de prova com serra policorte de disco e posterior retificação das seções transversais. A etapa de aquisição e processamento de imagens foi feita com a obtenção de imagens digitais das seções transversais retificadas dos corpos de prova, sob condições de iluminação e distância de captação da imagem controladas. As imagens obtidas foram utilizadas para estimativa da quantidade de fibras nos corpos de prova.

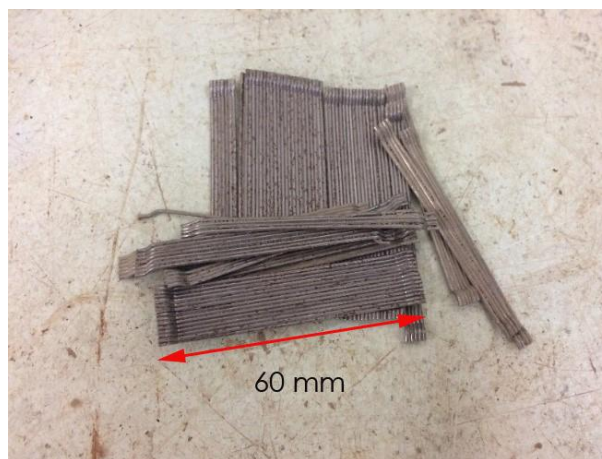
As propriedades de materiais utilizados na produção dos concretos com reforço de fibras de aço são apresentadas a seguir, incluindo a descrição da forma de avaliação das fibras presentes nos corpos de provas produzidos.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a produção dos compósitos utilizados neste trabalho foram empregados os seguintes materiais: Cimento Portland CPV ARI do fabricante Holcim, dois tipos de agregado graúdo de origem basáltica, areia fina, areia média, aditivo superplastificante Mira Flow 943 BMX e fibras de aço. O Aditivo Mira Flow 943 BMX é um aditivo a base de policarboxilato, que apresenta excelente dispersão das partículas no concreto melhorando a trabalhabilidade da mistura.

A fibra de aço utilizada foi a Dramix ® 65/60 BM (Figura 32), com as seguintes especificações, de acordo com o fabricante: comprimento de 60 mm, diâmetro de 0,90 mm, fator de forma 67, resistência à tração do arame maior que 1.000 N/m² e ancoragem nas extremidades (classificação tipo A, classe I, conforme especificações da ABNT NBR 15530:2007).

Figura 32 – Fibras utilizadas como reforço para o concreto



Fonte: Autor

As fibras apresentam-se originalmente coladas em pentes e quando misturadas ao concreto, a cola é dissolvidas garantindo uma facilitação no processo de homogeneização na mistura do compósito.

Foi realizada a verificação do controle para tolerância dimensional das fibras utilizadas, conforme plano de amostragem para aceitação de lotes e amostragem mínimas exigidas pela ABNT NBR 15530:2007. Para tal verificação foram analisadas 60 fibras de aço para controle dimensional e 200g para inspeção e constatação da ausência de defeitos de fabricação. As dimensões das amostras de fibras foram verificadas utilizando paquímetro digital com precisão de 0,01 g.

A inspeção visual não apontou defeitos de fabricação para as regiões de ancoragem das fibras utilizadas e o fator de forma ficou dentro dos limites normativos especificados. Os resultados para o controle dimensional das fibras estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Controle de tolerância dimensional para fibras

Fibras de aço (Dramix ® 65/60 BM)	Dimensão média (mm)	Variação percentual máxima especificada pela ABNT NBR 15530:2007 (%)	Variação das amostras (%)
Comprimento	59,20	± 5	1,33
Diâmetro da fibra	0,88	± 5	2,22
Fator de forma	67,27	± 5	3,49

Fonte: Autor

Os agregados miúdos utilizados foram areias lavadas de rio proveniente da região do Triângulo Mineiro do tipo média e fina. As caracterizações dos agregados foram feitas conforme prescrições da ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR NM 52:2009. Os valores das massas específicas são apresentados na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Caracterização do agregado miúdo de granulometria média

Ensaio	Valores Obtidos	Referência
Granulometria	Areia Média	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	2,598	NBR NM 52:2009

Fonte: Autor

Tabela 6 – Caracterização do agregado miúdo de granulometria fina

Ensaio	Valores Obtidos	Referência
Granulometria	Areia Fina	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	2,576	NBR NM 52:2009

Fonte: Autor

Foram utilizados dois tipos de agregados graúdos provenientes de pedra britada de rocha basalto, com dimensões máximas (D_{max}) de 12,5 mm e 19 mm, respectivamente. As caracterizações dos agregados graúdos foram feitas conforme prescrições da ABNT NBR

NM 248:2003 e ABNT NBR NM 53:2009. Os resultados determinados para massa específica são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7 – Caracterização do agregado graúdo (brita 0)

Ensaio	Valores Obtidos	Referência
Dimensão Característica Máxima	12,5	NBR NM 248:2003
Massa específica (g/cm ³)	2,877	NBR NM 53:2006

Fonte: Autor

Tabela 8 - Caracterização do agregado graúdo (brita 1)

Ensaio	Valores Obtidos	Referência
Dimensão Característica Máxima	19	NBR NM 248:2003
Massa Específica (g/cm ³)	2,969	NBR NM 53:2006

Fonte: Autor

4.2 DOSAGEM, PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a execução dos ensaios foi produzido uma matriz referência com três variações nos percentuais de volume de fibras para os corpos de prova – matriz utilizando cimento Portland com previsão de resistência característica de 40 MPa (S40) aos 28 dias, sendo: traço 1 com teor de fibra de 20 kg/m³, traço 2 com teor de fibra 30 kg/m³ e traço 3 com teor de 40 kg/m³.

A dosagem para os materiais na produção do compósito foi a estudada por Vitor (2017), a mesma utilizada pelo grupo de trabalho da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia que tem estudado a influência de fibras de aço nas propriedades de compósitos. A Tabela 9 apresenta os consumos de materiais por m³ para a produção de três compósitos com diferentes teores de fibra para concreto de série S40.

Tabela 9 – Consumo de materiais para produção do compósito

Materiais	Série S40 <i>f_c</i> 40 MPa		
	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40kg/m ³
Cimento CPV (kg/m ³)	459,27	459,27	459,27
Agregado miúdo - areia fina (kg/m ³)	257,19	257,19	257,19
Agregado miúdo - areia média (kg/m ³)	477,64	477,64	477,64
Agregado graúdo – dimensão máxima 12,5 mm (kg/m ³)	275,56	275,56	275,56
Agregado graúdo – dimensão máxima 19,5 mm (kg/m ³)	826,68	826,68	826,68
Água (kg/m ³)	183,70	183,70	183,70
Água corrigida			
Relação água/cimento	0,40	0,40	0,40
Aditivo (l/m ³)			
Teor de fibra (kg/m ³)	20	30	40

Fonte: Autor

Para a produção dos compósitos foi necessário o ajuste da quantidade de água e aditivo superplastificante adicionados à mistura, até que a mesma apresentasse trabalhabilidade desejada. A avaliação da consistência da mistura foi feita por meio da realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com a ABNT NBR NM 67: 1998.

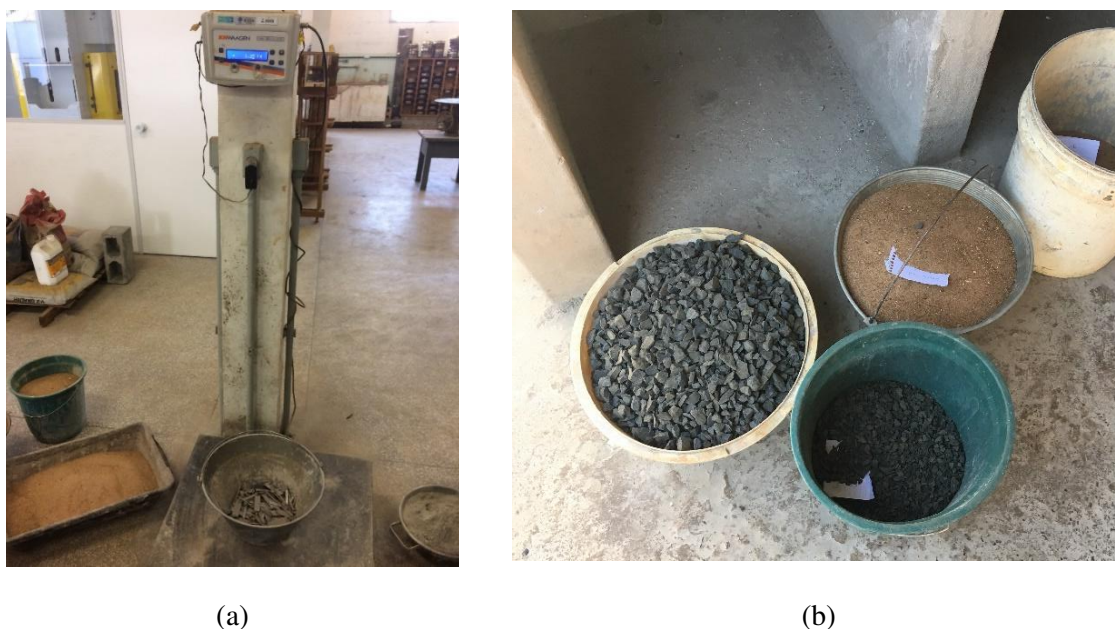
A adição do aditivo superplastificante foi dispersa em parte da água de emassamento e o fator água/cimento apresentado na Tabela 9 não considerou a quantidade de água do aditivo para os valores apresentados.

Para mistura dos concretos produzidos foi utilizado betoneira de eixo inclinado com capacidade para 400 L. A correção da quantidade de água na mistura foi feita em função da umidade dos agregados miúdos utilizados. Este procedimento foi executado conforme prescrições da ABNT NBR NM 26:2009. Para tal, foram pesadas amostras de areia em balança de precisão de 0,01 grama (*Pu*), que posteriormente foram levadas a estufa com temperatura de 100° C por 24 horas.

As produções dos compósitos com diferentes teores de fibra não foram executadas no mesmo dia, assim foi necessária a verificação da umidade dos agregados miúdos considerada na correção da quantidade de água na mistura para cada teor de fibra utilizado.

O volume de concreto para cada dosagem produzido foi de 0,141 m³. Para pesagem dos materiais utilizados na produção dos compósitos foi usada balança de precisão de 0,05 g e os materiais condicionados em recipientes de acordo com a quantidade necessária para cada dosagem, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Agregados pesados e condicionados para execução do concreto



(a) pesagem dos materiais; (b) condicionamento dos materiais Fonte: Autor

A variação no procedimento de mistura dos componentes pode causar interferências nos resultados para os compósitos. Assim, foi padronizado uma sequência para colocação dos insumos e tempo de mistura. O procedimento utilizado para mistura dos componentes para os compósitos foi o seguinte:

- imprimação da betoneira para evitar a perda de água e finos da mistura;
- colocação de agregados na betoneira;
- colocação de 30% da quantidade de água prevista no traço e mistura durante um minuto;

- adição do cimento e colocação de 50% da água restante, seguido de mistura durante mais um minuto;
- adição de aditivo diluído nos 20% restante da água, mantendo o processo de mistura por três minutos;
- adição de fibras de reforço a matriz de forma lenta para evitar a formação de “ouriços”, e mistura por três minutos adicionais para homogeneização do concreto;
- repouso do concreto por 2 minutos, totalizando oito minutos de mistura

Após a produção do compósito, foi verificada a consistência do concreto por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme especificações da ABNT NBR NM 67:1998. A Figura 34 mostra a verificação da consistência para o concreto.

Figura 34 – Verificação da consistência pelo abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor

Os corpos de prova moldados foram cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, seguindo as prescrições da ABNT NBR 5738:2015. Antes da moldagem dos corpos de prova, os moldes e suas bases foram revestidos internamente com uma camada de óleo diesel para facilitar o processo de desmoldagem.

No total foram produzidos 192 corpos de prova cilíndricos, sendo 64 corpos de prova para cada teor de fibra incorporada ao concreto. Destes, para cada teor de fibra, 32 foram utilizados na determinação da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova – etapa de ‘verificação da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova’ –, e 32 utilizados para

estimativa da quantidade de fibras presentes utilizando o PDI – etapa de ‘preparação de corpos de prova’ e etapa de ‘aquisição e processamento das imagens digitais’ –. A Figura 35 mostra o processo para moldagem (a) e os corpos de prova moldados (b).

Figura 35 – Moldagem de corpos de prova para verificação da quantidade de fibras



(a) moldagem de corpo de prova; (b) corpos de prova moldados. Fonte: Autor

4.3 VERIFICAÇÃO DA QUANTIDADE DE FIBRAS PRESENTES NOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova moldados para cada traço foram numerados de 1 a 64, conforme a sequência de moldagem. Desse total 32 foram utilizados para verificação da quantidade de fibras presentes e 32 foram utilizados para estimativa do teor de fibras utilizando o PDI.

Logo após o instante de moldagem, 32 corpos de prova foram tomados aleatoriamente em relação a sequência de moldagem, a fim de evitar possíveis interferências referentes à variabilidade na retirada de concreto da parte superior e do fundo da betoneira. As fibras então foram separadas por meio de lavagem em água corrente. O procedimento para separação das fibras do compósito foi dado a partir da seguinte sequência:

- corpo de prova ainda no estado fresco foi desmoldado e colocado em uma peneira ;
- utilizando água corrente foi separado o agregado miúdo (passantes na peneira) dos agregados graúdos e fibras ;

- com auxílio um ímã as fibras presentes nos corpos de prova foram separadas.

A Figura 36 mostra a separação de fibras para corpos de prova. As fibras separadas para cada corpo de prova foram secas em ambiente e posteriormente pesadas para verificação quantitativa das fibras presentes em corpos de prova. A separação das fibras gerou como saída um relatório de controle com os valores médios e desvio padrão para distribuição de fibras nos corpos de prova.

Figura 36 – Processo de separação de fibras para corpos de prova



(a)

(b)



(c)

(a) separação de fibras utilizando ímã; (b) lavagem de fibras separadas; (c) fibras separadas após pesagem. Fonte: Autor

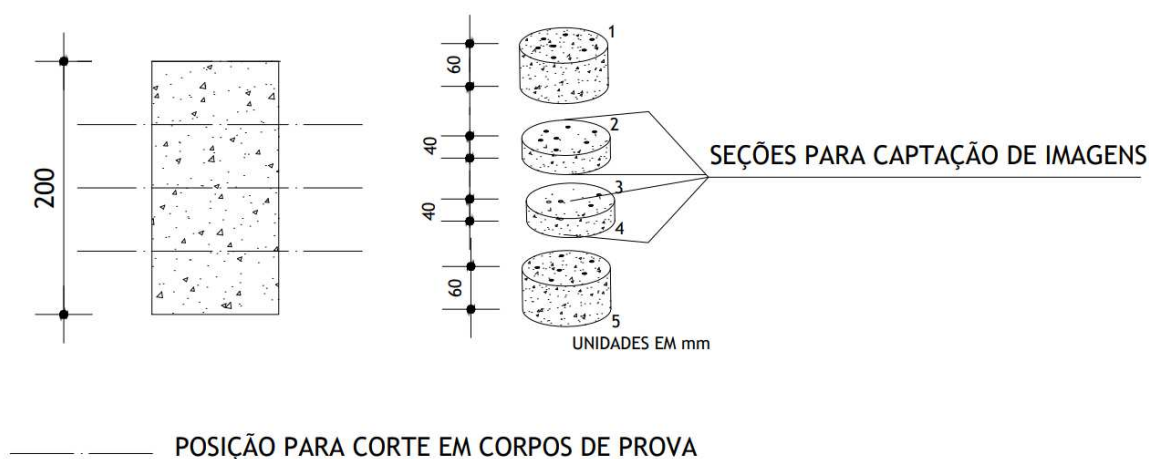
4.4 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova que não foram utilizados na verificação da quantidade de fibras foram mantidos em superfície livre de vibrações e ações que pudessem perturbar o concreto durante 72 horas. Então, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em solução saturada de hidróxido de cálcio até a idade de sete dias.

Com sete dias de idade os corpos de prova foram cortados transversalmente em três pontos. As posições de corte foram definidas nas distâncias de 60 mm e 140 mm em relação ao topo do corpo de prova. Esse procedimento foi adotado devido ao efeito de forma para o topo e fundo, situação em que as fibras tendem a apresentar maior concentração próximas ao fundo e ao topo do corpo de prova.

Foram consideradas as seções transversais 2, 3 e 4 do o corpo de prova para obtenção de imagens a serem processadas. A Figura 37 mostra o esquema de corte para os corpos de prova.

Figura 37 – Esquema de corte para corpos de prova.



Fonte: Autor

Para o corte transversal primeiramente foram marcadas as posições de corte em relação à altura do corpo de prova e então os cortes foram feitos utilizando uma serra policorte de disco, conforme ilustrado nas Figura 38(a) e Figura 38(b).

Figura 38 – Serra policorte e corpo de prova posicionado para corte transversal



(a)

(b)

(a) serra policorte de disco; (b) corpo de prova marcado e posicionado para corte. Fonte: Autor

O procedimento para o corte transversal dos corpos de prova mantém a superfície plana, porém as seções transversais de corte ainda foram regularizadas por meio da retificação das seções de corte. A retificação das seções transversais corrige possíveis imperfeições provocadas pela serra policorte que podem dificultar o processo de tomada de imagens. A Figura 39 (a) mostra o corpo de prova retificado.

Figura 39 – Retificação para seções transversais dos corpos de prova.



Fonte: Autor

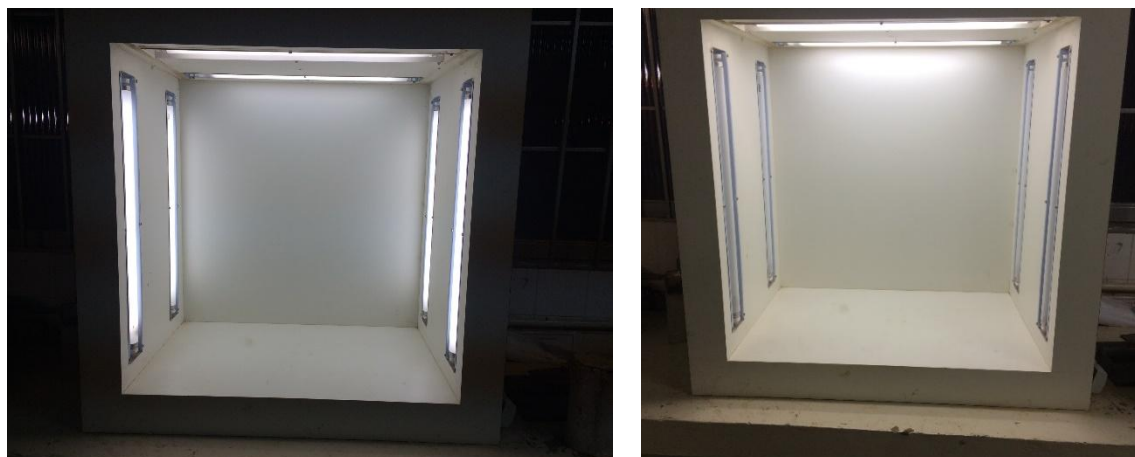
Os corpos de prova cortados transversalmente e retificados foram utilizados para aquisição de imagens e estimativa da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova.

4.5 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS DIGITAIS

A aquisição de imagens para processamento foi feita utilizando uma câmera digital de celular com as seguintes especificações: resolução de 12 *megapixels*, zoom digital de cinco vezes, lente de 5 elementos com abertura $f/2.2$, entrega de *pixels* de 1,22 μm , estabilização automática de imagem, redutor de ruídos, controle de exposição e sensor de retroiluminação.

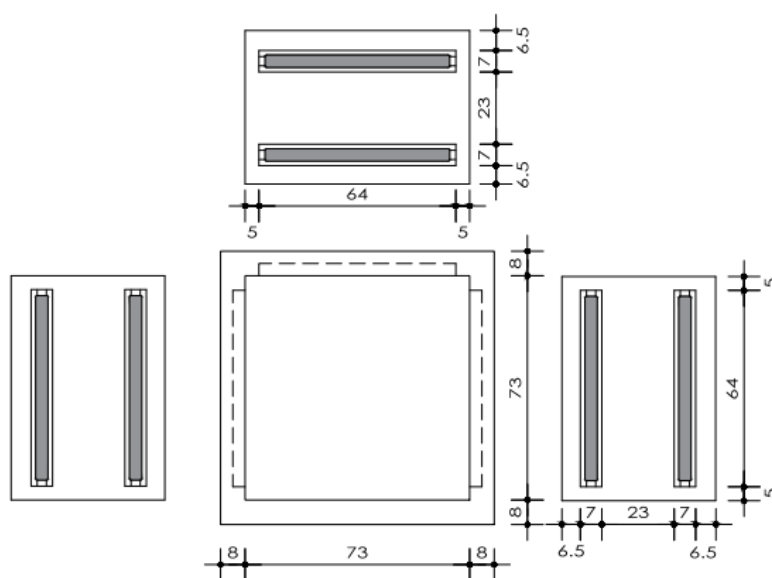
As tomadas de imagens foram feitas com condições de exposição controlada para os corpos de prova. Para isso foi utilizada uma caixa em MDF na cor branca, com dimensões internas de 73mm x 73 mm x 50 mm (largura x altura x profundidade) e iluminação interna nas laterais e topo. A iluminação interna da caixa é feita por meio de duas lâmpadas fluorescentes de 60 cm, com 20W de potência cada uma, em cada lado da caixa (laterais e topo). A Figura 39 mostra a caixa utilizada para controle de exposição na obtenção de imagens dos corpos de prova com suas respectivas dimensões internas e duas configurações para iluminação: iluminação nas laterais e parte superior (Figura 40 (a)); com iluminação na parte superior (Figura 40 (b)); e dimensões internas da caixa Figura 40 (c).

Figura 40 – Caixa para controle de exposição na captação de imagens



(a)

(b)



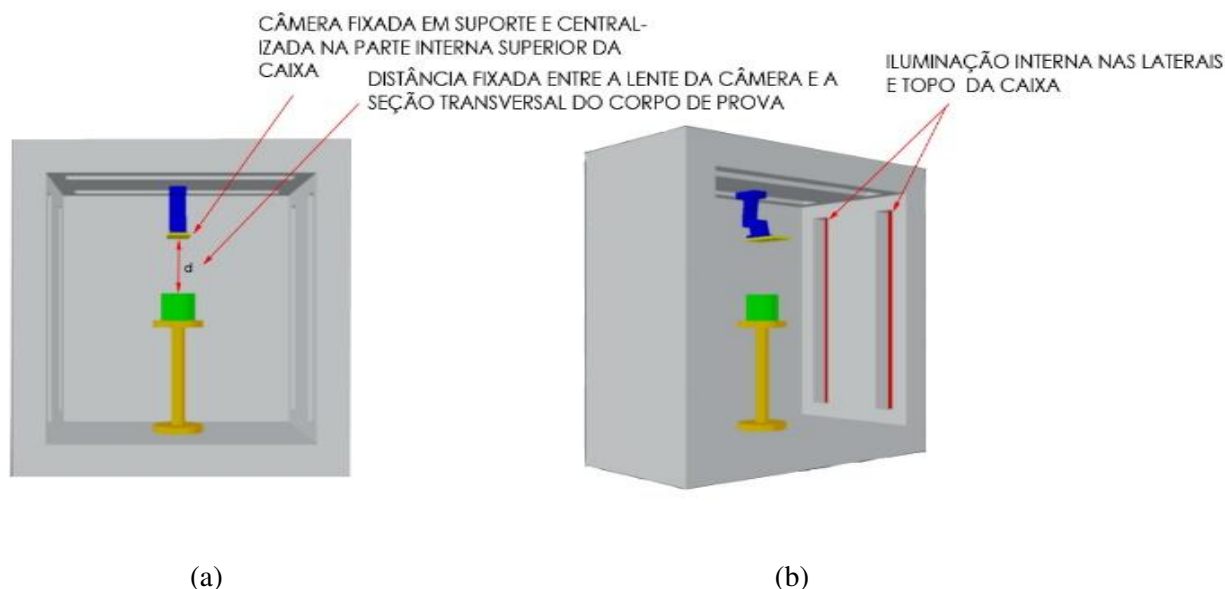
(c)

(a) iluminação nas laterais e parte superior; (b) iluminação superior; (c) vista frontal e dimensões internas da caixa. Fonte: Autor

A condição de exposição para os corpos de prova na aquisição das imagens foi definida a partir de testes para verificação da influência na qualidade das imagens com a variação das distâncias de posicionamento da câmera em relação ao corpo de prova e variação das condições de iluminação. Esses testes tiveram como objetivo definir a configuração para tomada de imagem que resultaria em melhores condições na análise e identificação de objetos nas cenas das imagens.

A Figura 41 mostra um esquema com dimensões e posicionamento das lâmpadas internas para a caixa.

Figura 41 – Esquema para aquisição de imagens em corpos de prova



(a) esquema para aquisição de imagens; (b) iluminação interna nas laterais e topo da caixa.

Fonte: Autor

Neste ponto da análise a forma de aquisição, a distância de foco e a condição de iluminação influenciam diretamente na resposta e na clareza com que se apresentam os objetos dentro da cena. A depender das condições de exposição dos corpos de prova as imagens obtidas podem apresentar diferentes condições de ruídos, prejudicando o processo de segmentação da imagem.

Foram feitos testes com a aplicação de reagentes na seção transversal de corpos de prova. Este procedimento procurou criar maior contraste entre as fibras da seção transversal e a matriz do concreto. Foram testados os reagentes fenolftaleína (concentração 0,1%), vermelho de metila (concentração de 0,1%), verde de bromocresol (concentração de 0,1%), alaranjado de metila (concentração de 0,5%) e púrpura de metila (concentração de 0,1%) e uma situação em que a seção dos corpos de prova foram molhadas.

A partir da análise visual, a situação em que a seção transversal dos corpos de prova foi apenas molhada apresentou melhor contraste entre a matriz e as fibras, conforme apresentado

na Figura 42. Assim, antes da obtenção das imagens foi tomado o cuidado de molhar a seção transversal dos corpos de prova.

Figura 42 – Diferentes reagentes aplicados na seção transversal de corpos de prova



(a)



(b)



(c)

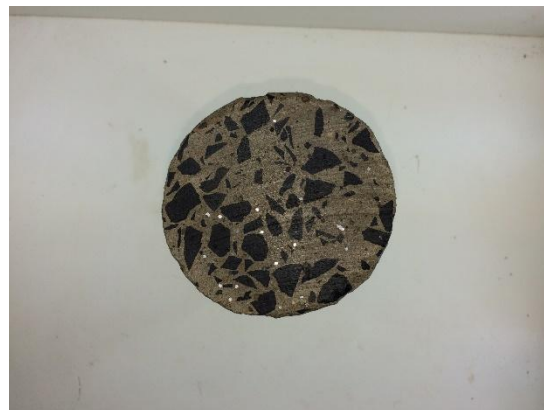
(a) reagentes testados para melhoria do contraste entre a matriz do compósito e as fibras na seção transversal; (b) reagente verde de bromocresol na seção transversal de um corpo de prova; (c) seção transversal do corpo de prova molhada. Fonte: Autor

Foram consideradas situações para imagens obtidas com a lente da câmera posicionada a três distâncias diferentes (d): 10, 20 e 30 cm do objeto analisado, sem a utilização de *zoom* da câmera na tomada de imagens. A Figura 43 mostra as imagens obtidas a partir das três situações de controle na tomada de imagens.

Figura 43 – Diferentes distâncias para posicionamento da lente da câmera em relação ao corpo de prova



(a)



(b)



(c)

- (a) lente da câmera posicionada a uma distância de 30 cm da seção transversal do corpo de prova;
(b) lente da câmera posicionada a uma distância de 20 cm da seção transversal do corpo de prova;
(c) lente da câmera posicionada a uma distância de 10 cm da seção transversal do corpo de prova.

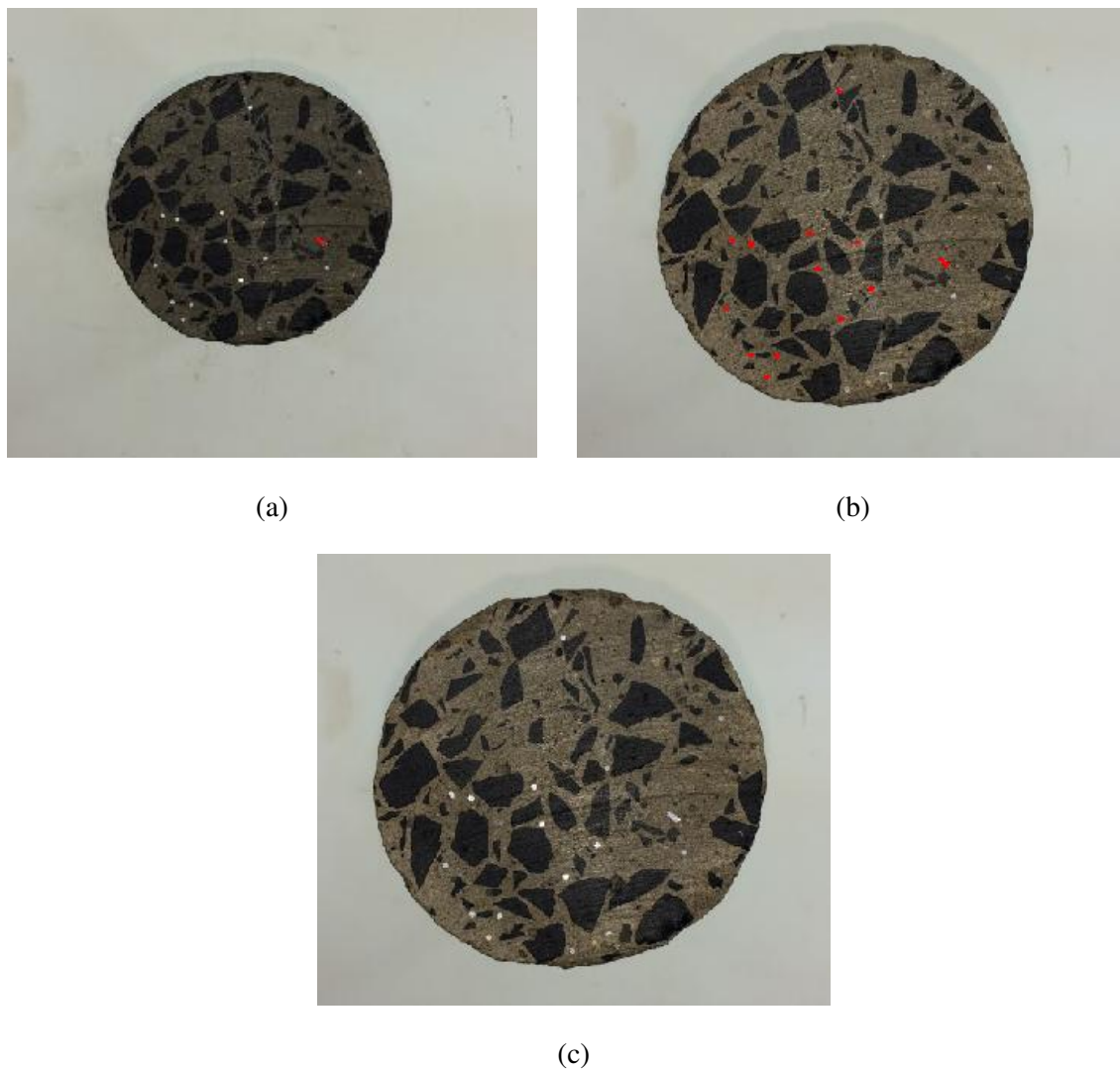
Fonte: Autor.

Os resultados para captação de imagens em diferentes distâncias entre a lente da câmera e a seção transversal apresentaram melhores resultados para as condições em que a lente foi posicionada a 20 cm e a 30 cm da seção transversal do corpo de prova. Para a situação em que a lente da câmera foi posicionada a 10 cm da seção transversal parte do corpo de prova ficou fora do enquadramento da imagem, inviabilizando essa configuração para obtenção das imagens.

A segmentação das imagens obtidas a 20 cm e 30 cm teve como objetivo verificar qual a distância de captação apresentaria melhor capacidade de detecção das fibras presentes nas

seções transversais. A Figura 44 apresenta os resultados para a segmentação utilizando o PDI para as imagens captadas a 30 e 20 cm da seção transversal.

Figura 44 – Segmentação para diferentes distâncias de captação de imagem

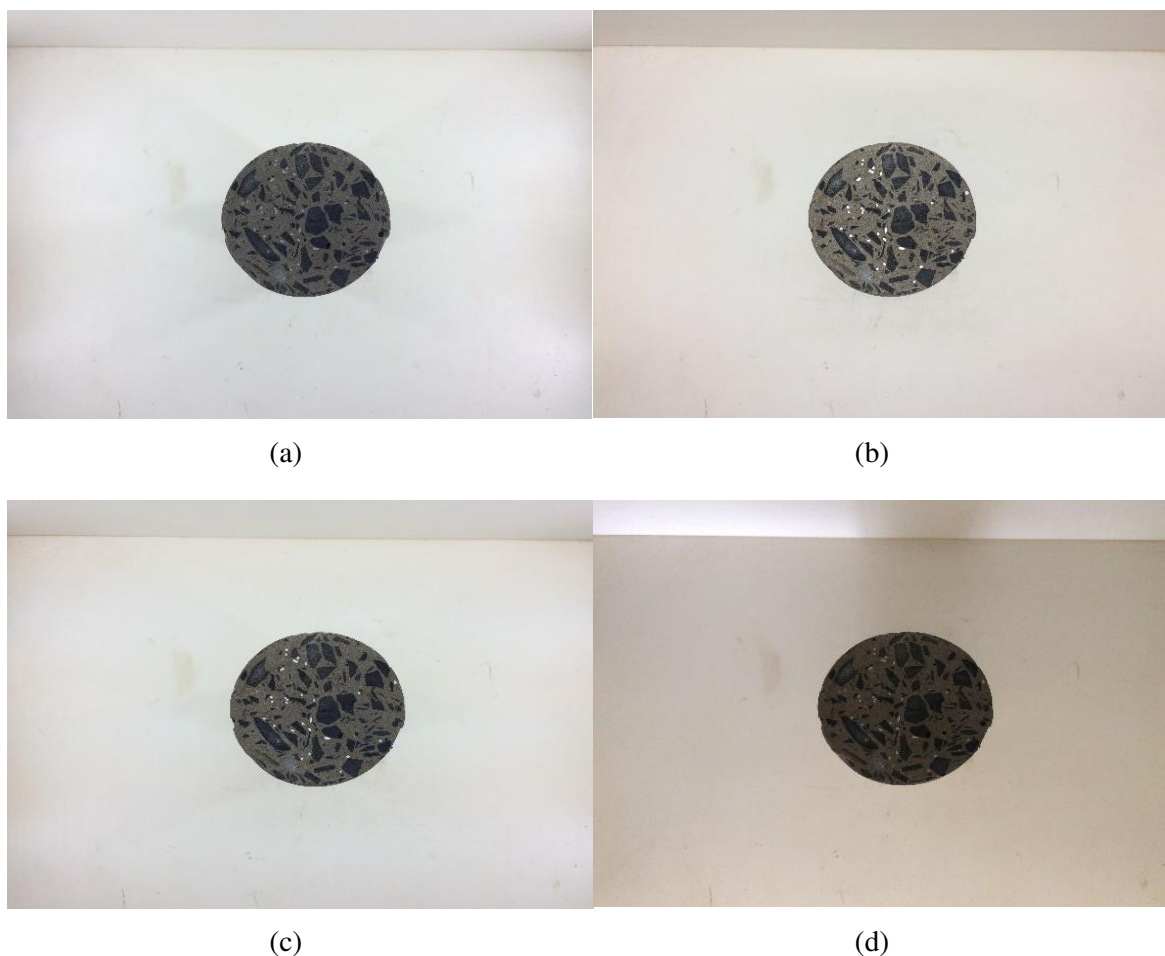


(a) segmentação para imagem captada com lente a 20 cm do corpo de prova; (b) segmentação para imagem captada com lente a 30 cm do corpo de prova; (c) imagem original. Fonte: Autor.

A análise para segmentação a partir das diferentes distâncias de captação para imagem apresentou melhor resultado para a distância de 20 cm entre a lente da câmera e a seção transversal, ou seja, para a imagem tomada com lente da câmera posicionada a 20 cm do corpo de prova o processamento de imagens conseguiu captar uma maior quantidade de fibras na seção.

Uma segunda análise de desempenho no resultado do processamento foi considerada em função da posição de incidência de iluminação direta. Para essa análise foram consideradas quatro configurações distintas: corpo de prova centrado na caixa e iluminação direta posicionada a direita e a esquerda a uma distância de 36,5 centímetros para cada lado (Figura 45(a) e Figura 46(a)); corpo de prova centrado e iluminação de cima, a uma distância de 40 centímetros da face do corpo de prova (Figura 45(b) e Figura 46(b)); corpo de prova centrado na caixa com iluminação incidindo tanto na lateral quanto na parte superior (Figura 45(c) e Figura 46(c)); e corpo de prova centrado na caixa sem utilização de iluminação direta (Figura 45(d) e Figura 46(d)). Essas configurações foram utilizadas com e sem o emprego de *flash* da câmera que fez captação das imagens. Detalhes deste processo são apresentados na Figura 45.

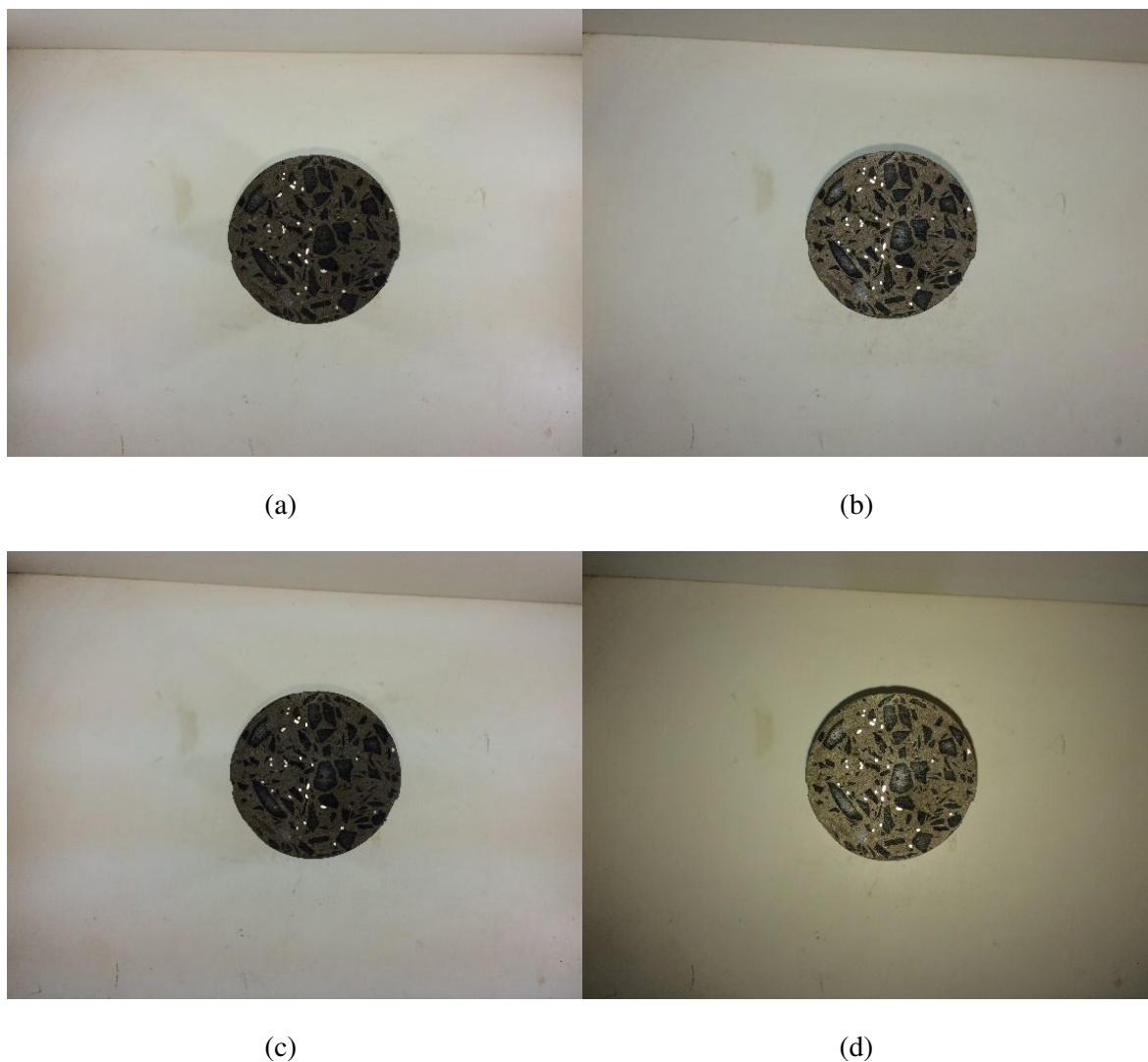
Figura 45 – Diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens sem a utilização de flash.



(a) imagem captada com iluminação lateral, sem a utilização de *flash*; (b) imagem captada com iluminação de cima, sem a utilização de *flash*; (c) imagem captada com iluminação lateral e de

cima, sem a utilização de *flash*; (d) imagem captada sem a utilização de iluminação artificial, obtida sem a utilização de *flash* da câmera. Fonte: Autor.

Figura 46 – Diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens com a utilização de flash.

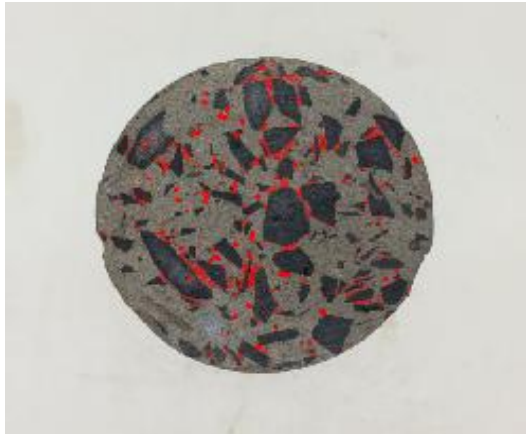


(a) imagem captada com iluminação lateral, com a utilização de *flash*; (b) imagem captada com iluminação de cima, com a utilização de *flash*; (c) imagem captada com iluminação lateral e de cima, com a utilização de *flash*; (d) imagem captada sem a utilização de iluminação artificial, obtida com a utilização de *flash* da câmera. Fonte: Autor.

As melhores condições apresentadas na captação de imagem foram dadas para iluminação de cima (Figura 45 (b) e Figura 46(b)) e iluminação nas laterais e de cima (Figura 45 (c) e Figura 46 (c)), na obtenção de imagens com e sem utilização de *flash* da câmera, ou seja, essas condições de iluminação apresentaram melhores respostas para contrastes entre a matriz do concreto e as fibras na seção transversal do corpo de prova.

A Figura 47 ilustra os resultados para a segmentação no PDI com as configurações de iluminação de cima e iluminação nas laterais e de cima, com e sem a utilização de *flash* da câmera e limiar de corte definido como 0,30.

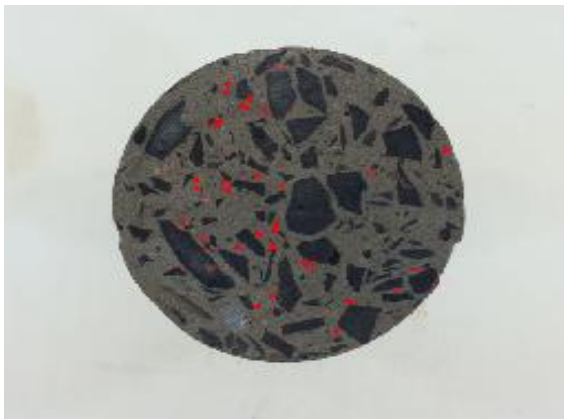
Figura 47 – Segmentação para diferentes condições de iluminação na aquisição das imagens com a utilização de flash.



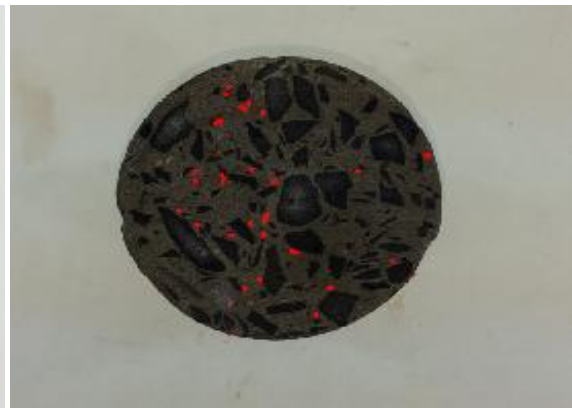
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

(a) segmentação para imagem captada com iluminação de cima, sem a utilização de *flash*; (b) segmentação para imagem captada com iluminação de cima com a utilização de *flash*; (c) segmentação para imagem captada com iluminação na lateral e acima do corpo de prova, sem a utilização de *flash*; (d)) segmentação para imagem captada com iluminação na lateral e acima do corpo de prova, com a utilização de *flash*; (e) imagem original. Fonte: Autor.

Os resultados para análise da segmentação no PDI apontaram melhores resultados na identificação e segmentação para as condições de iluminações com iluminação na lateral e cima, com e sem a utilização de *flash* (Figura 47 (c) e Figura 47 (d)), apresentando maior nitidez para segmentação na condição da Figura 47 (d).

A Tabela 10 apresenta a melhor situação obtida para captação de imagens das seções transversais.

Tabela 10 – Condições utilizadas para obtenção de imagens de seções transversais

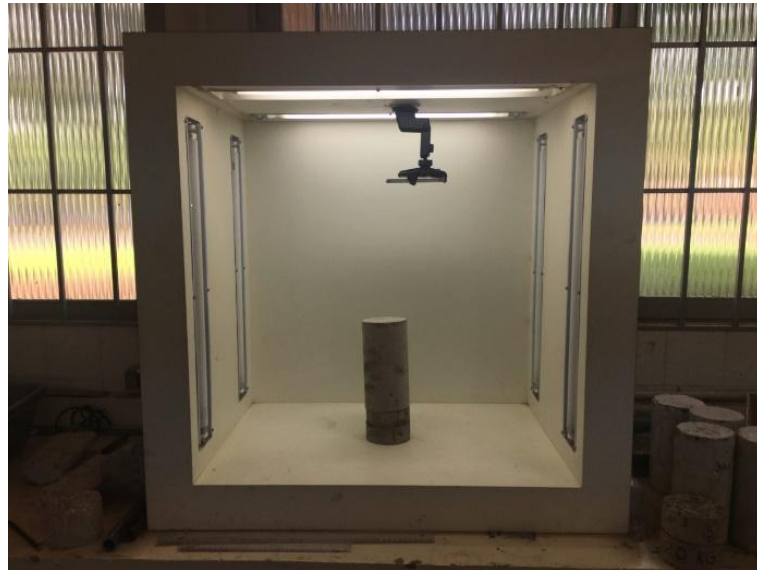
Condição para obtenção de imagens	
Melhoria do contraste entre matriz do concreto e fibras:	Seção transversal do corpo de prova molhada
Distância entre lente da câmera e seção transversal do corpo de prova:	20 cm
Condição de iluminação:	Iluminação lateral e cima
Utilização de flash:	sim

Fonte: Autor

Foram obtidas imagens de 32 corpos de prova para cada dosagem executada, sendo que para cada corpo de prova foram obtidas três imagens, referentes as seções transversais 2, 3 e 4, conforme seções identificadas na Figura 37.

As imagens foram obtidas com os corpos de prova posicionados no centro da caixa de controle de exposição. O celular utilizado para captação das imagens foi fixado em um suporte que garante a estabilidade no momento da tomada da imagem. Imagens foram captadas a cada 10 segundos, sendo substituído o corpo de prova por outro a cada obtenção de imagem. A Figura 48 mostra o corpo de prova posicionado e o suporte para captação da imagem da seção transversal.

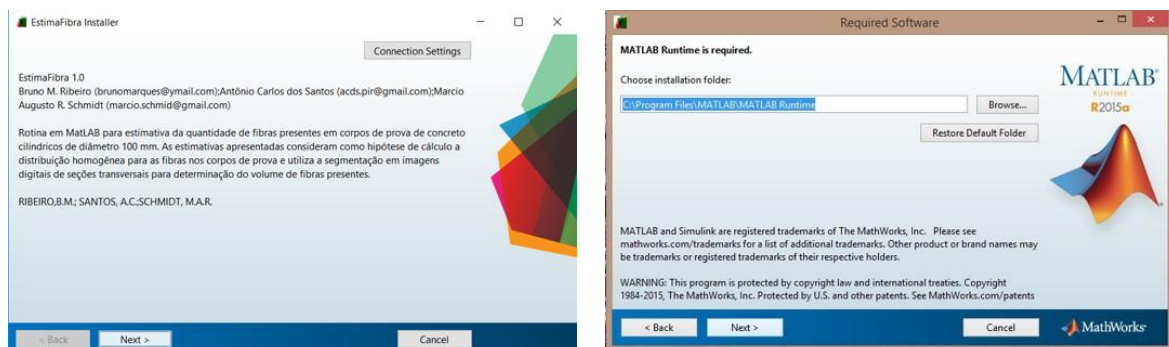
Figura 48 – Aparato para obtenção de imagens da seção transversal



Fonte: Autor

Após a obtenção das imagens, as mesmas foram analisadas utilizando uma programação em ambiente MatLab. A programação foi desenvolvida utilizando a ferramenta GUI (*Graphics User Interface*), que permite que os usuários lancem os dados de forma interativa, além de não ser necessário ter o MatLAB instalado no computador. A Figura 49 mostra a tela de instalação do programa. Caso o usuário não tenha o MatLAB instalado no computador será necessário que seja instalado um módulo complementar para que consiga utilizar o aplicativo.

Figura 49 – Tela de instalação do programa



Fonte: Autor

A interface do programa para estimativa do volume de fibras em corpos cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm é apresentada na Figura 50.

Figura 50 – Interface gráfica da rotina para estimativa da quantidade de fibras em compósitos.



Fonte: Autor.

O procedimento para estimativa da quantidade de fibras no corpo de prova utilizando a rotina seguiu a seguinte sequência:

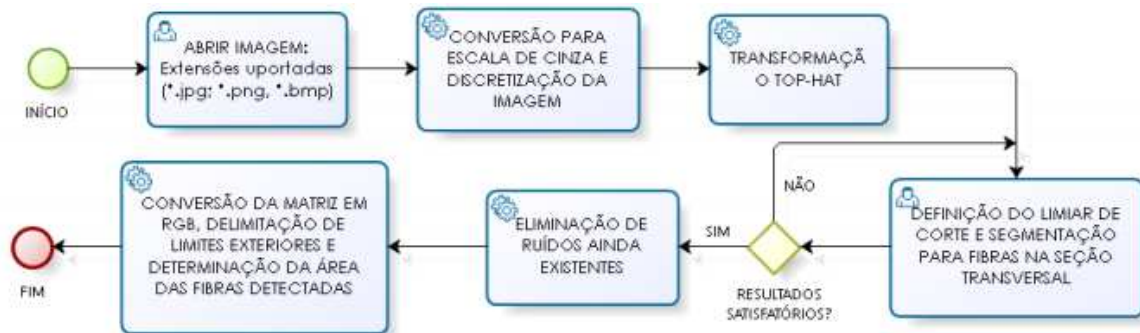
- seleção das imagens referentes as três seções transversais para cada corpo de prova utilizando o botão “Buscar”;
- preenchimento da altura do corpo de prova na caixa de edição;
- determinação do limiar (*threshold*) utilizando a barra deslizante;
- estimativa do volume de fibras utilizando o botão “Processar”.

A determinação do limiar (*threshold*) influencia na capacidade da rotina de conseguir captar as fibras presentes na seção transversal. O valor do limiar pode variar de zero a um, sendo que quanto menor o valor definido para o limiar, maior a sensibilidade na captação de elementos presentes na imagem analisada. Assim, a barra de determinação do limiar deve ser posicionada em um valor que seja capaz de detectar todas as fibras presentes na seção transversal do corpo de prova.

O botão “Original” mostra a imagem carregada referente a seção transversal selecionada a caixa de seleção “Seção”. A determinação do limiar é dada de forma interativa, sendo atualizada à imagem processada medida que a barra deslizante é movimentada.

O fluxograma para os processos utilizados na rotina em ambiente MatLAB estão apresentados na Figura 51

Figura 51 – Fluxograma de processos para rotina em MatLAB

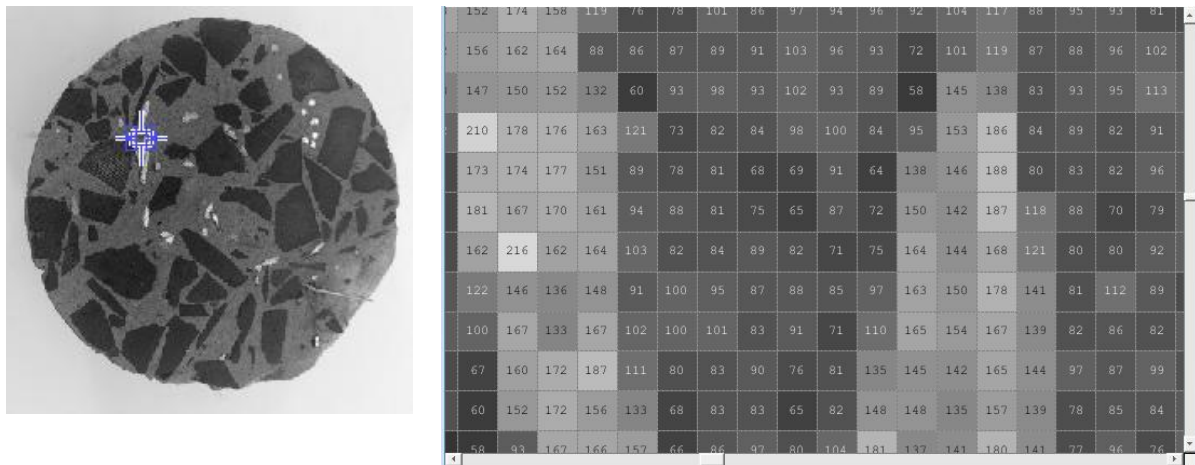


Fonte: Autor

A sequência de tarefas executadas pela programação em ambiente MatLab foi dada inicialmente pela leitura e transformação da imagem colorida padrão RGB em uma imagem monocromática. Esse processo, denominado resolução radiométrica da imagem, é dado pela discretização de amplitude para cada *pixel* unitário, em que para cada coordenada da imagem é atribuído um valor inteiro dado pela intensidade do nível de cinza naquele ponto, obtendo assim valores para cada coordenada da imagem dado por uma função que a representa. A Figura 52 ilustra a discretização para a seção transversal de um dos corpos de prova analisados.

O processo de discretização atribui a cada pixel da imagem um valor referente a intensidade para nível de cinza naquele ponto, dentro do intervalo de quantização possível para a imagem.

Figura 52 – Processo de discretização da imagem para seção transversal de corpo de prova

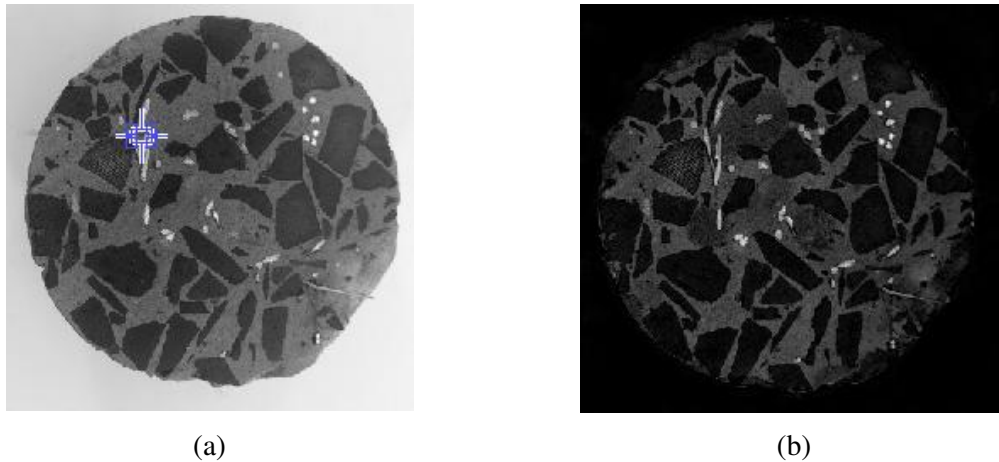


Fonte: Autor

Posteriormente ao processo de discretização foi feito o realce das bordas por meio de operações morfológicas utilizando o procedimento *top-hat*¹. Esse procedimento enfatiza os detalhes de uma imagem na presença de sombreamento utilizando a diferença entre uma imagem e sua abertura por um elemento estruturante ($T_{hat} = f - (f \circ b)$). A abertura de f por b , sendo b um elemento estruturante circular, é dada pelo deslocamento do elemento b no domínio espacial da imagem, com o valor resultante da operação de abertura dado pelo ponto máximo alcançado por qualquer ponto do elemento estruturante na imagem.

O processo de abertura de uma imagem pode ser visto como um método que provoca suavização de traços e redução de ruídos, assim o elemento estruturante utilizado no processo de abertura da imagem foi um elemento circular de diâmetro igual a 15 pixels. Esse tamanho foi definido em função do diâmetro da fibra utilizada para o compósito, tendo em vista que a adoção de um elemento estrutural maior que o tamanho da fibra excluiria os componentes da imagem menores que o elemento estruturante. A Figura 53 ilustra a seção transversal após o processo *top-hat*.

top-hat: procedimento que suaviza a imagem através de um procedimento que segmenta objetos presentes em uma imagem que diferem em nível de cinza do fundo. Assumindo uma imagem com pixels discretizados por uma escala de cinza A e um elemento estruturante B, o residuo da imagem resultante da abertura comparada com a imagem original, dada por $A - (A \circ B)$, constitui a operação *top-hat*. Essa ferramenta é utilizada de forma eficiente para extração de objetos luminosos em relação ao fundo.

Figura 53 – Realce de objetos utilizando procedimento *top-hat*.

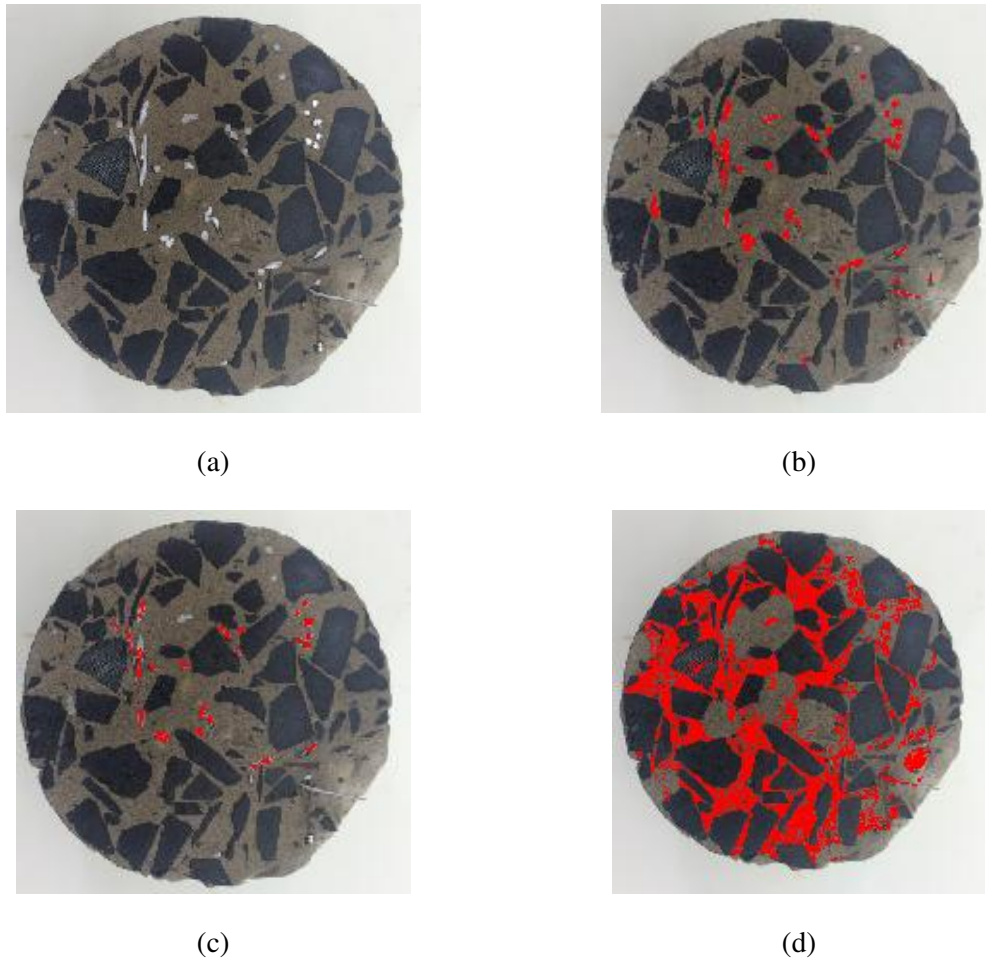
(a) imagem após discretização e antes do procedimento *top-hat*; (b) imagem após procedimento *top-hat*. Fonte: Autor.

Posteriormente ao processamento *top-hat* os ruídos ainda existentes na imagem foram eliminados e foi feita a limiarização para a imagem, processo que separa os *pixels* pertencente ao fundo da imagem dos *pixels* pertencentes as fibras. Esse processo transforma a intensidade de coordenada de cada *pixel* para o valor zero ou um, sendo zero exibido como preto e um como branco na saída. A transformação da intensidade do nível de cinza apresentado na imagem monocromática para um valor binário é feita a partir de um limite de corte, onde todos os *pixels* da imagem de entrada que possuem radiância maior que o limite de corte atribuído são atribuídos valor igual a 1 e os demais igual a 0.

O valor para o limiar de corte foi definido manualmente, devido a pequenas variações para condição de exposição. A rotina desenvolvida permitiu avaliar para todos os valores de limiares possíveis a resposta para segmentação das fibras na seção transversal. O processo de segmentação para as fibras no compósito é dado pelo desenho do contorno das fibras e cálculo das áreas que representam *pixels* pertencentes às fibras na imagem.

A Figura 54 apresenta a imagem original da seção transversal do corpo de prova e diferentes resultados para segmentação a partir da variação do limiar de corte.

Figura 54- Processo de limiarização.



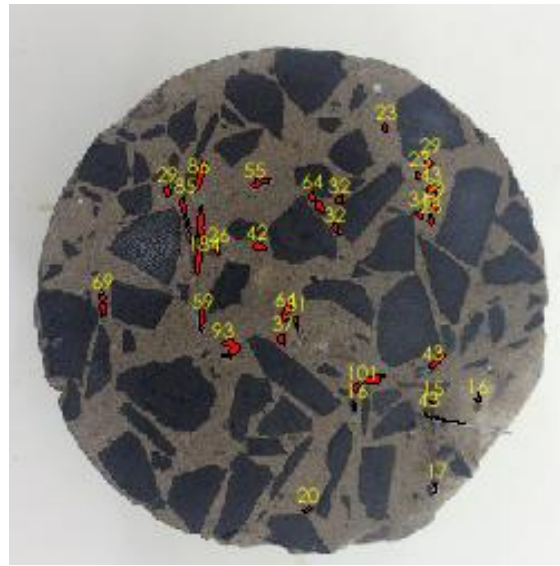
- (a) imagem original da seção transversal para corpo de prova; (b) segmentação com captação de fibras presentes na seção transversal com limiar fixado em 0.30; (c) segmentação com captação de fibras presentes na seção transversal com limiar fixado em 0.40; (d) segmentação para captação de fibras na seção transversal com limiar fixado em 0.40.

Fonte: Autor.

Por fim a imagem foi determinada a área para cada objeto detectado na imagem. A Figura 55 mostra as áreas em px^2 para cada fibra detectada na seção transversal.

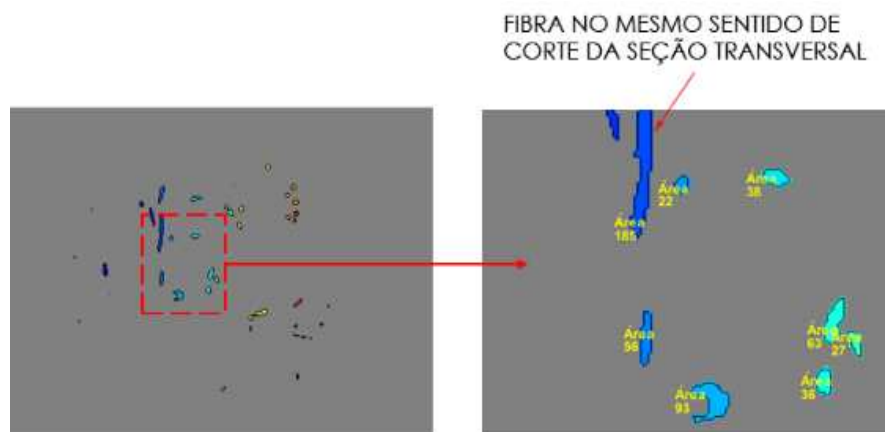
No processo de corte das seções transversais dos corpos de prova as fibras presentes na seção podem se apresentar de topo ou no mesmo sentido de corte da seção transversal. Para a situação em que as fibras se encontram no mesmo sentido de corte da seção transversal, o valor da área dessa fibra foi considerada como a área de uma fibra de topo. Esse processo é ilustrado na Figura 56.

Figura 55 – Áreas determinadas para fibras presentes na seção transversal



Fonte: Autor.

Figura 56 – Posição das fibras na seção transversal de corte.

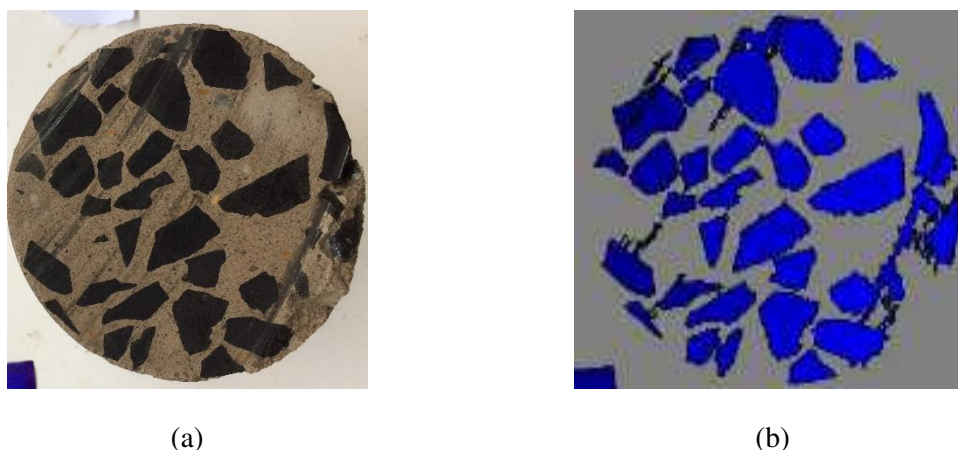


Fonte: Autor.

A validação do processo de determinação das áreas para objetos segmentados em uma imagem foi dada a partir da obtenção de imagens digitais para seções transversais de corpos de prova de concreto, seguidos pela identificação e comparação de valores para componentes de área obtidos por meio da rotina desenvolvida ambiente MatLAB e valores obtidos utilizando o AutoCAD. A Figura 57(a) ilustra a imagem original da seção transversal para um corpo de prova de concreto e áreas mapeadas para agregados presentes no concreto (Figura 57(b)).

A verificação da eficiência no processo de identificação de componentes de área de agregados na seção transversal de corpos de prova de concreto foi feita utilizando o teste-t na verificação da significância para a variância das medidas de áreas obtidas para os agregados identificados.

Figura 57- Validação para o processo de mapeamento de áreas de agregados em corpos de prova de concreto



(a) imagem do corpo de prova original; (b) segmentação de agregados presentes na seção transversal. Fonte: Autor.

A Tabela 11 apresenta as áreas obtidas para os componentes identificados na seção transversal da Figura 57 contendo 27 agregados graúdos. A coluna “Imagem AutoCAD” apresenta os valores para áreas dos agregados da seção transversal obtidas utilizando ferramentas do AutoCAD. A coluna “Imagem Processada” representa área obtida para os agregados identificados na seção transversal utilizando a rotina desenvolvida em ambiente MatLAB.

Tabela 11 – Áreas obtidas para agregados presentes em seção transversal de corpo de prova, considerando duas diferentes formas de obtenção da área.

Referência	Imagem AutoCAD	Imagem Processada
	cm ²	cm ²
B1	2,409	2,419
B2	2,138	2,140
B3	0,933	0,916
B4	2,172	2,087
B5	2,565	2,555
B6	0,887	0,885
B7	1,993	1,975
B8	1,219	1,215
B9	1,323	1,284
B10	1,142	1,135
B11	0,613	0,610
B12	0,906	0,904
B13	1,877	1,879
B14	1,081	1,009
B15	0,593	0,593
B16	1,525	1,572
B17	1,065	1,053
B18	0,657	0,657
B19	0,870	0,863
B20	0,694	0,699
B21	1,502	1,496
B22	0,811	0,810
B23	0,409	0,388
B24	0,809	0,815
B25	0,384	0,374
B26	1,001	1,007
B27	0,362	0,392

Fonte: Autor.

O teste-t entre amostras mostrou não haver diferença significativa ($p \leq 0,05$) para aceitação dos resultados, considerando as áreas de agregados obtidas por meio do processamento digital de imagem e avaliação utilizando o AutoCAD. Os valores das áreas obtidas pelos dois métodos se mantiveram próximos, validando o procedimento de identificação e determinação da área para componentes utilizando o MatLAB.

A partir da determinação das áreas de fibras presentes nas seções transversais foi feita uma aproximação para a quantidade de fibras presentes nos corpos de prova. Esta aproximação levou em consideração a média das áreas de fibras das seções transversais para cada corpo de prova, multiplicando o resultado da média pela altura do corpo de prova.

Os valores esperados em massa para a quantidade de fibras presentes nos corpos de prova foram calculados conforme Equação 16, para os três teores de fibra utilizados na produção dos compósitos, sendo uma dosagem com teor de fibra de 20 kg/m³, outra com teor de fibra 30 kg/m³ e outra com teor de 40 kg/m³, e comparados com a quantidade de fibras obtidas na desmoldagem de corpos de prova ainda no estado fresco. Os volumes de fibra esperados e obtidos nos corpos de prova foram determinados a partir do peso das fibras presentes nos mesmos, conforme Equação 17.

$$\text{Peso esperado} = \text{Teor de fibra} \times V_{cp} \quad \text{Equação 16}$$

onde: *Teor de fibra* é dado pelo teor de fibra de cada dosagem e V_{cp} o volume do corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm (0,001570796 m³)

$$V_{tf} \text{ (cm}^3\text{)} = \text{fibras em massa [kg]} \times 3172 \times V_f \quad \text{Equação 17}$$

sendo: V_{tf} o volume total de fibras no corpo de prova, em cm³; *fibras em massa [kg]* dado pelo peso das fibras presentes nos corpos de prova em kg; V_f dado pelo volume de uma fibra (diâmetro de 0,9 mm e comprimento de 60 mm); e 3172 a quantidade de fibras presentes em 1 kg de fibras.

A distribuição de valores obtidos por meio verificação da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova (descrito no item 4.3) foram comparados com as quantidades estimadas por meio do processamento digital de imagens e verificado o erro para a determinação quantitativa de fibras.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental. As análises referem-se a estimativa da quantidade de fibras em corpos de prova cilíndricos de concreto com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, reforçados com fibras de aço, utilizando rotina de programação desenvolvida em ambiente MatLAB. Os resultados obtidos foram comparados com as quantidades de fibras separadas a partir da desmoldagem de corpos de prova ainda no estado fresco.

Os resultados para quantidade de fibras, tanto para desmoldagem de corpos de prova quanto para análise de imagens utilizando o PDI, foram submetidos ao critério de Chauvenet para aceitação ou rejeição dos resultados das amostras.

O critério de Chauvenet é um procedimento para rejeição de valores duvidosos que extrapolam resultados dominantes para amostras. O princípio do critério é dado pela aceitação de valores aleatoriamente distribuídos em torno de um valor médio, devendo ser rejeitado caso a probabilidade “ p ” de obter o desvio em relação à média de “ n ” amostras seja menor que $1/2n$ (SALVADOR, 2012). A descrição da forma de análise do critério de Chauvenet está apresentada no Apêndice A.

As estimativas para a quantidade de fibras nos corpos de prova foram feitos considerando as áreas de fibras presentes em cada seção transversal do corpo de prova isoladamente, conforme seções para captação de imagens apresentado na Figura 37 e pela média das áreas de fibras das seções 1, 2 e 3.

5.1 VOLUME DE FIBRAS OBTIDO NA DESMOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

A verificação da quantidade de fibras em corpos de prova com três teores de fibra incorporadas a mistura foi feita a partir da desmoldagem e lavagem dos mesmos no estado fresco. O volume de fibras esperado para os corpos de prova foi de 3,80 cm³, 5,71 cm³ e 7,71 cm³ para os teores de fibra de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³, respectivamente.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados obtidos para a quantidade de fibras obtidas para o teor de 20 kg/m³.

Tabela 12 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 20 kg/m³

(continua)

CP	Valor Esperado (g)	Valor obtido (g)	20kg/m ³	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
			Volume fibra obtido (cm ³)		
CP1	31,42	20,7	2,51	65,89%	34,11%
CP2		19,7	2,39	62,71%	37,29%
CP3		19,8	2,40	63,03%	36,97%
CP4		24,8	3,00	78,94%	21,06%
CP5		24,1	2,92	76,71%	23,29%
CP6		30,7	3,72	97,72%	2,28%
CP7		27,2	3,29	86,58%	13,42%
CP8		24,8	3,00	78,94%	21,06%
CP9		17,2	2,08	54,75%	45,25%
CP10		19,4	2,35	61,75%	38,25%
CP11		26,9	3,26	85,63%	14,37%
CP12		20,2	2,45	64,30%	35,70%
CP13		26,3	3,18	83,72%	16,28%
CP14		16,6	2,01	52,84%	47,16%
CP15		31,3	3,79	99,63%	0,37%
CP16		26,9	3,26	85,63%	14,37%

Tabela 12 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 20 kg/m³

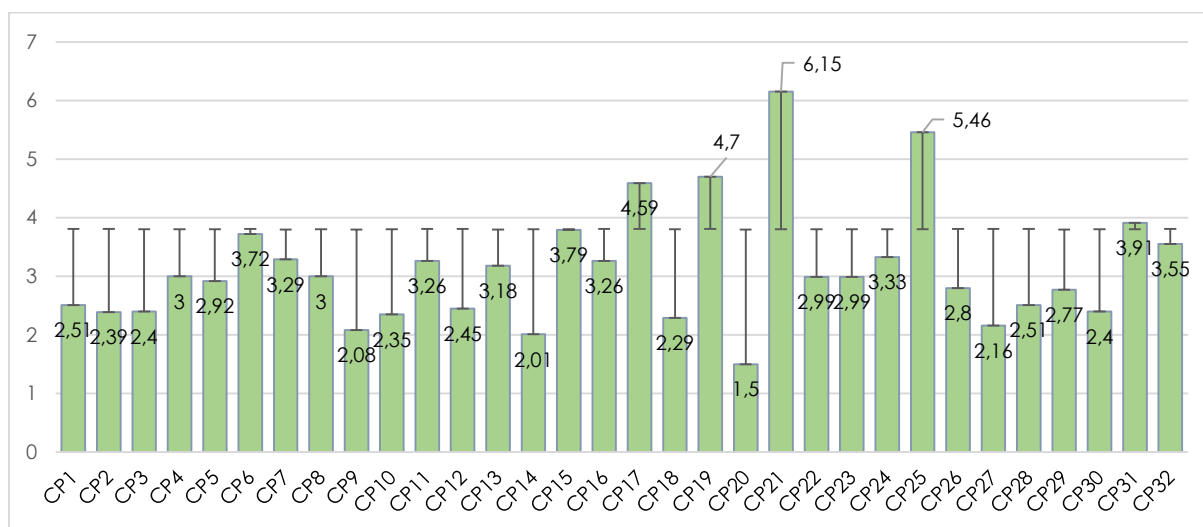
(conclusão)

CP	Valor Esperado (g)	20kg/m ³		Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
		Valor obtido (g)	Volume fibra obtido (cm ³)		
CP17	31,42	37,9	4,59	120,64%	20,64%
CP18		18,9	2,29	60,16%	39,84%
CP19		38,8	4,70	123,50%	23,50%
CP20		12,4	1,50	39,47%	60,53%
CP21		50,8	6,15	161,70%	61,70%
CP22		24,7	2,99	78,62%	21,38%
CP23		24,7	2,99	78,62%	21,38%
CP24		27,5	3,33	87,54%	12,46%
CP25		45,1	5,46	143,56%	43,56%
CP26		23,1	2,80	73,53%	26,47%
CP27		17,8	2,16	56,66%	43,34%
CP28		20,7	2,51	65,89%	34,11%
CP29		22,9	2,77	72,89%	27,11%
CP30		19,8	2,40	63,03%	36,97%
CP31		32,3	3,91	102,81%	2,81%
CP32		29,3	3,55	93,26%	6,74%
Média		25,73	3,12	81,90%	
Desvio Padrão			1,01		

Fonte: Autor.

A Tabela 12 mostra que para o volume de fibras obtidos com a desmoldagem de corpos de prova no estado fresco, com teor de fibra de 20 kg/m³, o volume de fibras obtido variou de 1,50 m³ a 6,15 m³.

A Figura 58 apresenta os volumes de fibras para teor de 20 kg/m³ com os respectivos desvios em relação ao valor esperado.

Figura 58 – Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 20 kg/m³

Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet apontou para necessidade de rejeição do volume de fibras obtidos no corpo de prova 21, que apresentou volume de fibras com 161,70% do valor esperado para o corpo de prova. Os detalhes dos resultados obtidos para rejeição de dados que extrapolam a tendência dominante para o volume de fibras em corpos de prova utilizando o critério de Chauvenet estão apresentados no Apêndice A.

A Tabela 13 apresenta a média e desvio padrão antes e após a exclusão de amostras discrepantes.

Tabela 13 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes.

	Todos os dados	Dados rejeitados excluídos
Média	3,12	3,02
Desvio Padrão	1,01	0,85
Coeficiente de variação (%)	32,21%	28,25%

Fonte: Autor.

Após a exclusão do dado da amostra rejeitada a média do volume de fibras foi de 3,02 cm³ e o desvio padrão de 0,85, resultando em um coeficiente de variação de 28,25%. O valor

obtido para a média do volume de fibras representa 79,32% do valor esperado para a quantidade de fibras.

A Tabela 14 mostra os resultados obtidos para a quantidade de fibras obtidas para o teor de 30 kg/m³.

Tabela 14 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 30 kg/m³

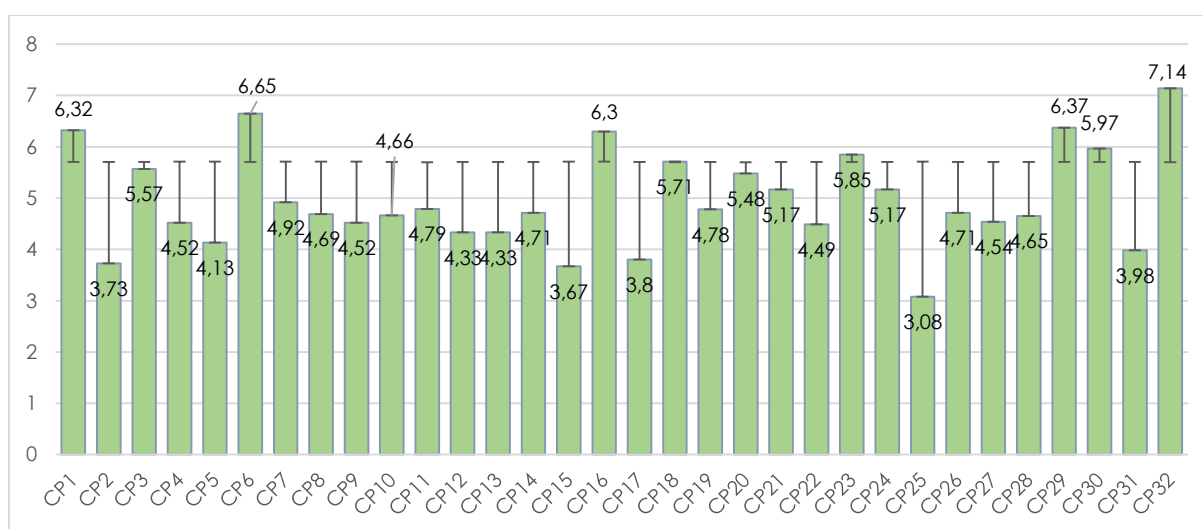
CP	30kg/m ³				
	Valor Esperado (g)	Valor obtido (g)	Volume fibra obtido (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	47,12	52,20	6,32	110,77%	10,77%
CP2	47,12	30,80	3,73	65,36%	34,64%
CP3	47,12	46,00	5,57	97,62%	2,38%
CP4	47,12	37,30	4,52	79,15%	20,85%
CP5	47,12	34,10	4,13	72,36%	27,64%
CP6	47,12	54,90	6,65	116,50%	16,50%
CP7	47,12	40,60	4,92	86,16%	13,84%
CP8	47,12	38,70	4,69	82,12%	17,88%
CP9	47,12	37,30	4,52	79,15%	20,85%
CP10	47,12	38,50	4,66	81,70%	18,30%
CP11	47,12	39,60	4,79	84,03%	15,97%
CP12	47,12	35,80	4,33	75,97%	24,03%
CP13	47,12	35,80	4,33	75,97%	24,03%
CP14	47,12	38,90	4,71	82,55%	17,45%
CP15	47,12	30,30	3,67	64,30%	35,70%
CP16	47,12	52,00	6,30	110,35%	10,35%
CP17	47,12	31,40	3,80	66,63%	33,37%
CP18	47,12	47,20	5,71	100,16%	0,16%
CP19	47,12	39,50	4,78	83,82%	16,18%
CP20	47,12	45,30	5,48	96,13%	3,87%
CP21	47,12	42,70	5,17	90,61%	9,39%
CP22	47,12	37,10	4,49	78,73%	21,27%
CP23	47,12	48,30	5,85	102,50%	2,50%
CP24	47,12	42,70	5,17	90,61%	9,39%
CP25	47,12	25,40	3,08	53,90%	46,10%
CP26	47,12	38,90	4,71	82,55%	17,45%
CP27	47,12	37,50	4,54	79,58%	20,42%
CP28	47,12	38,40	4,65	81,49%	18,51%
CP29	47,12	52,60	6,37	111,62%	11,62%
CP30	47,12	49,30	5,97	104,62%	4,62%
CP31	47,12	32,90	3,98	69,82%	30,18%
CP32	47,12	59,00	7,14	125,20%	25,20%
Média		40,96	4,96	86,94%	
Desvio Padrão			0,95		

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Tabela 14 para o volume de fibras obtidos com a desmoldagem de corpos de prova no estado fresco, com teor de fibra de 30 kg/m³, variaram com percentuais de 53,90% a 125,20% em relação ao valor esperado para o volume de fibras. A média das amostras para o volume de fibras foi de 4,96 cm³ e o desvio padrão de 0,95, resultando em um coeficiente de variação de 19,19%.

A Figura 59 apresenta os volumes de fibras para teor de 30 kg/m³ com os respectivos desvios em relação ao valor esperado.

Figura 59 – Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 30 kg/m³



Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet não rejeitou nenhuma dos dados obtidos e o valor obtido para a média do volume de fibras representa 86,94% do valor esperado para a quantidade de fibras em um corpo de prova.

Os resultados obtidos para a quantidade de fibras obtidas para o teor de 40 kg/m³ estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Volume de fibras em corpos de prova com teor de referência de 40 kg/m³

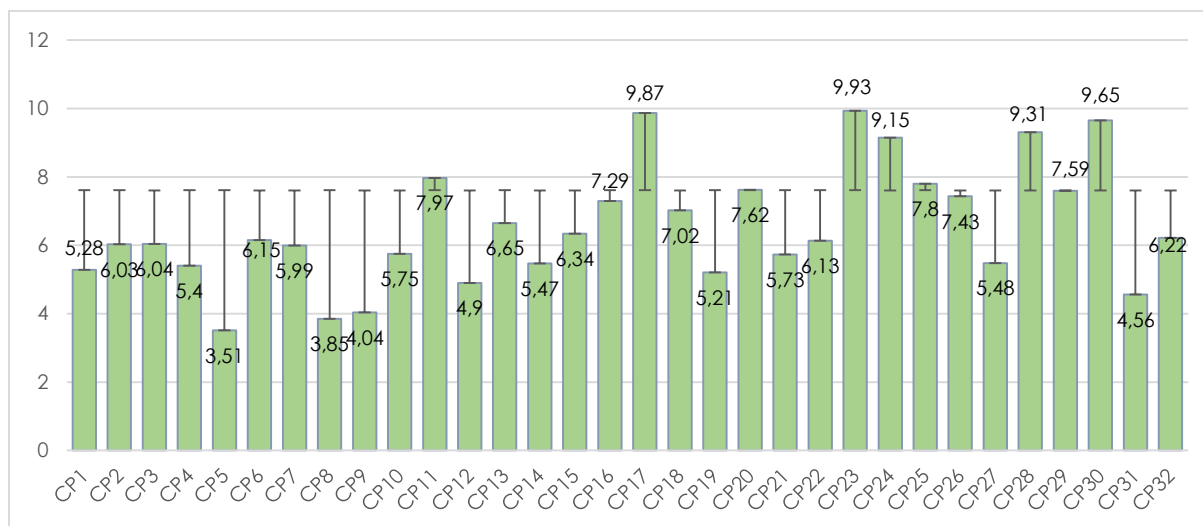
40kg/m ³					
CP	Peso esperado (g)	Peso obtido (g)	Volume fibra obtido (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	62,83	43,60	5,28	69,39%	69,39%
CP2	62,83	49,80	6,03	79,26%	79,26%
CP3	62,83	49,90	6,04	79,42%	79,42%
CP4	62,83	44,60	5,40	70,98%	70,98%
CP5	62,83	29,00	3,51	46,15%	30,61%
CP6	62,83	50,80	6,15	80,85%	20,74%
CP7	62,83	49,50	5,99	78,78%	20,58%
CP8	62,83	31,80	3,85	50,61%	29,02%
CP9	62,83	33,40	4,04	53,16%	53,85%
CP10	62,83	47,50	5,75	75,60%	19,15%
CP11	62,83	65,80	7,97	104,72%	21,22%
CP12	62,83	40,50	4,90	64,46%	49,39%
CP13	62,83	54,90	6,65	87,38%	46,84%
CP14	62,83	45,20	5,47	71,94%	24,40%
CP15	62,83	52,40	6,34	83,40%	4,72%
CP16	62,83	60,20	7,29	95,81%	35,54%
CP17	62,83	81,50	9,87	129,71%	12,62%
CP18	62,83	58,00	7,02	92,31%	28,06%
CP19	62,83	43,00	5,21	68,44%	16,60%
CP20	62,83	62,90	7,62	100,11%	4,19%
CP21	62,83	47,30	5,73	75,28%	29,71%
CP22	62,83	50,60	6,13	80,53%	7,69%
CP23	62,83	82,00	9,93	130,51%	31,56%
CP24	62,83	75,60	9,15	120,32%	0,11%
CP25	62,83	64,40	7,80	102,50%	24,72%
CP26	62,83	61,40	7,43	97,72%	19,47%
CP27	62,83	45,30	5,48	72,10%	30,51%
CP28	62,83	76,90	9,31	122,39%	20,32%
CP29	62,83	62,70	7,59	99,79%	2,50%
CP30	62,83	79,70	9,65	126,85%	2,28%
CP31	62,83	37,70	4,56	60,00%	27,90%
CP32	62,83	51,40	6,22	81,81%	22,39%
Média		54,04	6,54	86,00%	
Desvio Padrão			1,73		

Fonte: Autor.

Os resultados apresentados na Tabela 15 mostram que para o teor de fibra de 40 kg/m³ os volumes de fibras obtidos com a desmoldagem de corpos de prova no estado fresco variaram com percentuais de 46,15% a 130,51% em relação ao valor esperado para o volume de fibras.

A Figura 60 apresenta os volumes de fibras para teor de 40 kg/m³ com os respectivos desvios em relação ao valor esperado.

Figura 60 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para teor de 40 kg/m³



Fonte: Autor.

Assim como nos resultados para o teor de fibra de 30 kg/m³, o critério de Chauvenet não rejeitou nenhuma dos dados obtidos.

A média para o volume de fibras dos 32 corpos de prova foi de 6,54 cm³ e o desvio padrão de 1,73, resultando em um coeficiente de variação de 26,46%. O valor obtido para a média do volume de fibras representa 86,00% do valor esperado para a quantidade de fibras em um corpo de prova cilíndrico com 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura.

Os resultados apresentaram valores similares para o desvio em relação ao esperado para o volume nos teores de 30 kg/m³ e 40 kg/m³, com pequena variação observada para o teor de 20 kg/m³. Quando verificados os valores para os três teores de fibras utilizados observa-se também similaridade para os valores de coeficiente de variação, o que sugere não ter havido influência significativa do processo de moldagem dos corpos de prova para variação dos resultados.

5.2 VOLUME DE FIBRAS OBTIDO UTILIZANDO O PDI

Para determinação do volume de fibras em corpos de prova cilíndricos utilizando o PDI foi desenvolvido uma programação em ambiente MatLAB utilizando a ferramenta GUI (*Graphics User Interface*), que permite que o usuário, por meio de interfaces gráficas, lance os dados a serem processados de forma interativa. Esse tipo de recurso facilita a utilização do programa, permitindo que usuários compilem e executem a programação de qualquer computador, mesmo não possuindo o MatLAB instalado.

5.2.1 *Volume de fibras para teor de 20 kg/m³ utilizando PDI*

Para estimativa da quantidade de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 20 kg/m³ foi utilizado o limiar de 0,45. A definição do limiar em 0,45 estabelece que os pixels com valor de intensidade de cinza maiores que o valor de limiar definido terão suas intensidades alteradas para um e os demais para zero.

A Tabela 16 apresenta a compilação dos resultados apresentados na Tabela 34 (Apêndice B) e mostra os dados obtidos para as áreas de fibras em cada seção transversal e a estimativa para o volume de fibras nos corpos de prova. As estimativas apresentadas consideram como hipótese de cálculo uma distribuição homogênea para as fibras presentes no corpo de prova. Assim, os valores estimados para o volume de fibras foram dados a partir da área das fibras presentes nas seções transversais multiplicados pela altura do corpo de prova.

Os valores apresentados na Tabela 16 para “Média das áreas” representa a média das áreas de fibras nas três seções transversais para cada corpo de prova e o “Volume Sméd” apresenta a estimativa para o volume considerando a média das áreas de fibras presentes nas três seções multiplicada pela altura do corpo de prova.

Tabela 16 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 20 kg/m³

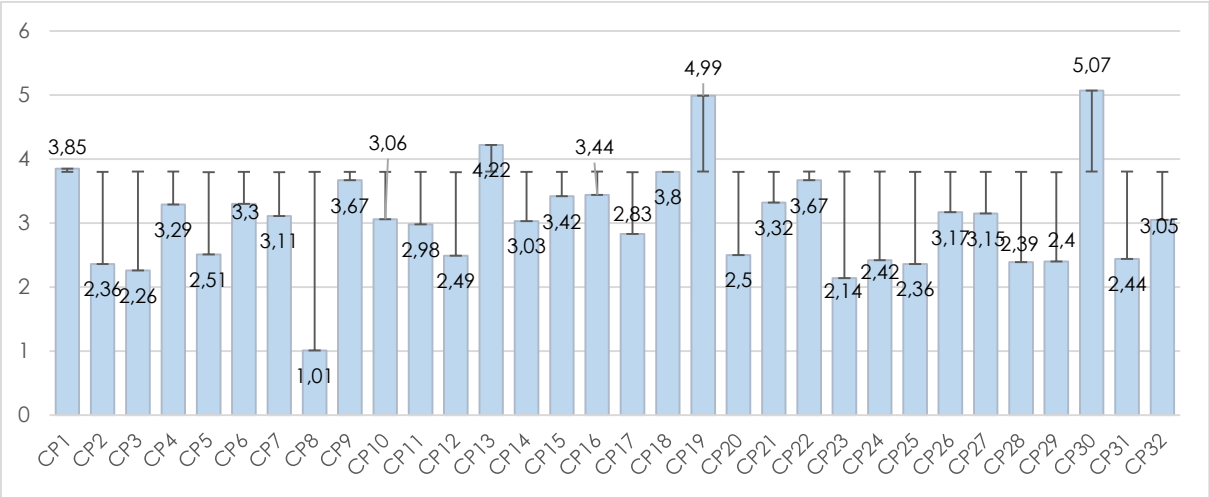
CP	Média das áreas (cm ²)	Volume Sméd (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,193	3,85	101,34%	1,34%
CP2	0,118	2,36	62,04%	37,96%
CP3	0,113	2,26	59,31%	40,69%
CP4	0,164	3,29	86,46%	13,54%
CP5	0,126	2,51	66,11%	33,89%
CP6	0,165	3,30	86,86%	13,14%
CP7	0,156	3,11	81,89%	18,11%
CP8	0,050	1,01	26,55%	73,45%
CP9	0,184	3,67	96,53%	3,47%
CP10	0,153	3,06	80,56%	19,44%
CP11	0,149	2,98	78,35%	21,65%
CP12	0,125	2,49	65,57%	34,43%
CP13	0,211	4,22	110,88%	10,88%
CP14	0,152	3,03	79,72%	20,28%
CP15	0,171	3,42	90,01%	9,99%
CP16	0,172	3,44	90,36%	9,64%
CP17	0,142	2,83	74,53%	25,47%
CP18	0,190	3,80	100,00%	0,00%
CP19	0,250	4,99	131,19%	31,19%
CP20	0,125	2,50	65,72%	34,28%
CP21	0,166	3,32	87,29%	12,71%
CP22	0,183	3,67	96,42%	3,58%
CP23	0,107	2,14	56,17%	43,83%
CP24	0,121	2,42	63,53%	36,47%
CP25	0,183	2,36	62,09%	37,91%
CP26	0,118	3,17	83,42%	16,58%
CP27	0,159	3,15	82,84%	17,16%
CP28	0,158	2,39	62,91%	37,09%
CP29	0,120	2,40	63,22%	36,78%
CP30	0,120	5,07	133,28%	33,28%
CP31	0,253	2,44	64,07%	35,93%
CP32	0,153	3,05	80,30%	19,70%
Média	0,15	3,05	80,30%	
Desv. P.		0,82		

Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos e indicados na Tabela 16, observa-se que a estimativa do volume de fibras com teor de 20 kg/m³, considerando a área média das fibras presentes nas seções transversais na estimativa, apresentou variações de 26,55% a 133,28% em relação ao

volume esperado para o teor. A Figura 61 apresenta os volumes de fibras para teor de 20 kg/m³ com os respectivos desvios em relação ao valor esperado.

Figura 61 -Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 20 kg/m³



Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet rejeitou os valores estimados para os corpos de prova 8, 19 e 30, que apresentaram valores discrepantes em relação à média dos demais. A Tabela 17 apresenta a média e desvio padrão antes e após a exclusão de amostras rejeitadas.

Tabela 17 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 20kg/m³, utilizando PDI.

	Todos os dados	Dados rejeitados excluídos
Média	3,05	2,99
Desvio Padrão	0,82	0,56
Coeficiente de variação (%)	26,85%	18,69%

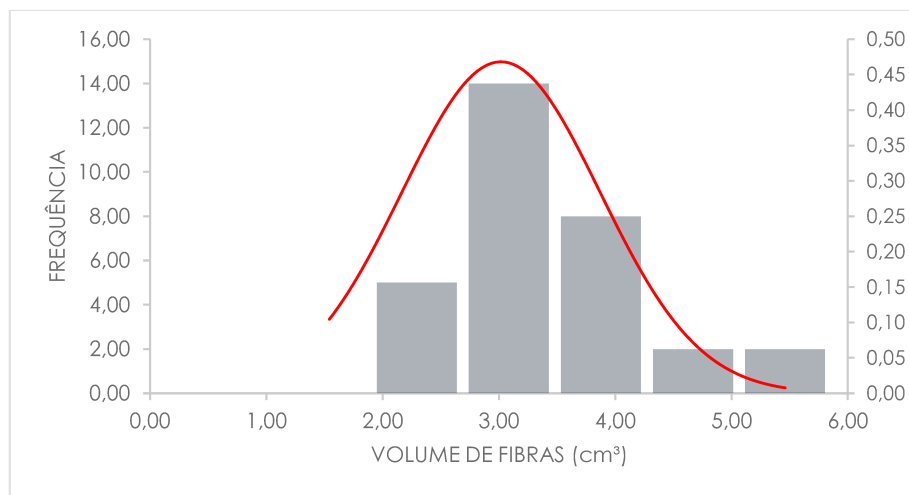
Fonte: Autor.

A média de fibras para os volumes estimados, já desconsiderando os valores rejeitados, ficou em 2,99 cm³. O desvio padrão para os dados foi de 0,56, resultando em um coeficiente de variação de 18,69%.

As Figura 62 e apresenta a curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova obtidos pela desmoldagem e pelo PDI para teor de 20 kg/m³. Os valores das médias e desvio

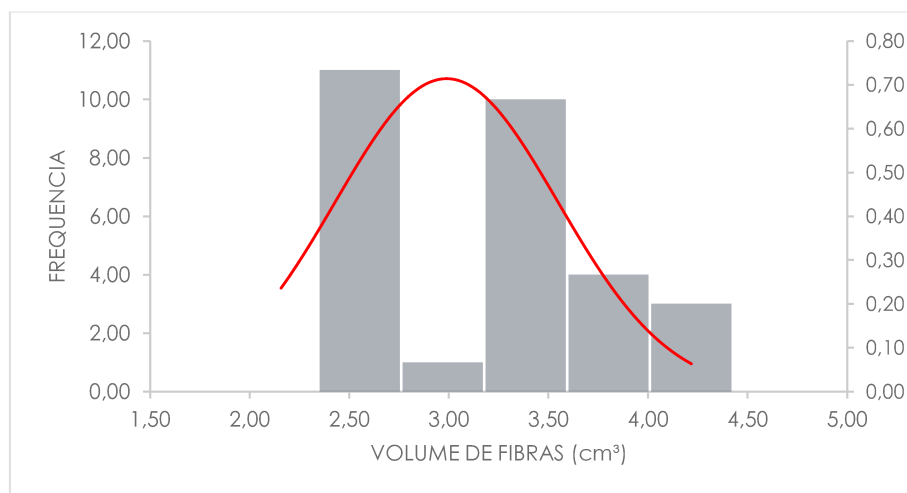
padrão apresentaram similaridade para as duas determinações, indicando que a variabilidade para os resultados estimados pelo PDI foi da mesma ordem da variabilidade real para distribuição de fibras nos corpos de prova.

Figura 62 – Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 20 kg/m³.



Fonte: Autor.

Figura 63 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pelo PDI, para teor de 20 kg/m³.



Fonte: Autor.

Quando consideradas as áreas de fibras das seções isoladas para estimativa do volume presentes nos corpos de prova, as médias para os volumes estimado, ficaram em 3,56, 2,71 e 2,89, respectivamente.

5.2.2 Volume de fibras para teor de 30 kg/m³ utilizando PDI

O limiar que apresentou melhor comportamento para os corpos de prova com teor de fibra de 30 kg/m³ foi 0,40, ou seja, esse limiar foi o que apresentou melhor resultado na identificação das fibras presentes nas seções transversais.

Os resultados compilados da Tabela 35 (Apêndice B) e apresentados na Tabela 18 apresentam os resultados obtidos para as áreas de fibras em cada seção transversal e a estimativa para o volume de fibras nos corpos de prova. Para o teor de 30 kg/m³ de fibras o volume de fibras esperado para cada corpo de prova é de 5,71 cm³

Tabela 18 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m³

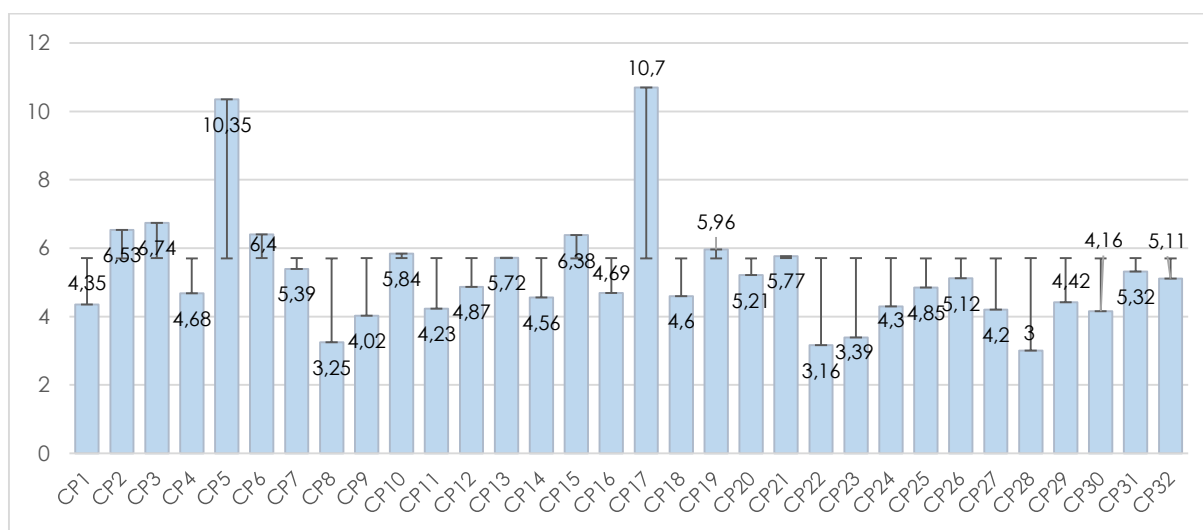
(continua)				
CP	Média das áreas (cm ²)	Volume Sméd (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,217	4,35	76,21%	23,79%
CP2	0,327	6,53	114,53%	14,53%
CP3	0,337	6,74	118,09%	18,09%
CP4	0,234	4,68	82,10%	17,90%
CP5	0,518	10,35	181,41%	81,41%
CP6	0,320	6,40	112,16%	12,16%
CP7	0,269	5,39	94,40%	5,60%
CP8	0,163	3,25	57,02%	42,98%
CP9	0,201	4,02	70,44%	29,56%
CP10	0,292	5,84	102,30%	2,30%
CP11	0,211	4,23	74,10%	25,90%
CP12	0,244	4,87	85,36%	14,64%
CP13	0,286	5,72	100,25%	0,25%
CP14	0,228	4,56	79,84%	20,16%
CP15	0,319	6,38	111,88%	11,88%
CP16	0,234	4,69	82,17%	17,83%
CP17	0,535	10,70	187,50%	87,50%
CP18	0,230	4,60	80,67%	19,33%
CP19	0,298	5,96	104,53%	4,53%
CP20	0,261	5,21	91,40%	8,60%
CP21	0,288	5,77	101,10%	1,10%
CP22	0,158	3,16	55,40%	44,60%
CP23	0,169	3,39	59,39%	40,61%
CP24	0,215	4,30	75,28%	24,72%
CP25	0,243	4,85	85,04%	14,96%
CP26	0,256	5,12	89,78%	10,22%
CP27	0,210	4,20	73,67%	26,33%
CP28	0,150	3,00	52,52%	47,48%

Tabela 19 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m³

CP	Média das áreas (cm ²)	Volume Sméd (cm ³)	(conclusão)	
			Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP29	0,221	4,42	77,47%	22,53%
CP30	0,208	4,16	72,96%	27,04%
CP31	0,266	5,32	93,26%	6,74%
CP32	0,256	5,11	89,63%	10,37%
Média	0,26	5,23	91,62%	
Desv. P.		1,70		

Fonte: Autor.

A estimativa de volume de fibras para teor de fibra de 30 kg/m³, apresentaram variações de 52,52% a 187,50% em relação ao volume esperado para esse teor. A Figura 64 apresenta os volumes de fibras obtidos pelo PDI para teor de 30 kg/m³ e os desvios em relação ao valor esperado.

Figura 64 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 30 kg/m³

Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet rejeitou os valores estimados para os corpos de prova 5 e 17, que apresentaram percentuais de 181,41% e 187,50%, respectivamente, em relação ao esperado. Os valores para média e desvio padrão antes e após a exclusão dos dados rejeitados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 30kg/m³, utilizando PDI.

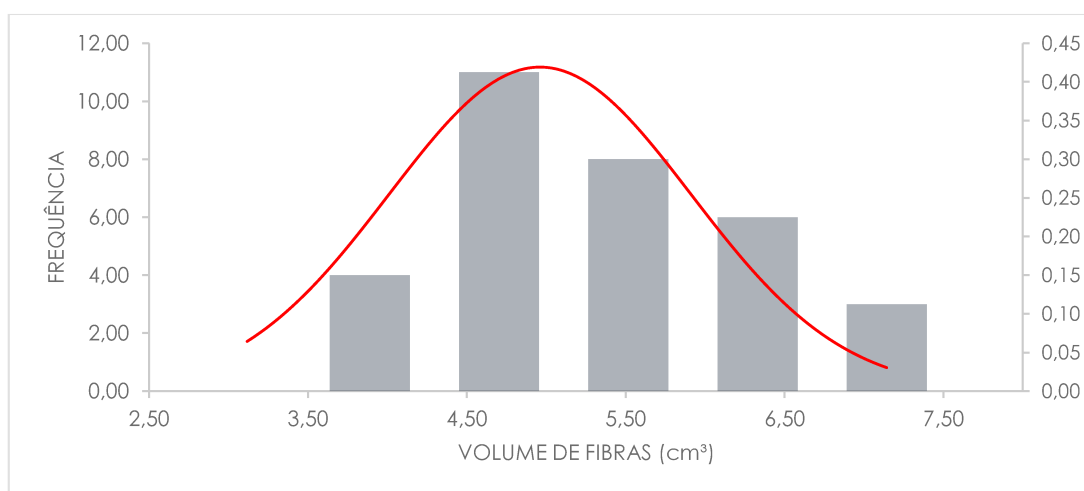
	Todos os dados	Dados rejeitados excluídos
Média	5,23	4,87
Desvio Padrão	1,70	1,01
Coeficiente de variação (%)	32,50%	20,73%

Fonte: Autor.

A média para o volume de fibras estimadas, já desconsiderando os valores rejeitados, ficou em 4,87 cm³, que representa 85,43% em relação ao valor esperado nos corpos de prova, para esse teor de fibras. O desvio padrão para as amostras foi de 1,011, resultando em um coeficiente de variação de 20,73%.

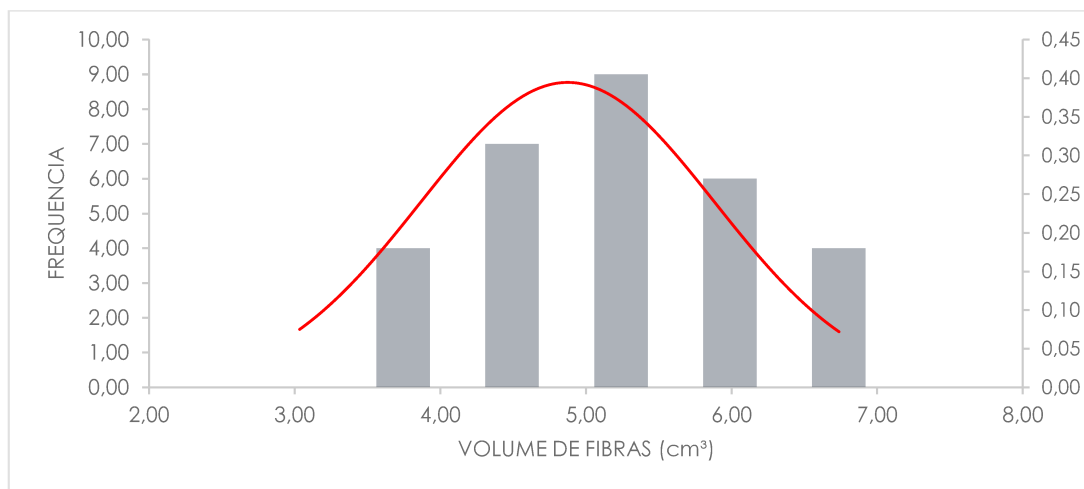
As Figura 65 e Figura 66 mostram as curvas de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova obtidos pela desmoldagem e pelo PDI, para teor de 30 kg/m³. Assim como nos resultados obtidos para o teor de fibras de 20 kg/m³, os valores da média do volume de fibras e desvio padrão se mantiveram semelhantes para os dois métodos de determinação.

Figura 65 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 30 kg/m³.



Fonte: Autor

Figura 66 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pelo PDI, para teor de 30 kg/m³.



5.2.3 Volume de fibras para teor de 40 kg/m³ utilizando PDI

Assim como nos corpos de prova com teor de fibra de 30 kg/m³, o limiar que apresentou melhor comportamento para os corpos de prova com teor de fibra de 40 kg/m³ foi 0,40, apresentando melhor resultado na identificação das fibras nas seções transversais.

A tabela 23 mostra os resultados para estimativa do volume de fibras obtido pelo PDI em corpos de prova com teor de fibra de 40 kg/m³, incluindo o percentual para o volume obtido e o desvio em relação ao esperado. Para o teor de 40 kg/m³ de fibras esperava-se um volume de 7,61 cm³ em cada corpo de prova. Os resultados são compilados da Tabela 36 (Apêndice B).

Tabela 21 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m³

(continua)

CP	Média das áreas (cm ²)	Volume Sméd (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,280	5,59	73,54%	26,46%
CP2	0,350	6,99	91,90%	8,10%
CP3	0,350	6,99	91,93%	8,07%
CP4	0,492	9,83	129,26%	29,26%
CP5	0,449	8,99	118,12%	18,12%
CP6	0,377	7,54	99,11%	0,89%

Tabela 21 - Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m³

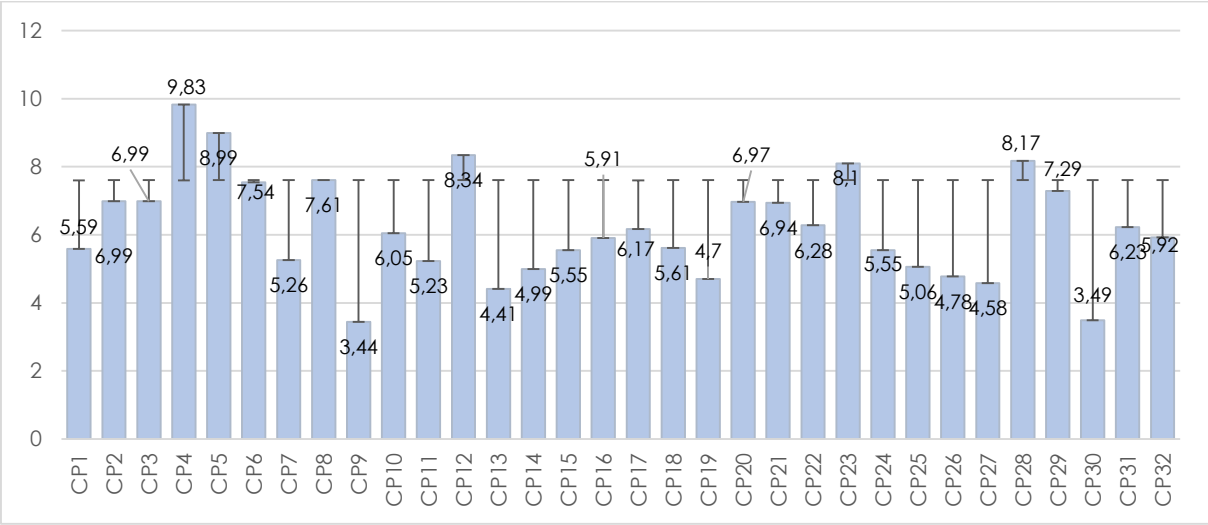
(conclusão)

CP	Média das áreas (cm ²)	Volume Sméd (cm ³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP7	0,263	5,26	69,11%	30,89%
CP8	0,380	7,61	99,99%	0,01%
CP9	0,172	3,44	45,19%	54,81%
CP10	0,303	6,05	79,53%	20,47%
CP11	0,261	5,23	68,69%	31,31%
CP12	0,417	8,34	109,66%	9,66%
CP13	0,221	4,41	57,97%	42,03%
CP14	0,249	4,99	65,58%	34,42%
CP15	0,277	5,55	72,92%	27,08%
CP16	0,295	5,91	77,67%	22,33%
CP17	0,309	6,17	81,16%	18,84%
CP18	0,280	5,61	73,73%	26,27%
CP19	0,235	4,70	61,76%	38,24%
CP20	0,348	6,97	91,60%	8,40%
CP21	0,347	6,94	91,21%	8,79%
CP22	0,314	6,28	82,49%	17,51%
CP23	0,278	8,10	106,45%	6,45%
CP24	0,253	5,55	72,99%	27,01%
CP25	0,239	5,06	66,46%	33,54%
CP26	0,229	4,78	62,82%	37,18%
CP27	0,408	4,58	60,24%	39,76%
CP28	0,364	8,17	107,34%	7,34%
CP29	0,174	7,29	95,81%	4,19%
CP30	0,311	3,49	45,83%	54,17%
CP31	0,296	6,23	81,83%	18,17%
CP32	0,31	5,92	77,78%	22,22%
Média	0,278	6,20	81,55%	
Desv. P.		1,52		

Fonte: Autor.

As estimativas para volumes de fibras em corpos de prova com teor de 40 kg/m³ registradas na Tabela 36 mostra que os valores determinados apresentaram variações de 45,19% a 129,26% em relação ao volume esperado para esse teor. A média para o volume de fibras nos corpos de prova ficou em 6,21 cm³ e o desvio padrão em 1,52.

Figura 67 - Volume de fibras e desvios em relação ao esperado para PDI e teor de fibras de 40 kg/m³



Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet rejeitou os valores estimados para o corpo de prova 4 com percentual para volume de fibras de 129,26% em relação ao esperado. A Tabela 22 mostra os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e após a rejeição de dados discrepantes.

Tabela 22 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação antes e depois da rejeição de dados discrepantes para teor de 40kg/m³, utilizando PDI.

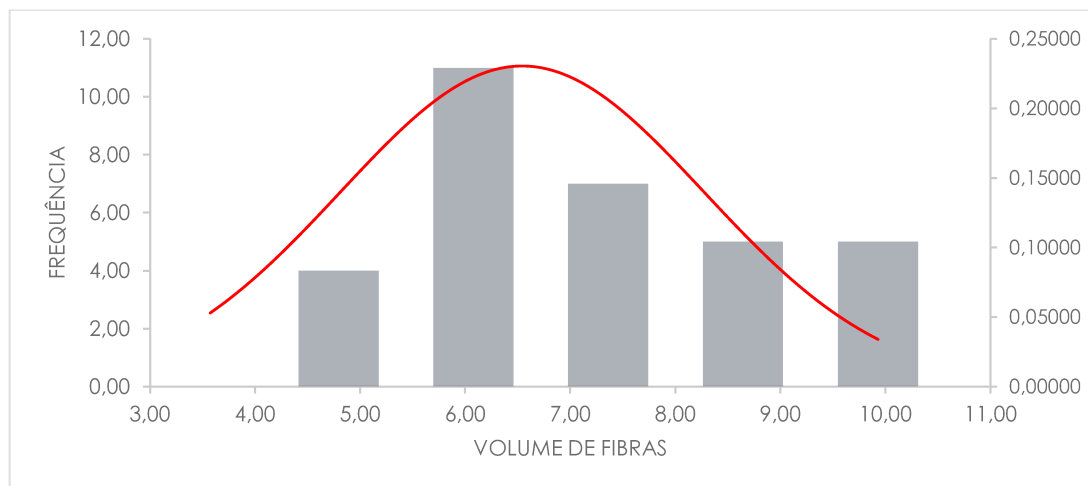
	Todos os dados	Dados rejeitados excluídos
Média	6,21	6,09
Desvio Padrão	1,52	1,39
Coeficiente de variação (%)	24,50%	22,89%

Fonte: Autor.

Desconsiderando os valores rejeitados, a média para o volume de fibras estimada pelo PDI para esse teor ficou em 6,09 cm³, que representa 80,01% em relação ao valor esperado nos corpos de prova, para esse teor de fibras. O desvio padrão para as amostras foi de 1,39 e o coeficiente de variação de 22,89%.

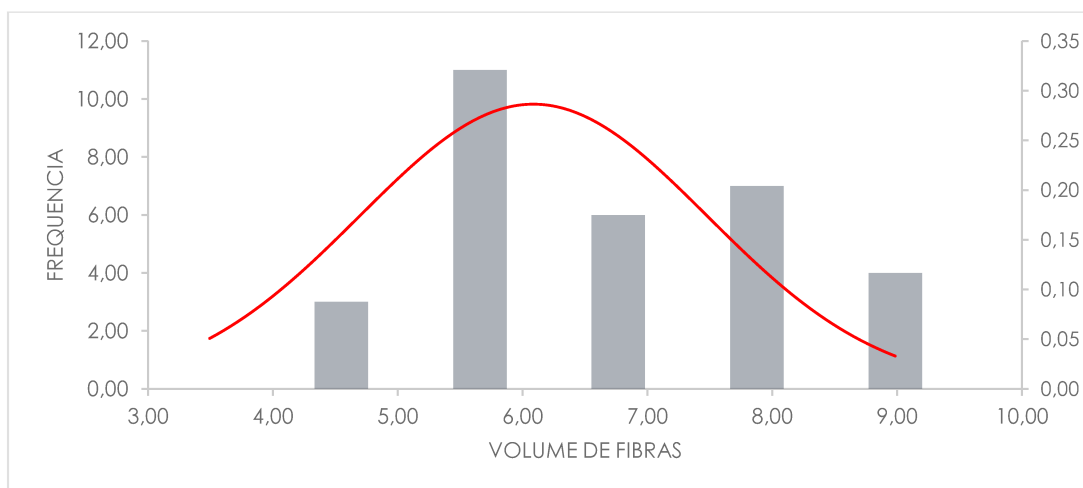
A Figura 68 e Figura 69 mostram a curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova obtidos pela desmoldagem e pelo PDI, para teor de 40 kg/m³.

Figura 68 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 40 kg/m³.



Fonte: Autor.

Figura 69 - Curva de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem, para teor de 40 kg/m³.



Fonte: Autor.

5.3 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA VOLUME DE FIBRAS PELA DESMOLDAGEM E PDI

A Tabela 23 mostra, após exclusão dos dados rejeitados pelo critério de Chauvenet, o resumo das médias, desvio padrão e coeficiente de variação para o volume de fibras nos corpos de prova desmoldados e estimados pelo PDI para os três teores de fibras utilizados.

Tabela 23 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação para volume de fibras verificado para desmoldagem e estimativa pelo PDI

	20 [kg/m ³]		30 [kg/m ³]		40 [kg/m ³]	
	DESMOLD.	PDI	DESMOLD.	PDI	DESMOLD.	PDI
Volume médio (cm ³)	3,02	2,99	4,96	4,87	6,54	6,09
Percentual em relação ao esperado	79,32%	78,57%	86,94%	85,43%	86,01%	80,01%
Desvio (%)	20,68%	18,69%	13,06%	14,57%	13,99%	19,99%
Desvio padrão	0,85	0,56	0,95	1,01	1,73	1,39
Coeficiente de variação	28,25%	18,69%	19,19%	20,73%	26,46%	22,89%

Fonte: Autor.

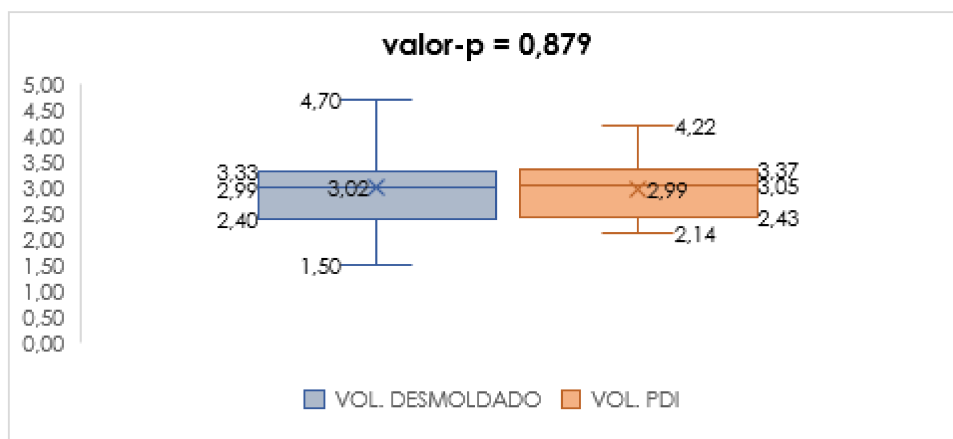
É possível verificar que, quanto maior o teor de fibras utilizadas na mistura do concreto maior se apresenta o desvio padrão para os volumes nos corpos de prova. Esse aumento do desvio padrão se repete nas duas formas de determinação do volume de fibras. As verificações dos valores de volume de fibras para os três teores utilizados apresentaram similaridade tanto para coeficientes de variação quanto para percentuais em relação ao valor esperado para fibras, quando comparados os resultados obtidos para volumes de fibras pela desmoldagem e os obtidos pelo PDI.

Para comparação entre os resultados obtidos pelas duas formas de determinação do volume de fibras nos corpos de prova foi utilizado a ferramenta teste-t da análise de dados do excel para verificar se houve variação significativa entre os resultados de volume obtidos pela desmoldagem de corpos de prova e pela estimativa utilizando o PDI. A análise utilizando o teste-t foi feita considerando os dados não rejeitados pelo critério de Chauvenet. O “valor-p” superior a 0,05 para o teste-t indica que não houveram evidências de diferenças significativas entre os grupos de dados de volumes determinados, já o “valor-p” menor ou

igual a 0,05 para o teste-t indica que existem variações significativas entre os resultados comparados.

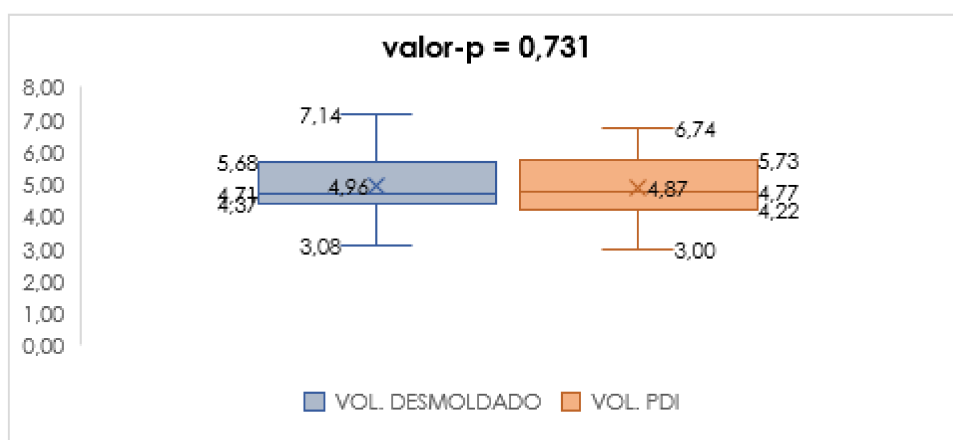
Os resultados obtidos para o “valor-p”, para os teores de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³, foram 0,846, 0,731 e 0,255, respectivamente, indicando que não houveram variações significativas para os resultados obtidos entre os valores para volumes de fibras obtidos pela desmoldagem e pelo PDI. As Figura 70 a 73 mostram as variações dentro do conjunto de dados para volumes estimados pelo PDI e pela desmoldagem e os respectivos resultados para o teste-t, apontando variação insignificante para os dados comparados.

Figura 70 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 20 kg/m³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem



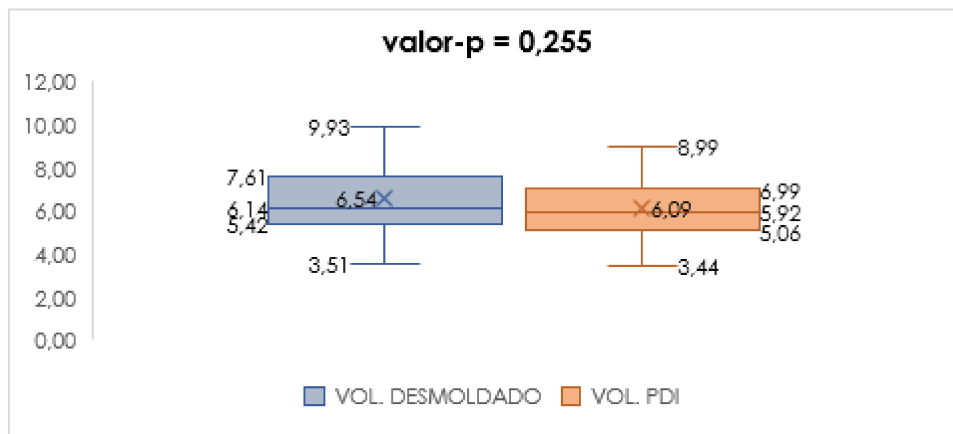
Fonte: Autor.

Figura 71 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 30 kg/m³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem



Fonte: Autor

Figura 72 - Teste-t para volume de fibras em corpos de prova com teor de fibra de 40 kg/m³ considerando área média das três seções transversais e volume obtido na desmoldagem



Fonte: Autor

5.2.1 Verificação de volumes estimados utilizando uma imagem de seção transversal para cada corpo de prova

Para verificar se a utilização de apenas uma imagem de seção transversal seria suficiente para estimar com precisão o volume de fibras presentes de cada corpo de prova, foi realizado o teste-t considerando os volumes estimados utilizando as áreas de cada seção transversal isolada e o volume determinado considerando a área média das três seções. O nível de significância utilizado para o teste-t foi de 5%. A Tabela 24 mostra os volumes estimados considerando as áreas de fibras para as seções transversais individuais e para a média das seções transversais, para o teor de fibras de 20 kg/m³. A Tabela 24 é uma compilação dos resultados apresentados na Tabela 34 (Apêndice B).

A coluna “Volume s1” apresenta os volumes para corpos de prova estimados considerando apenas as áreas de fibras obtidas com a imagem da seção 1, conforme esquema de corte apresentado na Figura 37. A coluna “Volume s2” apresenta os volumes estimados para fibras presentes em corpos de prova considerando apenas a imagem da seção transversal do corpo de prova. A coluna “Volume s3” mostra os volumes obtidos pela estimativa da quantidade de fibras presentes nos corpos de prova considerando as imagens da seção transversal 3 de cada corpo de prova.

Tabela 24 – Volume de fibras estimada pelo PDI considerando áreas das seções isoladas e área média das três seções, para teor de fibras de 20 kg/m³.

CP	Volume s1 (cm³)	Volume s2 (cm³)	Volume s3 (cm³)	Volume Sméd (cm³)
CP1	3,71	3,44	4,42	3,85
CP2	3,24	1,95	1,89	2,36
CP3	2,48	1,73	2,57	2,26
CP4	4,56	2,21	3,10	3,29
CP5	2,58	2,91	2,06	2,51
CP6	4,12	1,78	4,01	3,30
CP7	3,35	2,67	3,33	3,11
CP8	1,18	1,69	0,15	1,01
CP9	4,20	2,46	4,35	3,67
CP10	4,21	3,20	1,79	3,06
CP11	2,84	2,71	3,39	2,98
CP12	3,05	1,98	2,46	2,49
CP13	6,48	2,29	3,89	4,22
CP14	2,71	2,00	4,39	3,03
CP15	3,85	3,10	3,33	3,42
CP16	3,49	2,99	3,83	3,44
CP17	4,19	2,28	2,04	2,83
CP18	3,43	4,00	3,98	3,80
CP19	5,96	7,35	1,66	4,99
CP20	1,44	3,05	3,01	2,50
CP21	3,25	2,19	4,52	3,32
CP22	5,80	2,41	2,79	3,67
CP23	3,12	2,16	1,13	2,14
CP24	3,33	1,70	2,22	2,42
CP25	2,62	2,00	2,47	2,36
CP26	3,62	3,59	2,31	3,17
CP27	2,16	3,15	4,14	3,15
CP28	1,49	1,86	3,83	2,39
CP29	3,23	2,58	1,40	2,40
CP30	8,67	2,94	3,60	5,07
CP31	1,87	3,41	2,04	2,44
CP32	3,67	3,04	2,45	3,05
Média	3,56	2,71	2,89	3,05
Desv. P.	1,53	1,05	1,10	0,82

Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet apontou necessidade de rejeição do valor obtido para o corpo de prova 30 para a estimativa utilizando somente as áreas da seção 1, do corpo de prova 19 para estimativa utilizando somente áreas da seção 2 e do corpo de prova 8 considerando estimativa somente das áreas da seção 3. A Tabela 22 mostra os valores de média, desvio

padrão e coeficiente de variação após aplicação do critério de Chauvenet nas estimativas utilizando áreas das seções isoladas..

Tabela 25 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando área das seções isoladas (teor de fibras 20kg/m³).

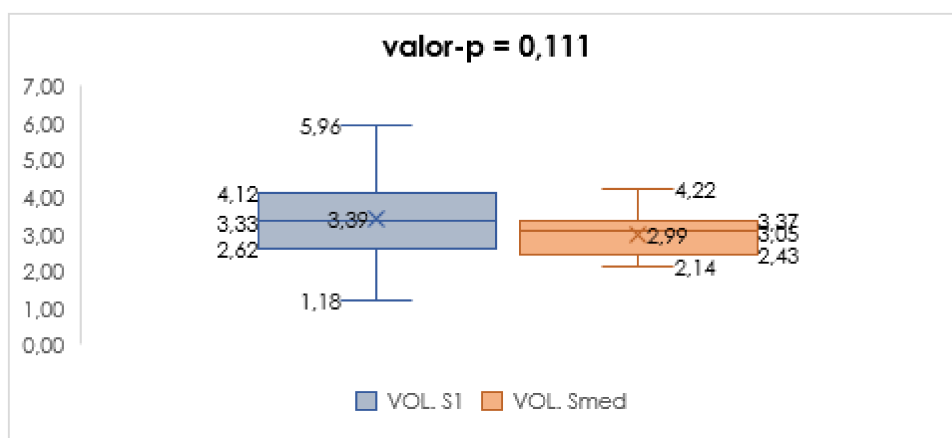
CP	Volume s1 (cm³)	Volume s2 (cm³)	Volume s3 (cm³)	Volume Sméd (cm³)
Média	3,39	2,56	2,98	2,99
Desv. P.	1,23	0,63	1,00	0,56
Coeficiente de Variação	36,30%	24,52%	33,39%	18,69%

Fonte: Autor.

O valor obtido para a probabilidade de significância (valor-p) para o volume estimado apenas com a área das fibras presentes na seção 2 foi menor que 0,05, indicando haver diferença significativa entre os resultados obtidos para as hipóteses de cálculo, sugerindo que a estimativa de volume de fibras tomando apenas uma imagem da seção transversal não apresenta resultados próximos aos estimados considerando a média das áreas de fibras nas três seções. As Figura 73 a Figura 75 ilustram essa afirmação.

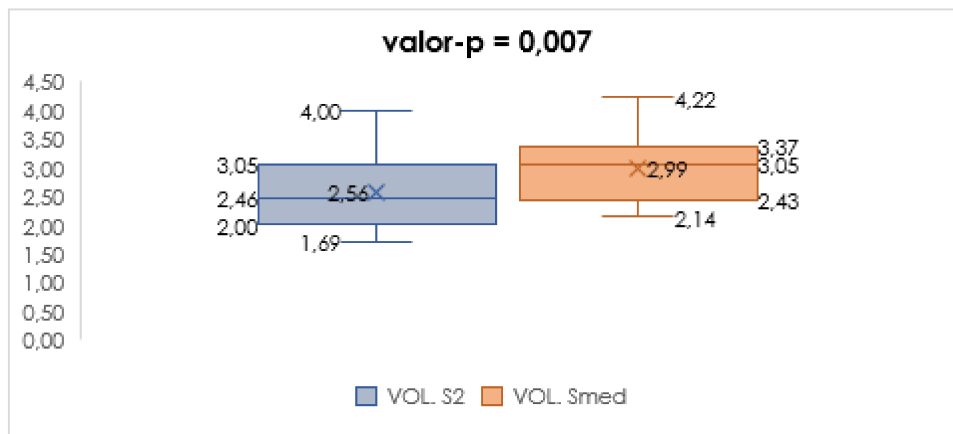
Os detalhes para os resultados obtidos para as análises de dados pelo teste-t estão apresentados no Apêndice B.

Figura 73 – Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 1 e área média das três seções transversais, considerando teor de fibras de 20 kg/m³



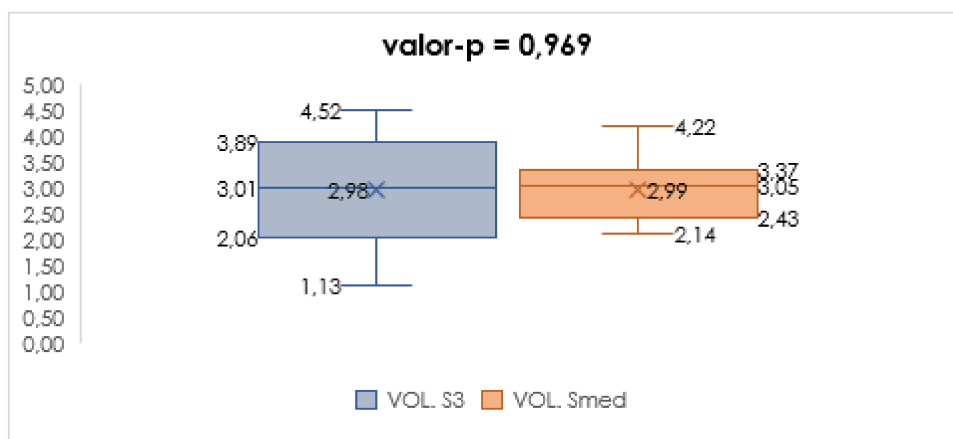
Fonte: Autor.

Figura 74 - Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 2 e área média das três seções transversais, considerando teor de fibras de 20 kg/m³



Fonte: Autor.

Figura 75 - Teste-t para volume de fibras considerando área da seção 3 e área média das três seções transversais, considerando teor de fibras de 20 kg/m³



Fonte: Autor.

5.2.1 Verificação de volumes estimados utilizando duas imagens de seção transversal para cada corpo de prova

Para verificar se a utilização de duas imagens da seção transversal conduz a resultados satisfatórios na estimativa com precisão do volume de fibras presentes de cada corpo de prova, foi realizado o teste-t considerando os volumes estimados utilizando a média das áreas da seção 1 e 2, média das áreas da seção 1 e 3 e a média das áreas das seções 2 e 3, e verificado o nível de significância para os resultados obtidos em comparação com os volumes estimados, considerando a área média das três seções. O nível de significância utilizado para o teste-t foi de 5%. A Tabela 26 mostra os volumes estimados considerando

as áreas de fibras para duas seções transversais e para a média das seções transversais, para o teor de fibras de 20 kg/m³.

Os valores apresentados na Tabela 26 para “Volume s1/s2” representam o volumes estimados para fibras nos corpos de prova considerando apenas áreas de fibras nas seções transversais 1 e 2 dos corpos de prova, o “Volume s1/s3” representa os volumes estimados para fibras nos corpos de prova considerando apenas áreas de fibras nas seções transversais 1 e 3 dos corpos de prova e o “Volume s2/s3”, as estimativas considerando as áreas de fibras para seções 2 e 3. A coluna “Volume Smed” mostra as estimativas para volumes considerando a média para as áreas de fibras das três seções transversais.

Tabela 26 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 20 kg/m³
(continua)

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Smed (cm ³)
CP1	3,57	4,06	2,62	3,85
CP2	2,59	2,56	1,28	2,36
CP3	2,10	2,52	1,43	2,26
CP4	3,38	3,83	1,77	3,29
CP5	2,74	2,32	1,66	2,51
CP6	2,95	4,07	1,93	3,30
CP7	3,01	3,34	2,00	3,11
CP8	1,44	0,67	0,62	1,01
CP9	3,33	4,28	2,27	3,67
CP10	3,70	3,00	1,66	3,06
CP11	2,77	3,12	2,03	2,98
CP12	2,51	2,75	1,48	2,49
CP13	4,38	5,18	2,06	4,22
CP14	2,36	3,55	2,13	3,03
CP15	3,47	3,59	2,14	3,42
CP16	3,24	3,66	2,27	3,44
CP17	3,23	3,11	1,44	2,83
CP18	3,72	3,70	2,66	3,80
CP19	6,66	3,81	3,00	4,99
CP20	2,24	2,22	2,02	2,50
CP21	2,72	3,88	2,24	3,32
CP22	4,10	4,30	1,73	3,67
CP23	2,64	2,13	1,10	2,14
CP24	2,51	2,77	1,31	2,42
CP25	2,31	2,54	1,49	2,36
CP26	3,61	2,96	1,97	3,17
CP27	2,66	3,15	2,43	3,15
CP28	1,67	2,66	1,90	2,39
CP29	2,90	2,32	1,33	2,40

Tabela 27 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 20 kg/m³ (continua)

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
CP30	5,80	6,14	2,18	5,07
CP31	2,64	1,95	1,82	2,44
CP32	3,36	3,06	1,83	3,05
Média	3,14	3,22	1,87	3,14
Desv. P	1,05	1,02	0,49	1,05

Fonte: Autor.

O critério de Chauvenet aplicado aos dados apresentados na Tabela 26 aponta a necessidade de rejeição dos volumes estimados para os CP's 19 e 30 das estimativa "Volume s1/s2 (cm³)", CP's 8 e 30 para estimativa "Volume s1/s3 (cm³)" e CP 8 para estimativa "Volume s2/s3 (cm³)".

Os detalhes dos resultados obtidos para rejeição de dados estão apresentados no Apêndice A.

A Tabela 28 apresenta a média, desvio padrão e coeficiente de variação após aplicação do critério de Chauvenet e desconsideração dos dados rejeitados na estimativa do volume de fibras considerando as médias de áreas de fibras para duas seções transversais.

Tabela 28 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais (teor de fibras 20kg/m³).

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
Média	3,02	3,21	1,91	2,99
Desv. P.	0,84	0,77	0,44	0,56
Coeficiente de Variação	27,75%	23,90%	23,22%	18,69%

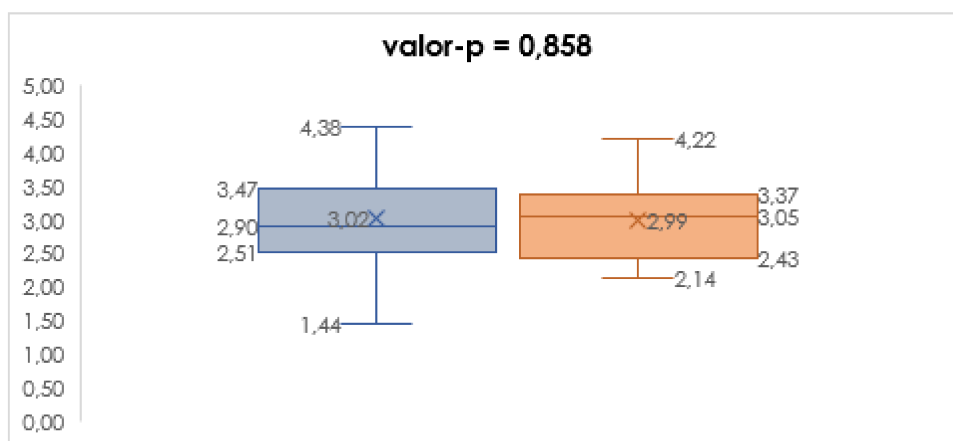
Fonte: Autor.

A verificação de existência de variação significativa em volumes estimados considerando a média de áreas de duas seções transversais em relação ao volume estimado com a média das três seções transversais resultou em valores-p de 0,858, 0,206 e 0,000, para Volume s1/s2, Volume s1/s3 e Volume s2/s3, respectivamente. Esse resultado sugere que a estimativa dos volumes de fibras em corpos de prova utilizando imagens de apenas duas seções transversais

em corpos de prova se mostrou satisfatória, não apresentando variação significativa, para os casos onde foram utilizadas as imagens das seções 1 e 2, e imagens das seções 1 e 3.

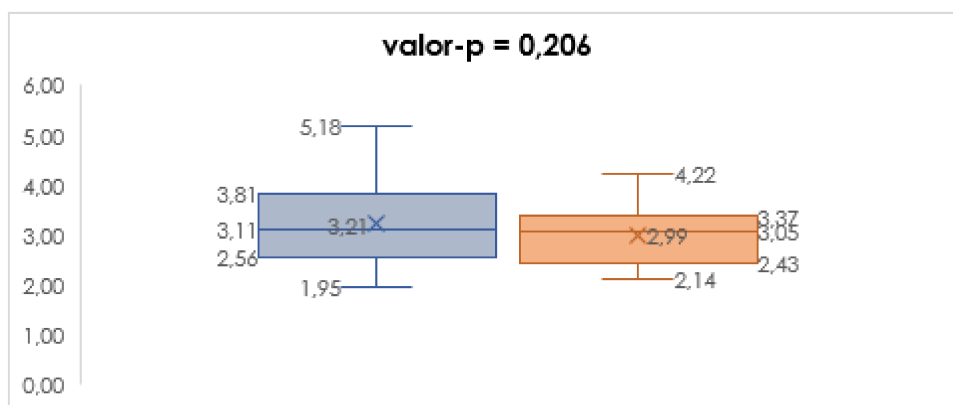
Para a estimativa do volume de fibras considerando a área média de fibras entre as seções transversais 2 e 3, os resultados apresentaram variação significativa em relação ao apresentado pela estimativa considerando a área média de fibras das três seções transversais. As Figura 73 a Figura 75 ilustram essa afirmação.

Figura 76 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 1 e 2 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m³



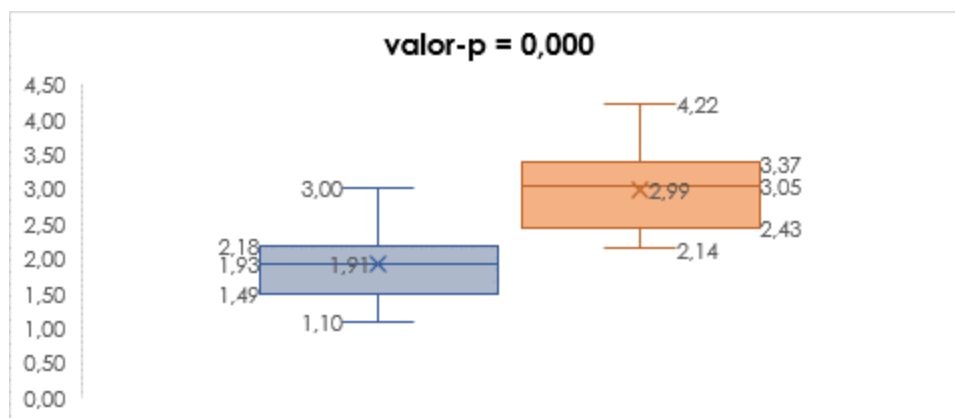
Fonte: Autor.

Figura 77 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 1 e 3 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m³



Fonte: Autor.

Figura 78 - Teste-t para volume de fibras considerando média das áreas de fibras das seções 2 e 3 e área média das três seções transversais, para teor de fibras de 20 kg/m³



Fonte: Autor.

A Tabela 29 apresenta os volumes estimados considerando a média das áreas de fibras para duas seções transversais e para a média das seções transversais, para o teor de fibras de 30 kg/m³.

Tabela 29 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 30 kg/m³ (continua)

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
CP1	4,10	4,50	2,96	4,35
CP2	7,77	4,50	4,89	6,53
CP3	6,67	7,33	4,15	6,74
CP4	4,94	4,52	3,06	4,68
CP5	11,74	10,17	6,09	10,35
CP6	6,18	6,76	4,17	6,40
CP7	5,92	4,95	3,52	5,39
CP8	4,35	2,76	1,77	3,25
CP9	3,10	4,75	2,80	4,02
CP10	7,30	5,14	3,38	5,84
CP11	3,32	4,77	3,06	4,23
CP12	4,56	5,21	3,23	4,87
CP13	3,64	6,18	4,90	5,72
CP14	4,84	4,83	2,66	4,56
CP15	7,35	6,39	3,61	6,38
CP16	4,18	5,10	3,19	4,69
CP17	14,80	9,40	5,26	10,70
CP18	3,67	5,29	3,23	4,60
CP19	5,18	5,86	4,57	5,96
CP20	4,82	5,88	3,29	5,21
CP21	6,09	6,18	3,36	5,77
CP22	3,45	3,13	1,94	3,16
CP23	2,83	3,48	2,57	3,39

Tabela 30 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 30 kg/m³ (conclusão)

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
CP24	4,23	4,98	2,45	4,30
CP25	5,74	4,52	2,86	4,85
CP26	5,21	5,29	3,25	5,12
CP27	4,35	4,29	2,65	4,20
CP28	3,01	2,62	2,24	3,00
CP29	4,89	4,41	2,64	4,42
CP30	3,61	4,19	3,12	4,16
CP31	4,86	5,66	3,63	5,32
CP32	4,75	5,45	3,42	5,11
Média	5,36	5,26	3,37	5,23
Desv. P	2,47	1,59	0,96	1,70

Fonte: Autor.

As estimativas para os CP's 5 e 17, para “Volume s1/s2 (cm³)” e “Volume s1/s3 (cm³)”, e CP 5 para “Volume s2/s3 (cm³)” foram desconsideradas por extrapolarem a tendência dominante para o volume de fibras em corpos de prova utilizando o critério de Chauvenet. O resumo com valores valores de médias, desvio padrão e coeficiente de variação após desconsideração de dados discrepantes são apresentados na

Tabela 31.

Tabela 31 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais (teor de fibras 30kg/m³).

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
Média	4,83	4,96	3,28	4,87
Desv. P.	1,32	1,09	0,83	1,01
Coeficiente de Variação	27,38%	22,03%	25,39%	20,73%

Fonte: Autor.

Assim como nos testes realizados para estimativas em concretos com teor de fibra de 20 kg/m³, o teste-t para as estimativas dos volumes em corpos de prova, com teor de fibra de 30 kg/m³, considerando a média de áreas de duas seções transversais comparadas com as estimativas a partir da média de três seções transversais resultou em “valores-p” de 0,888,

0,744 e 0,000, para Volume s1/s2, Volume s1/s3 e Volume s2/s3, respectivamente. Mais uma vez os resultados apontaram variação significativa para as estimativas considerando a média de áreas das seções 2 e 3.

Os volumes estimados para o teor de fibras de 40 kg/m³, considerando a média das áreas de fibras para duas seções transversais e para a média das seções transversais são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 – Volumes estimados considerando média para duas seções. Teor de fibras 40 kg/m³

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
CP1	6,50	5,10	3,45	5,59
CP2	6,95	8,27	3,84	6,99
CP3	6,64	8,99	3,57	6,99
CP4	9,05	11,64	5,87	9,83
CP5	10,47	9,48	4,67	8,99
CP6	7,00	8,87	4,50	7,54
CP7	6,13	6,66	1,99	5,26
CP8	8,63	7,74	4,30	7,61
CP9	3,60	3,67	2,03	3,44
CP10	6,79	6,54	3,21	6,05
CP11	5,23	5,53	3,28	5,23
CP12	8,92	10,06	4,04	8,34
CP13	5,12	5,08	2,02	4,41
CP14	5,29	5,57	2,73	4,99
CP15	6,46	5,37	3,21	5,55
CP16	4,03	6,33	4,92	5,91
CP17	6,34	6,71	3,65	6,17
CP18	5,62	6,75	2,97	5,61
CP19	3,89	5,70	3,00	4,70
CP20	7,04	8,13	3,82	6,97
CP21	6,84	7,21	4,51	6,94
CP22	7,08	7,40	2,90	6,28
CP23	8,03	9,53	4,49	8,10
CP24	5,31	6,17	3,45	5,55
CP25	3,68	5,49	3,99	5,06
CP26	4,21	4,52	3,74	4,78
CP27	4,87	5,30	2,39	4,58
CP28	8,52	10,06	3,94	8,17
CP29	7,92	6,68	4,84	7,29
CP30	4,13	3,59	1,82	3,49
CP31	6,73	6,36	3,72	6,23
CP32	5,35	6,18	4,15	5,92
Média	6,32	6,90	3,59	6,20
Desv. P	1,73	1,94	0,95	1,52

Fonte: Autor

A verificação de dados discrepantes nos resultados apontou para necessidade de desconsideração do CP 4 para todas as estimativas de volume calculadas considerando a média de área de fibras presentes em duas seções transversais. A Tabela 33 mostra o resumo com a média, desvio padrão e coeficiente de variação após exclusão dos dados rejeitados.

Tabela 33 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação após da rejeição de dados discrepantes para estimativa de volume de fibras utilizando média de duas áreas de seções transversais (teor de fibras 40kg/m³).

CP	Volume s1/s2 (cm ³)	Volume s1/s3 (cm ³)	Volume s2/s3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)
Média	6,19	6,74	3,52	6,09
Desv. P.	1,58	1,76	0,87	1,39
Coeficiente de Variação	25,56%	26,12%	24,69%	22,89%

Fonte: Autor.

O teste-t para verificação de existência de variação significativa para estimativa dos volumes de fibras presentes nos corpos de prova resultou em valores-p de 0,784, 0,109 e 0,000, para Volume s1/s2, Volume s1/s3 e Volume s2/s3, comparados com o Volume Sméd, respectivamente. Esse resultado foi observado para os corpos de prova com os três teores de fibras utilizados, indicando que a estimativa dos volumes de fibras em corpos de prova utilizando imagens de apenas duas seções transversais em corpos de prova apresentou, para o número de amostras estudadas, resultados discrepantes em relação aos verificados no Volume Smed apenas para o volume estimado com as áreas da seção 2 e 3.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A verificação da quantidade de fibras em corpos de prova com três diferentes teores de fibra incorporadas a mistura, a partir da desmoldagem no estado fresco, apresentou grande variabilidade para o percentual de fibras nos corpos de prova em relação ao esperado. O coeficiente de variação apresentou valores similares para os três teores de fibras, sugerindo que a variabilidade não foi dada por influências no processo de moldagem dos corpos de prova. Os percentuais médios para volumes de fibras em relação ao esperado foram de 79,32%, 86,94% e 86,01%, para os teores de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³, respectivamente.

Assim como nos volumes de fibras determinados pela desmoldagem de corpos de prova no estado fresco, os volumes estimados utilizando o PDI também apresentaram variabilidade em relação ao esperado. A comparação das curvas de distribuição para volumes de fibras em corpos de prova pela desmoldagem e pelo PDI para os três teores de fibras mostrou semelhança para os valores de médias e desvio padrão, resultando em coeficientes de variação próximos para as duas formas de determinação do volume de fibras.

A validação da rotina desenvolvida em MatLAB para estimativa do volume de fibras presentes em corpos de prova cilíndricos de diâmetro 100 mm e altura 200 mm foi confirmada pelo teste-t entre os volumes determinados pela desmoldagem dos corpos de prova e os volumes determinados pelo PDI. Neste teste não foi observada variação significativa entre os resultados obtidos para as duas formas de estimativa do volume de fibras, tendo obtido “valor-p” de 0,879, 0,731 e 0,255, para os teores de 20 kg/m³, 30 kg/m³ e 40 kg/m³, respectivamente.

A verificação da viabilidade para utilização de apenas uma imagem de seção transversal para cada corpo de prova na estimativa do volume de fibras mostrou-se falha, apresentando variabilidade significativa para os resultados estimados para volumes com áreas de apenas uma seção em relação aos valores estimados consideradas as médias de áreas de fibras das três seções transversais.

A análise da viabilidade para utilização de apenas duas imagens de seções transversais em um mesmo corpo de prova na estimativa do volume de fibras mostrou-se satisfatória para utilização das imagens das seções 1 e 2 e imagens das seções 1 e 3. Os resultados obtidos para os valores-p foram de 0,858, 0,206, respectivamente.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se como propostas para trabalhos futuros:

- Desenvolver algoritmo para detecção automática de melhor limiar para cada imagem processada em função das diferentes condições de exposição e iluminação do objeto;
- Verificar se o percentual para o volume de fibras em corpos de prova se mantém, para teores de fibras diferentes dos abordados nessa pesquisa, similar aos determinados nesse trabalho;
- Aprimoramento da rotina para estimativa de volumes de fibras em peças de diferentes formas e seções transversais ;
- Verificar a viabilidade da utilização da rotina desenvolvida nessa pesquisa para fibras de aço de diferentes formas e comprimentos.

REFERÊNCIAS

ABRISHAMBAF; A. BARROS J.A.O; CUNHA, V.M.C.F. Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. **Cement and Concrete Research**, v.51, p.57–66, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.009>

ACHARYA, T.; RAY, A. K. **Image Processing: Principles and Applications**. John Wiley & Sons, Inc. 2005. <https://doi.org/10.1002/0471745790>

AL-QURESHI, H. A. **Composite Materials: Fabrication and Analysis**. 3. ed. São José Dos Campos, Sp: Ita - Cta, 1984.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1R**: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. [S.I.]: ACI committee, 1996. Reapproved 2002. 66 p.

ANDRADE, A. F.; BOTELHO, M. F.; CENTENO, J. A. S. Classificação de imagens de alta resolução integrando variáveis espectrais e forma utilizando redes neurais artificiais. **XI Simpósio Brasileiro de sensoriamento Remoto**. Anais. Belo Horizonte, Brasil: INPE, p. 265-272, 2003.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldada ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. Tese de Doutorado – EESC. São Carlos/SP, 2002.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2007. 7 p.

ASTM D3878 – 2007: “**Standard Terminology for Composite Materials**”, ASTM International, Philadelphia, 2007.

AZEVEDO, E.; CONCI, A. **Computação Gráfica: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: **XII Angewandte Geographische Informationsverarbeitung**. Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2000.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**. McGraw-Hill International Editions, New York, 1992.

BANTHIA, N.; MAJDZADEH, J.; WU, J.; BINDIGANAVILE, V. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. **Cement and Concrete Composites**, v. 48, p. 91-97, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>

BARKSDALE, R.D., KEMP, M.A., SHEFFIELD, W.J. and HUBBARD, J.L., **Measurement of aggregate shape, surface, area, and roughness**. Transportation Research Record 1301, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1991

BARROS, J. A. O. Estado-da-arte dos betões reforçados com fibras. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, 1996.

BARROS, J. A. O; GOUVEIA, A. V. Simulação do comportamento à compressão uniaxial do betão reforçado com fibras de aço. **Engenharia Civil**, Universidade do Minho, n. 8, p. 32-52, 2000.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. CRC Press, 2007.

BENTZ, D. P. and GARBOCZI, E. J. **Digital-Image-Based Computer Modeling and Visualization of Cement-Based Materials**. Transportation Research Record 1526, National Research Council, Washington D.C., 1996.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra de Aramida Kevlar**, 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BERRYMAN, James G.; BLAIR, Stephen C. Use of digital image analysis to estimate fluid permeability of porous materials: Application of two-point correlation functions. **Journal of applied Physics**, v. 60, n. 6, p. 1930-1938, 1986.

<https://doi.org/10.1063/1.337245>

BONIFAZI, G., SAPPA G; DE CASA, G. **Applications of images digital analysis in the characterization of grains morphology influence in mechanical behavior of granular soils**. Materials Research Society Symposium, Proceedings, Vol. 362, 1995.

BRANDT, A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, p. 3-9, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>

CARVALHO, E. **Estudo da variabilidade da tenacidade de concretos reforçados com fibras de aço por meio de ensaios à flexão em prismas moldados e extraídos**. 2012.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

CAVALCANTI, W. S. **Compósitos poliéster/tecidos tramados vegetal-vidro: caracterização mecânica e simulação da sorção de água**. Tese (doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, 2006.

CHEN, S. D.; RAMLI, A. R. Minimum mean brightness error bi-histogram equalization in contrast enhancement. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 49, no. 4, p. 1310– 1319, 2003a. <https://doi.org/10.1109/TCE.2003.1261234>

CHEN, S. D.; RAMLI, A. R. Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 49, no. 4, p. 1301–1309, 2003b. <https://doi.org/10.1109/TCE.2003.1261233>

COUMAR, S. O.; RAJESH, P.; SADANANDAM, S. Image restoration using filters and image quality assessment using reduced reference metrics. In: **Circuits, Controls and Communications (CCUBE), 2013 International conference on**. IEEE, p. 1-5, 2013.

DUPONT, D; VANDERWALLE, L. Distribution of steel fibres in rectangular sections. **Cement e Concrete Composites**, v.27, p. 391-398, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005>

EDGINGTON, J.; HANNANT, D.J. Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration. **Material and Structures**, p. 41-44, 1972. <https://doi.org/10.1007/BF02479076>

FÉLIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrióxissilano como agente de adesão**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

_____. **Concreto reforçado com fibras**. São Paulo, 2011. 247 p.

_____. **Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural**. 56º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2014.

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. A. Nova normalização brasileira sobre fibras de aço. **Concreto & construções**. São Paulo, v.36, n. 50, p. 67-76, 2008.

FORSYTH, D.; PONCE, J. **Computer Vision: A Modern Approach**. Prentice Hall, 693 p., 2003.

GAY, D.; HOA, S. V. **Composite Materials: Design and Applications**. 2nd edition, CRC Press, 548p., 2007

GARCEZ, E. O. A. **Análise técnico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibra de aço submetidos a cargas de impacto**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GETTU, R.; GARDNER, D.R.; SALDIVAR, H.; BARRAGAN, B.E. Study of the distribution and orientation of fibres in SFRC specimens. **Material and Structures**, v.38, p.31-37, 2005. <https://doi.org/10.1007/BF02480572>

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluído reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, 2005.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. **Digital Image Processing**. Pearson Education, 954p., 2009.

GROSSI, Breno Ferreira. **Uma contribuição para a modelagem numérica do concreto com fibras curtas de aço**. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

GUPTA, Gajanand. Algorithm for image processing using improved median filter and comparison of mean, median and improved median filter. **International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)**, v. 1, n. 5, p. 304-311, 2011.

HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concretes**. Chinchester: John Wiley, 1978.

HAPP, P.N.; FEITOSA, R.Q.; BENTES, C.; FARIAS, R. Um algoritmo de segmentação por segmentação por crescimento de regiões para GPUS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 2, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702013000200004>

ISLAN, S. T. **Study of same parameters affecting the measured flexural toughness of fiber reinforced concrete**. Dissertação (Mestrado). The Faculty of Graduate Studies (Civil Engineering), The University of British Columbia, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSULTORIA E ENGENHARIA ESTRUTURAL. **Prática recomendada IBRACON/ABECE: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras**. Ed. IBRACON/ABECE, 2016, 39 p.

JAIN, A. K. **Fundamentals of Digital Image Processing**. 4rd edition, Prentice Hall, 569 p., 1989.

JÄHNE, B. **Digital Image Processing**. 5rd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 585p., 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04781-1>

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. 2nd edition, Pearson, 608 p., 2006.

JOHANNSEN, G.; BILLE, J. A threshold selection method using information measures. In: **ICPR**. 1982. p. 140-143.

KAPUR, J. N; SAHOO, P. K.; WONG, A. K. C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. **Computer vision, graphics, and image processing**, v. 29, n. 3, p. 273-285, 1985. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90125-2)

KIM, Y. T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v.43, p. 1-8, 1997. <https://doi.org/10.1109/30.580378>

KUITY, A; Das, A. **Study on Aggregate Size Distribution in Asphalt Mix Using Images Obtained by Different Imaging Techniques**. In Transportation Research Procedia. v. 17, 2016.

LAKSHMI, S. et al. A study of edge detection techniques for segmentation computing approaches. **IJCA Special Issue on Computer Aided Soft Computing Techniques for Imaging and Biomedical Applications CASCT**, p. 35-40, 2010.

LEE, S.U.; CHUNG, S.Y.; PARK, R.H. A comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation. **Computer Vision, Graphics, Image Processing**. v. 52, n. 2, p. 171-190, 1990. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(90\)90053-X](https://doi.org/10.1016/0734-189X(90)90053-X)

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. Ciência e Tecnologia. Ed. Edgard Blücher, 2006.

LEE, B. Y. Kim, Y. Y., Yi, S. T., & Kim, J. K. . Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 9, n. 6, p. 567-577, 2013. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.593891>

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**, Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

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

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. 1^a ed., Brasília, UnB/CNPq, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2^a ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MOHAMMADI, Y., SINGH, S.P.; KAUSHIK, S. K. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, **Construction and Building Materials**, v. 22, 2008, p. 956-965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004>

MORAES NETO, B. N. **Comportamento à Punção de Lajes Lisas em Concreto Reforçado com Fibras de Aço sob Carregamento Simétrico**. 2013. 363 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

NAAMAN, A. E. Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**. Japan Concrete Institute, v.1, n.9, p. 241-252, nov. 2003.

NAAMAN, A. E. High performance fiber reinforced cement composites: classification and applications. In: CBM-CI International Workshop. Karachi, Pakistan, 2003a.

NAAMAN, A.E., REINHARDT, H.W. "Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response", **Materials and Structures** v. 39, pp. 547-555, 2006. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9103-2>

NABAWY, B. **Estimating porosity and permeability using Digital Image Analysis (DIA) technique for highly porous sandstones**. Arabian Journal of Geosciences, 2013.

NOVO, E. M. L. M.; **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OOI, C. H.; KONG, N. S. P.; IBRAHIM, H. Bi-histogram equalization with a plateau limit for digital image enhancement. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, vol.55, p. 2072-2080, 2009. <https://doi.org/10.1109/TCE.2009.5373771>

OLIVEIRA JÚNIOR, L. A. O., **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análise estática e dinâmica**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012

OTSU, N. **A threshold selection method from gray-level histograms**, IEEE Transactions on Systems, vol. 9, pp. 62-66, 1979. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. **Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações**. São Paulo: Thomson Learning, 508 p., 2008.

PEREIRA, C. D. **Influência da Refletância e da Emitância de Superfícies Externas no Desempenho Térmico de Edificações Florianópolis**, 2014. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

- PHILLIPS, D. **Image Processing in C**. 2nd edition, R & D Publications, 794 p., 2000.
- PUJADAS, P.; BLANCO, A.; CAVALARO, S.H.P.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A. Multidirectional double punch test to assess the post-cracking behavior and fibre orientation of FRC. **Construction and Building Materials**, v. 58, p-214-224, 2014.
- PUN, T. A new method for grey-level picture thresholding using the entropy of the histogram. **Signal processing**, v. 2, n. 3, p. 223-237, 1980. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(80\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0165-1684(80)90020-1)
- RIDLER, T.W., CALVARD, S. Picture thresholding using an iterative selection method. **IEEE Transactions on Systems Man Cybernet**, v. 8, P.630–632, 1978. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1978.4310039>
- ROBINS, P.J.; AUSTIN, S.A.; JONES, S.A. Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 55, p-225-235, 2003.
- RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006-03-31. 140 p. (INPE-14166-TDI/1083). Dissertação de mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- RULANINGTYAS, Riries; AIN, Khusnul. Edge detection for brain tumor pattern recognition. In: **Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2009 International Conference on**. IEEE, 2009.
- RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. 3rd edition, CRC Press LLC, 1998. ISBN 0849325323.
- SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo São Paulo, 2012.
- SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, v. 18, n. 2, p. 1273-1285, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200003>
- SENTHILKUMARAN, N.; RAJESH, R. Edge detection techniques for image segmentation—a survey of soft computing approaches. **International journal of recent trends in engineering**, v. 1, n. 2, p. 250-254, 2009.
- SHIMOSAKA, T. J. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos auto adensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

- SILVA, H. P. **Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados**. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Coimbra, 2014.
- SOVJÁK, R.; MÁCA, P.; IMLAUF, T. Effect of fibre length on the fracture energy of UHPFRC. **Procedia Engineering**, v. 193, p. 74-79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.188>
- STEFFEN, C. A. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Disponível em: <http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em: 27 de março de 2017.
- TANG, J.R.; ISA, N. A. M. Bi-histogram equalization using modified histogram bins. **Applied Soft Computing**, v. 55, p. 31-43, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.053>
- TORRENTS, J. BLANCO, A.; PUJADAS, P. AGUADO, A.; GARCIA, P.J.; MORAGUES, M.A.S. Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. **Materials and Structures**. V. 45, p. 1577-1592, 2012. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9858-6>
- VASILIEV, Valery V. **Mechanics of composite structures**. Routledge, 2017.
- VINCENT, O. R.; FOLORUNSO, O. A descriptive algorithm for sobel image edge detection. Em: **Proceedings of Informing Science & IT Education Conference (InSITE)**, 2009. <https://doi.org/10.28945/3351>
- VILLARES, A. M. O. **Influência da largura do corpo-de-prova na medida da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**, 2001. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- VITOR, P.C.P. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado sem armadura transversal reforçadas com fibras de aço**. 217 p. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- YU, S.N; JANG, J.H; HAN, C.S. Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel. **Automation in Construction**, v. 16, n. 3, p. 255-261, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.003>
- WAN, Y.; CHEN, Q.; ZHANG, B.-M. Image enhancement based on equal area dualistic subimage histogram equalization method. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 45, no. 1, p. 68–75, 1999. <https://doi.org/10.1109/30.754419>
- WILLE, K.; TUE, N. V.; MONTESINOS, G.J.P. Fiber distribution and orientation in UHP-FRC beams and their effect on backward analysis. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1825-1838, 2013. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0153-y>

XU, X.; XU, S.; JIN, L.; SONG, E. Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. **Pattern recognition letters**, v. 32, n. 7, p. 956-961, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.01.021>

ZHOU, B.; UCHIDA, Y. Relationship between fiber orientation/distribution and post-cracking flexural strength in ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Composites**, v. 83. P.66-75, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.007>

APÊNDICE A – CRITÉRIO DE CHAUVENET PARA REJEIÇÃO DE VALORES MEDIDOS

Para aplicação do método primeiramente é calculada a média (x_{med}) e desvio padrão (σ) do conjunto de dados medidos, conforme Equação 18. A partir do valor de cada medida (x_i) é calculado o valor do desvio Δ_x para cada ponto, conforme Equação 19. Os resultados obtidos para Δ_x são comparados com o valor da razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, conforme Quadro 2, devendo ser rejeitados caso o desvio de cada um dos pontos seja superior aos apresentados na Tabela x, para a respectiva quantidade de dados medidos.

$$\text{Desvio Padrão } (\sigma) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_n)^2 \right]^{1/2} \quad \text{Equação 18}$$

$$\Delta_x = \frac{|x_i - x_{med}|}{\sigma} \quad \text{Equação 19}$$

Quadro 2 – Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido

Dados Medidos N	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão	Dados Medidos N	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão
3	1,38	20	2,24
4	1,54	21	2,26
5	1,65	22	2,28
6	1,73	23	2,30
7	1,80	24	2,31
8	1,85	25	2,33
9	1,91	26	2,35
10	1,96	27	2,36
11	1,99	28	2,37
12	2,03	29	2,38
14	2,10	50	2,57
15	2,13	100	2,81
16	2,16	300	2,14
17	2,18	500	3,29
18	2,20	1000	3,48
19	2,22		

Fonte: Arif (2014).

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PELA DESMOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA NO ESTADO FRESCO – TEOR DE FIBRA DE 20 kg/m³
CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)

LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	2,506	0,1735375	0,4192268	ACEITADO
2	2,385	0,2890726	0,541073	ACEITADO
3	2,397	0,2761997	0,5288883	ACEITADO
4	3,003	0,0063736	0,0803423	ACEITADO
5	2,918	2,419E-05	0,00495	ACEITADO
6	3,717	0,6307301	0,7992344	ACEITADO
7	3,293	0,1372095	0,372773	ACEITADO
8	3,003	0,0063736	0,0803423	ACEITADO
9	2,083	0,7061807	0,8456883	ACEITADO
10	2,349	0,3294503	0,5776268	ACEITADO
11	3,257	0,1116195	0,3362192	ACEITADO
12	2,446	0,2276402	0,4801499	ACEITADO
13	3,184	0,0683557	0,2631115	ACEITADO
14	2,010	0,8335532	0,918796	ACEITADO
15	3,790	0,751396	0,8723421	ACEITADO
16	3,257	0,1116195	0,3362192	ACEITADO
17	4,589	2,7753392	1,6765266	ACEITADO
18	2,288	0,4026102	0,6385499	ACEITADO
19	4,698	3,150283	1,7861881	ACEITADO
20	1,501	2,0206965	1,4305497	ACEITADO
21	0,000	8,5431037	2,9414417	REJEITADO
22	2,991	0,004587	0,0681577	ACEITADO
23	2,991	0,004587	0,0681577	ACEITADO
24	3,330	0,1654381	0,4093268	ACEITADO
25	5,461	6,4398435	2,5538187	ACEITADO
26	2,797	0,0158748	0,1267961	ACEITADO
27	2,155	0,5893629	0,7725806	ACEITADO
28	2,506	0,1735375	0,4192268	ACEITADO
29	2,773	0,0225631	0,1511654	ACEITADO
30	2,397	0,2761997	0,5288883	ACEITADO
31	3,911	0,975961	0,9941882	ACEITADO
32	3,548	0,390223	0,6286499	ACEITADO
Xm	2,923			
DESVPAD	0,9937			

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PELA DESMOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA NO ESTADO FRESCO – TEOR DE FIBRA 30 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (30 kg/m³)

LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	6,320	1,84916152	1,428695464	ACEITADO
2	3,729	1,515841522	1,293537852	ACEITADO
3	5,570	0,371082483	0,640011045	ACEITADO
4	4,516	0,197312635	0,466691284	ACEITADO
5	4,129	0,691630406	0,87375421	ACEITADO
6	6,647	2,845108481	1,772154808	ACEITADO
7	4,916	0,001993346	0,046907642	ACEITADO
8	4,686	0,075455681	0,288601254	ACEITADO
9	4,516	0,197312635	0,466691284	ACEITADO
10	4,661	0,089345541	0,314042687	ACEITADO
11	4,795	0,027464198	0,174114806	ACEITADO
12	4,335	0,391642408	0,657502031	ACEITADO
13	4,335	0,391642408	0,657502031	ACEITADO
14	4,710	0,062738579	0,263159821	ACEITADO
15	3,669	1,668575012	1,357141434	ACEITADO
16	6,296	1,783890171	1,403254031	ACEITADO
17	3,802	1,342236593	1,217213554	ACEITADO
18	5,715	0,569205398	0,792659643	ACEITADO
19	4,783	0,031623826	0,186835523	ACEITADO
20	5,485	0,275007895	0,55096603	ACEITADO
21	5,170	0,043937792	0,220227403	ACEITADO
22	4,492	0,219411806	0,492132717	ACEITADO
23	5,848	0,787906562	0,932587523	ACEITADO
24	5,170	0,043937792	0,220227403	ACEITADO
25	3,075	3,553253138	1,980456539	ACEITADO
26	4,710	0,062738579	0,263159821	ACEITADO
27	4,540	0,176386223	0,441249851	ACEITADO
28	4,649	0,096730256	0,326763403	ACEITADO
29	6,369	1,983222493	1,47957833	ACEITADO
30	5,969	1,017510717	1,059794688	ACEITADO
31	3,983	0,954401642	1,026402807	ACEITADO
32	7,144	4,766178774	2,293704182	ACEITADO
Xm	4,960			
DESVPAD	0,951804509			

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PELA DESMOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA NO ESTADO FRESCO – TEOR DE FIBRA 40 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (40 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	5,279	1,597981154	0,730198466	ACEITADO
2	6,030	0,263620025	0,296581658	ACEITADO
3	6,042	0,251333546	0,289587838	ACEITADO
4	5,400	1,306532305	0,660260272	ACEITADO
5	3,511	9,191978236	1,751296112	ACEITADO
6	6,151	0,153948767	0,226643463	ACEITADO
7	5,993	0,302238601	0,317563116	ACEITADO
8	3,850	7,251245911	1,555469167	ACEITADO
9	4,044	6,245458772	1,443568055	ACEITADO
10	5,751	0,627129396	0,457439506	ACEITADO
11	7,967	2,027155848	0,822429461	ACEITADO
12	4,904	2,687794618	0,947006871	ACEITADO
13	6,647	0,010826401	0,060103136	ACEITADO
14	5,473	1,145736099	0,618297355	ACEITADO
15	6,344	0,039458204	0,114742351	ACEITADO
16	7,289	0,556150011	0,430775569	ACEITADO
17	9,868	11,05350354	1,920459121	ACEITADO
18	7,022	0,229811592	0,276911541	ACEITADO
19	5,206	1,786923568	0,772161383	ACEITADO
20	7,616	1,150601215	0,619608696	ACEITADO
21	5,727	0,666068648	0,471427145	ACEITADO
22	6,126	0,173537501	0,240631102	ACEITADO
23	9,928	11,45970866	1,955428219	ACEITADO
24	9,153	6,813825258	1,507823771	ACEITADO
25	7,797	1,573206628	0,724515988	ACEITADO
26	7,434	0,793963477	0,514701403	ACEITADO
27	5,485	1,119962895	0,611303535	ACEITADO
28	9,311	7,66032795	1,598743425	ACEITADO
29	7,591	1,099238051	0,605621057	ACEITADO
30	9,650	9,651855384	1,794570371	ACEITADO
31	4,565	3,914316924	1,142833817	ACEITADO
32	6,223	0,102219116	0,184680546	ACEITADO
Xm	6,543			
DESVPAD	1,731190699			

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PARA CORPOS DE PROVA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	3,855	0,6405974	0,9758041	ACEITADO
2	2,360	0,4822627	0,8466656	ACEITADO
3	2,256	0,6371457	0,9731717	ACEITADO
4	3,289	0,0549027	0,2856715	ACEITADO
5	2,515	0,2912258	0,657938	ACEITADO
6	3,304	0,0623104	0,304334	ACEITADO
7	3,115	0,0036482	0,0736388	ACEITADO
8	1,010	4,1800424	2,492645	REJEITADO
9	3,672	0,3812074	0,7527499	ACEITADO
10	3,064	0,0001001	0,0121999	ACEITADO
11	2,980	0,0054731	0,0901955	ACEITADO
12	2,494	0,313792	0,6829533	ACEITADO
13	4,218	1,3532978	1,4182956	ACEITADO
14	3,032	0,0004827	0,0267864	ACEITADO
15	3,424	0,1364415	0,450343	ACEITADO
16	3,437	0,1464848	0,4666232	ACEITADO
17	2,835	0,0481218	0,2674489	ACEITADO
18	3,804	0,5617302	0,9137638	ACEITADO
19	4,990	3,7478273	2,3602601	REJEITADO
20	2,500	0,3073927	0,6759536	ACEITADO
21	3,320	0,070795	0,3243929	ACEITADO
22	3,667	0,3759079	0,7474993	ACEITADO
23	2,137	0,84204	1,1187588	ACEITADO
24	2,416	0,4070007	0,7777995	ACEITADO
25	2,362	0,4794363	0,8441809	ACEITADO
26	3,173	0,014134	0,1449449	ACEITADO
27	3,151	0,0093728	0,1180334	ACEITADO
28	2,393	0,4374015	0,8063252	ACEITADO
29	2,405	0,4221327	0,7921266	ACEITADO
30	5,070	4,0616757	2,4570992	REJEITADO
31	2,437	0,3811614	0,7527046	ACEITADO
32	3,054	4,727E-15	8,382E-08	ACEITADO
Xm	3,054			
DESVPAD	0,8202192			

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PARA CORPOS DE PROVA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS– TEOR DE FIBRA 30 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (30 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm)²	r	ACEITADO?
1	4,348	0,772934	0,5173319	ACEITADO
2	6,534	1,7081444	0,7690603	ACEITADO
3	6,737	2,2800396	0,8885242	ACEITADO
4	4,684	0,2951604	0,3196886	ACEITADO
5	10,350	26,244378	3,0145064	REJEITADO
6	6,399	1,3728809	0,6894686	ACEITADO
7	5,386	0,0250948	0,0932159	ACEITADO
8	3,253	3,8968681	1,1615982	ACEITADO
9	4,019	1,4607462	0,7111897	ACEITADO
10	5,837	0,3713115	0,3585645	ACEITADO
11	4,228	0,9990802	0,5881637	ACEITADO
12	4,870	0,1275776	0,210177	ACEITADO
13	5,720	0,2425037	0,2897726	ACEITADO
14	4,555	0,451575	0,395424	ACEITADO
15	6,383	1,3362898	0,6802184	ACEITADO
16	4,688	0,2908804	0,3173623	ACEITADO
17	10,698	29,924328	3,2189207	REJEITADO
18	4,603	0,3901418	0,367544	ACEITADO
19	5,964	0,5421701	0,4332772	ACEITADO
20	5,215	0,0001618	0,0074849	ACEITADO
21	5,768	0,2924863	0,3182371	ACEITADO
22	3,161	4,2703947	1,2159958	ACEITADO
23	3,389	3,3808912	1,0819661	ACEITADO
24	4,295	0,868711	0,5484483	ACEITADO
25	4,852	0,1410253	0,2209767	ACEITADO
26	5,123	0,0109677	0,0616248	ACEITADO
27	4,203	1,048617	0,6025686	ACEITADO
28	2,997	4,9767661	1,3127187	ACEITADO
29	4,420	0,6519055	0,4751059	ACEITADO
30	4,163	1,1336713	0,6265297	ACEITADO
31	5,321	0,0087472	0,0550343	ACEITADO
32	5,114	0,0129262	0,0669011	ACEITADO
Xm	5,227			
DESVPAD	1,6994247			

VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS PARA CORPOS DE PROVA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS– TEOR DE FIBRA 40 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (40 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	5,594	0,3717674	0,4005772	ACEITADO
2	6,991	0,6191267	1,0376727	ACEITADO
3	6,994	0,6237725	1,0394066	ACEITADO
4	9,833	13,168911	2,7100347	REJEITADO
5	8,986	7,7367388	2,2113954	ACEITADO
6	7,540	1,78493	1,3608213	ACEITADO
7	5,258	0,895283	0,0178923	ACEITADO
8	7,606	1,9662566	1,3997874	ACEITADO
9	3,437	7,6537839	1,0532662	ACEITADO
10	6,050	0,0237162	0,4840462	ACEITADO
11	5,226	0,9567982	0,000918	ACEITADO
12	8,342	4,5725238	1,8329418	ACEITADO
13	4,410	3,2183904	0,4809785	ACEITADO
14	4,989	1,4759025	0,1402043	ACEITADO
15	5,548	0,4308443	0,1884245	ACEITADO
16	5,909	0,0871355	0,4009671	ACEITADO
17	6,174	0,0008869	0,5571415	ACEITADO
18	5,609	0,3543193	0,2244014	ACEITADO
19	4,698	2,2681985	0,3115486	ACEITADO
20	6,968	0,5842351	1,0244369	ACEITADO
21	6,939	0,5400967	1,0071134	ACEITADO
22	6,275	0,0050788	0,6166008	ACEITADO
23	8,098	3,5875872	1,6892148	ACEITADO
24	5,553	0,4242533	0,1913903	ACEITADO
25	5,056	1,3181044	0,1009087	ACEITADO
26	4,779	2,0311398	0,2639599	ACEITADO
27	4,583	2,6278808	0,3792303	ACEITADO
28	8,166	3,849834	1,7292322	ACEITADO
29	7,289	1,1769488	1,2130419	ACEITADO
30	3,486	7,3852082	1,0244486	ACEITADO
31	6,225	0,0004497	0,5871438	ACEITADO
32	5,917	0,0823847	0,4057687	ACEITADO
Xm	6,204			
DESVPAD	1,5221217			

**ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREA DA
SEÇÃO 1– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.**

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	3,710	0,023136	0,099473373	ACEITADO
2	3,236	0,103642	0,210538002	ACEITADO
3	2,476	1,170929	0,707665347	ACEITADO
4	4,555	0,9956552	0,652555011	ACEITADO
5	2,577	0,9618406	0,641378213	ACEITADO
6	4,118	0,3139196	0,366413806	ACEITADO
7	3,349	0,0437206	0,136743209	ACEITADO
8	1,182	5,6456552	1,553888362	ACEITADO
9	4,204	0,417969	0,422799724	ACEITADO
10	4,207	0,421104	0,424382349	ACEITADO
11	2,840	0,514397	0,469042128	ACEITADO
12	3,045	0,2626714	0,335172986	ACEITADO
13	6,476	8,5148714	1,908322122	ACEITADO
14	2,714	0,7119896	0,551822568	ACEITADO
15	3,845	0,0826593	0,188021892	ACEITADO
16	3,487	0,0049329	0,045931929	ACEITADO
17	4,188	0,3978648	0,412506122	ACEITADO
18	3,429	0,0164698	0,083928007	ACEITADO
19	5,962	5,7805876	1,572347851	ACEITADO
20	1,438	4,4944201	1,386434872	ACEITADO
21	3,252	0,0933026	0,199760457	ACEITADO
22	5,797	5,0170859	1,464833991	ACEITADO
23	3,119	0,1920497	0,286595556	ACEITADO
24	3,326	0,0536917	0,151536175	ACEITADO
25	2,615	0,8883718	0,616396282	ACEITADO
26	3,617	0,0035647	0,039045875	ACEITADO
27	2,164	1,9412145	0,911169987	ACEITADO
28	1,487	4,285814	1,353877269	ACEITADO
29	3,225	0,1103135	0,21720857	ACEITADO
30	8,671	26,142618	3,343776022	REJEITADO
31	1,865	2,8646333	1,10687137	ACEITADO
32	3,667	0,0119476	0,071483147	ACEITADO
Xm	3,558			
DESVPAD	1,5291052			

**ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREA DA
SEÇÃO 2– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.**

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	3,437	0,5236754	0,6903503	ACEITADO
2	1,950	0,5822725	0,7279501	ACEITADO
3	1,727	0,9724086	0,9407254	ACEITADO
4	2,211	0,2518693	0,478769	ACEITADO
5	2,911	0,0390277	0,1884624	ACEITADO
6	1,780	0,8714294	0,8905423	ACEITADO
7	2,666	0,0022246	0,0449952	ACEITADO
8	1,693	1,04042	0,9730671	ACEITADO
9	2,465	0,0618446	0,2372408	ACEITADO
10	3,196	0,2330516	0,460537	ACEITADO
11	2,709	1,526E-05	0,0037261	ACEITADO
12	1,981	0,5360873	0,6984836	ACEITADO
13	2,288	0,1813106	0,4062095	ACEITADO
14	1,998	0,5117368	0,6824358	ACEITADO
15	3,098	0,1482051	0,367257	ACEITADO
16	2,995	0,0792953	0,2686347	ACEITADO
17	2,279	0,1882916	0,4139558	ACEITADO
18	4,001	1,6591351	1,2287947	ACEITADO
19	7,352	21,515814	4,4250414	REJEITADO
20	3,052	0,1145512	0,3228779	ACEITADO
21	2,193	0,2708847	0,496513	ACEITADO
22	2,410	0,0920915	0,2894998	ACEITADO
23	2,160	0,3066123	0,5282424	ACEITADO
24	1,703	1,020835	0,9638651	ACEITADO
25	2,002	0,505956	0,6785702	ACEITADO
26	3,594	0,7762212	0,8404874	ACEITADO
27	3,147	0,1879346	0,4135631	ACEITADO
28	1,857	0,7340202	0,8173206	ACEITADO
29	2,584	0,0168132	0,1236984	ACEITADO
30	2,937	0,0500391	0,2133994	ACEITADO
31	3,406	0,4794651	0,6605671	ACEITADO
32	3,044	0,1096101	0,3158376	ACEITADO
Xm	2,713			
DESVPAD	1,048242			

**ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREA DA
SEÇÃO 3– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.**

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	4,417	2,3267242	1,3880021	ACEITADO
2	1,894	0,996706	0,9084504	ACEITADO
3	2,566	0,1065628	0,2970439	ACEITADO
4	3,099	0,0428409	0,1883418	ACEITADO
5	2,056	0,6985276	0,7605179	ACEITADO
6	4,014	1,2590643	1,0210374	ACEITADO
7	3,329	0,1913716	0,3980672	ACEITADO
8	0,155	7,4937806	2,4909681	REJEITADO
9	4,346	2,1153967	1,3234684	ACEITADO
10	1,790	1,213654	1,0024555	ACEITADO
11	3,391	0,249181	0,4542293	ACEITADO
12	2,456	0,1899388	0,3965742	ACEITADO
13	3,890	0,9954459	0,9078759	ACEITADO
14	4,385	2,2297668	1,3587745	ACEITADO
15	3,328	0,1897999	0,3964293	ACEITADO
16	3,829	0,8776699	0,8524782	ACEITADO
17	2,037	0,7309218	0,7779526	ACEITADO
18	3,981	1,185312	0,9906814	ACEITADO
19	1,657	1,5252439	1,1237956	ACEITADO
20	3,010	0,0139855	0,107611	ACEITADO
21	4,516	2,6378319	1,477887	ACEITADO
22	2,795	0,0094245	0,0883377	ACEITADO
23	1,131	3,100845	1,6023512	ACEITADO
24	2,220	0,4513416	0,6113225	ACEITADO
25	2,469	0,1792673	0,3852726	ACEITADO
26	2,308	0,341149	0,5314834	ACEITADO
27	4,142	1,5630009	1,1376202	ACEITADO
28	3,835	0,8890234	0,8579743	ACEITADO
29	1,405	2,2122149	1,3534161	ACEITADO
30	3,601	0,5032489	0,6455191	ACEITADO
31	2,040	0,7260056	0,7753319	ACEITADO
32	2,452	0,1939342	0,4007236	ACEITADO
Xm	2,892			
DESVPAD	1,0989611			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 2– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	3,573	0,191739	0,41876291	ACEITADO
2	2,593	0,294308	0,51881693	ACEITADO
3	2,101	1,069365	0,98895482	ACEITADO
4	3,383	0,061494	0,2371535	ACEITADO
5	2,744	0,153343	0,37449436	ACEITADO
6	2,949	0,034823	0,17846235	ACEITADO
7	3,007	0,016417	0,12253641	ACEITADO
8	1,437	2,88332	1,62390204	ACEITADO
9	3,334	0,039565	0,19022578	ACEITADO
10	3,701	0,320175	0,54113647	ACEITADO
11	2,775	0,130004	0,34481906	ACEITADO
12	2,513	0,387316	0,59517704	ACEITADO
13	4,382	1,552789	1,19170746	ACEITADO
14	2,356	0,607739	0,74554179	ACEITADO
15	3,472	0,113057	0,32156027	ACEITADO
16	3,241	0,011168	0,10106599	ACEITADO
17	3,234	0,009686	0,09412294	ACEITADO
18	3,715	0,336249	0,55455395	REJEITADO
19	6,657	12,40026	3,36766357	ACEITADO
20	2,245	0,793481	0,8518861	ACEITADO
21	2,722	0,170536	0,39493139	ACEITADO
22	4,104	0,93743	0,92593993	ACEITADO
23	2,639	0,245996	0,47432693	ACEITADO
24	2,514	0,38569	0,59392615	ACEITADO
25	2,309	0,683797	0,79081886	ACEITADO
26	3,606	0,221248	0,44983447	ACEITADO
27	2,656	0,230285	0,45892982	ACEITADO
28	1,672	2,141789	1,39959291	ACEITADO
29	2,905	0,053315	0,22081971	REJEITADO
30	5,804	7,120037	2,55184619	ACEITADO
31	2,635	0,250044	0,47821351	ACEITADO
32	3,356	0,048484	0,21057675	ACEITADO
Xm	3,135			
DESVPAD	1,04565			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 3– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	4,064	0,703473	0,823996	ACEITADO
2	2,565	0,435789	0,648544	ACEITADO
3	2,521	0,495992	0,691893	ACEITADO
4	3,827	0,362889	0,591818	ACEITADO
5	2,317	0,824931	0,892299	ACEITADO
6	4,066	0,707589	0,826403	ACEITADO
7	3,339	0,013038	0,112177	ACEITADO
8	0,668	6,537062	2,511845	REJEITADO
9	4,275	1,103493	1,032016	ACEITADO
10	2,998	0,051242	0,22239	ACEITADO
11	3,116	0,011885	0,107102	ACEITADO
12	2,751	0,224835	0,465836	ACEITADO
13	5,183	3,833266	1,923473	ACEITADO
14	3,550	0,105445	0,319017	ACEITADO
15	3,586	0,130742	0,35523	ACEITADO
16	3,658	0,187751	0,42569	ACEITADO
17	3,113	0,012564	0,110118	ACEITADO
18	3,705	0,230585	0,471756	ACEITADO
19	3,809	0,341803	0,574367	ACEITADO
20	2,224	1,001745	0,983287	ACEITADO
21	3,884	0,434733	0,647758	ACEITADO
22	4,296	1,147904	1,052578	ACEITADO
23	2,125	1,209072	1,080258	ACEITADO
24	2,773	0,204094	0,44383	ACEITADO
25	2,542	0,466444	0,670967	ACEITADO
26	2,963	0,068742	0,257581	ACEITADO
27	3,153	0,005118	0,07028	ACEITADO
28	2,661	0,317724	0,553766	ACEITADO
29	2,315	0,827633	0,893759	ACEITADO
30	6,136	8,475044	2,860042	REJEITADO
31	1,952	1,618725	1,249937	ACEITADO
32	3,059	0,027403	0,162629	ACEITADO
Xm	3,225			
DESVPAD	1,01788			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 2 E 3– TEOR DE FIBRA 20 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (20 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	2,618	0,562007	1,522656	ACEITADO
2	1,281	0,344733	1,192538	ACEITADO
3	1,431	0,19142	0,888637	ACEITADO
4	1,770	0,009662	0,199647	ACEITADO
5	1,656	0,045259	0,432099	ACEITADO
6	1,931	0,003951	0,127672	ACEITADO
7	1,999	0,016926	0,264242	ACEITADO
8	0,616	1,568745	2,543941	REJEITADO
9	2,270	0,161538	0,816335	ACEITADO
10	1,662	0,04256	0,419019	ACEITADO
11	2,034	0,027255	0,335317	ACEITADO
12	1,479	0,15158	0,790774	ACEITADO
13	2,059	0,036343	0,387205	ACEITADO
14	2,128	0,067233	0,526652	ACEITADO
15	2,142	0,074827	0,555596	ACEITADO
16	2,275	0,164954	0,82492	ACEITADO
17	1,439	0,184575	0,872604	ACEITADO
18	2,661	0,627684	1,609167	ACEITADO
19	3,003	1,287095	2,304285	ACEITADO
20	2,021	0,023176	0,309211	ACEITADO
21	2,236	0,135344	0,747224	ACEITADO
22	1,735	0,017826	0,271182	ACEITADO
23	1,097	0,595288	1,567092	ACEITADO
24	1,308	0,314416	1,138893	ACEITADO
25	1,490	0,143062	0,768233	ACEITADO
26	1,967	0,009798	0,201048	ACEITADO
27	2,430	0,314988	1,13993	ACEITADO
28	1,897	0,000824	0,058313	ACEITADO
29	1,329	0,290527	1,094774	ACEITADO
30	2,179	0,096741	0,631735	ACEITADO
31	1,815	0,002831	0,108072	ACEITADO
32	1,832	0,001328	0,074003	ACEITADO
Xm	1,868			
DESVPAD	0,49234456			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 2– TEOR DE FIBRA 30 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (30 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	4,103	1,5761039	0,508466823	ACEITADO
2	7,772	5,8208328	0,977153421	ACEITADO
3	6,668	1,7137434	0,530204109	ACEITADO
4	4,939	0,1761983	0,17000865	ACEITADO
5	11,738	40,69024	2,583540784	REJEITADO
6	6,179	0,6729909	0,332257495	ACEITADO
7	5,924	0,3191236	0,228796631	ACEITADO
8	4,352	1,0130016	0,407638551	ACEITADO
9	3,104	5,0833555	0,913156959	ACEITADO
10	7,302	3,7766878	0,787092432	ACEITADO
11	3,315	4,1757279	0,827630121	ACEITADO
12	4,561	0,63599	0,322994644	ACEITADO
13	3,638	2,9612896	0,696964457	ACEITADO
14	4,845	0,2642883	0,208213634	ACEITADO
15	7,347	3,951628	0,805115562	ACEITADO
16	4,182	1,3854933	0,476729914	ACEITADO
17	14,804	89,206329	3,82532226	REJEITADO
18	3,674	2,8376069	0,682254343	ACEITADO
19	5,176	0,0335647	0,074201338	ACEITADO
20	4,824	0,2856686	0,216471873	ACEITADO
21	6,092	0,5369522	0,296782305	ACEITADO
22	3,450	3,6448529	0,773232671	ACEITADO
23	2,835	6,3711807	1,022304221	ACEITADO
24	4,234	1,2647697	0,455486922	ACEITADO
25	5,741	0,1457027	0,154598039	ACEITADO
26	5,207	0,0229795	0,061396006	ACEITADO
27	4,346	1,026432	0,410331895	ACEITADO
28	3,010	5,515874	0,951212088	ACEITADO
29	4,891	0,2188086	0,189453379	ACEITADO
30	3,615	3,0414306	0,706332434	ACEITADO
31	4,863	0,2455299	0,200688472	ACEITADO
32	4,752	0,3679997	0,245693644	ACEITADO
Xm	5,359			
DESVPAD	2,4690496			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 3– TEOR DE FIBRA 30 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (30 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	4,500	0,5843488	0,4801646	ACEITADO
2	4,503	0,5805177	0,478588	ACEITADO
3	7,326	4,2473208	1,2945285	ACEITADO
4	4,522	0,551599	0,4665152	ACEITADO
5	10,172	24,084468	3,0826387	REJEITADO
6	6,759	2,2315368	0,9383311	ACEITADO
7	4,946	0,1013194	0,1999403	ACEITADO
8	2,760	6,2744243	1,5734068	ACEITADO
9	4,748	0,2671929	0,3246883	ACEITADO
10	5,140	0,0155344	0,0782891	ACEITADO
11	4,774	0,2411076	0,3084321	ACEITADO
12	5,208	0,0031942	0,0355005	ACEITADO
13	6,178	0,8330631	0,5733147	ACEITADO
14	4,825	0,1930171	0,2759637	ACEITADO
15	6,388	1,2617196	0,7055625	ACEITADO
16	5,100	0,0271515	0,1035025	ACEITADO
17	9,399	17,087913	2,5965615	REJEITADO
18	5,293	0,0008181	0,0179665	ACEITADO
19	5,856	0,3495918	0,3713939	ACEITADO
20	5,883	0,3824593	0,3884603	ACEITADO
21	6,176	0,8308375	0,5725483	ACEITADO
22	3,125	4,5779185	1,3439655	ACEITADO
23	3,475	3,2019777	1,1239921	ACEITADO
24	4,981	0,0807453	0,1784895	ACEITADO
25	4,518	0,5580345	0,4692288	ACEITADO
26	5,289	0,0006083	0,0154917	ACEITADO
27	4,290	0,9496641	0,6121236	ACEITADO
28	2,623	6,9807827	1,6596104	ACEITADO
29	4,413	0,7247919	0,5347623	ACEITADO
30	4,190	1,1551028	0,6750943	ACEITADO
31	5,659	0,1555063	0,2477012	ACEITADO
32	5,452	0,0351461	0,1177586	ACEITADO
Xm	5,265			
DESVPAD	1,5920104			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 2 E 3– TEOR DE FIBRA 30 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (30 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	2,961	0,169548	0,4293906	ACEITADO
2	4,886	2,2904943	1,5782318	ACEITADO
3	4,146	0,5979794	0,8063977	ACEITADO
4	3,061	0,0970959	0,3249425	ACEITADO
5	6,094	7,4067323	2,8380464	REJEITADO
6	4,173	0,6409677	0,8348803	ACEITADO
7	3,525	0,0232333	0,1589502	ACEITADO
8	1,765	2,5830621	1,6759984	ACEITADO
9	2,803	0,3243706	0,5939186	ACEITADO
10	3,379	3,866E-05	0,0064841	ACEITADO
11	3,063	0,095742	0,3226692	ACEITADO
12	3,227	0,0210314	0,1512308	ACEITADO
13	4,896	2,3214725	1,5888684	ACEITADO
14	2,664	0,5017863	0,7386957	ACEITADO
15	3,610	0,0565827	0,2480551	ACEITADO
16	3,188	0,0338936	0,1919839	ACEITADO
17	5,261	3,565241	1,9690222	ACEITADO
18	3,227	0,0211069	0,151502	ACEITADO
19	4,573	1,4414562	1,2520074	ACEITADO
20	3,291	0,0066274	0,0848941	ACEITADO
21	3,358	0,0002115	0,0151647	ACEITADO
22	1,939	2,0558266	1,4952004	ACEITADO
23	2,571	0,6428117	0,8360805	ACEITADO
24	2,448	0,8554562	0,9645063	ACEITADO
25	2,865	0,2575854	0,5292573	ACEITADO
26	3,248	0,0155839	0,1301799	ACEITADO
27	2,649	0,5226549	0,7538999	ACEITADO
28	2,238	1,2873068	1,1831701	ACEITADO
29	2,637	0,5408162	0,7668864	ACEITADO
30	3,122	0,0626645	0,2610459	ACEITADO
31	3,627	0,0647692	0,2653936	ACEITADO
32	3,424	0,0027093	0,0542797	ACEITADO
Xm	3,372			
DESVPAD	0,958945295			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 2– TEOR DE FIBRA 40 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (40 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	6,501	0,0311654	0,10198982	ACEITADO
2	6,945	0,384781	0,358366525	ACEITADO
3	6,643	0,1014405	0,184003559	ACEITADO
4	9,049	7,4216862	1,573881083	ACEITADO
5	10,473	17,208204	2,396560461	REJEITADO
6	7,003	0,4600599	0,391857201	ACEITADO
7	6,132	0,0370073	0,111138445	ACEITADO
8	8,632	5,3242202	1,333056716	ACEITADO
9	3,602	7,411586	1,572809765	ACEITADO
10	6,793	0,2195646	0,270708419	ACEITADO
11	5,235	1,1879971	0,629692206	ACEITADO
12	8,916	6,711971	1,496737559	ACEITADO
13	5,116	1,4602374	0,698123647	ACEITADO
14	5,292	1,0669295	0,59674459	ACEITADO
15	6,459	0,0179204	0,077338325	ACEITADO
16	4,027	5,2814604	1,327692907	ACEITADO
17	6,337	0,0001574	0,007248815	ACEITADO
18	5,622	0,4944942	0,40625734	ACEITADO
19	3,886	5,9455157	1,408689851	ACEITADO
20	7,042	0,514587	0,414428889	ACEITADO
21	6,839	0,2648926	0,297341509	ACEITADO
22	7,078	0,5672006	0,435099864	ACEITADO
23	8,031	2,9112795	0,985740432	ACEITADO
24	5,313	1,0246962	0,584814584	ACEITADO
25	3,685	6,9688757	1,525112849	ACEITADO
26	4,215	4,4514789	1,218913202	ACEITADO
27	4,869	2,1189833	0,840977531	ACEITADO
28	8,524	4,8375679	1,270674048	ACEITADO
29	7,918	2,5380224	0,920382484	ACEITADO
30	4,132	4,8069809	1,266650559	ACEITADO
31	6,729	0,1637555	0,23378606	ACEITADO
32	5,353	0,9449061	0,561584291	ACEITADO
Xm	6,325			
DESVPAD	1,7309295			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 1 E 3– TEOR DE FIBRA 40 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (40 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	5,105	3,2106458	0,9249341	ACEITADO
2	8,272	1,8927225	0,710163	ACEITADO
3	8,990	4,3835064	1,0807504	ACEITADO
4	11,645	22,544287	2,450941	REJEITADO
5	9,480	6,6744335	1,3335884	ACEITADO
6	8,874	3,9082226	1,0204794	ACEITADO
7	6,664	0,0543298	0,1203188	ACEITADO
8	7,741	0,7129818	0,4358668	ACEITADO
9	3,666	10,438893	1,6677917	ACEITADO
10	6,538	0,1288505	0,1852924	ACEITADO
11	5,528	1,8731686	0,7064851	ACEITADO
12	10,058	9,9959833	1,6320271	ACEITADO
13	5,079	3,3032608	0,9381797	ACEITADO
14	5,574	1,7504282	0,6829466	ACEITADO
15	5,366	2,3428512	0,7901089	ACEITADO
16	6,327	0,3247262	0,294153	ACEITADO
17	6,706	0,0365221	0,0986489	ACEITADO
18	6,747	0,0224273	0,0773042	ACEITADO
19	5,704	1,4221934	0,6155934	ACEITADO
20	8,129	1,5176084	0,6359082	ACEITADO
21	7,210	0,0984344	0,1619526	ACEITADO
22	7,404	0,2571834	0,2617797	ACEITADO
23	9,528	6,9229635	1,3581903	ACEITADO
24	6,174	0,5223061	0,3730587	ACEITADO
25	5,495	1,9646718	0,7235351	ACEITADO
26	4,517	5,6623891	1,2283283	ACEITADO
27	5,297	2,55996	0,8259071	ACEITADO
28	10,065	10,036493	1,6353307	ACEITADO
29	6,684	0,0453168	0,1098865	ACEITADO
30	3,591	10,927504	1,7063773	ACEITADO
31	6,362	0,2856769	0,2759003	ACEITADO
32	6,176	0,5199816	0,3722276	ACEITADO
Xm	6,897			
DESVPAD	1,9372488			

ESTIMATIVA PARA VOLUME DE FIBRAS CONSIDERANDO APENAS ÁREAS DAS SEÇÕES 2 E 3– TEOR DE FIBRA 40 kg/m³.

CRITÉRIO CHAUVENET (40 kg/m³)				
LEITURA	Vol. Fibras (Xi)	(Xi - Xm) ²	r	ACEITADO?
1	3,451	0,0203332	0,1500033	ACEITADO
2	3,837	0,0590388	0,2556036	ACEITADO
3	3,565	0,0008142	0,030017	ACEITADO
4	5,870	5,1812031	2,3944931	REJEITADO
5	4,669	1,1559525	1,1310148	ACEITADO
6	4,496	0,8134097	0,9487526	ACEITADO
7	1,985	2,5880692	1,6923346	ACEITADO
8	4,297	0,4945732	0,7397987	ACEITADO
9	2,030	2,446704	1,6454664	ACEITADO
10	3,213	0,1452228	0,4008811	ACEITADO
11	3,277	0,1006546	0,3337452	ACEITADO
12	4,036	0,1951569	0,4647188	ACEITADO
13	2,023	2,4671436	1,6523251	ACEITADO
14	2,735	0,7380431	0,903731	ACEITADO
15	3,212	0,1456143	0,4014212	ACEITADO
16	4,915	1,7466767	1,3902873	ACEITADO
17	3,653	0,0035377	0,0625694	ACEITADO
18	2,972	0,3867029	0,6541645	ACEITADO
19	3,002	0,3498814	0,6222411	ACEITADO
20	3,823	0,0525322	0,2411076	ACEITADO
21	4,511	0,84189	0,9652192	ACEITADO
22	2,896	0,486703	0,7338889	ACEITADO
23	4,490	0,8038658	0,9431702	ACEITADO
24	3,448	0,021328	0,153629	ACEITADO
25	3,992	0,1585465	0,4188674	ACEITADO
26	3,736	0,0203326	0,1500011	ACEITADO
27	2,389	1,4521239	1,2676522	ACEITADO
28	3,940	0,1196276	0,363843	ACEITADO
29	4,843	1,5614642	1,3145113	ACEITADO
30	1,824	3,1318654	1,8616577	ACEITADO
31	3,723	0,0166304	0,1356594	ACEITADO
32	4,148	0,3077131	0,5835409	ACEITADO
Xm	3,594			
DESVPAD	0,950608538			

APÊNDICE B – VOLUME DE FIBRAS OBTIDOS COM PDI

Tabela 34 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 20 kg/m³

(continua)

CP	Área seção 1 (cm ²)	Área seção 2 (cm ²)	Área seção 3 (cm ²)	20kg/m ³					Valor esperado (cm ³)	Limiar: 0,45	
				Média das áreas (cm ²)	Volume s1 (cm ³)	Volume S2 (cm ³)	Volume S3 (cm ³)	Volume Sméd (cm ³)		Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,185	0,172	0,221	0,193	3,71	3,44	4,42	3,85	3,80	101,34%	1,34%
CP2	0,162	0,098	0,095	0,118	3,24	1,95	1,89	2,36	3,80	62,04%	37,96%
CP3	0,124	0,086	0,128	0,113	2,48	1,73	2,57	2,26	3,80	59,31%	40,69%
CP4	0,228	0,111	0,155	0,164	4,56	2,21	3,10	3,29	3,80	86,46%	13,54%
CP5	0,129	0,146	0,103	0,126	2,58	2,91	2,06	2,51	3,80	66,11%	33,89%
CP6	0,206	0,089	0,201	0,165	4,12	1,78	4,01	3,30	3,80	86,86%	13,14%
CP7	0,167	0,133	0,166	0,156	3,35	2,67	3,33	3,11	3,80	81,89%	18,11%
CP8	0,059	0,085	0,008	0,050	1,18	1,69	0,15	1,01	3,80	26,55%	73,45%
CP9	0,210	0,123	0,217	0,184	4,20	2,46	4,35	3,67	3,80	96,53%	3,47%
CP10	0,210	0,160	0,090	0,153	4,21	3,20	1,79	3,06	3,80	80,56%	19,44%
CP11	0,142	0,135	0,170	0,149	2,84	2,71	3,39	2,98	3,80	78,35%	21,65%
CP12	0,152	0,099	0,123	0,125	3,05	1,98	2,46	2,49	3,80	65,57%	34,43%
CP13	0,324	0,114	0,194	0,211	6,48	2,29	3,89	4,22	3,80	110,88%	10,88%
CP14	0,136	0,100	0,219	0,152	2,71	2,00	4,39	3,03	3,80	79,72%	20,28%
CP15	0,192	0,155	0,166	0,171	3,85	3,10	3,33	3,42	3,80	90,01%	9,99%
CP16	0,174	0,150	0,191	0,172	3,49	2,99	3,83	3,44	3,80	90,36%	9,64%
CP17	0,209	0,114	0,102	0,142	4,19	2,28	2,04	2,83	3,80	74,53%	25,47%
CP18	0,171	0,200	0,199	0,190	3,43	4,00	3,98	3,80	3,80	100,00%	0,00%
CP19	0,298	0,368	0,083	0,250	5,96	7,35	1,66	4,99	3,80	131,19%	31,19%
CP20	0,072	0,153	0,151	0,125	1,44	3,05	3,01	2,50	3,80	65,72%	34,28%

Tabela 34 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 20 kg/m³

(conclusão)										
CP	Área seção 1 (cm ²)	Área seção 2 (cm ²)	Área seção 3 (cm ²)	20kg/m ³				Valor esperado (cm ³)	Limiar: Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
				Média das áreas (cm ²)	Volume s1 (cm ³)	Volume S2 (cm ³)	Volume S3 (cm ³)			
CP21	0,163	0,110	0,226	0,166	3,25	2,19	4,52	3,32	3,80	87,29%
CP22	0,290	0,120	0,140	0,183	5,80	2,41	2,79	3,67	3,80	96,42%
CP23	0,156	0,108	0,057	0,107	3,12	2,16	1,13	2,14	3,80	56,17%
CP24	0,166	0,085	0,111	0,121	3,33	1,70	2,22	2,42	3,80	63,53%
CP25	0,131	0,100	0,123	0,118	2,62	2,00	2,47	2,36	3,80	62,09%
CP26	0,181	0,180	0,115	0,159	3,62	3,59	2,31	3,17	3,80	83,42%
CP27	0,108	0,157	0,207	0,158	2,16	3,15	4,14	3,15	3,80	82,84%
CP28	0,074	0,093	0,192	0,120	1,49	1,86	3,83	2,39	3,80	62,91%
CP29	0,161	0,129	0,070	0,120	3,23	2,58	1,40	2,40	3,80	63,22%
CP30	0,434	0,147	0,180	0,253	8,67	2,94	3,60	5,07	3,80	133,28%
CP31	0,093	0,170	0,102	0,122	1,87	3,41	2,04	2,44	3,80	64,07%
CP32	0,183	0,152	0,123	0,153	3,67	3,04	2,45	3,05	3,80	80,30%
Média	0,18	0,14	0,14	0,15	3,56	2,71	2,89	3,05	3,80	80,30%
Desv. P.								0,82		

Fonte: Autor.

Tabela 35 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m³

(continua)

CP	Área seção 1 (cm²)	Área seção 2 (cm²)	Área seção 3 (cm²)	30kg/m³					Valor esperado (cm³)	Limiar: 0,40	
				Média das áreas (cm²)	Volume s1 (cm³)	Volume S2 (cm³)	Volume S3 (cm³)	Volume Sméd (cm³)		Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,208	0,202	0,242	0,217	4,16	4,04	4,84	4,35	5,71	76,21%	23,79%
CP2	0,247	0,530	0,203	0,327	4,95	10,60	4,06	6,53	5,71	114,53%	14,53%
CP3	0,389	0,278	0,344	0,337	7,78	5,56	6,88	6,74	5,71	118,09%	18,09%
CP4	0,244	0,250	0,209	0,234	4,87	5,01	4,17	4,68	5,71	82,10%	17,90%
CP5	0,638	0,535	0,379	0,518	12,77	10,71	7,58	10,35	5,71	181,41%	81,41%
CP6	0,334	0,284	0,342	0,320	6,68	5,68	6,84	6,40	5,71	112,16%	12,16%
CP7	0,279	0,313	0,215	0,269	5,58	6,26	4,31	5,39	5,71	94,40%	5,60%
CP8	0,223	0,212	0,053	0,163	4,46	4,24	1,06	3,25	5,71	57,02%	42,98%
CP9	0,182	0,128	0,292	0,201	3,65	2,56	5,85	4,02	5,71	70,44%	29,56%
CP10	0,369	0,362	0,145	0,292	7,37	7,23	2,91	5,84	5,71	102,30%	2,30%
CP11	0,175	0,157	0,303	0,211	3,49	3,14	6,05	4,23	5,71	74,10%	25,90%
CP12	0,246	0,210	0,274	0,244	4,93	4,19	5,49	4,87	5,71	85,36%	14,64%
CP13	0,124	0,240	0,494	0,286	2,47	4,80	9,88	5,72	5,71	100,25%	0,25%
CP14	0,284	0,201	0,199	0,228	5,67	4,02	3,98	4,56	5,71	79,84%	20,16%
CP15	0,416	0,319	0,223	0,319	8,32	6,37	4,46	6,38	5,71	111,88%	11,88%
CP16	0,225	0,193	0,285	0,234	4,50	3,86	5,70	4,69	5,71	82,17%	17,83%
CP17	0,816	0,665	0,124	0,535	16,31	13,30	2,49	10,70	5,71	187,50%	87,50%
CP18	0,206	0,161	0,323	0,230	4,13	3,22	6,46	4,60	5,71	80,67%	19,33%
CP19	0,209	0,309	0,377	0,298	4,17	6,18	7,54	5,96	5,71	104,53%	4,53%
CP20	0,289	0,194	0,300	0,261	5,77	3,88	6,00	5,21	5,71	91,40%	8,60%
CP21	0,362	0,248	0,256	0,288	7,23	4,95	5,12	5,77	5,71	101,10%	1,10%
CP22	0,183	0,162	0,129	0,158	3,67	3,23	2,58	3,16	5,71	55,40%	44,60%
CP23	0,123	0,161	0,225	0,169	2,45	3,22	4,50	3,39	5,71	59,39%	40,61%

Tabela 35 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 30 kg/m³

(conclusão)											
CP	Área seção 1 (cm²)	Área seção 2 (cm²)	Área seção 3 (cm²)	30kg/m³				Valor esperado (cm³)	Limiar:	0,40	
				Média das áreas (cm²)	Volume s1 (cm³)	Volume S2 (cm³)	Volume S3 (cm³)		Percentual em relação ao esperado	Desvio(%)	
CP24	0,277	0,146	0,221	0,215	5,54	2,92	4,42	4,30	5,71	75,28%	24,72%
CP25	0,298	0,276	0,154	0,243	5,96	5,52	3,07	4,85	5,71	85,04%	14,96%
CP26	0,281	0,239	0,248	0,256	5,63	4,79	4,95	5,12	5,71	89,78%	10,22%
CP27	0,233	0,201	0,196	0,210	4,66	4,03	3,92	4,20	5,71	73,67%	26,33%
CP28	0,114	0,187	0,148	0,150	2,28	3,74	2,97	3,00	5,71	52,52%	47,48%
CP29	0,267	0,222	0,174	0,221	5,35	4,43	3,48	4,42	5,71	77,47%	22,53%
CP30	0,156	0,205	0,263	0,208	3,12	4,11	5,26	4,16	5,71	72,96%	27,04%
CP31	0,254	0,232	0,312	0,266	5,08	4,64	6,24	5,32	5,71	93,26%	6,74%
CP32	0,253	0,222	0,292	0,256	5,07	4,44	5,84	5,11	5,71	89,63%	10,37%
Média	0,28	0,26	0,25	0,26	5,57	5,15	4,96	5,23	5,71	91,62%	
Desv.Pad								1,70			

Fonte: Autor.

Tabela 36 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m³

(continua)

CP	Área seção 1 (cm²)	Área seção 2 (cm²)	Área seção 3 (cm²)	40kg/m³					Valor esperado (cm³)	Limiar: 0,40	
				Média das áreas (cm²)	Volume s1 (cm³)	Volume S2 (cm³)	Volume S3 (cm³)	Volume Sméd (cm³)		Percentual em relação ao esperado	Desvio (%)
CP1	0,321	0,329	0,189	0,280	6,43	6,57	3,78	5,59	7,61	73,54%	26,46%
CP2	0,473	0,221	0,354	0,350	9,46	4,43	7,08	6,99	7,61	91,90%	8,10%
CP3	0,514	0,150	0,385	0,350	10,29	3,00	7,69	6,99	7,61	91,93%	8,07%
CP4	0,594	0,310	0,570	0,492	11,89	6,21	11,40	9,83	7,61	129,26%	29,26%
CP5	0,647	0,400	0,301	0,449	12,95	8,00	6,01	8,99	7,61	118,12%	18,12%
CP6	0,457	0,244	0,431	0,377	9,13	4,87	8,61	7,54	7,61	99,11%	0,89%
CP7	0,491	0,122	0,175	0,263	9,82	2,45	3,51	5,26	7,61	69,11%	30,89%
CP8	0,496	0,367	0,278	0,380	9,93	7,34	5,55	7,61	7,61	99,99%	0,01%
CP9	0,211	0,149	0,155	0,172	4,22	2,98	3,11	3,44	7,61	45,19%	54,81%
CP10	0,426	0,254	0,228	0,303	8,51	5,07	4,56	6,05	7,61	79,53%	20,47%
CP11	0,292	0,231	0,260	0,261	5,85	4,62	5,21	5,23	7,61	68,69%	31,31%
CP12	0,646	0,246	0,360	0,417	12,92	4,91	7,20	8,34	7,61	109,66%	9,66%
CP13	0,358	0,154	0,150	0,221	7,16	3,07	3,00	4,41	7,61	57,97%	42,03%
CP14	0,338	0,191	0,219	0,249	6,76	3,82	4,38	4,99	7,61	65,58%	34,42%
CP15	0,350	0,296	0,186	0,277	7,01	5,91	3,73	5,55	7,61	72,92%	27,08%
CP16	0,149	0,254	0,484	0,295	2,98	5,07	9,67	5,91	7,61	77,67%	22,33%
CP17	0,378	0,256	0,292	0,309	7,56	5,11	5,85	6,17	7,61	81,16%	18,84%
CP18	0,396	0,167	0,279	0,280	7,91	3,33	5,58	5,61	7,61	73,73%	26,27%
CP19	0,254	0,134	0,316	0,235	5,09	2,69	6,32	4,70	7,61	61,76%	38,24%
CP20	0,472	0,232	0,341	0,348	9,44	4,65	6,82	6,97	7,61	91,60%	8,40%
CP21	0,364	0,320	0,357	0,347	7,28	6,40	7,14	6,94	7,61	91,21%	8,79%
CP22	0,507	0,201	0,234	0,314	10,14	4,02	4,67	6,28	7,61	82,49%	17,51%
CP23	0,541	0,262	0,412	0,405	10,82	5,24	8,23	8,10	7,61	106,45%	6,45%

Tabela 36 – Estimativa do volume de fibras utilizando PDI para teor de fibra de 40 kg/m³

(conclusão)											
CP	Área seção 1 (cm²)	Área seção 2 (cm²)	Área seção 3 (cm²)	40 kg/m³				Valor esperado (cm³)	Limiar:	0,40	
				Média das áreas (cm²)	Volume s1 (cm³)	Volume S2 (cm³)	Volume S3 (cm³)		Volume Sméd (cm³)	Percentual em relação ao esperado	Desvio(%)
CP24	0,316	0,216	0,302	0,278	6,31	4,31	6,03	5,55	7,61	72,99%	27,01%
CP25	0,160	0,209	0,390	0,253	3,19	4,18	7,80	5,06	7,61	66,46%	33,54%
CP26	0,156	0,265	0,295	0,239	3,13	5,30	5,91	4,78	7,61	62,82%	37,18%
CP27	0,329	0,158	0,201	0,229	6,58	3,16	4,01	4,58	7,61	60,24%	39,76%
CP28	0,634	0,218	0,372	0,408	12,68	4,37	7,45	8,17	7,61	107,34%	7,34%
CP29	0,367	0,425	0,302	0,364	7,34	8,50	6,03	7,29	7,61	95,81%	4,19%
CP30	0,249	0,164	0,110	0,174	4,99	3,28	2,19	3,49	7,61	45,83%	54,17%
CP31	0,375	0,298	0,261	0,311	7,51	5,95	5,22	6,23	7,61	81,83%	18,17%
CP32	0,265	0,270	0,352	0,296	5,31	5,40	7,05	5,92	7,61	77,78%	22,22%
Média	0,39	0,24	0,30	0,31	7,83	4,82	5,96	6,20	7,61	81,55%	
Desv.Pad								1,52			

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – TESTE-T

**TESTE-T PARA VOLUME DE FIBRAS EM CORPOS DE PROVA COM
TEOR DE FIBRA DE 20 KG/M³ CONSIDERANDO ÁREA MÉDIA DAS TRÊS
SEÇÕES TRANSVERSAIS E VOLUME OBTIDO NA DESMOLDAGEM**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Volume Desmoldagem (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,017144592	3,055265244
Variância	0,726361942	0,43495856
Observações	31	30
Variância agrupada	0,583129771	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	59	
Stat t	-0,194919046	
P(T<=t) uni-caudal	0,423062997	
t crítico uni-caudal	1,671093032	
P(T<=t) bi-caudal	0,846125995	
t crítico bi-caudal	2,000995378	

se $p > 0,05$

se $p < 0,05$

H_0 não deve ser rejeitada

H_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T PARA VOLUME DE FIBRAS EM CORPOS DE PROVA COM
TEOR DE FIBRA DE 30 KG/M³ CONSIDERANDO ÁREA MÉDIA DAS
TRÊS SEÇÕES TRANSVERSAIS E VOLUME OBTIDO NA
DESMOLDAGEM**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Volume Desmoldagem (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	4,960347	4,874325
Variância	0,905932	1,021383
Observações	32	30
Variância agrupada	0,961733	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	60	
Stat t	0,345159	
P(T<=t) uni-caudal	0,365591	
t crítico uni-caudal	1,670649	
P(T<=t) bi-caudal	0,731182	
t crítico bi-caudal	2,000298	

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T PARA VOLUME DE FIBRAS EM CORPOS DE PROVA COM
TEOR DE FIBRA DE 40 KG/M³ CONSIDERANDO ÁREA MÉDIA DAS
TRÊS SEÇÕES TRANSVERSAIS E VOLUME OBTIDO NA
DESMOLDAGEM**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Volume Desmoldagem</i> (cm ³)	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	6,543042	6,086973
Variância	2,997021	1,940959
Observações	32	31
Variância agrupada	2,477646	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	61	
Stat t	1,149732	
P(T<=t) uni-caudal	0,127371	
t crítico uni-caudal	1,670219	
P(T<=t) bi-caudal	0,254742	
t crítico bi-caudal	1,999624	

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA
ÁREA DE FIBRAS PRESENTES NA SEÇÃO 1 E VOLUME DE FIBRAS
ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1,
2 E 3 (TEOR DE FIBRAS DE 20 kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,39266	2,988543
Variância	1,51657	0,312165
Observações	31	29
Variância agrupada	0,935133	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	1,617614	
P(T<=t) uni-caudal	0,055586	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	0,111172	
t crítico bi-caudal	2,001717	

se $p > 0,05$

se $p > 0,05$

h_0 não deve ser rejeitada

h_0 deve ser rejeitada

TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA DE FIBRAS PRESENTES NA SEÇÃO 2 E VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 20kg/m³)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S2 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	2,563676	2,988543
Variância	0,395109	0,312165
Observações	31	29
Variância agrupada	0,355067	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	-2,75995	
P(T<=t) uni-caudal	0,003862	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	0,007725	
t crítico bi-caudal	2,001717	

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA DE FIBRAS PRESENTES NA SEÇÃO 3 E VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 20kg/m³)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	2,980285	2,988543
Variância	0,990122	0,312165
Observações	31	29
Variância agrupada	0,662833	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	-0,03926	
P(T<=t) uni-caudal	0,48441	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	0,968819	
t crítico bi-caudal	2,001717	
se p>0,05	h0 não deve ser rejeitada	
se p>0,05	h0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 2 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 20kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S2 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,021857	2,988543
Variância	0,703156	0,312165
Observações	31	29
Variância agrupada	0,514402	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	0,179797	
P(T<=t) uni-caudal	0,428969	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	0,857939	
t crítico bi-caudal	2,001717	
se p>0,05	h0 não deve ser rejeitada	
se p>0,05	h0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 20kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,212973	2,988543
Variância	0,58974	0,312165
Observações	30	29
Variância agrupada	0,453387	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	57	
Stat t	1,279914	
P(T<=t) uni-caudal	0,10288	

t crítico uni-caudal	1,672029
P(T<=t) bi-caudal	0,20576
t crítico bi-caudal	2,002465

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 2 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 20kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S2/S2 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	1,908832	2,988543
Variância	0,196505	0,312165
Observações	31	29
Variância agrupada	0,252341	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	-8,3199	
P(T<=t) uni-caudal	8,93E-12	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	1,79E-11	
t crítico bi-caudal	2,001717	
se $p > 0,05$	h_0 não deve ser rejeitada	
se $p > 0,05$	h_0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 2 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 30kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S2 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	4,83145	4,874325
Variância	1,749634	1,021383
Observações	30	30
Variância agrupada	1,385509	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	-0,14108	
P(T<=t) uni-caudal	0,44415	
t crítico uni-caudal	1,671553	
P(T<=t) bi-caudal	0,888299	
t crítico bi-caudal	2,001717	
se p>0,05	h0 não deve ser rejeitada	
se p>0,05	h0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 30kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	4,963399	4,874325
Variância	1,195592	1,021383
Observações	30	30
Variância agrupada	1,108488	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	58	
Stat t	0,327664	
P(T<=t) uni-caudal	0,372173	

t crítico uni-caudal	1,671553
P(T<=t) bi-caudal	0,744345
t crítico bi-caudal	2,001717

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 2 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 30kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S2/S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,284617	4,874325
Variância	0,695373	1,021383
Observações	31	30
Variância agrupada	0,855615	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	59	
Stat t	-6,7105	
P(T<=t) uni-caudal	4,17E-09	
t crítico uni-caudal	1,671093	
P(T<=t) bi-caudal	8,35E-09	
t crítico bi-caudal	2,000995	
se $p > 0,05$	h_0 não deve ser rejeitada	
se $p > 0,05$	h_0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 2 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 40kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S2 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	6,190997	6,086973
Variância	2,503877	1,940959
Observações	31	31
Variância agrupada	2,222418	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	60	
Stat t	0,27472	
P(T<=t) uni-caudal	0,392238	
t crítico uni-caudal	1,670649	
P(T<=t) bi-caudal	0,784475	
t crítico bi-caudal	2,000298	
se p>0,05	h0 não deve ser rejeitada	
se p>0,05	h0 deve ser rejeitada	

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 1 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 40kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S1/S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	6,743474	6,086973
Variância	3,102313	1,940959
Observações	31	31
Variância agrupada	2,521636	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	60	

Stat t	1,627646
P(T<=t) uni-caudal	0,05442
t crítico uni-caudal	1,670649
P(T<=t) bi-caudal	0,108841
t crítico bi-caudal	2,000298

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

**TESTE-T CONSIDERANDO VOLUME DE FIBRAS ESTIMADO PELA MÉDIA
DAS ÁREAS DE FIBRAS PRESENTES NAS SEÇÕES 2 E 3 E VOLUME DE
FIBRAS ESTIMADO PELA ÁREA MÉDIA DE FIBRAS PRESENTES NAS
SEÇÕES 1, 2 E 3 (TEOR DE FIBRAS 40kg/m³)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>VOLUME S2/S3 (cm³)</i>	<i>VOLUME Sméd (cm³)</i>
Média	3,520341	6,086973
Variância	0,755501	1,940959
Observações	31	31
Variância agrupada	1,34823	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	60	
Stat t	-8,70257	
P(T<=t) uni-caudal	1,57E-12	
t crítico uni-caudal	1,670649	
P(T<=t) bi-caudal	3,13E-12	
t crítico bi-caudal	2,000298	

se $p > 0,05$ h_0 não deve ser rejeitada
se $p > 0,05$ h_0 deve ser rejeitada

APÊNDICE D – CÓDIGO MATLAB

```

function varargout = Estimativa(varargin)
% ESTIMATIVA MATLAB code for Estimativa.fig
%     ESTIMATIVA, by itself, creates a new ESTIMATIVA or raises the
existing
%     singleton*.
%
%     H = ESTIMATIVA returns the handle to a new ESTIMATIVA or the
handle to
%     the existing singleton*.
%
%     ESTIMATIVA('CALLBACK',hObject,
eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in ESTIMATIVA.M with the given input
arguments.
%
%     ESTIMATIVA('Property','Value',...) creates a new ESTIMATIVA or
raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before Estimativa_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to Estimativa_OpeningFcn via
varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Estimativa

% Last Modified by GUIDE v2.5 10-Jan-2018 20:26:41

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Estimativa_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Estimativa_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Estimativa is made visible.

```

```

function Estimativa_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Estimativa (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Estimativa
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Estimativa wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Estimativa_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%        get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
slider
PopupMenu = get(handles.popupmenu1,'value')
arquivo2 = get(handles.text17,'String');
arquivo3 = get(handles.text20,'String');
arquivo = get(handles.text5,'String');
[m,n] = size(arquivo);
if (n == 0 )
    errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA','Erro
no processamento');
else
    if(PopMenu == 1)
        arquivoSEC = arquivo
    elseif (PopMenu == 2)
        arquivoSEC = arquivo2
    else
        arquivoSEC = arquivo3
    end
    ThresholdIMG = get(handles.slider1, 'Value');
    object_detected = Detect_fiber(ThresholdIMG,arquivoSEC);
    axes(handles.axes1);
    set(handles.text1,'String',ThresholdIMG);
    imshow(object_detected);

```

```
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');
arquivo = [caminho nome];
set(handles.text5, 'String', arquivo);

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
arquivo = get(handles.text5, 'String');
[m,n] = size(arquivo);
if (n == 0 )
    errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA', 'Erro
no processamento');
else

    PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
    arquivo2 = get(handles.text17, 'String');
    arquivo3 = get(handles.text20, 'String');
    arquivo = get(handles.text5, 'String');
    if(PopMenu == 1)
        arquivoORIG = arquivo
    elseif (PopMenu == 2)
        arquivoORIG = arquivo2
    else
        arquivoORIG = arquivo3
    end
    orig = imread(arquivoORIG);
    axes(handles.axes2);
    imshow(orig);
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
%value_arfea = FiberArea(1);

```

```

    %a = imread('Fiber.jpg');
    %axes(handles.axes2);
    %imshow(value_area);
    arquivo = get(handles.text5, 'String');
    [m,n] = size(arquivo);
    if (n == 0 )
        errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA', 'Erro
no processamento');
    else
        AreaMedia = 0;
        arquivo2 = get(handles.text17, 'String');
        arquivo3 = get(handles.text20, 'String');
        arquivo = get(handles.text5, 'String');
        PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
        for i = 1:4
            if(i == 1)
                arquivo = arquivo;
            elseif (i == 2)
                arquivo = arquivo2;
            elseif (i == 3)
                arquivo = arquivo3;
            else
                PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
                if (PopMenu == 1)
                    arquivo = get(handles.text5, 'String');
                elseif (PopMenu == 2)
                    arquivo = get(handles.text17, 'String');
                else
                    (PopMenu == 3)
                    arquivo = get(handles.text20, 'String');
                end
            end
        end

        orig = imread(arquivo);
        axes(handles.axes2);

        imshow(orig);
        %% Read Images
        img = imread(arquivo);
        %% Display Color image
        %figure
        imshow(img);
        %% Convert Image to Grayscale
        imgBW = rgb2gray(img);

        %% Display Grayscale image
        %figure
        imshow(imgBW);
        %% Top-hat image
        se = strel('disk',15);
        tophatFiltered = imtophat(imgBW,se);
        %% Display Top-hat mode
        %figure
        imshow(tophatFiltered, [])

        %% Threshold
        level = graythresh(tophatFiltered);
        ThresholdIMG2 = get(handles.slider1, 'Value');

```

```

        BW = im2bw(tophatFiltered,ThresholdIMG2);
        %% Fill in Regions
        imgFilled = bwareaopen(BW,15); %remove small objects from
binary image; The object to remove was determinate with 15 px
        %figure
        %imshow (imgFilled);

        %% Overlay Onto Original Image
        %Utility from File Exchange
        imgBoth2 = imoverlay(img,imgFilled,[1 0 0]); %usa o arquivo
externo imoverlay para identificar os objetos na imagem
        %figure
        %imshow(imgBoth)

        %% Subtract Images
        imgBW2 = rgb2gray(imgBoth2);
        imgDiff = abs(imgBW - imgBW2);
        %figure
        %imshow(imgDiff);
        %% Threshold Image
        imgThresh = imgDiff > 8; %Create imgThresh; if pixel to
imgDiff is > 8, then do pixel 1, else do pixel 0
        %figure
        %imshow (imgThresh)

        %% Only Care About Things Large Than 80
        [B,L] = bwboundaries(imgFilled,'noholes');
        imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]));
        axes(handles.axes2);
        imshow(imgBoth2);
        hold on;
        %Retem parcela dos eixos para que novas parcelas possam ser
adicionadas

        for k = 1:length(B)
            % para k = 1 até a quantidade de objetos que existem na
imagem (length(B))
            boundary = B{k};
            %seta a variável boudary como os pares ordenados do
objeto (B) k (objeto
            %1,2,3.. dentre aqueles que fazem parte da imagem)
            plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'k', 'LineWidth', 1)
            %Plota a variável 'boundary' com sintaxe
            plot(boundary(:,2),boundary(:,1)
            %fazendo o %par ordenado 'TODOS OS VALORES DA COLUNA 2 X
TODOS ELEMENTOS
            %DA COLUNA 1 %seta a cor como preto (k) [w=branco] e a
espessura da linha
            %como 1;
        end

        stats = regionprops(L,'Area','Centroid');
        %determinação de propriedades das regiões dos objetos;
        %SINTAXE: REGIONPROPS(MATRIZ BINÁRIA,PARÂMETROS); (parâmetro
perimeter
        %também é suportado)

        threshold = 0.94;

```

```

%Estabelece um limite de 0,94
AreaSoma = 0;
t = 1;
hold on;
for k = 1:length(B)
    t= k;
    %para k=1 até a quantidade de objetos na imagem
    boundary = B{k};
    % Obter (x, y) coordenadas dos limites correspondentes a
rotular 'k'
    delta_sq = diff(boundary).^2;
    %DIFF calcula a distância entre elementos do vetor, valor
foi elevado ao quadrado. Por exemplo 10 12 15 20, retornaria 2 3 5
    perimeter = sum(sqrt(sum(delta_sq,2)));
    %Estima o perímetro do objeto correspondente a rotular
'k' através de:
    % sum(delta_sq,2) REPRESENTA A SOMA DAS LINHAS DA MATRIZ.
Se A é uma matriz , em seguida, sum (a , 2 ) é um vector de coluna que
contém a soma de cada linha .
    % sqrt(sum(delta_sq,2)) representa a raiz da soma das
linhas da matriz
    % sum(sqrt(sum(delta_sq,2))) representa a soma das
raizes. Cálculo
    % baseia-se na soma das distâncias entre pontos, que é
dada pela raiz quadrada
    % da soma do quadrado dos lados.
    perimeter_string = sprintf('%2.2f',perimeter);

    area = stats(k).Area %calcula a área para o objeto k da
matriz rotulada;
    area_string = sprintf('%2.0f',area);
    %p= 135.3150; %Área referente a uma fibra
    p= 135.3150; %Área referente a uma fibra

    if (area < p)
        AreaSoma = AreaSoma + area;

        %AreaSoma = AreaSoma + 135.3150;
    else
        AreaSoma = AreaSoma + 135.3150;
    end

    metric = 4*pi*area/perimeter^2 %computa o fator de forma;

    metric_string = sprintf('%2.2f',metric);
    %redefine a variável metric alterando para duas casas
decimais. O operador
    %trabalha com a sintaxe SPRINTF('FORMAT,VARIÁVEL). O
formato do operador
    %inicia-se com um símbolo de %LARG_DA_BANDA.PRECISÃO

    for w = 1:length(B)
        if (metric > threshold)
            % Se o fator de forma for maior que o limite
            centroid = stats(w).Centroid; % Calcula-se o
centroide

            %plot(centroid(1),centroid(2),'k+');
            % Plota o centróide de cordenadas CENTROID(1) para x
e CENTROID(2) para Y,

```

```

                                % com a propriedade PRETO e marcador tipo ALVO (+).
Outros tipos podem ser
                                % definidos, verificar propriedades no help
                                end
                                end

                                %text(boundary(1,2)-
5,boundary(1,1)+1,'Área','Color','y',...
                                %'FontSize',7,'FontWeight','normal','FontName','Century
Gothic');
                                text(boundary(1,2)-5,boundary(1,1)-
10,area_string,'Color','y',...
                                %'FontSize',7,'FontWeight','normal','FontName','Century
Gothic');
                                %text(boundary(1,2)-
35,boundary(1,1)+49,perimeter_string,'Color','y',...
                                %'FontSize',10,'FontWeight','bold');

                                end

                                hold off;
                                AreaSoma = AreaSoma * ((pi * 10^2)/4)/1670556.082

                                if (i == 1)
                                    AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
                                    set(handles.text14,'String',AreaSoma);
                                elseif (i == 2)
                                    set(handles.text23,'String',AreaSoma);
                                    AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
                                elseif (i == 3)
                                    set(handles.text26,'String',AreaSoma);
                                    AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
                                end
                                end
                                AreaMedia = AreaMedia/3;
                                set(handles.text63,'String',AreaMedia);
                                AltCP = str2num(get(handles.edit1,'String'))
                                VolFiber = AreaMedia * AltCP
                                set(handles.text29,'String',VolFiber);
                                end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
imshow('ufu.jpg');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes7

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called
imshow('feciv.jpg');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes8

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho ] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');
arquivo2 = [caminho nome];
set(handles.text17, 'String', arquivo2);

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho ] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');
arquivo3 = [caminho nome];
set(handles.text20, 'String', arquivo3);

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
if(PopMenu == 1)
    arquivoSEC = get(handles.text5, 'String');
elseif (PopMenu == 2)
    arquivoSEC = get(handles.text17, 'String');
else
    arquivoSEC = get(handles.text20, 'String');
end
ThresholdIMG = get(handles.slider1, 'Value');
axes(handles.axes1);
object_detected = Detect_fiber(ThresholdIMG, arquivoSEC);
imshow(object_detected);

% Hints: contents = cellstr(get(hObject, 'String')) returns popupmenu1
contents as cell array
%         contents{get(hObject, 'Value')} returns selected item from
popupmenu1

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
slider

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
set(gca, 'xtick', [])
set(gca, 'ytick', [])
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
set(gca, 'xtick', [])
set(gca, 'ytick', [])
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1

% --- Executes during object deletion, before destroying properties.
function axes8_DeleteFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

function varargout = Estimativa(varargin)
% ESTIMATIVA MATLAB code for Estimativa.fig
%     ESTIMATIVA, by itself, creates a new ESTIMATIVA or raises the
existing
%     singleton*.
%
%     H = ESTIMATIVA returns the handle to a new ESTIMATIVA or the
handle to
%     the existing singleton*.
%
%     ESTIMATIVA('CALLBACK',hObject,
eventData,handles,...) calls the local
%     function named CALLBACK in ESTIMATIVA.M with the given input
arguments.
%
%     ESTIMATIVA('Property','Value',...) creates a new ESTIMATIVA or
raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before Estimativa_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application

```

```

%      stop.  All inputs are passed to Estimativa_OpeningFcn via
varargin.
%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows only
one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Estimativa

% Last Modified by GUIDE v2.5 10-Jan-2018 20:26:41

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @Estimativa_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @Estimativa_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [] , ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Estimativa is made visible.
function Estimativa_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Estimativa (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Estimativa
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Estimativa wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Estimativa_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
slider
PopupMenu = get(handles.popupmenu1,'value')
arquivo2 = get(handles.text17,'String');
arquivo3 = get(handles.text20,'String');
arquivo = get(handles.text5,'String');
[m,n] = size(arquivo);
if (n == 0 )
    errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA','Erro
no processamento');
else
    if(PopMenu == 1)
        arquivoSEC = arquivo
    elseif (PopMenu == 2)
        arquivoSEC = arquivo2
    else
        arquivoSEC = arquivo3
    end
    ThresholdIMG = get(handles.slider1, 'Value');
    object_detected = Detect_fiber(ThresholdIMG,arquivoSEC);
    axes(handles.axes1);
    set(handles.text1,'String',ThresholdIMG);
    imshow(object_detected);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text

```

```
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');
arquivo = [caminho nome];
set(handles.text5,'String',arquivo);

% --- Executes on button press in pushbutton2.
```

```

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
arquivo = get(handles.text5, 'String');
[m,n] = size(arquivo);
if (n == 0 )
    errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA', 'Erro
no processamento');
else

    PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
    arquivo2 = get(handles.text17, 'String');
    arquivo3 = get(handles.text20, 'String');
    arquivo = get(handles.text5, 'String');
    if(PopMenu == 1)
        arquivoORIG = arquivo
    elseif (PopMenu == 2)
        arquivoORIG = arquivo2
    else
        arquivoORIG = arquivo3
    end
    orig = imread(arquivoORIG);
    axes(handles.axes2);
    imshow(orig);
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
%value_arfea = FiberArea(1);
%a = imread('Fiber.jpg');
%axes(handles.axes2);
%imshow(value_area);
arquivo = get(handles.text5, 'String');
[m,n] = size(arquivo);
if (n == 0 )
    errordlg('ERRO - SELECIONE UMA IMAGEM PARA SER PROCESSADA', 'Erro
no processamento');
else
    AreaMedia = 0;
    arquivo2 = get(handles.text17, 'String');
    arquivo3 = get(handles.text20, 'String');
    arquivo = get(handles.text5, 'String');
    PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
    for i = 1:4
        if(i == 1)
            arquivo = arquivo;
        elseif (i == 2)
            arquivo = arquivo2;
        elseif (i == 3)
            arquivo = arquivo3;
        else
            PopMenu = get(handles.popupmenu1, 'value')
            if (PopMenu == 1)
                arquivo = get(handles.text5, 'String');
            end
        end
    end
end

```

```

        elseif (PopupMenu == 2)
            arquivo = get(handles.text17, 'String');
        else
            (PopupMenu == 3)
            arquivo = get(handles.text20, 'String');
        end
    end

    orig = imread(arquivo);
    axes(handles.axes2);

    imshow(orig);
    %% Read Images
    img = imread(arquivo);
    %% Display Color image
    %figure
    imshow(img);
    %% Convert Image to Grayscale
    imgBW = rgb2gray(img);

    %% Display Grayscale image
    %figure
    imshow(imgBW);
    %% Top-hat image
    se = strel('disk',15);
    tophatFiltered = imtophat(imgBW,se);
    %% Display Top-hat mode
    %figure
    imshow(tophatFiltered, [])

    %% Threshold
    level = graythresh(tophatFiltered);
    ThresholdIMG2 = get(handles.slider1, 'Value');
    BW = im2bw(tophatFiltered, ThresholdIMG2);
    %% Fill in Regions
    imgFilled = bwareaopen(BW,15); %remove small objects from
binary image; The object to remove was determinate with 15 px
    %figure
    imshow (imgFilled);

    %% Overlay Onto Original Image
    %Utility from File Exchange
    imgBoth2 = imoverlay(img,imgFilled,[1 0 0]); %usa o arquivo
externo imoverlay para identificar os objetos na imagem
    %figure
    imshow(imgBoth)

    %% Subtract Images
    imgBW2 = rgb2gray(imgBoth2);
    imgDiff = abs(imgBW - imgBW2);
    %figure
    imshow(imgDiff);
    %% Threshold Image
    imgThresh = imgDiff > 8; %Create imgThresh; if pixel to
imgDiff is > 8, then do pixel 1, else do pixel 0
    %figure

```

```

    imshow (imgThresh)

    %% Only Care About Things Large Than 80
    [B,L] = bwboundaries(imgFilled,'noholes');
    imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5]));
    axes(handles.axes2);
    imshow(imgBoth2);
    hold on;
    %Retem parcela dos eixos para que novas parcelas possam ser
    adicionadas

    for k = 1:length(B)
        % para k = 1 até a quantidade de objetos que existem na
        imagem (length(B))
        boundary = B{k};
        %seta a variável boudary como os pares ordenados do
        objeto (B) k (objeto
        %1,2,3.. dentre aqueles que fazem parte da imagem)
        plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'k', 'LineWidth', 1)
        %Plota a variável 'boundary' com sintaxe
        plot(boundary(:,2),boundary(:,1)
        %fazendo o %par ordenado 'TODOS OS VALORES DA COLUNA 2 X
        TODOS ELEMENTOS
        %DA COLUNA 1 %seta a cor como preto (k) [w=branco] e a
        espessura da linha
        %como 1;
    end

    stats = regionprops(L,'Area','Centroid');
    %determinação de propriedades das regiões dos objetos;
    %SINTAXE: REGIONPROPS(MATRIZ BINÁRIA,PARÂMETROS); (parâmetro
    perimeter
    %também é suportado)

    threshold = 0.94;
    %Estabelece um limite de 0,94
    AreaSoma = 0;
    t = 1;
    hold on;
    for k = 1:length(B)
        t= k;
        %para k=1 até a quantidade de objetos na imagem
        boundary = B{k};
        % Obter (x, y) coordenadas dos limites correspondentes a
        rotular 'k'

        delta_sq = diff(boundary).^2;
        %DIFF calcula a distância entre elementos do vetor, valor
        foi elevado ao quadrado. Por exemplo 10 12 15 20, retornaria 2 3 5
        perimeter = sum(sqrt(sum(delta_sq,2)));
        %Estima o perímetro do objeto correspondente a rotular
        'k' através de:
        % sum(delta_sq,2) REPRESENTA A SOMA DAS LINHAS DA MATRIZ.
        Se A é uma matriz , em seguida, sum (a , 2 ) é um vector de coluna que
        contém a soma de cada linha .
        % sqrt(sum(delta_sq,2)) representa a raiz da soma das
        linhas da matriz
        % sum(sqrt(sum(delta_sq,2))) representa a soma das
        raizes. Cálculo

```

```

        % baseia-se na soma das distâncias entre pontos, que é
dada pela raiz quadrada
        % da soma do quadrado dos lados.
        perimeter_string = sprintf('%2.2f',perimeter);

        area = stats(k).Area %calcula a área para o objeto k da
matriz rotulada;
        area_string = sprintf('%2.0f',area);
        %p= 135.3150; %Área referente a uma fibra
        p= 135.3150; %Área referente a uma fibra

        if (area < p)
            AreaSoma = AreaSoma + area;

            %AreaSoma = AreaSoma + 135.3150;
        else
            AreaSoma = AreaSoma + 135.3150;
        end

        metric = 4*pi*area/perimeter^2 %computa o fator de forma;

        metric_string = sprintf('%2.2f',metric);
        %redefine a variável metric alterando para duas casas
decimais. O operador
        %trabalha com a sintaxe SRPINTF('FORMAT,VARIÁVEL). O
formato do operador
        %inicia-se com um simbolo de %LARG_DA_BANDA.PRECISÃO de

        for w = 1:length(B)
            if (metric > threshold)
                % Se o fator de forma for maior que o limite
                centroid = stats(w).Centroid; % Calcula-se o
centroide

                %plot(centroid(1),centroid(2),'k+');
                % Plota o centróide de cordenadas CENTROID(1) para x
e CENTROID(2) para Y,
                % com a propriedade PRETO e marcador tipo ALVO (+).
Outros tipos podem ser
                % definidos, verificar propriedades no help
            end
        end

        %text(boundary(1,2)-
5,boundary(1,1)+1,'Área','Color','y',...
        %'FontSize',7,'FontWeight','normal','FontName','Century
Gothic');
        text(boundary(1,2)-5,boundary(1,1)-
10,area_string,'Color','y',...
        %'FontSize',7,'FontWeight','normal','FontName','Century
Gothic');
        %text(boundary(1,2)-
35,boundary(1,1)+49,perimeter_string,'Color','y',...
        %'FontSize',10,'FontWeight','bold');

        end

        hold off;

```

```

        AreaSoma = AreaSoma * ((pi * 10^2)/4)/1670556.082

        if (i == 1)
            AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
            set(handles.text14,'String',AreaSoma);
        elseif (i == 2)
            set(handles.text23,'String',AreaSoma);
            AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
        elseif (i == 3)
            set(handles.text26,'String',AreaSoma);
            AreaMedia = AreaMedia + AreaSoma
        end
    end
    AreaMedia = AreaMedia/3;
    set(handles.text63,'String',AreaMedia);
    AltCP = str2num(get(handles.edit1,'String'))
    VolFiber = AreaMedia * AltCP
    set(handles.text29,'String',VolFiber);
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
imshow('ufu.jpg');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes7

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
imshow('feciv.jpg');
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes8

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');
arquivo2 = [caminho nome];
set(handles.text17,'String',arquivo2);

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
[nome, caminho] = uigetfile({'*.jpg'; '*.png'; '*.bmp'}, 'Escolha um
arquivo de imagem');

```

```

arquivo3 = [caminho nome];
set(handles.text20,'String',arquivo3);

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

PopMenu = get(handles.popupmenu1,'value')
if(PopMenu == 1)
    arquivoSEC = get(handles.text5,'String');
elseif (PopMenu == 2)
    arquivoSEC = get(handles.text17,'String');
else
    arquivoSEC = get(handles.text20,'String');
end
ThresholdIMG = get(handles.slider1, 'Value');
axes(handles.axes1);
object_detected = Detect_fiber(ThresholdIMG,arquivoSEC);
imshow(object_detected);

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1
%         contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
%         popupmenu1

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
%            called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
%         slider

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu2
contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called
set(gca, 'xtick', [])
set(gca, 'ytick', [])
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes2

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

```



```

set(gca, 'xtick', [])
set(gca, 'ytick', [])
% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1

% --- Executes during object deletion, before destroying properties.
function axes8_DeleteFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to axes8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

function out = imoverlay(in, mask, color)
%IMOVERLAY Create a mask-based image overlay.
%   OUT = IMOVERLAY(IN, MASK, COLOR) takes an input image, IN, and a
binary
%   image, MASK, and produces an output image whose pixels in the MASK
%   locations have the specified COLOR.
%
%   IN should be a grayscale or an RGB image of class uint8, uint16,
int16,
%   logical, double, or single.  If IN is double or single, it should be
in
%   the range [0, 1].  If it is not in that range, you might want to use
%   mat2gray to scale it into that range.
%
%   MASK should be a two-dimensional logical matrix.
%
%   COLOR should be a 1-by-3 vector of values in the range [0, 1].  [0 0
0]
%   is black, and [1 1 1] is white.
%
%   OUT is a uint8 RGB image.
%
%   Examples
%   -----
%   Overlay edge detection result in green over the original image.
%
%       I = imread('cameraman.tif');
%       bw = edge(I, 'canny');
%       rgb = imoverlay(I, bw, [0 1 0]);
%       imshow(rgb)
%
%   Treating the output of peaks as an image, overlay the values greater
than
%   7 in red.  The output of peaks is not in the usual grayscale image
range
%   of [0, 1], so use mat2gray to scale it.
%
%       I = peaks;
%       mask = I > 7;
%       rgb = imoverlay(mat2gray(I), mask, [1 0 0]);
%       imshow(rgb, 'InitialMagnification', 'fit')

%   Steven L. Eddins
%   Copyright 2006-2012 The MathWorks, Inc.

% If the user doesn't specify the color, use white.
DEFAULT_COLOR = [1 1 1];
if nargin < 3

```

```
        color = DEFAULT_COLOR;
    end

    % Force the 2nd input to be logical.
    mask = (mask ~= 0);

    % Make the uint8 the working data class. The output is also uint8.
    in_uint8 = im2uint8(in);
    color_uint8 = im2uint8(color);

    % Initialize the red, green, and blue output channels.
    if ndims(in_uint8) == 2
        % Input is grayscale. Initialize all output channels the same.
        out_red    = in_uint8;
        out_green  = in_uint8;
        out_blue   = in_uint8;
    else
        % Input is RGB truecolor.
        out_red    = in_uint8(:,:,1);
        out_green  = in_uint8(:,:,2);
        out_blue   = in_uint8(:,:,3);
    end

    % Replace output channel values in the mask locations with the
    appropriate
    % color value.
    out_red(mask)    = color_uint8(1);
    out_green(mask)  = color_uint8(2);
    out_blue(mask)   = color_uint8(3);

    % Form an RGB truecolor image by concatenating the channel matrices along
    % the third dimension.
    out = cat(3, out_red, out_green, out_blue);
```