

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS
DE PAPEL KRAFT EM ARGAMASSAS**

RAÍSSA ARVELLOS DIAS

**ORIENTADOR: CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA
FEITOSA PEREIRA**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA / DF: JULHO/2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA INTERFERÊNCIA DA ADIÇÃO DE FIBRAS
DE PAPEL KRAFT EM ARGAMASSAS**

RAÍSSA ARVELLOS DIAS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**Prof. CLÁUDIO HENRIQUE DE ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, Dr. (ENC/UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof^ª. CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, Dra. (ENC/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Eng^ª. LILIAN DE SOUSA ALVES, Mestre (PECC/UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de JULHO de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

DIAS, RAÍSSA ARVELLOS

Avaliação da interferência da adição de fibras de papel kraft em argamassas [Distrito Federal] 2017.

x, p.84, 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Compósitos fibra vegetal/Cimento Portland

2. Papel Kraft

3. Propriedades mecânica/físicas

4. Argamassas

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DIAS, R. A. (2017) Avaliação da interferência da adição de fibras de papel kraft em argamassas. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Raíssa Arvellos Dias

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da interferência da adição de fibras de papel kraft em argamassas.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Raíssa Arvellos Dias

SHCES 407, bloco h

70650-478, Cruzeiro Novo/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Pereira, a quem manifesto meu profundo respeito e admiração. Obrigada pelo apoio e incentivo na elaboração deste trabalho, por ter me apresentado essa área de conhecimento, e por seus valiosos ensinamentos.

À Prof. Dra. Cláudia Gurjão, pela sua participação na banca examinadora do meu Projeto Final 1 e 2 e, principalmente, pelo seu grande desprendimento em ajudar-me durante a minha formação.

À Eng^a. LILIAN DE SOUSA ALVES, pelos conselhos e por ter dedicado seu tempo a me ajudar na execução do programa experimental e na elaboração desse trabalho.

Aos meus pais, Wagner e Eliane, pelo suporte, ensinamentos, e por serem uma referência na minha vida. À minhas irmãs, Daphne e Khiara, pelos bons momentos e pelas brigas, pois é o que nos faz crescer e sermos mais unidas. Aos meus avós, Maura, Elza, Onofre e Mário, pelos ensinamentos de vida, e pela força, ainda que à distância.

Aos meus amigos da matemática, em especial à Lenise de Abreu, Agda Galletti, Maísa Campos, Elisson Morales, Priscila Ferreira e Gabriela Parreira, pelas suas amizades e por terem sempre apoiado as minhas escolhas. Obrigada por estarem sempre comigo, mesmo quando estamos distantes.

Aos meus amigos da engenharia, pelo carinho e apoio constante. Obrigada pela companhia nas noites e fins de semana de estudo, sem vocês essa caminhada seria mais difícil.

E finalmente agradeço à Deus, por proporcionar mais essa conquista e por me guiar durante essa trajetória. E a todos que direta ou indiretamente fizeram para da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

A construção civil é uma das atividades econômicas que mais geram resíduos, e uma grande parte desses são descartados de forma inadequada e, por conseguinte provoca impactos ambientais. Neste contexto, há diversos estudos relativos a novos métodos que visam obter uma destinação adequada para esse tipo de resíduo. Uma das soluções estudadas é a produção de compósitos. Desta forma, este trabalho busca analisar um compósito de matriz cimentícia com adição de fibras de papel kraft provenientes de embalagens de cimento e argamassa, sendo esse compósito uma argamassa com traço 1:3 (cimento, agregado miúdo). Para avaliar o comportamento dessas argamassas, foram executados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão e, de absorção de água, sendo comparados os resultados para corpos de prova prismáticos moldados sem fibra, e com teores de fibra de 0.5, 1.0 e 1.5%. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que há o aumento da absorção de água nas argamassas com fibras, sendo justificado pela porosidade destas. Em termos de resistência, a adição de 0.5% permitiu um leve aumento na resistência à tração na flexão quando comparada à argamassa sem fibras, enquanto para os demais teores houve uma redução tanto na resistência à tração na flexão, quanto na compressão.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA	1
1.2. OBJETIVOS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 PAPEL KRAFT.....	3
2.1.1 TIPOS DE PAPEL KRAFT E SUA UTILIZAÇÃO	3
2.1.2 PROCESSO KRAFT OU SULFATO.....	4
2.1.3 REUTILIZAÇÃO DE EMBALAGENS DE CIMENTO	7
2.2 COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM ADIÇÃO DE FIBRAS NATURAIS.....	8
2.2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	9
2.2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	11
2.2.3. DURABILIDADE.....	13
2.3 ESTUDOS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA E CELULOSE	14
2.3.1. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E PAPEL KRAFT MULTIFOLIADO.....	15
2.3.2. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E PASTA KRAFT	17
2.3.3. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E OUTRAS FIBRAS	18
3. METODOLOGIA	20
3.1 ETAPA I: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES.....	21
3.1.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA	22
3.1.2 MASSA ESPECIFICA.....	24
3.1.3 MASSA UNITÁRIA.....	25
3.1.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRA.....	26
3.1.5 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO	28

3.2 ETAPA II: DETERMINAÇÃO DA TRABALHABILIDADE.....	31
3.2.1 MÉTODO DE ESPALHAMENTO (<i>FLOW TABLE</i>).....	31
3.2.2 MÉTODO DO CONE	33
3.2.3 AJUSTE DO TRAÇO	34
3.3 ETAPA III: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXAO	35
3.3.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	36
3.3.2 EXECUÇÃO DO ENSAIO.....	38
3.4 ETAPA IV: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	39
3.5 ETAPA V: ABSORÇÃO DE ÁGUA	40
3.5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	40
3.5.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
4.1.1 AGREGADOS	44
4.1.2 CIMENTO PORTLAND	47
4.2 ETAPA II: TRABALHABILIDADE.....	48
4.3 ETAPA III: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	51
4.4 ETAPA IV: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	52
4.5 ETAPA V: ABSORÇÃO D'ÁGUA.....	55
4.5.1 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE.....	55
4.5.2 ABSROÇÃO POR IMERSÃO	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICES	67
APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO GRANULOMÈTRICA	67
APÊNDICE B – MASSA UNITÁRIA	71
APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	72
APÊNDICE D – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	74
APÊNDICE E – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO	75
APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	79
APÊNDICE G – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma simplificado do processo Kraft.....	5
Figura 2.2: Digestor contínuo.....	6
Figura 2.3: Efeito do teor de umidade na resistência à flexão.....	12
Figura 2.4: Efeito do teor de umidade na tenacidade.....	12
Figura 2.5: Representação esquemática da decomposição de fibras em meio alcalino.....	14
Figura 3.1: Etapas do trabalho experimental.....	20
Figura 3.2: Fibras de papel kraft.....	21
Figura 3.3: Agregados utilizados.....	22
Figura 3.4: Etapas e aparelhagem para a determinação da massa unitária.....	25
Figura 3.5: As quatro frações da areia de Corumbá.....	28
Figura 3.8: Etapas e aparelhagem do preparo e moldagem dos corpos de prova.....	30
Figura 3.9: Etapas e aparelhagem para o ensaio de resistência à compressão.....	31
Figura 3.10: Etapas e equipamentos do ensaio da mesa de consistência.....	32
Figura 3.11: Etapas do ensaio de penetração do cone.....	33
Figura 3.12: Ajuste do traço.....	34
Figura 3.13: Esquema dos corpos de prova a serem ensaiados.....	36
Figura 3.14: Etapas e aparelhagem da moldagem dos corpos de prova.....	37
Figura 3.15: Etapas e aparelhagem do ensaio de resistência à tração.....	38
Figura 3.16: Etapas e materiais do ensaio de resistência à compressão axial.....	39
Figura 3.17: Etapas do ensaio absorção por capilaridade.....	41
Figura 3.18: Etapas do ensaio absorção por imersão.....	42
Figura 4.1: Curva granulométrica dos agregados.....	45
Figura 4.2: Aspecto da argamassa.....	49
Figura 4.3: Aspecto do corpo de prova para os diferentes traços.....	50
Figura 4.4: Resistência à tração na flexão em função do teor de fibras.....	51
Figura 4.5: Resistência à compressão em função do teor de fibras	53
Figura 4.6: Dispersão das fibras nos corpos de prova.....	54
Figura 4.7: Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo em minutos.....	56
Figura 4.8: Absorção de água por imersão em função do teor de fibras.....	57
Figura 4.9: Índice de vazios em função do teor de fibras.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Quantidade de materiais secos das argamassas de referência e com adição de fibras.....	27
Tabela 3.2: Composição da argamassa segundo a norma (ABNT NBR 7215:1996).....	29
Tabela 3.3: Traço da argamassa conforme a NBR 7215/96 e após ajuste do teor de água e de fibras.....	35
Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	44
Tabela 4.2: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (ABNT NBR 7211:2005).....	45
Tabela 4.3: Classificação das areias com base no grau de continuidade de Allen-Hazem.....	46
Tabela 4.4: Classificação dos agregados ensaiados com base no grau de continuidade de Allen-Hazem.....	46
Tabela 4.5: Comparação dos resultados obtidos com os valores exigidos pela norma de caracterização do CP V – Primeiro ensaio	47
Tabela 4.6: Comparação dos resultados obtidos com os valores exigidos pela norma de caracterização do CP V – Primeiro ensaio	47
Tabela 4.7: Índice de consistência pelo método de <i>flow table</i> e penetração de cone.....	48
Tabela 4.8: Índice de consistência, resistência à tração na flexão, e resistência à compressão para argamassa com e sem ajuste de água.....	50
Tabela 4.9: Resistência média à tração na flexão para as idades de 7 e 28 dias.....	51
Tabela 4.10: Resistência média à compressão para as idades de 7 e 28 dias.....	52
Tabela 4.11: Absorção de água por capilaridade para cada tempo e coeficientes de capilaridade.....	55
Tabela 4.12: Absorção de água por imersão e índice de vazios.....	57
Tabela 4.13: Massa específica média da argamassa.....	58
Tabela 4.14: Resumo das propriedades das argamassas ensaiadas.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American socyety for testing end materials
BTC	Bloco de Terra Compactada
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
cm	Centímetros
g	Gramas
Kgf	Quilogramas força
LEM/UnB	Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília
m	Metros
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
°C	Graus Celsius

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMA

A utilização de fibras vegetais, em geral, como reforço de matrizes à base cimento, e em substituição às fibras sintéticas, tem sido objeto de estudo e despertado grande interesse em diversos países, sendo esse fato atribuído à sua abundância, baixo custo, propriedades mecânicas úteis, e às questões ambientais.

Assim sendo, o melhor entendimento acerca da influência da adição de fibras nesse tipo de material torna-se um fator essencial para a escolha e identificação do melhor tipo e quantidade de fibras a serem inseridas em cada compósito, de modo a se obter melhorias nas características mecânicas e ou físicas desse.

O compósito cimentício com adição de fibras provenientes de processos de reciclagem de embalagens de papel kraft começou a ser mais estudado recentemente. Nesse caso, as embalagens de cimento e argamassa são um dos tipos pesquisados, visto que essas, uma vez em contato com esses materiais, tornam-se contaminadas, dificultando assim sua correta destinação.

Essas embalagens são um dos diversos resíduos gerados pela construção civil, que é umas das maiores geradoras de resíduos sólidos, e de acordo com Carvalho e Santos (2011), o setor da construção civil é responsável por uma média de 50% a 70% do volume de resíduos gerados nos principais centros urbanos do Brasil. Por conseguinte, o desenvolvimento de novos métodos de reutilização e reciclagem destes matérias possui um papel importante para melhorar o gerenciamento desses resíduos

Desta forma, o estudo da adição de fibras de provenientes de embalagens de cimento como reforço de matriz cimentícias, é uma proposta para o desenvolvimento de novos materiais de

construção, e ao mesmo tempo um meio de reduzir a quantidade de resíduos gerados por essa atividade econômica de grande relevância no país.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é de dar continuidade à linha de pesquisas sobre a utilização de embalagens de papel kraft como reforço de compósitos, a qual pode-se citar os estudos de Mohr (2006), Carvalho e Santos (2011), Santana (2015), Alves (2016) e Matins e Soares. (2016).

Para tanto, neste será realizado a avaliação dos efeitos da adição de fibras provenientes de embalagens de papel kraft nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas. No tocante ao estado fresco, será desenvolvida uma metodologia para a o ajuste do traço desse novo tipo de argamassas.

Finalmente, os objetivos específicos são os seguintes:

- Verificar a adequabilidade do uso de fibras proveniente da reutilização de embalagens de papel kraft como reforço em argamassas;
- Análise por meio de ensaios as características do estado endurecido das argamassas com adição de fibra por substituição em volume, tais como, absorção por capilaridade, absorção por imersão resistência à tração na flexão e à compressão axial;
- Averiguar a interferência do teor de fibras na trabalhabilidade desses compósitos;
- Ajustar o traço das argamassas produzidas com os agregados desse estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAPEL KRAFT

Kraft é um termo em alemão que significa *forte*, e refere-se ao papel cuja principal característica é a resistência mecânica. Ele possui elevada resistência à tração, ao rasgo e ao arrebentamento, o que lhe torna um dos tipos de papel mais requisitados para a confecção de embalagens e embrulhos.

Fabricados, em geral com pasta química sulfato não branqueadas, em gramaturas de 30 a 200 g/m², e cuja principal característica é a resistência mecânica elevada. Distinguem-se variedades como kraft branco (pasta branqueada), kraft para sacos multifoliados (80 a 90 g/m², em geral extensíveis) (ABTCP, 1994).

Estas especificações exigem a utilização de celulose de fibra longa. E no Brasil utiliza-se, principalmente, as diversas espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* para a produção de pasta celulósica. Segundo Klock *et al.* (2013), as espécies mais utilizadas como matéria prima da celulose de fibra longa são: *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* e *Pinus caribaea*.

A qualidade e propriedade da polpa são influenciadas pela espécie de madeira utilizada, sendo que as propriedades físicas das polpas de frondosas são geralmente inferiores as de resinosas. No caso de papéis para embalagem, o ideal é uma combinação de polpas de fibras longas e fibras curtas, visto que as fibras longas propiciam melhores propriedades de resistência física, enquanto as fibras curtas influenciam em características como melhor resistência a compressão (ABTCP, 1994).

2.1.1 TIPOS DE PAPEL KRAFT E SUA UTILIZAÇÃO

De acordo com Robert (2007), e Lopes (2010), o kraft pode ser classificado como:

- Kraft natural para sacos multifoliados: fabricados com polpa química sulfato não branqueada, e com gramaturas entre 80 e 90g/m². Por ser altamente resistente ao rasgo, e

com boa resistência à tração ao estouro, é usado na fabricação de sacos e embalagens industriais de grande porte.

- Kraft natural ou em cores para outros fins: fabricado com polpa química sulfato não branqueada, e com gramatura entre 30 a 150g/m². Possuem resistência mecânica similar ao kraft natural para sacos multifoliados, sendo usado na fabricação de sacos de pequeno porte e embalagens em geral.
- Kraft branco ou em cores: fabricado com pasta química sulfato branqueada, e com gramatura entre 30 g/m e 150 g/m . Possui acabamento monolúcido ou alisado, sendo utilizado na fabricação de embalagens de pequeno porte individuais, como folha externa em sacos multifoliados, entre outros.
- Kraft de 1^a: fabricado com no mínimo 50% de polpa química, e com gramatura de 40 g/m. Possui resistência mecânica inferior ao kraft natural ou em cores, e com acabamento monolúcido ou não.
- Kraft de 2^a – possui características semelhante ao kraft de 1^a, porém sua resistência mecânica é inferior.

2.1.2 PROCESSO KRAFT OU SULFATO

O processo sulfato ou kraft é resultado da evolução do processo soda, sendo desenvolvido em 1883 pelo químico alemão Karl Dahl. Neste processo, o licor de cozimento utilizado é composto por uma solução aquosa de NaOH e Na₂S (KLOCK *et al.*, 2013).

Além disso, esse método tornou-se o processo mais empregado no Brasil, e em todo o mundo, devido à um sistema de recuperação econômica dos reagentes que foi desenvolvido posteriormente, e à qualidade das fibras (KLOCK *et al.*, 2013). Esse método também gera poucos resíduos, e um dos subprodutos do processo, o licor negro, que pode ser totalmente reaproveitado, o que torna este processo ecologicamente correto (COSTA, 2000).

O processo kraft também apresenta uma grande versatilidade de matéria prima, ciclos de cozimento mais curto em relação a soda e sulfito, e polpa de alta resistência. Porém, suas principais desvantagens são o baixo rendimento obtido no processo, e o custo de investimento.

Na polpação química, processo pelo qual a madeira é reduzida a uma massa fibrosa, são utilizados como reagentes no cozimento dos cavacos (toras de madeiras picadas) o NaOH, Na₂S e Na₂CO₃. O processo soda é bastante semelhante ao processo sulfato, sendo seus processos apenas alcalinos, e já o processo sulfito utiliza bissulfeto de cálcio e dióxido de enxofre (SHREVE e BRINK, 2008).

O processo kraft, ou sulfito, para a obtenção de celulose pode ser dividido em diversas etapas, conforme o fluxograma simplificado apresentado na Figura 2.1.

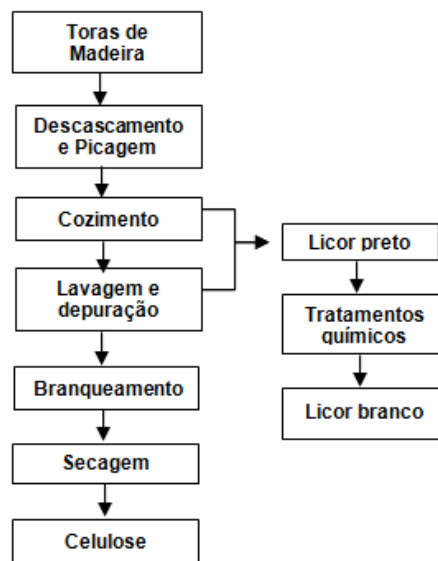


Figura 2.1: Fluxograma simplificado do processo kraft

A primeira etapa o processo kraft consiste em cortar as toras de madeira em tamanho uniforme para que as cascas possam ser, em seguida, retiradas por atrito dentro de tambores descascadores rotativo. Além desse tipo de descascamento, há também métodos que consistem na utilização de jatos de água a alta pressão, cerca de 95,2 atm, e outro por meio de atrito mecânico (SHREVE e BRINK, 2008).

Posteriormente, essas toras passam por um picador para se obter pedaços menores de madeira, também conhecidos como cavacos. De acordo com Piotto (2003), deve-se utilizar a madeira em forma de cavacos na produção de celulose via processo químico, para garantir um cozimento homogêneo, obtendo assim um melhor rendimento. Por fim, esses cavacos passam

por uma peneira para separar as frações com os diversos tamanhos. Sendo que, as frações maiores são colocadas novamente no picador, e as mais finas são, geralmente, utilizadas como combustível para as caldeiras.

De acordo com Shreve e Brink . (2008), os cavacos são cozidos, em uma solução de licor branco com 12,5% de NaOH, Na₂S e Na₂CO₃, dentro de reatores denominados digestores contínuos, onde estão submetidos à alta temperatura e pressão. Além disso, segundo Piotto (2003), esse licor branco irá dissolver a lignina e parte das hemiceluloses, promovendo assim, a separação das fibras.

O digestor contínuo, Figura 2.2, é alimentado em sua parte superior com os cavacos e o licor branco, e na parte inferior é descarregada a pasta de celulose. De acordo com a CENIBRA (2016), essa mistura fica no digestor por cerca de 4 horas, e na parte mediana do mesmo, é extraído o licor negro, que corresponde à parte da madeira que não se dissolveu. Esse licor preto pode passar por tratamentos químicos que lhe permitirão voltar para os digestores na forma de licor branco.



Figura 2.2: Digestor contínuo (MAPEL Jr., 2016)

Um dos parâmetros de controle no cozimento é a realização deste a um número kappa definido. E segundo a ABTCP (1994), o número kappa permite-se ter uma idéia da quantidade de lignina que resta na polpa, sendo que quanto menor o número kappa, menor é o rendimento, devido à maior resistência intrínseca da polpa. Além disso, esse parâmetro irá designar o grau de deslignificação, que é uma das variáveis que afetam as propriedades do papel.

A polpa obtida no digestor contém materiais orgânicos dissolvidos da madeira e inorgânicos do licor de cozimento. Piotto (2003) afirma que a lavagem com água quente tem como objetivo separar o licor das fibras, e ela se inicia no próprio digestor, seja ele de batelada ou contínuo. Além disso, uma lavagem eficiente reduz a quantidade de produtos químicos que serão utilizados na etapa de deslignificação e no branqueamento.

Em seguida, é realizada a depuração, que corresponde ao peneiramento da pasta de celulose e cuja finalidade é a de eliminar os cavos não cozidos. (CENIBRA, 2016).

O branqueamento possui como objetivo a remoção da lignina remanescente, sendo utilizados para isso, agentes químicos diversos, como por exemplo, dióxido de cloro, ozônio, oxigênio e peróxido. Piotto (2003) afirma que o branqueamento da polpa é feito, normalmente, em quatro ou cinco etapas de reação e lavagem. E os dois principais métodos de branqueamento são o *Elemental Chlorine Free- ECF* (com uso de compostos de cloro) e o *Totally Chlorine Free- TCF* (não usa compostos à base de cloro).

A pasta de celulose sai do processo de branqueamento bastante diluída em água, com aproximadamente de 50% de umidade, sendo assim necessário executar a secagem da mesma. Por fim, segundo a Cenibra (2016), nesta última etapa do processo kraft, a folha de celulose sai da secadora com uma umidade de aproximadamente 10 %.

2.1.3 REUTILIZAÇÃO DE EMBALAGENS DE CIMENTO

As embalagens de papel kraft utilizadas para ensacar o cimento fazem parte dos resíduos da construção civil e geram um grande volume diário de resíduos, e isso contribui na intensificação dos impactos ambientais. De acordo com o relatório anual de 2013, do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), 66% do cimento é despachado em embalagens e 34% a granel, o que gera uma grande quantidade de resíduos, que por sua vez são, geralmente, descartados de maneira inadequada e, por conseguinte, impacta o meio ambiente de forma negativa (ALVES, 2016).

O descarte de embalagens de kraft não é um problema tão grave, visto que, esse tipo de papel leva cerca de seis meses para se decompor. Porém o cimento demora milhares de anos, e ainda pode contaminar o lençol freático (BUSON, 2009). Desta forma, as embalagens de materiais como o cimento, torna-se inadequado a processos de consumos secundários e desqualificados aos processos convencionais de reciclagem, devido à seu contato com o cimento (SCHMAL *et al.*, 2008).

Após a utilização do cimento, a sua embalagem, constituída por material com boas características físicas e mecânicas, se encontra contaminado por esse material e, portanto, acaba não sendo utilizado pelas empresas de reciclagem de papel. Todavia, há potencial de aproveitamento deste resíduo na produção de novos componentes para habitação, onde se busca a melhoria das propriedades técnicas e econômicas destes, e a maior sustentabilidade ambiental e econômica do processo. Por fim, o aproveitamento do saco de cimento pode minimizar os impactos ambientais causados pelo mesmo (BUSON, 2009).

Pode-se citar como um exemplo de reutilização do saco de cimento, o trabalho realizado por Buson (2009), o qual apresentou um novo tipo de Bloco de Terra Compactada (BTC) com adição de fibras da polpa de celulose resultante da reciclagem desse material descartado. Esse novo compósito, cuja finalidade é o uso em vedações verticais de edificações, foi denominado de kraftterra, e apresentou uma melhoria na resistência à retração, compressão e ao fogo. Além disso, o autor verificou que esse novo BTC permite fazer a redução ou até a eliminação do cimento na sua produção.

2.2 COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO COM ADIÇÃO DE FIBRAS NATURAIS

Dentre os diversos tipos de materiais existentes, pode-se citar os compósitos, que são constituídos por dois ou mais componentes empregados juntos com o objetivo de melhorar as propriedades físicas, mecânicas ou químicas desse material. Eles são compostos por uma fase matriz e uma fase dispersa, sendo essa geralmente de fibras (PEREIRA, 2002).

A fase dispersa irá influenciar no comportamento dos compósitos ao qual está sendo adicionada. As fibras, por exemplo, são de diversas variedades e assim, possuem características diferentes, o que faz com que cada tipo reaja de modo diferente ao serem adicionadas a uma matriz (PEREIRA, 2002).

Diversos estudos verificaram a importância de se fazer uma boa escolha do tipo de fase dispersa a ser usada. Sendo assim, serão apresentados alguns dos fatores e propriedades que são afetados pela utilização de algum tipo de fibra natural.

2.2.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS

Uma das características que possuem um papel fundamental no comportamento de compósitos é a aderência fase dispersa-matriz. Essa deve garantir uma boa interação entre as fases, ou seja, um melhor desempenho na zona de transição, pois assim irá garantir uma melhor transferência de tensões entre as duas. (CARVALHO e SANTOS, 2011).

Essa interação ocorre devido a combinação da interação mecânica, da adesão física molecular e da adesão química, sendo que ambos fenômenos ocorrem simultaneamente. Dentre esses, pode-se citar alguns fatores que irão influenciar na aderência, sendo eles a composição da matriz, o tipo e geometria das fibras, o método de preparação do compósito, entre outros. (MAHMOUD, 2005).

A ligação cimento-fibras irá depender da penetração da mistura da matriz nos poros e canais das fibras, e essa está sujeita ao tamanho das fibras. A respeito disso, Bentur *et al.* (1995) afirma que o tamanho da seção influencia consideravelmente na microestrutura da interface matriz-fibra. No caso de fibras que possuam um diâmetro inferior ou igual à das partículas de cimento ($\leq 70 \mu\text{m}$), a microestrutura da interface será densa e pouco diferente da estrutura da matriz, e as partículas de cimento e os hidratos formados não irão conseguir penetrar nas fibras.

Enquanto isso, as fibras cujo diâmetro é superior ao das partículas de cimento, a microestrutura da interface tem semelhanças à da zona de transição agregados-cimento nos

concretos, e pode ser composta por uma camada descontínua de cristais provenientes da hidratação do cimento e de uma zona porosa. Ademais, neste caso haverá a penetração da mistura da matriz nos poros (BENTUR *et al.*, 1995). Além disso, vale ressaltar que, uma melhor adesão é obtida reduzindo-se a porosidade, e obtendo uma menor concentração de cristais de hidróxido de cálcio no meio próximo às fibras (SAVASTANO, 2000).

No tocante aos parâmetros químicos, devido às composições químicas da matriz e das fibras, pode ser produzido pontes de hidroxila e ligações de hidrogênio quando essas fases reagem entre si (MAHMOUD, 2005). Além disso, a lignina, um dos constituintes das fibras vegetais, não possui muita compatibilidade química com o cimento, de modo que a sua presença em maiores quantidades irá reduzir a ligação entre a fibra e a matriz, e subsequentemente reduz a resistência (BLANKENHORN *et al.*, 1999).

A quantidade de lignina na interface matriz-fibra pode ser reduzida com o tratamento da fibra, que consiste no seu preparo prévio de modo que altere a relação das mesmas com a alcalinidade do ambiente da matriz. Esse processo limpa a superfície da fibra eliminando a camada superficial de lignina, melhorando assim a compatibilidade química desta com o cimento e, por consequência, a aderência entre as fases (MAHMOUD, 2005). O tratamento químico também minimiza a característica higroscópica da fibra, ou seja, a capacidade de absorção de água (BLANKENHORN *et al.*, 1999).

Outro fator que está relacionado às propriedades da fibra, é a razão de aspecto, que consiste na relação entre o comprimento e diâmetro da fibra, sendo que as melhores fibras são as de comprimento médio, entre 1 e 2mm. De acordo com Savastano (2000), isto ocorre porque o arrancamento das fibras curtas de dentro da fase matriz se dará mais facilmente quando solicitada. Enquanto a fibra longa irá receber maiores tensões, já que a tensão na fibra é proporcional ao seu comprimento, e desta forma, a intensidade da tensão pode ser superior à sua resistência o que leva ao rompimento da mesma.

Em relação ao módulo de elasticidade, essa propriedade irá contribuir na resistência à tração da matriz cimentícia, e no aumento de sua capacidade de absorver as deformações impostas. Ademais, as fibras que apresentam melhor desempenho nesse requisito, também são as de

comprimento médio, pois possuem alta resistência à tração e baixo módulo de elasticidade (CARVALHO e SANTOS., 2011).

Blankenhorn *et al.* (1999) propôs a utilização de fibras de papel reciclado em compósitos, sendo verificado o aumento do módulo de elasticidade com os ciclos de congelamento e descongelamento. O autor também concluiu que a resistência à flexão e a tenacidade desses compósitos são melhores que a do cimento puro, mas quando há o aumento de umidade ocorre a redução da resistência à flexão.

A tenacidade à fratura também está associada ao comprimento das fibras de reforço, já que a tensão é transferida da matriz para a fibra. Todavia, podem ocorrer descolamentos na interface e a fibra sair da matriz, o que pode contribuir na geração de fraturas (SAVASTANO, 2000).

2.2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A respeito das propriedades físicas, uma das características de argamassas é a absorção por capilaridade, que corresponde à capacidade de sucção do sistema de poros e capilares que compõem a argamassa. De acordo com Carvalho e Santos (2011), os fatores que interferem nessa propriedade são a capacidade individual de absorção dos materiais constituintes da argamassa, a configuração dos poros, e maiores relações água/materiais secos. Sendo que um maior valor desse último irá aumentar a porosidade da argamassa, o que eleva a absorção do sistema.

A intensidade da incidência dos poros permeáveis nas fibras depende das lacunas e lumens. O lúmen é uma cavidade com dimensão entre 5µm e 10 µm, e que se encontra no interior das células constituintes das fibras vegetais, enquanto as lacunas são cavidades entre as células. Além de uma maior quantidade de poros, uma grande quantidade dessas cavidades acarreta em uma massa específica aparente inferior à real, e ao aumento da absorção de água (SAVASTANO, 2000).

O American Concrete Institute -ACI (1996) afirma que diversos estudos demonstram que o aumento do teor de umidade enfraquece a ligação entre matriz e fibra, o que incentiva a

ocorrência do arrancamento da fibra, em vez da ruptura nas fissuras. Além disso, a ligação enfraquecida reduz a resistência à flexão, todavia a energia de fricção consumida durante o arrancamento tende a aumentar a tenacidade à fratura do compósito.

A influência da umidade em cimento reforçado com polpa kraft foi uma das diversas propriedades desse tipo de compósito estudadas por Coutts (1984). As Figura 2.3 e Figura 2.4 comparam os valores de resistência à flexão (*flexural strength*) e tenacidade (*fracture toughness*) de cimento reforçado com diversos teores de polpa kraft, sendo testados em condições úmidas (*wet tested*), secas em estufa (*oven dried*), e ambiente com atmosfera controlado com 50% de umidade relativa (*RH tested*).

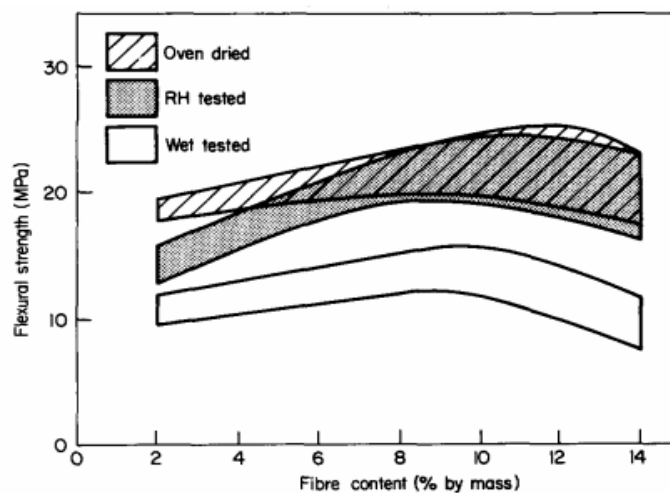


Figura 2.3: Efeito do teor de umidade na resistência à flexão (COUTTS, 1984).

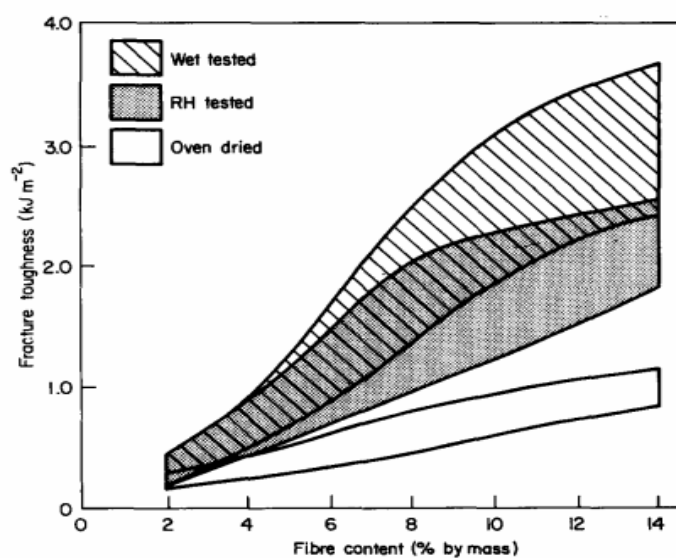


Figura 2.4: Efeito do teor de umidade na tenacidade (COUTTS, 1984).

Por meio da Figura 2.3, verifica-se que com o aumento do teor de umidade, tende a diminuir a resistência à flexão de cimentos reforçados com fibras naturais. Por outro lado, na Figura 2.4, observa-se um maior teor umidade tende a aumentar a tenacidade dos compósitos (COUTTS, 1984).

Outro aspecto importante afetado pela adição de fibras em compósitos é o aumento do tempo de pega do cimento que ocorre, por exemplo, devido a presença de hemicelulose, açúcares e alguns fenóis, que são encontrados nas fibras. Além disso, outro fator contribuinte é a presença de substâncias de caráter ácido que são liberadas pelas fibras em solução aquosa (SAVASTANO, 2000).

Uma terceira propriedade é a capacidade de dispersão das fibras, e está relacionada com a quantidade desta dentro da matriz, de modo que maiores quantidades de fibras irão reduzir a capacidade de dispersão, o que provocará uma redução da trabalhabilidade (PERUZZI, 2002).

2.2.3. DURABILIDADE

A durabilidade do concreto reforçado com fibras naturais está relacionada com a capacidade de resistir a ações externas, como variações de temperatura e umidade, o ataque de sulfato e de cloreto; resistir a ações internas, como por exemplo, a compatibilidade entre matriz e fibras (WOODHEAD PUBLISHING SERIES IN TEXTILES, 2011).

As fibras naturais possuem em sua composição uma grande parcela de lignina e hemicelulose, que por sua vez são afetadas pelo grau de alcalinidade do meio (SAVASTANO, 2000). Assim, fibras naturais imersas em cimento Portland, um ambiente alcalino, se degradam ao dissolver as fases de lignina e hemicelulose, e devido ao efeito da deposição e cristalização de produtos de hidratação nos vazios das fibras. (WOODHEAD PUBLISHING SERIES IN TEXTILES, 2011)

De acordo com Gram (1988), a decomposição da celulose em meio alcalino, ilustrado na Figura 2.5, ocorre inicialmente devido a um fenômeno chamado "*peeling-off*", que ataca as extremidades das cadeias moleculares, estas possuem grupos redutores que reagem com os

íons OH^- da solução básica. Essa reação conduz a formação de ácidos, como o CH_2OH , que se separam da cadeia molecular. Um segundo fenômeno é a hidrólise alcalina, que resulta na divisão da cadeia molecular, e conseqüentemente reduz o grau de polimerização.

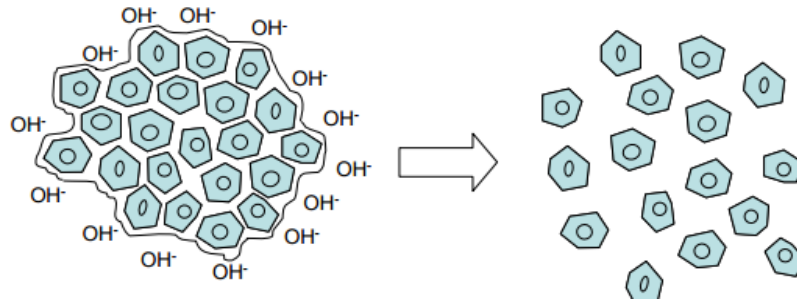


Figura 2.5: Representação esquemática da decomposição de fibras em meio alcalino (GRAM, 1988) .

Por conseguinte, verifica-se que menores teores de lignina, ou seja, polpas com menores valores de Kappa resistem melhor à agressividade da matriz e possuem boa durabilidade em meios alcalinos (SAVASTANO, 2000). Desta forma, a polpa kraft possui melhores características de durabilidade do que outras fibras naturais, já que essa possui uma menor quantidade de lignina (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996).

Por fim, já foram propostos diversos métodos para prolongar a vida útil de fibras em compósitos cimentícios, como por exemplo, o tratamento prévio das fibras e a redução da alcalinidade da pasta de cimento, sendo o último obtido com a adição de minerais. (GRAM, 1983).

2.3 ESTUDOS DE COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA E CELULOSE

De acordo com Savastano (2000), o estudo das possibilidades de utilização de fibras como reforço de matrizes iniciou-se na Inglaterra em 1970, e no Brasil em 1980 com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (Ceped) da Bahia. E com o passar dos anos, observa-se um número crescente de pesquisas sobre compósitos cimentícios com o uso de fibras naturais e artificiais.

2.3.1. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E PAPEL KRAFT MULTIFOLIADO

No tocante a estudos de compósitos com adição papel kraft multifoliado, verifica-se que não há muito desenvolvimento de pesquisas na área, sendo encontrados apenas alguns trabalhos nacionais.

Um dos estudos, é o proposto por Carvalho e Santos (2011), que corresponde à confecção de argamassas de assentamento com a adição de fibras de papel kraft provenientes de sacos de cimentos e de cal. Realizaram um estudo confeccionando esse compósito com cal, cimento, areia e água, e acrescentando quatro teores diferentes da polpa de fibras, que foi obtida com a agitação dos sacos dentro de água potável até a dispersão destas.

Além disso, foram realizados testes em duas etapas: uma em laboratório, e uma segunda em canteiro de obras. No laboratório, as argamassas foram estudadas em seu estado fresco e endurecido, sendo realizados, por exemplo, ensaios como a da determinação da absorção de água por capilaridade, da variação dimensional, da resistência mecânica, de resistência à compressão, de aderência, entre outros. Já no segundo momento, foram feitos testes empíricos em canteiro de obras para trabalhabilidade e exsudação desse compósito (CARVALHO e SANTOS, 2011).

Os autores possuíam como objetivo, obter um desempenho do compósito que fosse igual ou superior ao da argamassa sem fibras (argamassa comum). Os resultados foram considerados satisfatórios, pois em um dos traços, com 10% de polpa em substituição à areia, obteve-se melhores valores de resistência mecânica e resistência de aderência, e resultados parecidos para resistência à compressão quando comparado à sem fibras (CARVALHO e SANTOS, 2011).

Em outro estudo, Carvalho *et al.* (2014) verifica o uso em compósitos das diversas variações de embalagens de kraft encontradas na indústria. Com esta finalidade, realizou-se ensaios de resistência à tração, microscopia eletrônica, absorção de água, gramatura, grau de

polimerização, e de alongamento. Sendo empregadas amostras de papel na sua forma original e na forma de fibra processadas mecanicamente.

Os resultados obtidos foram aceitáveis, e verificou-se que, aparentemente, esses diferentes tipos de fibras de kraft não influenciam ou limitam o seu uso em compósitos, já que não são alteradas as características das fibras individuais (CARVALHO *et al.*, 2014).

Outro estudo de compósitos de matriz cimentícia foi realizado por Silva (2013), no qual foram adicionadas polpas de papel kraft provenientes de embalagens de reensaques e de embalagens descartadas, e emulsão à base de poli acetato de vinila e areia lavada fina. Tendo como objetivo avaliar as características térmicas e mecânicas desse compósito, moldou-se corpos de provas com a argamassa misturada à diferentes tipos de fibras celulósicas, e com teores variados para cada um desses, sendo esses teores de 0%, 4% e 12% de polpa.

Os ensaios realizados foram os seguintes: espectroscopia por transformada de Fourier, difração de raios-x, microscopia óptica e eletrônica de varredura, difusividade térmica, condutividade térmica, calor específico (Método Flash Laser), e de flexão simples. (SILVA, 2013).

Finalmente, os resultados desses ensaios demonstraram que o uso dessas fibras podem melhorar características térmicas e mecânicas de matrizes cimentícias de uso não estrutural. E verificou-se que esses materiais apresentaram um módulo de elasticidade superior à argamassa sem fibras (SILVA, 2013).

Adicionalmente, Martins e Soares (2016) estudou as argamassa com fibras provenientes de embalagens de cal, sendo analisadas suas propriedades, nos estados fresco, endurecido e sob a forma de revestimento em obra. Para tanto, desenvolveram três painéis de revestimento, sendo um de referência, um com argamassa e fibras, e outro com fibras e aditivo incorporador de ar. Ademais, a quantidade de fibras a ser substituída corresponde a 7% da massa dos aglomerantes, porém a fibra foi adicionada em troca da areia.

Foi verificado por esses autores que o uso do aditivo incorporador de ar prejudicou algumas das propriedades da argamassa. Além disso, Martins e Soares (2016) obteve resultados contrários ao do estudo desenvolvido por Carvalho *et al.* (2014), uma vez que nos ensaios de

resistência de aderência à tração os valores dos painéis com adição de fibra foram inferiores ao de referência. Os resultados foram justificados pela heterogeneidade da mistura e uso da betoneira, e pelo acréscimo de água em alguns locais no momento da aplicação da argamassa.

Em relação ao estudo de blocos de concreto com adição de fibras kraft, Alves (2016) propõe a reutilização de sacos de cimento como a fase dispersa na produção de blocos de Classe C (vedação), sem função estrutural e com dimensões nominais de 9 cm x 19 cm x 39 cm (largura, altura e comprimento).

Na confecção desse compósito, utilizou-se na mistura cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água, e aditivo plastificante. Além disso, foram realizados em dois traços diferentes, um com teor de argamassa de 61% e outro com 91%, sendo também adicionando areia mix na produção do segundo traço. Dentre esses traços, os blocos foram moldados com teores de 1,0% e 0,5% em massa de material seco de fibras kraft, e também foi previsto blocos sem adição de fibras para a realização do estudo comparativo (ALVES, 2016).

A autora realizou ensaios de resistência à compressão, análise dimensional, absorção de água, e difração de raios x. Dentre os resultados obtidos, observa-se que ao aumentar o teor da adição de fibra, aumenta-se a absorção de água dos blocos, e se reduz a resistência a compressão. Além disso, dentre os traços estudados, apenas o com teor de 91% de argamassa e com adição de somente 0,5% de fibra kraft se mostrou mais adequado para a produção desse compósito, já que apresentou valores acima dos mínimos exigidos pela norma (ALVES, 2016).

2.3.2. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E OUTROS TIPOS DE PASTA KRAFT

Visto que o papel kraft multifoliado é apenas um dos diversos tipos de pasta kraft, verifica-se a existência de pesquisas com outras variedades dessa pasta que são adicionadas à matriz cimentícia como forma de reforço. Dentre esses, destaca-se o trabalho de Mohr *et al.* (2006), no qual o autor estudou o uso de folhas de polpa kraft, de fibras de *Pinus elliottii*, em vez de fibras dispersas como os demais autores.

Foi estudado o desempenho das argamassas ao se adicionar folhas de diversas espessuras, com uma ou mais camadas, e colocadas em diferentes profundidades da secção. Segundo o mesmo autor, o uso de folhas de fibra permite reforçar uma secção em específico, bastando adicioná-la próximo ao local onde se deseja aumentar a resistência à tração e flexão. Outra vantagem desse tipo de fase dispersa, é que comparado ao reforço de fibras distribuídas aleatoriamente com volumes equivalentes, os teste de flexão mostraram que os compósitos de folha de fibra apresentam uma maior tenacidade (MOHR *et al.*, 2006).

Coutts (1984) estudou compósitos de cimento reforçados com fibras de madeira, mais especificamente, com polpa kraft de *Pinus radiata*. Ele concluiu que a resistência a flexão varia com a fração em massa da fibra e o grau de refinação desta. O autor também verificou que o aumento de teor umidade tende a elevar a tenacidade dos compósitos, enquanto reduz a resistência à flexão.

O ACI 544.1-96, documento do American Concrete Institute é um relatório composto com informações sobre concretos reforçados com diversos tipos de fibras (fibras de aço, vidro, sintéticas e naturais). Ele apresenta os princípios desses compósitos, descrição dos tipos de fibra, métodos de fabricação, propriedades físicas, aplicações, estudos desenvolvidos por diversos autores, entre outras características.

Em relação às fibras naturais, o documento afirma que há indicativos de que o reforço com a polpa kraft melhora o desempenho de flexão dos materiais cimento, e que a adição mínima de fibras para se verificar melhorias nas propriedades mecânicas do compósito de cimento é de aproximadamente 3% em volume. O ACI também apresenta algumas das aplicações comerciais desse compósito, sendo eles: fabricação de folha plana e ondulada, tubos de concreto para drenagem, produtos de argamassa para jardinagem, entre outros (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996).

2.3.3. COMPÓSITOS DE CIMENTO PORTLAND E OUTRAS FIBRAS

Visto que existe uma grande variedade de fibras naturais, diversas pesquisas já foram realizadas sobre a adição destas em compósitos de cimento. Dentre elas, pode-se citar os

estudos de Zhu (1994 e 1993) com fibras de banana e de Coutts e Ni (1995) com fibras de bambu, ambas utilizadas como reforço desse tipo de compósito.

Em relação à fibra de cânhamo, bastante estudada na Europa como reforço de diversos materiais, pode-se citar os trabalhos de Sedan (2007) sobre as propriedades mecânicas do compósito e as interações físico-químicas nas interfaces fibra de cânhamo-cimento; e a de Magniont (2010) sobre a caracterização de materiais de construção à base de materiais agrícolas, na qual a autora aborda o uso de fibras de Cânhamo e de yucca como fase dispersa de compósitos.

Já em relação às fibras de sisal, Olivares (1992) e Savastano (2003) analisaram as características mecânicas, dentre outros fatores, desse componente como reforço de matriz cimentícia. Além disso, Izquierdo (2011) estuda a adição dessa fibra em blocos de concreto para alvenaria, e Martins (2014) desenvolve a caracterização de compósitos solo-cimento auto adensáveis reforçados com sisal.

Por fim, além dessas fibras citadas, muitas outras já foram focos de estudos, como a fibra de juta, de palmeira, de coco, entre outras. Sendo assim, é possível observar que pesquisas sobre novos materiais utilizando fibras naturais tem sido objeto de análise há bastante tempo, e tem demonstrado ser um bom componente de reforço.

Com base nesses estudos apresentados, verifica-se que a utilização de fibras naturais no desenvolvimento de novos compósitos parece ser adequada, assim como a viabilidade de seu uso, visto que são uma ótima resposta à necessidade de fibras refinadas, baratas e de produção viável (SAVASTANO, 2000).

3. METODOLOGIA

O presente estudo experimental propõe a utilização de fibras naturais como reforço em argamassas, sendo essas fibras obtidas por meio da reutilização de embalagens de papel kraft provenientes de embalagens de cimentos e de argamassas. Com o objetivo realizar a caracterização física e mecânica desse compósito, dividiram-se os ensaios em cinco etapas, conforme a metodologia apresentada na Figura 3.1.

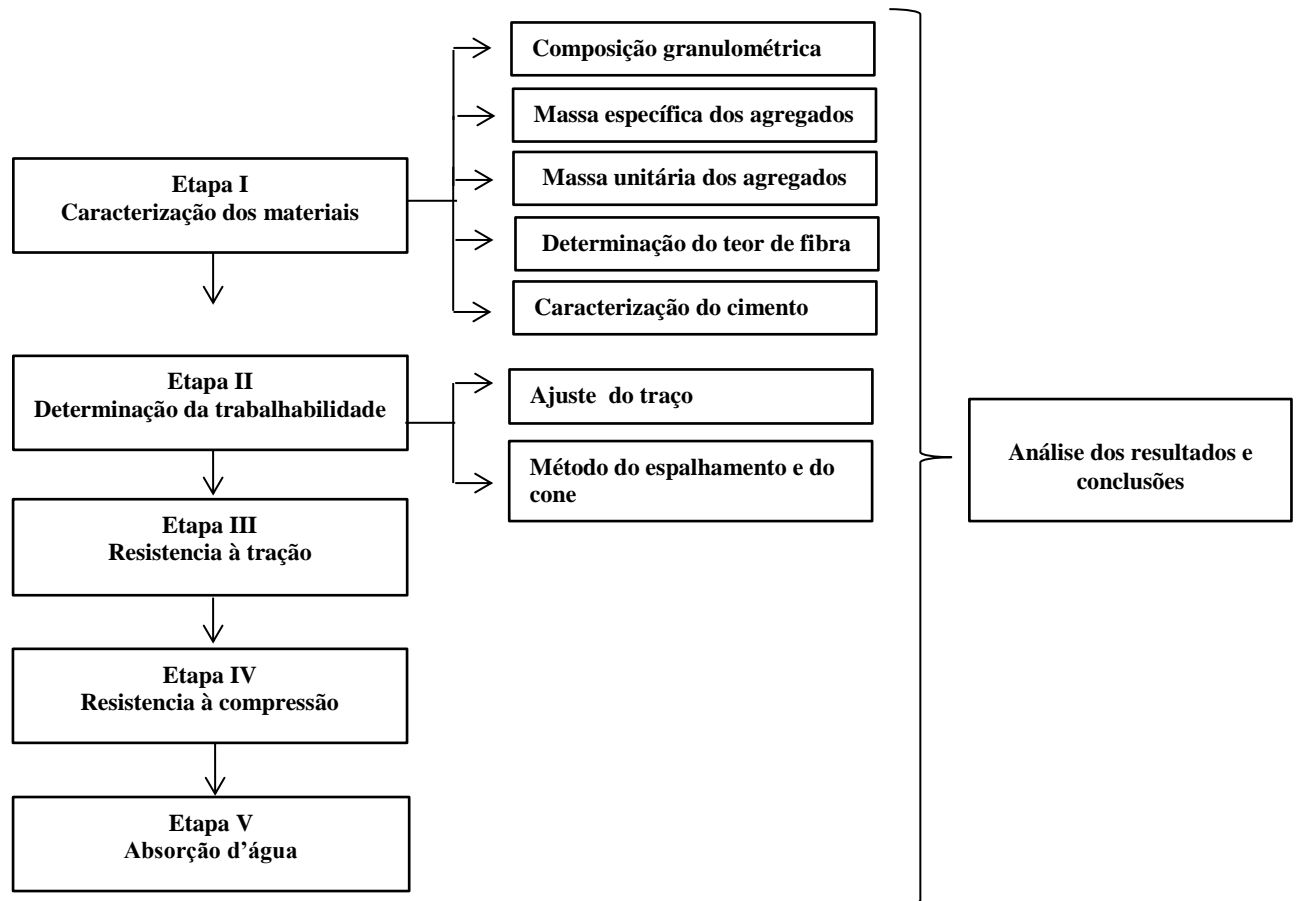


Figura 3.1: Etapas do trabalho experimental

Na avaliação da interferência do traço em argamassas, foi fixada a trabalhabilidade como característica de referência, e tem-se como variáveis o tipo de areia e os teores de fibra empregados. Ademais, os ensaios do presente estudo foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM/UnB) da Universidade de Brasília.

3.1 ETAPA I: OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Esta primeira etapa consiste em especificar e caracterizar os materiais necessários para a realização dos ensaios. Os corpos de prova foram moldados a partir da mistura de cimento Portland (CP V ARI), agregados miúdos, fibras de papel kraft e água. Sendo que a água utilizada no amassamento foi a da rede pública do Distrito Federal, que é fornecida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

As fibras de papel kraft, Figura 3.2, foram obtidas por meio do processo de reciclagem de embalagens de cimento e argamassa, e descritos por Alves (2016). Os procedimentos desse processo consistem, resumidamente, na limpeza das embalagens com a retirada do cimento que tenha ficado preso a esta, a sua imersão em água, agitação em um misturador, retirada da água em excesso e, por fim, a polpa é dispersa e seca.



Figura 3.2: Fibras de papel kraft

No tocante aos agregados, foram utilizados a areia rosa, pó de brita e areia mix, conforme Figura 3.3, sendo que a escolha desses agregados foi motivada por já serem estudadas em outros trabalhos. Para a caracterização destes foram realizados os ensaios de granulometria, determinação da massa específica e massa unitária, conforme descritos nos próximos tópicos.

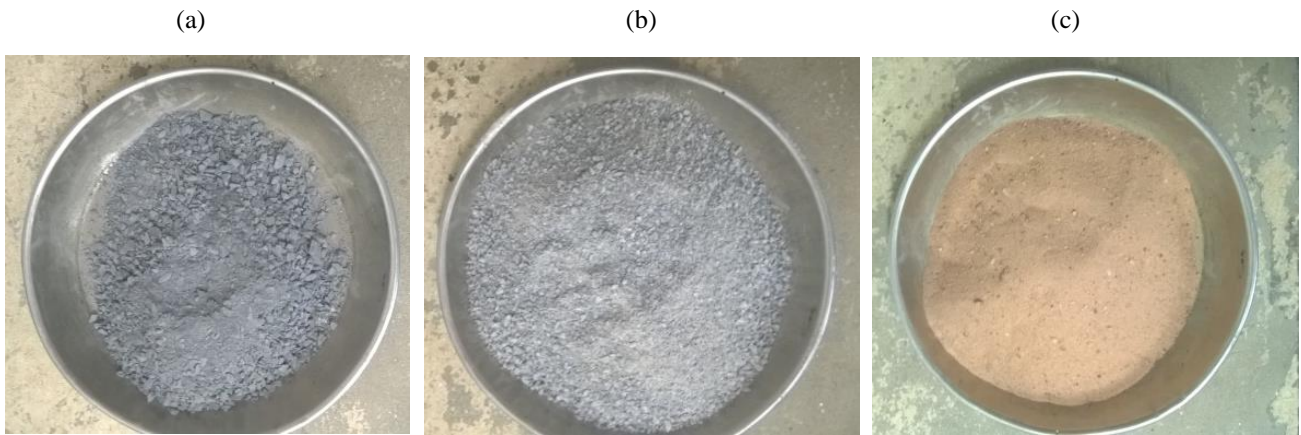


Figura 3.3: Agregados utilizados: (a) Pó de brita, (b) Areia Mix, (c) Areia rosa

3.1.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA

Para a determinação da faixa de tamanhos das partículas do agregado, ou seja, da sua composição granulométrica, foi realizado o ensaio conforme a NBR NM 248:2003. Desta forma, a aparelhagem utilizada foi:

- Balança (resolução de 0,01 g);
- Estufa;
- Agitador mecânico;
- Peneiras das séries normal e intermediária, conforme a NM-ISO 3310-1 ou 2.;
- Bandejas;
- Escova;

Inicialmente, são separadas duas amostras para serem ensaiadas, sendo que a massa mínima para a amostra é dada com base na dimensão máxima nominal do agregado, sendo pra esse caso, de 1 kg de material seco. A amostra é seca em estufa e pesada, para em seguida ser colocada no conjunto de peneiras, que são encaixadas com a abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. Posteriormente, é realizada a agitação mecânica do conjunto por 10 minutos, para promover assim a separação dos diferentes tamanhos das partículas do agregado.

Após a agitação mecânica, o material retido na peneira é removido, e a tela em ambos os lados deve ser escovada para retirar qualquer material que possa ter ficado preso na tela. Assim, o agregado desprendido pelo lado interno é considerado como retido naquela malha, enquanto o da parte inferior é adotado como material passante. Por fim, obtêm-se a massa do material retido em cada peneira e no fundo.

A composição granulométrica é a relação da porcentagem retida acumulada em cada peneira pela abertura dessas, sendo que uma maior ou menor continuidade da curva está associada à variação das dimensões dos grãos, que por sua vez irá interferir em algumas propriedades da argamassa, como o índice de vazios e a massa unitária.

A análise da continuidade de uma areia pode ser realizada por meio do método de Allen-Hazem, o qual se permite a obtenção do coeficiente de uniformidade C , conforme a equação (3.1). Esse parâmetro indica o grau de uniformidade, sendo uma areia uniforme aquela cujos diâmetros da maior parte da amostra estão dentro de uma pequena faixa de graduação, ou seja, possuem grão com tamanhos semelhantes. Desta forma, areias uniformes possuem baixo grau de continuidade, uma vez que essas não possuem uma distribuição granulométrica adequada. (PINI, 1997)

$$C = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3.1)$$

Onde d_{60} e d_{10} são os diâmetros correspondentes a 60% e 10% das frações passantes, respectivamente, sendo obtidos na curva granulométrica.

Outras grandezas que podem ser obtidas com os resultados dessa etapa são a dimensão máxima característica e o módulo de finura. O primeiro correspondente à abertura da peneira na qual porcentagem retida acumulada é igual, ou imediatamente inferior a 5%; enquanto o segundo é dado pela somatória das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal, e dividida por 100.

O peneiramento também permite conhecer a quantidade de materiais pulverulentos que compõe o agregado, que de acordo com a ABNT NBR 7219:1987 correspondem às partículas com dimensão inferior a 0,075mm. Além disso, a presença de um alto teor desse tipo de material prejudica a resistência mecânica e a trabalhabilidade do concreto e argamassa, dado

que o material pulverulento diminui a aderência entre o agregado e a argamassa (SANTOS e MARITNS, 2010).

3.1.2 MASSA ESPECIFICA

A determinação da massa específica foi executada pelo método do frasco de Chapman, e conforme as especificações da ABNT NBR 9776:1988. A escolha desta metodologia em função das outras, deve-se à simplicidade de execução do frasco de Chapman, e a rapidez para a obtenção dos resultados.

De acordo com essa norma, essa propriedade pode ser definida como a relação entre a massa do agregado seco em estufa e o volume igual do sólido, estando incluídos os poros impermeáveis. Para a execução, inicialmente, deve-se colocar a água no frasco até que essa atinja a marca de 200 cm³. Em seguida é inserido 500g da amostra do agregado, e agita-se o mesmo para a eliminação de bolhas de ar. Deve-se lembrar de que esse agregado deve ter sido previamente seco em estufa a uma temperatura entre 105°C e 110°C, de modo a se obter uma constância de massa.

Por fim, o nível atingido pelo conjunto água-agregado, que pode ser obtido pela leitura no frasco, será o volume dado em cm³. Já a massa específica do agregado miúdo é obtida pela equação (3.2), sendo que a norma recomenda que sejam feitas duas determinações com amostras do mesmo agregado.

$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (3.2)$$

Onde γ é massa específica do agregado expressa em g/cm³; e L é o volume ocupado pelo conjunto água-agregado e obtido pela leitura do frasco.

3.1.3 MASSA UNITÁRIA

A massa unitária de um agregado é definida como a relação entre a massa não compactada e o volume desse material, sendo assim considerados os vazios existentes entre os grãos. Por conseguinte, o desempenho das argamassas é influenciado por esse parâmetro, uma vez que ele pode afetar a dosagem (SAVI *et al*, 2013).

O ensaio foi executado conforme as especificações da AMN NBR NM 45:2006, sendo aplicado o Método C, o qual considera que o agregado está no estado solto. Por conseguinte, a aparelhagem utilizada foi a balança, um recipiente cilíndrico com capacidade de 14,79 dm³ e uma régua.

A primeira etapa consiste em secar a amostra em estufa a uma temperatura de aproximadamente 105°C até constância de massa, sendo que ela deve ser capaz de preencher cerca de 150% do volume do recipiente de ensaio. Posteriormente, determina-se a massa do recipiente vazio e em seguida coloca-se a amostra até que essa transborde, e de modo que ela seja despejada de uma altura máxima de 5 cm.

Por último, com o auxílio de uma régua, nivela-se a camada superficial retirando a amostra que excedeu ao volume do recipiente. Por fim, obtêm-se a massa do conjunto agregado/recipiente.

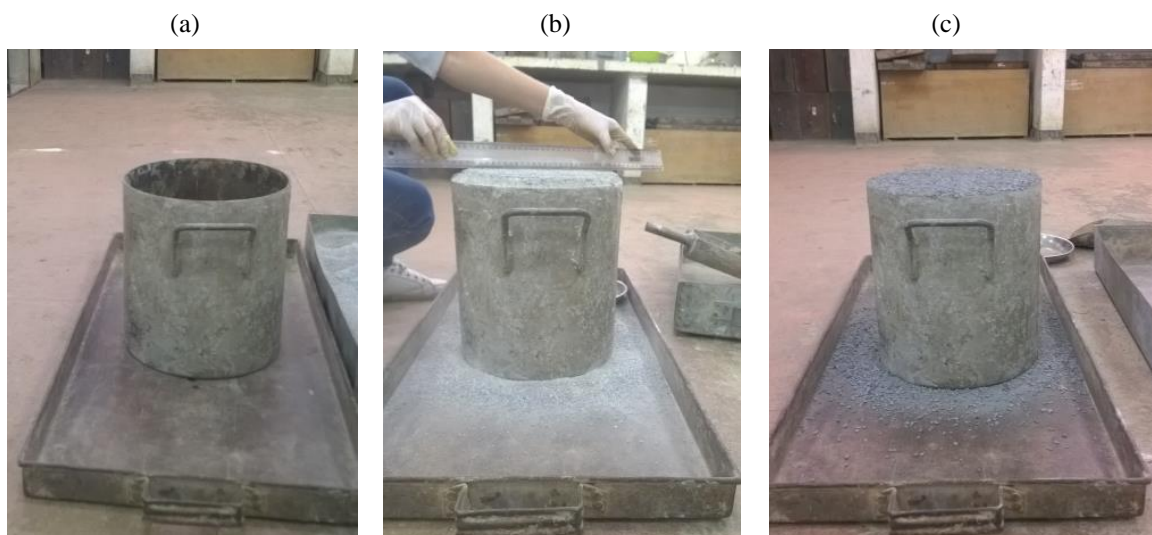


Figura 3.4: Etapas e aparelhagem para a determinação da massa unitária - (a) Recipiente cilíndrico; (b) Rasadura; (c) Conjunto agregado/recipiente

Desta forma, a massa unitária do agregado (ρ_{ap}), expresso em kg/m^3 , é dada pela equação (3.3). Onde V é o volume do recipiente em m^3 , m_{ar} a massa do conjunto agregado/recipiente, e m_r a massa do recipiente vazio.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3.3)$$

Além disso, com a massa unitária e a massa específica é possível obter o índice de volumes de vazios, conforme equação (3.4).

$$E_v = \frac{10 * [(d_1 * \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 * \rho_w} \quad (3.4)$$

Na qual E_v é o índice de volume de vazios nos agregados expresso em porcentagem; ρ_{ap} a massa unitária média do agregado em kg/m^3 ; ρ_w a massa específica da água em kg/m^3 ; e d_1 a massa específica relativa do agregado seco.

3.1.4 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRA

O primeiro obstáculo encontrado neste estudo foi determinar se a adição de fibras seria por substituição em massa ou em volume. A escolha da melhor metodologia foi realizada após análise das massas específicas dos agregados das fibras de papel kraft, uma vez que verificou-se que a areia rosa, areia mix, e pó de brita possuem respectivamente, massa específica de $2,65\text{g/cm}^3$, $2,71\text{g/cm}^3$ e $2,71\text{g/cm}^3$; enquanto a do papel kraft multifoliado é de $1,5\text{g/cm}^3$, conforme caracterização do papel kraft de embalagens realizada por Carvalho *et al.* (2014).

Observa-se que, em estudos de compósitos de fibra-cimento, realizados anteriormente por diversos autores, foi adotada a substituição em massa, como pode ser verificado nos trabalhos de Alves (2016) e Carvalho e Santos (2011). Todavia, como a massa específica desse material é quase a metade dos demais agregados, se adotada a substituição em massa, a quantidade de fibras a ser adicionada seria relativamente grande, o que pode ocasionar, por exemplo, maiores dificuldades na moldagem. Desta forma, acredita-se que a escolha pela substituição por volume pode proporcionar a obtenção de resultados melhores nos ensaios de tração e absorção de água.

Já que foi determinada a adoção da substituição por volume de agregados, e que a argamassa será preparada com o traço especificado pela ABNT NBR 7215:1996, é necessário especificar os teores de fibras a serem adicionados à mistura. O primeiro teor de fibra escolhido foi de 1%, posto que este já foi pesquisado e adotado por outros autores, como Santana (2015) que utilizou teores de 1,0% até 5,0% e conseguiu obter uma boa homogeneização do concreto para essa primeira porcentagem de fibras.

Com base no teor de referência de 1,0%, determinou-se que seriam analisados um teor de adição superior e um inferior à esse. Assim, serão adotados os teores de 0,5%, 1% e 1,5% do volume total de agregados. Para a determinação da massa de cada agregado utilizado, transformou-se o traço em massa Da ABNT NBR 7215:1996 para volume e posteriormente subtraiu os teores de fibra a serem adicionados, e o valor restante foi convertido novamente em massa.

Por fim, os novos valores do traço, para cada teor de fibra, são os apresentados na Tabela 3.1, na qual a notação 0,5% de fibras corresponde à argamassa com substituição de 0,5% do volume de agregados pelo mesmo volume em fibras, o que vale para os demais teores.

Tabela 3.1: Quantidade de materiais secos das argamassas de referência e com adição de fibras.

Material	Referência (g)	0,5% de fibras (g)	1,0% de fibras (g)	1,5% fibras (g)
Cimento	624,00	624,00	624,00	624,00
Areia Rosa	468,00	465,66	463,32	460,98
Pó de Brita	468,00	465,66	463,32	460,98
Areia Mix	936,00	931,32	926,64	921,96
Fibra Kraft	0,00	5,21	10,42	15,63

Observa-se na Tabela 3.1 que a areia mix será adicionada com o dobro da quantidade dos demais agregados e esse procedimento é justificado, pois na ABNT NBR 7215:1996 são consideradas quatro frações de areia e, nesse estudo há apenas três frações diferentes. Uma vez que a areia mix é a que possui granulometria intermediária entre as três utilizadas, será adotada duas medidas para essa, enquanto para a areia rosa e o pó de brita apenas uma medida.

3.1.5 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

Na caracterização do cimento a norma utilizada como referência foi a ABNT NBR 7215:1996. Desta forma, foram moldados corpos de prova (CP) cilíndricos e, com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, observando a quantidade de 4 CP para cada idade ensaiada, sendo essas de 1, 3 e 7 dias.

Para tanto, a aparelhagem utilizada, desde a moldagem dos corpos de prova até o ensaio de resistência a compressão para a caracterização do cimento, foram:

- Misturador mecânico;
- Balança digital;
- Forma cilíndrica metálica e com base rosqueada;
- Soquete;
- Placas de vidro;
- Prensa Hidráulica com capacidade de 100 toneladas, marca Dinatest

Primeiramente, deve-se untar os moldes com óleo em toda a superfície interna, para em seguida iniciar o preparo da argamassa. Essa foi preparada por meio de um misturador mecânico, adotando a composição da mistura informada na norma de referência (Tabela 2), e utilizando as quatro frações da areia de Corumbá como agregado, que são fração grossa, média grossa, média fina e fina.



Figura 3.5: As quatro frações da areia de Corumbá

Tabela 3.2: Composição da argamassa segundo a norma (ABNT NBR 7215:1996)

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	624 ± 0,4
Água	300 ± 0,2
Areia normal	
- fração grossa	468 ± 0,3
- fração média grossa	468 ± 0,3
- fração média fina	468 ± 0,3
- fração fina	468 ± 0,3

- **Preparo da argamassa**

Os procedimentos para o preparo da argamassa será o mesmo para todas as etapas deste estudo, visto que é necessário que essa seja uma das condições fixa, para assim ser possível obter resultados mais confiáveis e ter um meio de padronizar a produção. Desta forma, as etapas desse processo são as apresentadas a seguir.

Para a realização da mistura, adiciona-se toda a água a cuba, sendo que esta deve estar úmida para que ela não retire a água do traço. Em seguida é colocado o cimento, anotando-se a hora em que esse entrou em contato com a água, e deve-se proceder a mistura desses materiais a uma velocidade baixa por 30 segundos. Sem parar o misturador, adiciona-se, gradativamente as frações dos agregados previamente misturados e num período de 30 segundos. Após ter adicionado todo o material, muda-se a velocidade para alta e após 30 segundos o misturador é desligado.

Nesse segundo momento, é retirado a argamassa que ficou aderida à pá e às paredes da cuba, sendo especificado pela norma realizar esse procedimento nos primeiros 15 segundos. Deve-se então deixar a mistura repousar pelos próximos 1 minuto e 15 segundos, sendo que a cuba deve ficar coberta com pano úmido durante esse tempo. Por fim, após o repouso, liga-se novamente o misturador na velocidade alta por 1 minuto, obtendo assim a argamassa.

- **Moldagem dos corpos de prova e ensaio de resistência à compressão**

É recomendado pela norma que o preenchimento dos moldes com a argamassa seja executado imediatamente após o amassamento, sendo essa colocada em quatro camadas

aproximadamente iguais com o auxílio de um instrumento que possibilita ter uma referência da altura das camadas, conforme a Figura 3.6 – (b). Para um bom adensamento, a norma especifica que cada camada receba 30 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, operação realizada com o soquete metálico. Por fim, com uma espátula é feita a rasadura do topo dos corpos de prova.



Figura 3.6: Etapas e aparelhagem do preparo e moldagem dos corpos de prova -
(a) Misturador mecânico; (b) Molde com o instrumento de referência de camadas; (c) Molde preenchido.

Uma vez preenchidos com a argamassa, os moldes foram colocados na câmara úmida do LEM/UnB e sobre esses foram posicionadas placas de vidro. Após 24 horas de cura, eles foram desmoldados e identificados. Dos doze corpos de prova cilíndricos moldados, quatro foram separados para serem ensaiados e os demais são submetidos à cura em água saturada de cal até a data de ruptura.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com a prensa da marca Dinatest, e para a realização do mesmo é necessário retificar previamente os corpos de prova, de modo a se obter uma superfície sem rugosidades. Ademais, a prensa, a retifica e os corpos de prova ensaiados são apresentados na Figura 3.7.

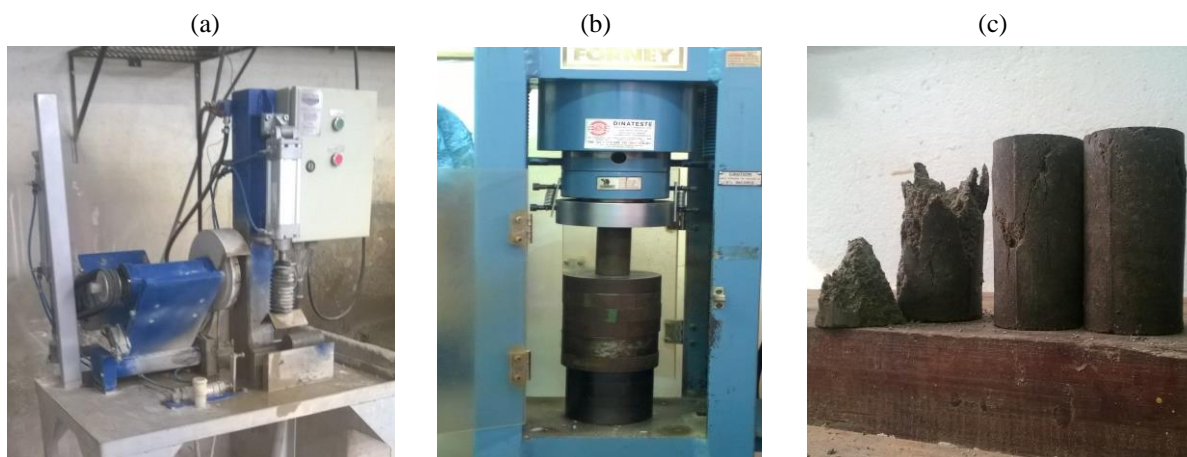


Figura 3.7: Etapas e aparelhagem para o ensaio de resistência à compressão -
(a) Retífica; (b) Prensa; (c) Corpo de prova ensaiado.

3.2 ETAPA II: DETERMINAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade é uma das características que afetam o desempenho da argamassa, uma vez que essa deve apresentar um estado plástico adequado e permanecer assim pelo tempo necessário à sua utilização. Além disso, essa característica também influencia no estado endurecido, já que propriedades como a resistência e a aderência estão relacionados à qualidade do assentamento e à capacidade de retenção de água, fatores ligados à trabalhabilidade (UFRGS, 2017).

Por outro lado, a trabalhabilidade depende de fatores como a consistência e a plasticidade. Desta forma, para a determinação dessa propriedade, foi realizado o ensaio de índice de consistência, que é obtido pelo método de espalhamento, ou mesa de consistência (*Flow table*), e de penetração de cone.

3.2.1 ENSAIO DE ESPALHAMENTO (MESA DE CONSISTÊNCIA)

Esse método é normatizado pela ABNT NBR 13276:2002, e para a sua execução é necessário a seguinte aparelhagem:

- Balança digital (resolução de 0,01 g);
- Trena;
- Mesa padronizada pela NBR 7215/1996;
- Molde tronco cônico;
- Soquete metálico.

A primeira etapa para a execução deste ensaio é limpar a mesa padronizada e a parede do molde, observando que essas devem ficar ligeiramente úmidas para que esses não puxem a água da mistura. Em seguida, inicia-se a preparação da argamassa, a qual foi realizada conforme traço definido nesse estudo.

O preenchimento do tronco de cone com a argamassa é feito imediatamente após sua preparação, sendo esse realizado em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Para uma melhor distribuição no molde, aplica-se na primeira, segunda e terceira camada, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete. Por fim, executa-se o rasadura da argamassa.

Para a execução o ensaio, é retirado o molde e acionada a manivela da mesa, de forma que essa caia 30 vezes em um período de 30 segundos. Posteriormente, com uma trena, é feita a medição de três diâmetros do espalhamento da argamassa sendo a média desses diâmetros o índice de consistência expresso em milímetros. Deve-se destacar que para cada mistura de argamassa produzida, realizou-se uma única vez o ensaio.

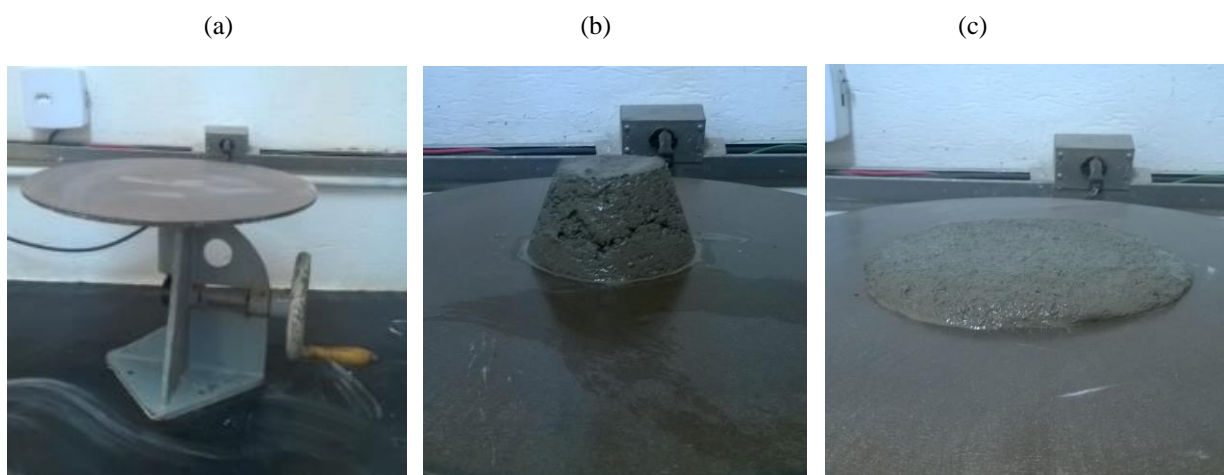


Figura 3.8: Etapas e equipamentos do ensaio da mesa de consistência - (a) Mesa de consistência (b) Argamassa de referência após a retirada do tronco de cone; (c) E da argamassa de referência

3.2.2 ENSAIO DA PENETRAÇÃO DO CONE

O ensaio da penetração de cone foi realizado conforme a ASTM C780:2014 e para tanto, os equipamentos utilizados foram: dois recipientes cilíndricos, uma balança, espátula metálica, e o cone metálico.

Inicialmente, os recipientes cilíndricos, previamente pesados, são preenchidos com argamassa em três camadas com alturas aproximadamente iguais, sobre as quais é aplicado 20 golpes com uma espátula, sendo esses distribuídos uniformemente, com o objetivo de adensá-las.

Posteriormente, realiza-se a rasadura da superfície com a espátula, e em seguida é pesado o conjunto recipiente/argamassa. Para a determinação da penetração, posiciona-se o cone rente à superfície da argamassa e ajusta-se a régua de modo que essa altura será a leitura inicial. Por fim, o cone é liberado e realiza-se leitura final, sendo o índice de consistência a diferença entre a leitura inicial e a final, sendo ela dada em milímetros.

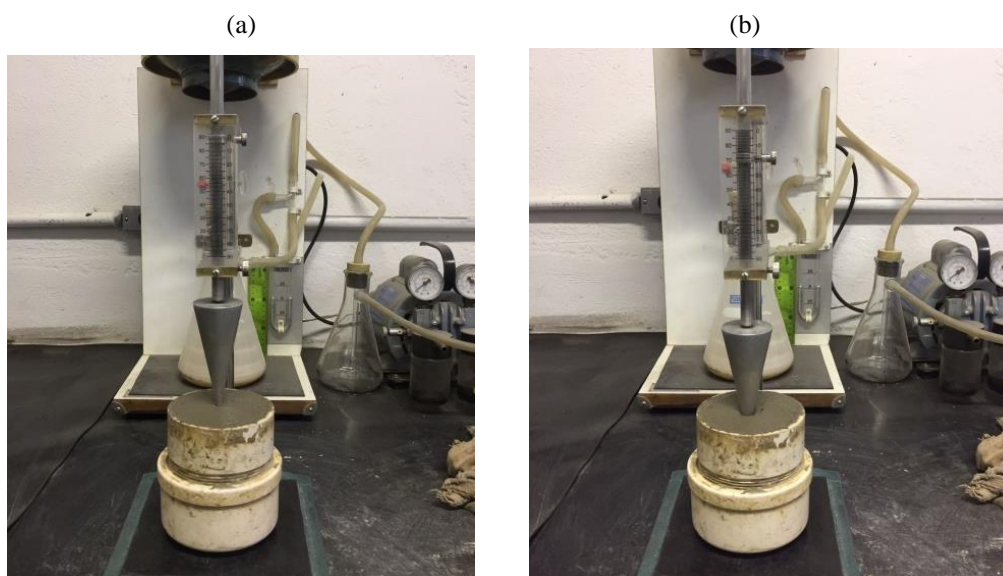


Figura 3.9: Etapas do ensaio de penetração do cone –
(a) Cone posicionado rente à argamassa; (b) Cone após liberado.

3.2.3 AJUSTE DO TRAÇO

Uma vez que a trabalhabilidade é a propriedade que foi fixada como referência para esse estudo, adotou-se como base a da argamassa produzida com a areia de Corumbá e com o traço da NBR 7215/1996. Por conseguinte, foi preparada a argamassa conforme descrito nas etapas anteriores, e obtido uma trabalhabilidade de 220 mm.

A condição fixa de 220 mm para a trabalhabilidade significa que a argamassa de referência com os agregados desse estudo (areia rosa, areia mix e pó de brita) deverá apresentar uma trabalhabilidade próxima a esse fixado, de modo que somente após a obtenção de uma mistura com essas características é que será realizado a variação com os diferentes teores de fibra.

Desta forma, inicialmente preparou-se a argamassa com o traço da norma e obteve-se 167 mm de trabalhabilidade, Figura 3.10. Ao se verificar que o valor é inferior ao de referência, foi necessário ajustar o traço, e para isso optou-se por adicionar uma maior quantidade de água à mistura. Assim, foi preparada uma nova argamassa com adição de 40 gramas de água, o que permitiu a obtenção de uma trabalhabilidade igual a 213 mm, valor considerado adequado pela proximidade com o fixado, conforme Figura 3.10.

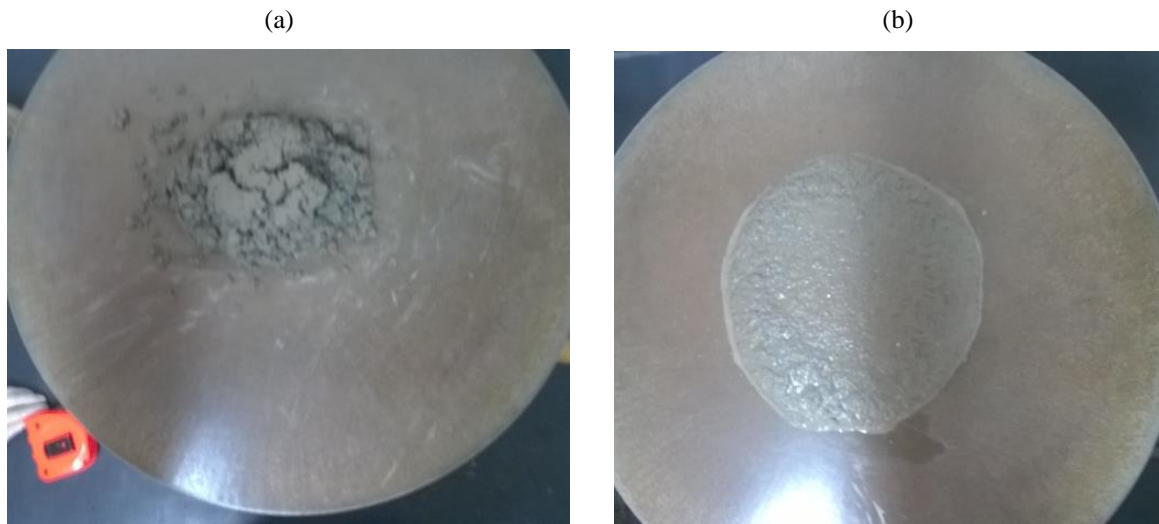


Figura 3.10: Ajuste do traço - (a) Argamassa com o traço da NBR 7215/1996;
(b) Argamassa de com o ajuste de água

Por conseguinte, o novo traço para a argamassa com os agregados desse estudo e, apresentados na Tabela 3.3, possui 40 gramas adicionais de água, totalizando 340 gramas. Ademais, determinou-se que esse acréscimo será sempre colocado no início, junto com a quantidade de referência da norma.

Tabela 3.3: Traço da argamassa conforme a NBR 7215/96 e após ajuste do teor de água e de fibras.

Material	NBR 7215/96 (g)	Referência (g)	0,5% de fibras (g)	1,0% de fibras (g)	1,5% fibras (g)
Cimento	624,00	624,00	624,00	624,00	624,00
Areia Rosa	468,00	468,00	465,66	463,32	460,98
Pó de Brita	468,00	468,00	465,66	463,32	460,98
Areia Mix	936,00	936,00	931,32	926,64	921,96
Água	300,00	340,00	340,00	340,00	340,00
Fibra Kraft	0,00	0,00	5,21	10,42	15,63

3.3 ETAPA III: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O compósito ensaiado trata-se de um material sem muitas referências bibliográficas e, por conseguinte adotou-se como parâmetro para a avaliação das suas características mecânicas a ABNT NBR 13279:2015, norma referente à resistência à tração na flexão e à compressão para argamassas.

Adicionalmente, a metodologia utilizada para o preparo das argamassas foi o da ABNT NBR 7215:1996 e, cujos procedimentos foram descritos no item 3.1.5 deste trabalho, referente à caracterização do cimento. No caso das argamassas com substituição em volume de fibras de papel kraft, esse material foi adicionado durante os 30 segundos que a norma reserva no preparo da mistura para a adição dos agregados, sendo a fibra acrescida imediatamente após toda a colocação das frações de areia.

3.3.1 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram moldados de acordo com a norma de referencia, sendo esses prismáticos e com as dimensões de 4x4x16cm. Foram moldados um total de 3 corpos de prova com a areia normal para serem ensaiados aos 28 dias. Por outro lado, com as areias desse trabalho, observa-se a quantidade de 3 para cada traço e para cada uma das idades de 7 e 28 dias, além de outros 3 para a realização do ensaio de absorção. Por conseguinte, nesse último caso, foram moldados um total de 36 corpos de prova, sendo 9 de referência e 27 com adição em volume de fibras de papel kraft, conforme apresentado na Figura 3.11.

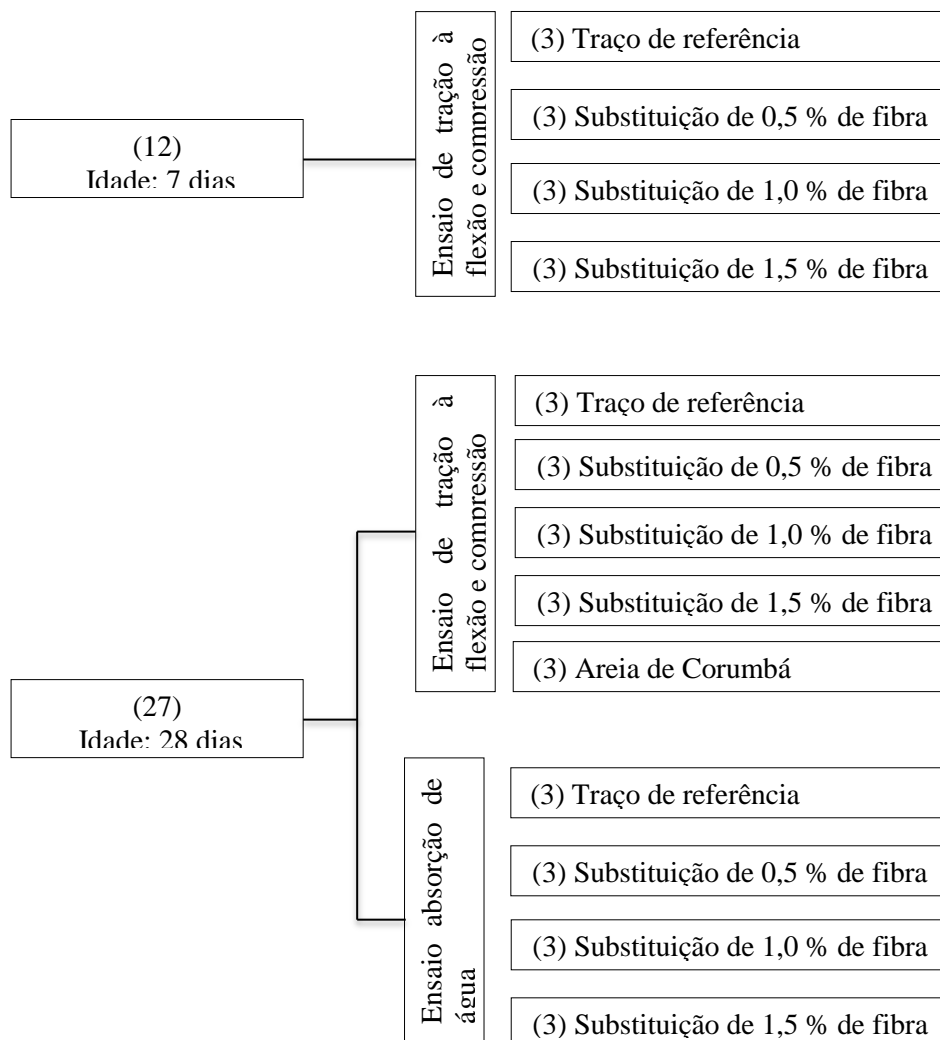


Figura 3.11: Esquema dos corpos de prova a serem ensaiados

A aparelhagem utilizada, desde a moldagem dos corpos de prova até o ensaio de resistência à flexão, foram:

- Prensa hidráulica com capacidade para 5000 KN
- Paquímetro digital;
- Molde prismático metálico;
- Cronômetro;
- Misturador mecânico;
- Balança digital (resolução de 0,01 g);
- Nivelador do molde prismático.

Imediatamente após o amassamento foram realizados os ensaios para determinação da trabalhabilidade e de penetração de cone, e somente em seguida foram preenchidos os moldes, nos quais foram previamente aplicadas uma camada de desmoldante nas faces internas. A argamassa é colocada em duas camadas aproximadamente iguais, a qual é espalhada nos moldes com o auxílio do nivelador. Para um bom adensamento, a norma especifica que após cada camada deve-se aplicar 30 quedas através da mesa de adensamento padronizada.

Por fim, com uma espátula é feito a rasadura do topo dos corpos de prova, sendo que cada amassamento realizado com o misturador mecânico possibilita o preparo de 3 corpos de prova prismáticos, sendo assim necessário o preparo de 3 misturas por traço.

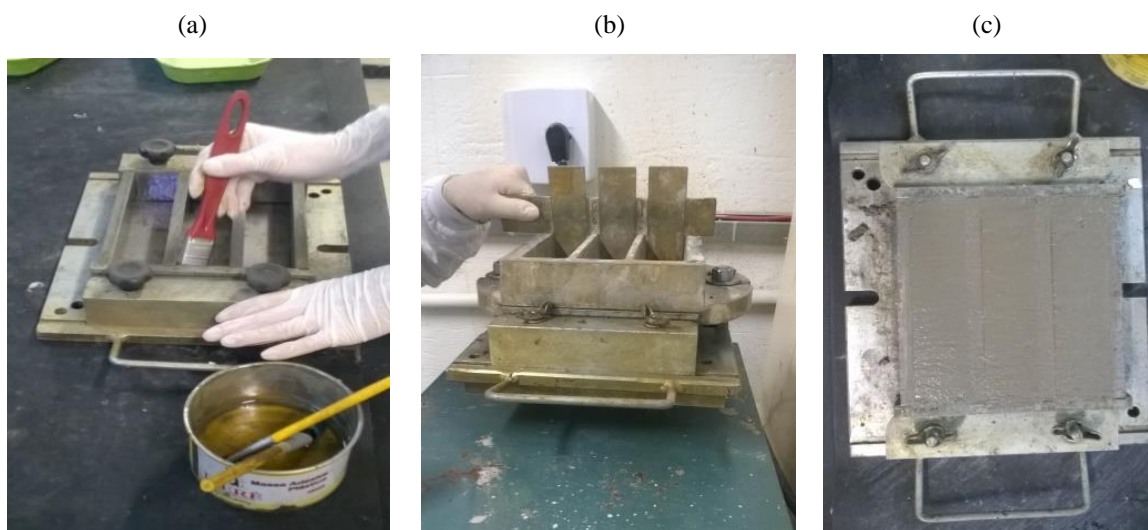


Figura 3.12: Etapas e aparelhagem da moldagem dos corpos de prova -
(a) Preparação do molde; (b) Nivelamento da camada; (c) Molde após a rasadura.

Para a cura, os corpos de prova devem permanecer nos moldes por um período de 48 horas, devendo ser conservados em ambiente com temperatura aproximada de 23°C e umidade relativa do ar de 60%, conforme especificações da ABNT NBR 13279:2005. Desta forma, para manter o ambiente controlado, os moldes foram colocados em sacolas plásticas devidamente fechadas. Após o tempo de cura e de serem desmoldados, os primas foram envoltos em papel filme e guardados no LEM/UnB até o dia da ruptura.

3.3.2 EXECUÇÃO DO ENSAIO

Antes da execução do ensaio, retirou-se o papel filme dos corpos de prova e, com o auxílio de um paquímetro mediu-se suas dimensões. Posteriormente, esses elementos foram pesados e marcou-se, com uma régua, o seu centro de modo a melhor posicioná-los na prensa.

O ensaio de resistência à tração foi realizado com uma prensa hidráulica com capacidade para 5000 KN, sendo o corpo de prova posicionado no equipamento, de modo que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de carga ou de apoio, conforme apresentado na Figura 3.13. A carga é aplicada aos poucos, aumentando-a até a ruptura do corpo de prova, sendo a resistência à tração na flexão calculada conforme a equação (3.5).

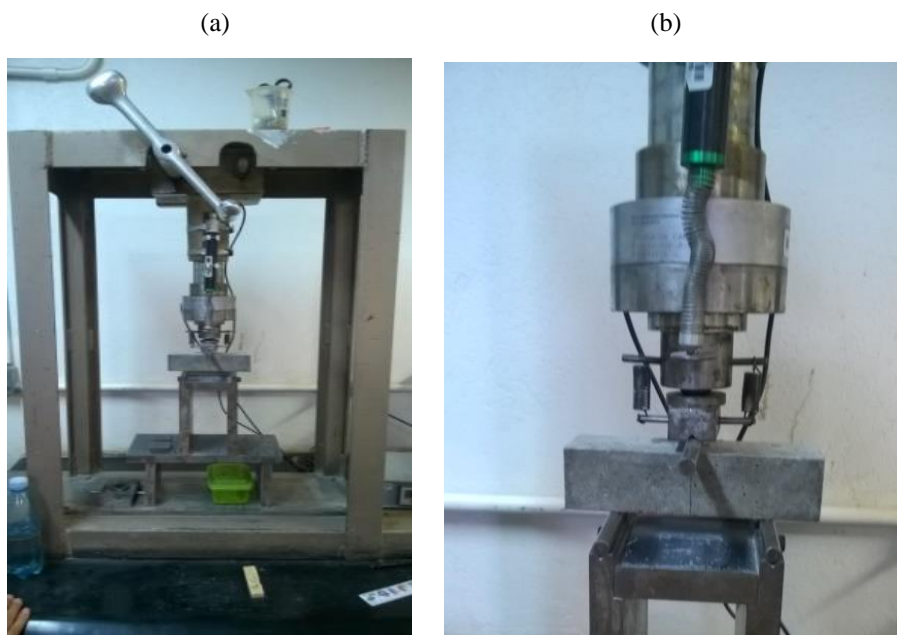


Figura 3.13: Etapas e aparelhagem do ensaio de resistência à tração -
(a) Dispositivo para ensaio; (b) Posicionamento do corpo de prova.

$$R_t = \frac{1,5 * F_1 * L}{40^3} \quad (3.5)$$

Onde R_t é a resistência à tração na flexão expressa em megapascals, F_t é a carga em newtons aplicada verticalmente no prisma, e L a distância em milímetros entre os suportes.

3.4 ETAPA IV: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O presente ensaio também foi executado conforme a ABNT NBR 13279:2015, e é realizado utilizando as metades dos corpos de prova ensaiados na resistência à tração na flexão, conforme a Figura 3.14.

Neste ensaio foi necessário o uso de um equipamento diferente do empregado no ensaio de resistência à tração, porque nesse caso era necessária uma prensa com maior capacidade de carga, sendo essa prensa de 100 toneladas, a mesma utilizado no ensaio de resistência à compressão do cimento.

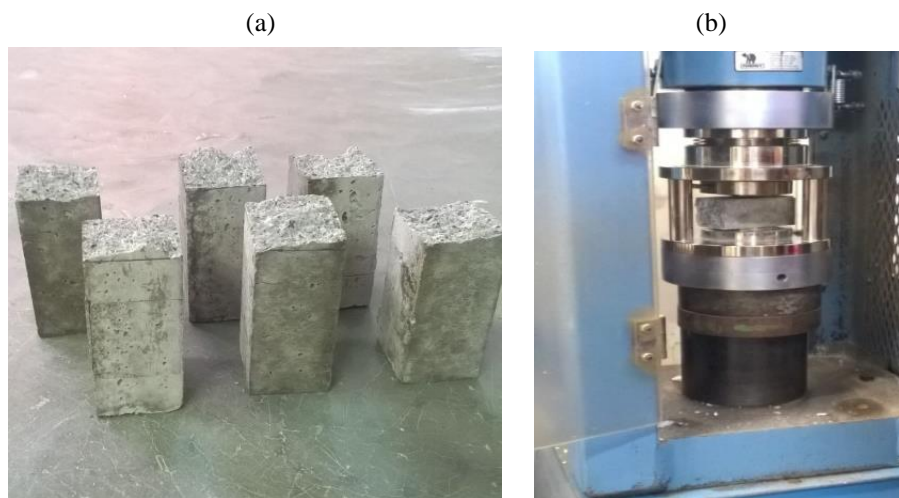


Figura 3.14: Etapas e materiais do ensaio de resistência à compressão axial –
(a) Metades do corpo de prova ensaiados na resistência à tração; (b) Ensaio de compressão axial

Por fim, aplica-se a carga lentamente até a ruptura dos corpos de prova, e a resistência à compressão axial é obtida pela equação (3.6).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.6)$$

Na qual R_c é a resistência à compressão expressa em megapascals, e F_c a carga em newtons no momento da ruptura.

3.5 ETAPA V: ABSORÇÃO DE ÁGUA

Nesta etapa será determinada a absorção de água por capilaridade e por imersão, sendo a aparelhagem utilizada:

- Estufa;
- Balança hidrostática;
- Balança digital (resolução de 0,01 g);
- Cronômetro;
- Recipiente de vidro com régua;
- Recipiente para imersão.

3.5.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio foi executado conforme a ABNT NBR 15259:2005, sendo o corpo de prova ensaiado com idade de 28 dias. Para o preparo desses, eles foram lixados, pesados, e colocados em estufa por um período de 72 horas antes da realização do mesmo.

Os primas a serem ensaiados são colocados dentro do recipiente de vidro, Figura 3.15, e posicionados sobre suportes de vidro e, de modo a permitir um maior contato entre a face

inferior e a água. Além disso, o nível d'água deve permanecer constantemente a 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água.

A norma de referência determina que as leituras sejam realizadas aos 10 minutos e 90 minutos após o contato com a água, mas com o objetivo de se obter resultados mais precisos, foram executadas leituras aos 10, 30, 60 e 90 minutos. Por conseguinte, para essas leituras, os corpos de prova são retirados do recipiente e, secos com pano úmido de maneira superficial, para em seguida ser determinado sua massa.

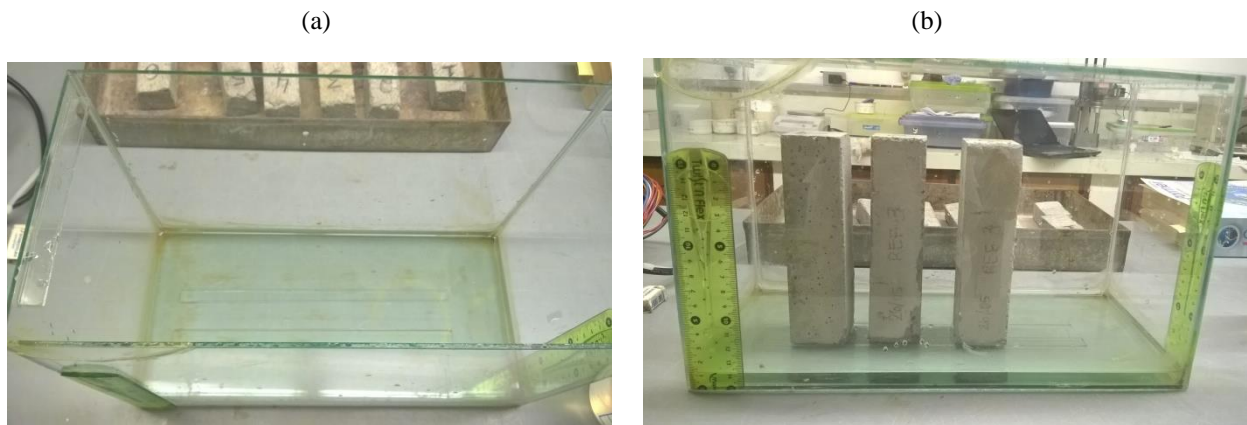


Figura 3.15: Etapas do ensaio absorção por capilaridade –
(a) Recipiente de vidro com os suportes; (b) Corpos de prova dentro do recipiente.

Por fim, o coeficiente de capilaridade (C) corresponde ao coeficiente angular da reta que relaciona a massa do corpo de prova em função do tempo da leitura, sendo adotada no eixo das abscissas a raiz quadrada dos tempos em minuto e no eixo das ordenadas as absorções de água correspondentes a cada intervalo. Além disso, esse parâmetro também pode ser estimado pela equação (3.7), e a absorção de água por capilaridade (At) é dada pela equação (3.8).

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (3.7)$$

$$At = \frac{Mt - Mo}{16} \quad (3.8)$$

Onde m_{10} é a massa aos 10min, m_{90} a massa aos 90min, Mo a massa inicial, Mt a massa do prisma em cada tempo, e 16 é a área do corpo de prova em contato com a água.

3.5.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

De acordo com a ABNT NBR 9778:2009, a absorção de água por imersão é o acréscimo de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros, ou seja, é o processo pelo qual a água ocupa os poros permeáveis.

Para a execução desse ensaio, o corpo de prova é inicialmente deixado em estufa nas 72 horas precedentes ao ensaio, sendo determinado a sua massa após esse período. Em seguida, ele deve resfriar em um ambiente seco e com uma temperatura de aproximadamente 23°C, sendo em seguida determinado a sua massa.

A amostra deve ficar imersa em água à temperatura de 23°C durante 72 horas, sendo determinada a sua massa após 24, 48 e 72 horas submerso, e para isso os corpos de prova são retirados do recipiente e secos superficialmente com um papel absorvente. Após a saturação, obtêm-se a massa da amostra saturada imersa em água com o auxílio de uma balança hidrostática.



Figura 3.16: Etapas do ensaio absorção por imersão – (a) Amostras submersas; (b) Balança hidrostática

Por fim, a absorção de água por imersão (A) é dada pela equação (3.9), enquanto o índice de vazios (I_v) pela equação (3.10)

$$A = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.9)$$

$$Iv = \frac{Msat - Ms}{Msat - Mi} * 100 \quad (3.10)$$

Onde Msat é a massa do corpo de prova saturado, Ms a massa seca, e Mi a massa saturado quando o corpo de prova está imerso em água.

O presente ensaio também permite obter a massa específica da amostra seca (ρ_s), saturada (ρ_{sat}), e real (ρ_r), calculadas, respectivamente, pelas equação (3.11), equação (3.12) e equação (3.13).

$$\rho_s = \frac{Ms}{Msat - Mi} \quad (3.11)$$

$$\rho_{sat} = \frac{Msat}{Msat - Mi} \quad (3.12)$$

$$\rho_r = \frac{Ms}{Ms - Mi} \quad (3.13)$$

Por fim, a massa específica da amostra seca e a massa específica real correspondem a relação entre a massa do material seco e o seu volume, sendo que o primeiro considera os poros permeáveis e impermeáveis, enquanto o segundo exclui os poros permeáveis. Por outro lado, a massa específica da amostra saturada relaciona a massa saturada e o volume total, incluindo ambos os tipos de poros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios expostos anteriormente, sendo dividido conforme as etapas da metodologia.

4.1 ETAPA I: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 AGREGADOS

Na composição do traço foram utilizadas a areia mix, areia rosa e pó de brita, sendo os resultados da caracterização desses apresentados na Tabela 4.1. Ademais, os dados detalhados do ensaio de granulometria e da determinação da massa específica são apresentados nos Apêndices A e B, respectivamente.

Tabela 4.1: Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Agregado	Módulo de finura (%)	Dimensão máxima característica (mm)	Materiais pulverulentos (%)	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (Kg/m³)
Areia rosa	1,16	2,36	2,82	2,646	810
Pó de brita	3,24	4,75	7,11	2,714	1110
Areia mix	3,04	2,40	4,72	2,710	1070

Por meio desse, é possível verificar que os agregados utilizados nesse estudo são classificados, de acordo com a NBR 7211:2009, como agregados miúdos, uma vez que suas partículas passam na peneira com abertura de 4,75 mm e ficam retidos na com abertura de 150 µm.

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria são válidos, uma vez que eles estão dentro dos preceitos estabelecidos pela NBR NM 248, aos quais determina que a soma das massas retidas individualmente nas peneiras não deve diferir mais de 0,3% da massa ensaiada, e que a diferença entre as porcentagens retidas nas duas amostras e para cada abertura deve ser igual ou menor que 4%. Assim, a curva granulométrica de cada agregado é apresentada na Figura 4.1.

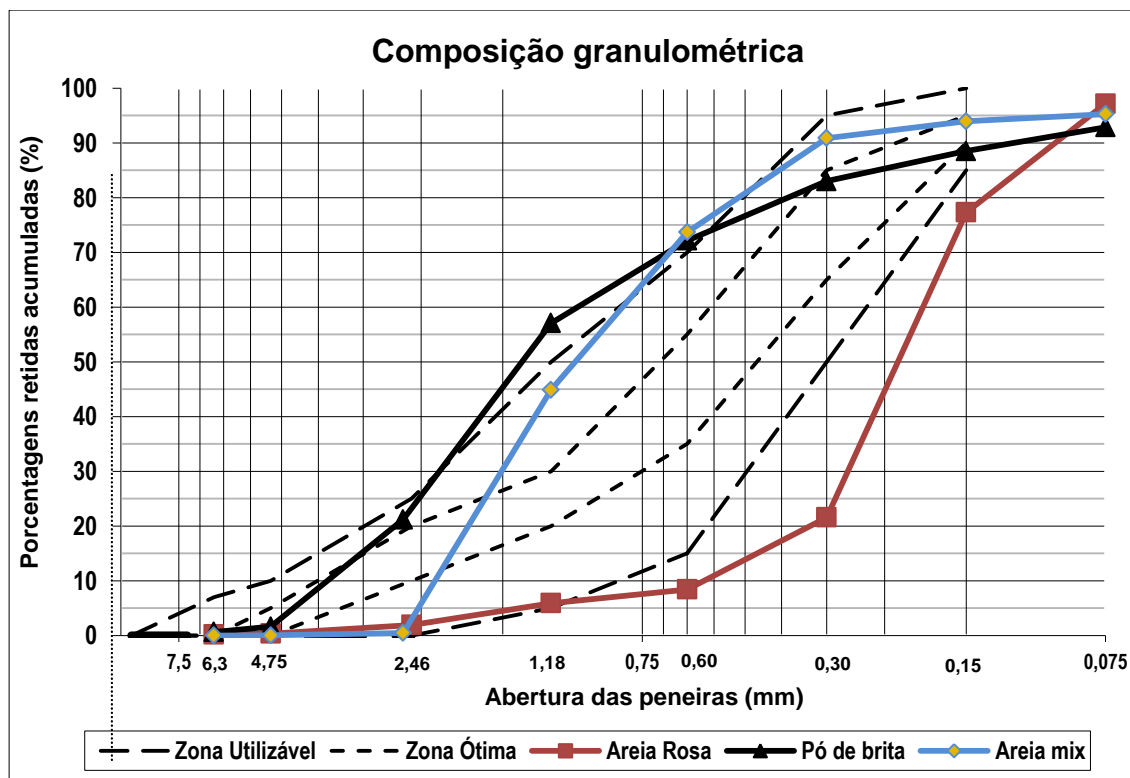


Figura 4.1: Curva granulométrica dos agregados

Na Figura 4.1, as curvas correspondentes à zona utilizável e zona ótima são as estabelecidas pela NBR 7211:2005, e representam os limites da distribuição granulométrica que o agregado miúdo deve apresentar para sua utilização em concretos, conforme os dados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (ABNT NBR 7211:2005)

Peneira com abertura de malha (mm)	Porcentagem retida acumulada em massa			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,60	15	35	55	70
0,30	50	65	85	95
0,150	85	90	95	100

Por mais que essa norma se refira aos agregados para concreto, optou-se por utilizar os limites como meio de referência. Assim, verifica-se que partes das curvas granulométricas dos agregados utilizados nesse estudo estão fora da zona de utilização, sendo que a curva da areia rosa apresenta-se abaixo do limite inferior, e a do pó de brita acima da zona utilizável superior. Em relação a areia mix, é possível observar que ela está praticamente dentro da zona de utilização, o que está de acordo com o esperado, uma vez que essa é uma composição de areia rosa, pó de brita, e outros materiais.

No tocante à uniformidade da curva, obteve-se o grau de continuidade por meio do método de Allen-Hazem, e os resultados são os indicados na Tabela 4.4. Ademais, a classificação da continuidade das areias é realizada conforme Caputo (1988), e de acordo com a Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Classificação das areias com base no grau de continuidade de Allen-Hazem.

Grau de continuidade (C)	Classificação segundo Caputo (1988)	
$C < 5$	curvas muito uniformes	areia sem continuidade
$5 < C < 15$	curva de uniformidade média	areia de continuidade média
$C > 15$	Curvas desuniformes	areia de boa continuidade

Tabela 4.4: Classificação dos agregados ensaiados com base no grau de continuidade de Allen-Hazem.

Agregado	Grau de continuidade	Classificação segundo Caputo (1988)
Areia rosa	2,50	curvas muito uniformes
Pó de brita	13,69	curva de uniformidade média
Areia mix	4,13	curvas muito uniformes

Desta forma, os resultados obtidos indicam que os agregados, principalmente a areia rosa e areia mix, possuem uma quantidade relativamente grande de grãos com dimensões concentradas em uma determinada faixa granulométrica, o que indica que são agregados com granulometria uniforme e sem continuidade. Por conseguinte, materiais com curvas uniformes irão compor uma argamassa com maiores índices de vazios, maior consumo de água e menor trabalhabilidade.

Com base nas análises do grau de continuidade e das curvas granulométricas dos agregados, e tendo como referência as zonas de utilização, observa-se que para ajustar a curva granulométrica dos agregados dentro desses limites e para obter um melhor grau de continuidade, é necessária uma composição desses materiais.

4.1.2 CIMENTO PORTLAND

As Tabela 4.5 e Tabela 4.6 expõem os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão do cimento Portland CP V – ARI RS, e os dados das resistências individuais dos corpos de prova estão dispostos no Apêndice C. Foram realizados dois ensaios, pois com o primeiro não foi possível obter as exigências mínimas normativas para a resistência à compressão do cimento utilizado.

Tabela 4.5: Comparação dos resultados obtidos com os valores exigidos pela norma de caracterização do CP V – Primeiro ensaio

Idade (dias)	Resultado obtido (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Valores normativos (MPa)
1	22,41	4,5	14,00
3	29,56	2,5	24,00
7	27,74	19,5	34,00

Tabela 4.6: Comparação dos resultados obtidos com os valores exigidos pela norma de caracterização do CP V – Segundo ensaio

Idade (dias)	Resultado obtido (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Valores normativos (MPa)
1	20,62	4,4	14,00
3	25,58	2,9	24,00
7	29,37	3,4	34,00

Observa-se que os valores encontrados, em ambos os ensaios, para as idades de 1 e 3 dias estão acima dos exigidos pela ABNT NBR 5733:1991, norma referente à caracterização do cimento Portland de alta resistência inicial. Por outro lado, para a idade de 7 dias apresenta uma resistência à compressão inferior ao normativo. Ademais, uma justificativa para essa diferença é a possibilidade do cimento estar hidratado, uma vez que ele é comprado a granel e foi obtido diretamente da empresa de fabricação de blocos.

Por fim, a ocorrência de um dos resultados da resistência à compressão do cimento inferior ao exigido não invalida esse estudo, pois o objetivo deste é a avaliação da influência dos diferentes teores de fibras na argamassa. Além disso, todos os corpos de prova foram moldados com esse aglomerante, sendo assim ele não é uma das variáveis e, por conseguinte, ele não irá interferir nas análises deste trabalho.

4.2 ETAPA II: TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade de uma argamassa irá influenciar na maior ou menor facilidade da sua mistura, transporte e utilização, sendo assim é uma importante propriedade do estado fresco. Um dos métodos de quantificar essa característica é por meio do índice de consistência.

Neste trabalho esse parâmetro foi obtido pelos métodos da mesa de consistência e de penetração de cone. Uma vez que foi necessária a execução de três amassamentos de argamassa para cada traço, foram executados esses dois ensaios para cada mistura, sendo os resultados individuais apresentados no Apêndice D, e na Tabela 4.7 são apresentadas a média desses parâmetros.

Tabela 4.7: Índice de consistência pelo método da mesa de consistência e penetração de cone.

Método	Referência (mm)	0,5% fibras (mm)	1,0% fibras (mm)	1,5% fibras (mm)
Penetração de cone	21	10	3	1
Mesa de consistência	220	177	146	132

A partir dos resultados acima, observa-se uma redução no índice de consistência ao se adicionar as fibras de papel kraft, ou seja, uma diminuição na fluidez. Por conseguinte, pode-se afirmar que a trabalhabilidade das argamassas diminui à medida que o teor de fibra adicionado aumenta, sendo que esse resultado está de acordo com o encontrado por Carvalho *et al.*(2014) e Peruzzi (2002).

Observa-se que no estado fresco a mistura com adição de fibras possui uma aparência mais seca, conforme a Figura 4.2, sendo esse fato justificado pela característica da fibra de absorver parte da água do traço durante o processo de mistura, reduzindo assim o índice de consistência.

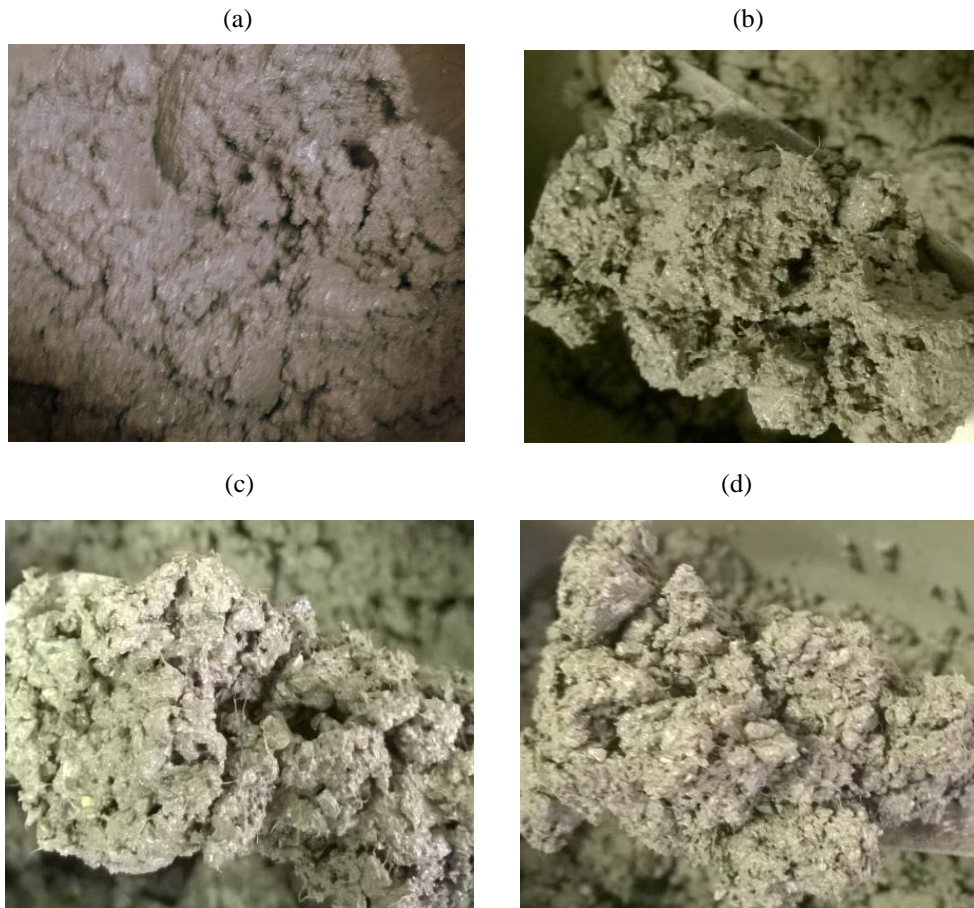


Figura 4.2: Aspecto da argamassa – (a) Referência; (b) 0,5% de fibras; (c) 1,0% de fibras; (d) 1,5% de fibras.

Outro fenômeno que interfere nessa propriedade é a coesão, e de acordo com Carvalho e Santos (2011) a presença de fibra confere maior coesão à mistura, ou seja, propicia maiores forças físicas de atração entre a pasta e as fibras, dificultando o seu espalhamento. Uma consequência da redução dessa característica pôde ser observada no adensamento dos corpos de prova, uma vez que quanto menor a trabalhabilidade pior foi o adensamento, o que propiciou amostras mais porosas (Figura 4.3), que por sua vez afeta características como a resistência e a absorção de água.

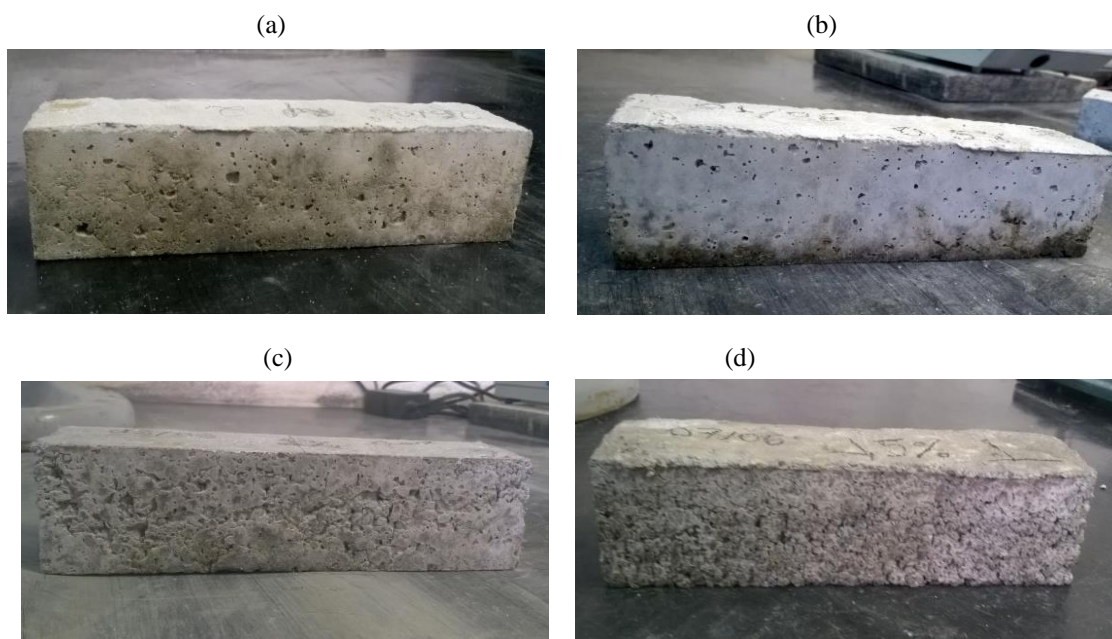


Figura 4.3: Aspecto do corpo de prova para os diferentes traços – (a) Referência; (b) 0,5% de fibras; (c) 1,0% de fibras; (d) 1,5% de fibras.

Por fim, pode-se recuperar esse prejuízo na trabalhabilidade ajustando o teor de água ou com a adição de aditivos plastificantes. Todavia, um aumento na quantidade de água reduz a resistência, sendo esse fato verificado ao comparar duas misturas cuja única variável é o teor de água: uma argamassa executada com os agregados desse estudo e com o traço da ABNT NBR 7215:1996 e, outra com o mesmo traço e com adição de 40g de água, conforme o ajuste realizado na Etapa II do programa experimental. Desta forma, os resultados são os indicados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Índice de consistência, resistência à tração na flexão, e resistência à compressão para argamassa com e sem ajuste de água.

Traço	Flow table (mm)	Penetração de cone (mm)	Resistência à tração na flexão (Mpa)	Resistência à compressão (Mpa)
Traço sem adição de água	170	3	9,1	58,1
Traço com adição de água	220	21	8,3	52,6

Verifica-se uma melhora da trabalhabilidade ao adicionar na argamassa 40g de água. Todavia, houve uma redução de 8,8% da resistência à tração na flexão e de 9,5% da resistência à compressão. Além disso, os corpos de prova ensaiados foram os com 28 dias de idade.

4.3 ETAPA III: RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

No que se refere à resistência à tração na flexão, os resultados médios encontrados estão expostos na Tabela 4.9, e os valores individuais no Apêndice E.

Tabela 4.9: Resistência média à tração na flexão para as idades de 7 e 28 dias.

Traço	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à tração na flexão (Mpa)	Desvio padrão (MPa)
Referência	6,6	0,1	8,3	0,2
0,5% fibras	8,2	0,2	8,4	0,2
1,0% fibras	6,4	0,2	7,0	0,3
1,5% fibras	5,6	0,2	6,6	0,1

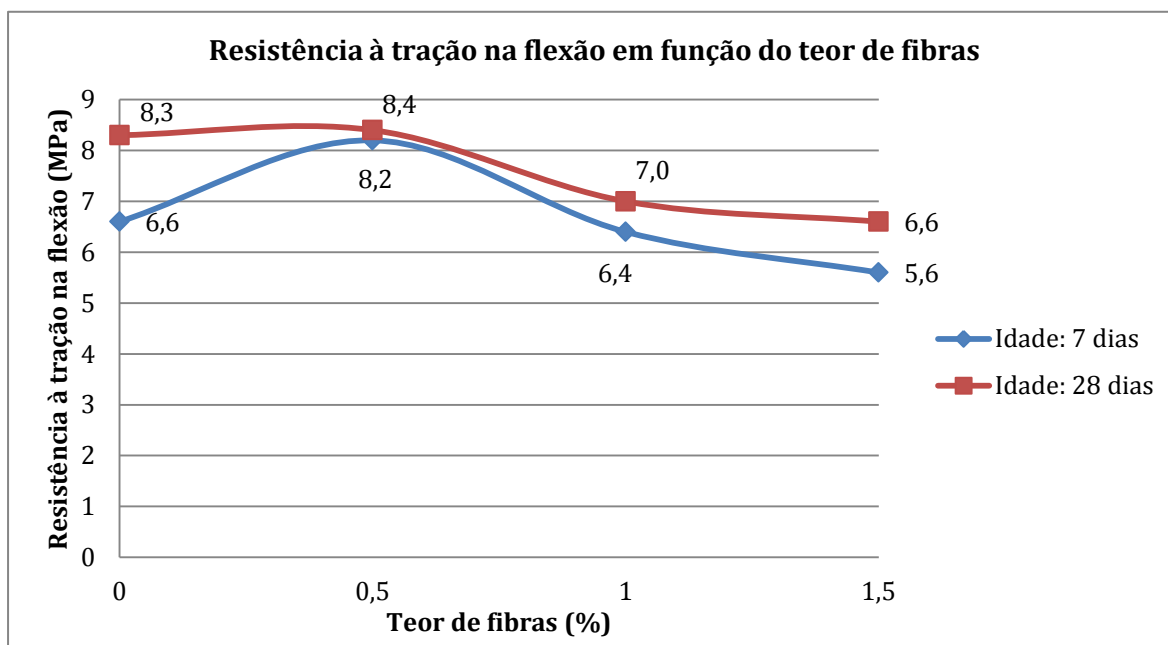


Figura 4.4: Resistência à tração na flexão em função do teor de fibras

Tendo como referência os dados acima e a Figura 4.4 é possível observar que as argamassas com adição de 1,0% de fibras apresentaram valores de resistência à tração na flexão próximos aos resultados do traço de referência para a idade de 7 dias, enquanto para 28 dias houve uma redução significativa.

Por outro lado, aos 7 dias e 28 dias de idade, a argamassa com 0,5% de fibras apresentou valores ligeiramente superiores ao de referência. Isso se deve ao fato da fibra apresentar uma considerável resistência à tração e, por esse teor ser pequeno, não houve uma grande porosidade, o que reduziria a resistência mecânica.

Além disso, o resultado encontrado corrobora com outros estudos, por exemplo, o relatório do *American Concrete Institute*, o ACI 544.1-96, o qual indica que a utilização de alguns teores de polpa kraft pode melhorar a resistência à tração.

No tocante à argamassa com 1,5% de fibras, que apresentou resultados de resistência inferiores, isso é justificado pela maior porosidade que essa apresenta em relação aos demais teores. Posto que as fibras conferem uma maior incorporação de ar durante a mistura, obteve-se como resultado um maior número de vazios (MARTINS e SOARES, 2016).

4.4 ETAPA IV: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados das resistências médias à compressão, para os diferentes traços ensaiados, são indicados na Tabela 4.10, enquanto os de cada corpo de prova são apresentados no Apêndice E juntamente com as dimensões dos mesmos.

Tabela 4.10: Resistência média à compressão para as idades de 7 e 28 dias.

Traço	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à compressão (Mpa)	Desvio padrão (MPa)
Referência	41,3	0,67	52,6	0,77
0,5% fibras	40,1	2,41	44,5	2,21
1,0% fibras	31,1	1,6	41,8	2,98
1,5% fibras	25,4	1,76	32,5	0,51

Em relação a resistência à compressão, verifica-se na Figura 4.5 que há uma redução deste parâmetro a medida que o teor de fibras aumenta. Os resultados são justificados pelo baixo desempenho à compressão da fibra e pela porosidade das argamassas.

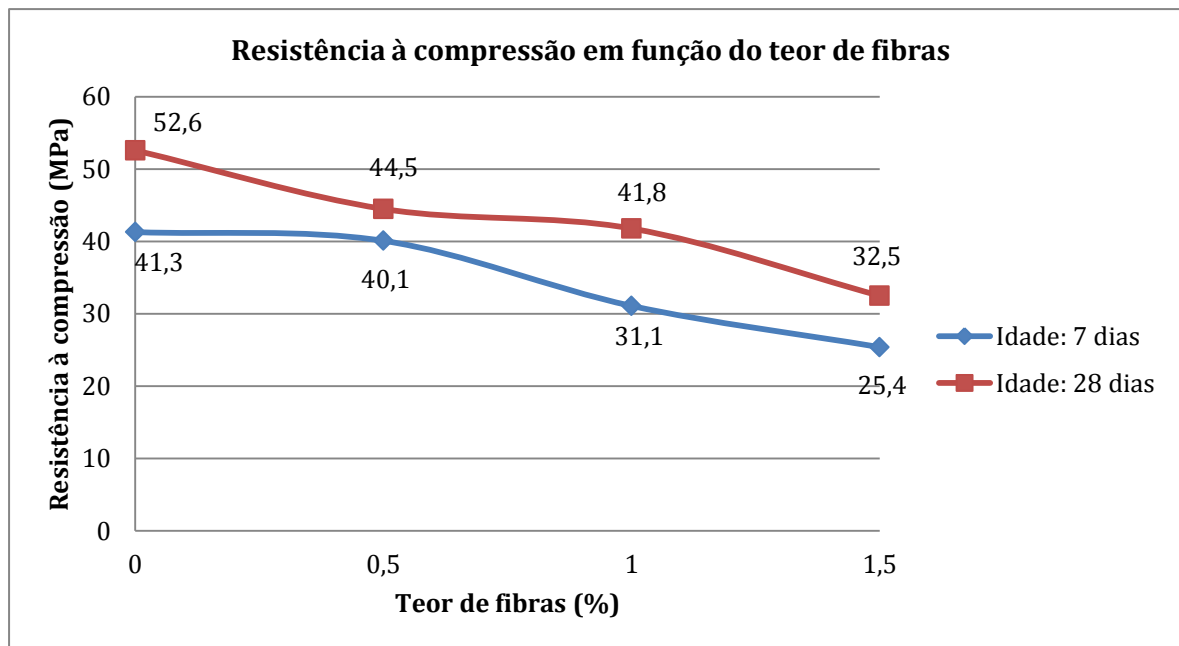


Figura 4.5: Resistência à compressão em função do teor de fibras

Martins e Soares (2016) explica que essa maior quantidade de vazios são em decorrência do aumento, no estado fresco, do teor de ar incorporado em argamassas com fibras, e também da evaporação de parte água do amassamento no estado endurecido. Ademais, verifica-se que na moldagem dos corpos de prova, quanto maior o teor de fibras pior foi o adensamento, fato que auxiliou no aumento da porosidade.

Outra justificativa para a redução do desempenho à compressão é a dispersão das fibras, pois durante o preparo das argamassas, quanto maior a quantidade de fibras adicionadas, mais difícil foi a dispersão dessas. Esse fato é observado nos corpos de prova ensaiados para a resistência à compressão, Figura 4.6, na qual é possível observar maiores regiões de concentração de fibras, como as indicadas pela setas.

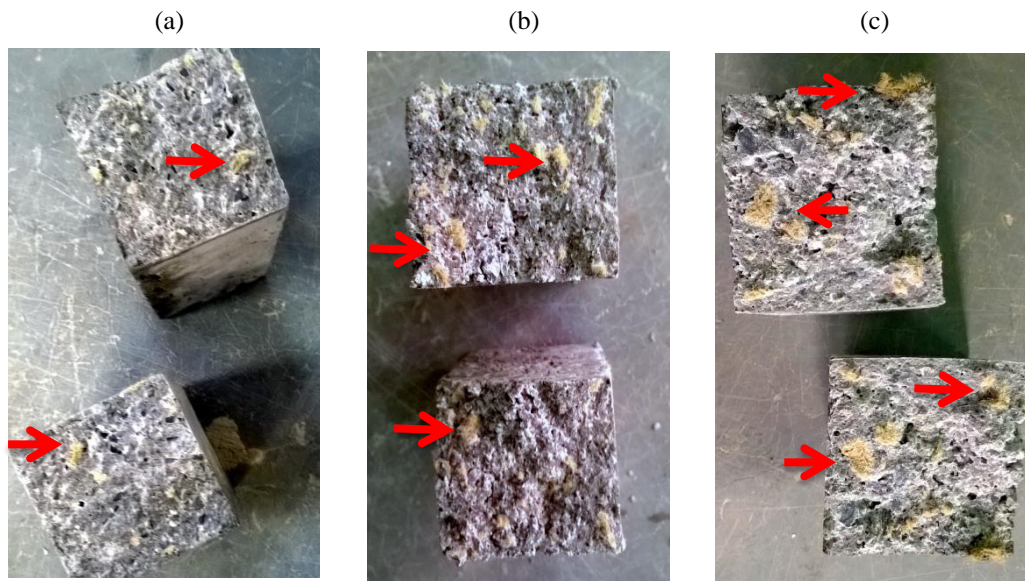


Figura 4.6: Dispersão das fibras nos corpos de prova - (a) 0,5% de fibras; (b) 1,0% de fibras; (c) 1,5% de fibras.

Desta forma, os locais de concentração de fibras apresentam menor resistência mecânica em comparação às demais seções. Isso está relacionado à presença de lignina nas fibras vegetais, pois essa interfere na ligação entre a fibra e a matriz cimentícia, conforme indicado no estudo realizado por Blankenhorn *et al.* (1999).

Por fim, observa-se que o desvio padrão para a resistência à compressão e, para todos os traços e idades, estão acima do determinado em norma. Esse fato pode ser justificado, pois o equipamento de ensaio é manual, sendo necessário que o operador controle a velocidade de aplicação da carga. Além disso, a norma foi desenvolvida para argamassas sem adição de fibras, e a presença dessas altera as características dos corpos de prova, o que pode levar a maiores desvios, visto que a dispersão dessas ocorre não se dá de maneira uniforme.

4.5 ETAPA V: ABSORÇÃO DE ÁGUA

4.5.1 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

O coeficiente de capilaridade foi obtido por meio de duas metodologias, sendo uma com a equação (3.7), e a segunda determinando-se o coeficiente angular diretamente nos gráficos da Figura 4.7, que corresponde à relação da absorção de água em função da raiz quadrada do tempo. Por conseguinte, o coeficiente angular foi determinado através de uma regressão linear realizada com auxílio do *software* Microsoft Excel, sendo com essa obtida a equação da reta para as curvas e, por sua vez o coeficiente angular.

Ademais, a absorção de água por capilaridade média, para cada tempo, e o coeficiente médio de capilaridade são apresentados na Tabela 4.11, sendo C o coeficiente de capilaridade calculado com a equação (3.7), e $C - Eq. Reta$ o coeficiente de capilaridade obtido por meio da equação da reta. Além disso, os resultados individuais dos três corpos de provas para cada traço são expostos no Apêndice F.

Tabela 4.11: Absorção de água por capilaridade para cada tempo e coeficientes de capilaridade.

Traço	At_{10} (g/cm ²)	At_{30} (g/cm ²)	At_{60} (g/cm ²)	At_{90} (g/cm ²)	C (g/dm ² min ^{1/2})	Desvio de C (%)	$C - Eq. Reta$ (g/dm ² min ^{1/2})	Desvio de $C Eq.$ $Reta$ (%)
Referência	0,10	0,18	0,26	0,33	3,60	7,59	3,60	7,78
0,5% de fibras	0,12	0,20	0,28	0,34	3,54	1,89	3,52	2,56
1,0% de fibras	0,16	0,25	0,33	0,38	3,52	19,43	3,47	18,73
1,5% de fibras	0,28	0,37	0,44	0,50	3,44	6,01	3,38	6,51

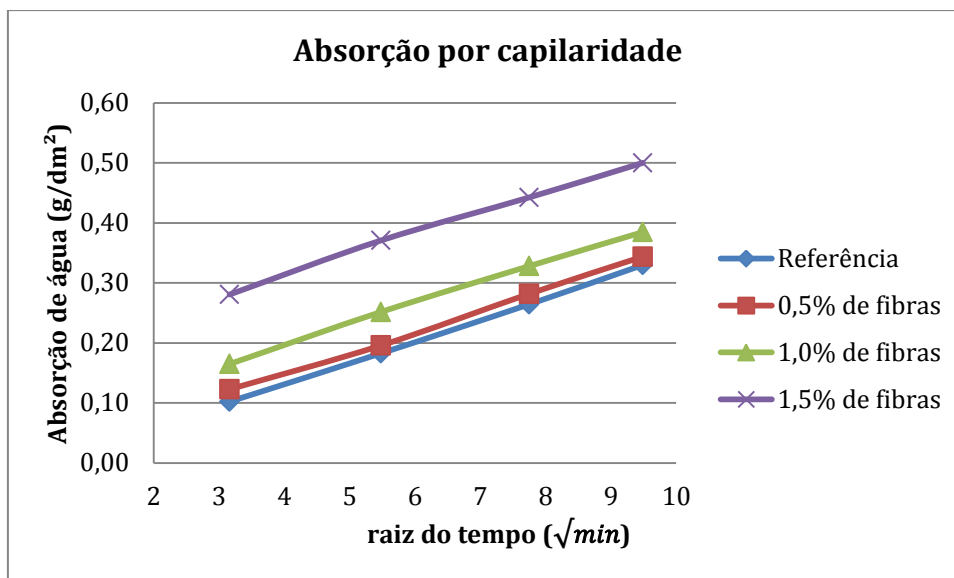


Figura 4.7: Absorção de água por capilaridade em função da raiz do tempo em minutos

Os dados da Tabela 4.11 e a Figura 4.7 permite verificar que há um aumento na absorção de água conforme se adiciona maiores quantidades de fibra. Esse fato é justificado pela porosidade dessas argamassas, pois essa característica eleva a absorção do sistema. Uma vez que há a existência de uma maior quantidade de vazios interligados, uma maior quantidade de água irá ascender devido às forças capilares.

Por último, a determinação do coeficiente de absorção por duas metodologias tem como único objetivo o comparativo, pois a equação (3.7) considera apenas os resultados no tempo de 10min e 90min, e a determinação gráfica avalia os demais intervalos, permitindo assim a obtenção de valores mais precisos. Verifica-se que os valores estão muito próximos, sendo a diferença máxima de 0.06, o que permite concluir que os ensaios foram executados de modo coerente e que os seus resultados são válidos.

4.5.2 ABSROÇÃO POR IMERSÃO

A absorção de água por imersão e o índice de vazios estão expostos na Tabela 4.12, a qual indica a média obtida para esses parâmetros, além das massas médias para os diferentes intervalos de leitura, sendo obtidas a partir das amostras com 28 dias Os resultados individuais para cada corpo de prova podem ser encontrados no Apêndice G.

Tabela 4.12: Absorção de água por imersão e índice de vazios.

Traço	m_s (g)	m_{24h} (g)	m_{48h} (g)	m_{72h} (g)	A (%)	Iv (%)
Referência	574,10	622,19	622,60	623,00	8,52	17,94
0,5% de fibras	543,76	591,15	591,67	591,89	8,85	18,10
1,0% de fibras	524,22	571,01	571,30	571,86	9,09	18,28
1,5% de fibras	504,08	551,30	551,86	552,73	9,65	18,90

Conforme os dados acima e as Figura 4.8 e Figura 4.9 é possível comprovar que quanto maior a porcentagem de fibras adicionadas, maior o índice de vazios, e por sua vez maior a absorção. Além disso, verificou-se que as argamassas com 1,5% de fibras apresentaram um aumento de 13,33% na absorção de água, e de 5,38% de índice de vazios. Por conseguinte, esses resultados corroboram com os obtidos no ensaio de absorção por capilaridade, ou seja, a absorção de água varia diretamente com o teor de fibras adicionado.

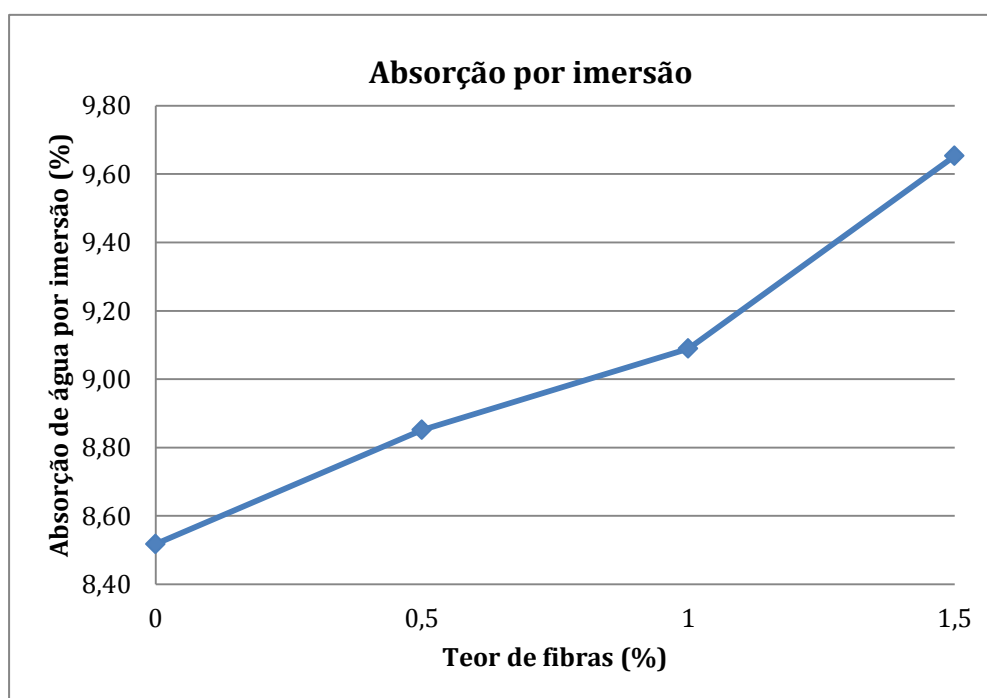


Figura 4.8: Absorção de água por imersão em função do teor de fibras

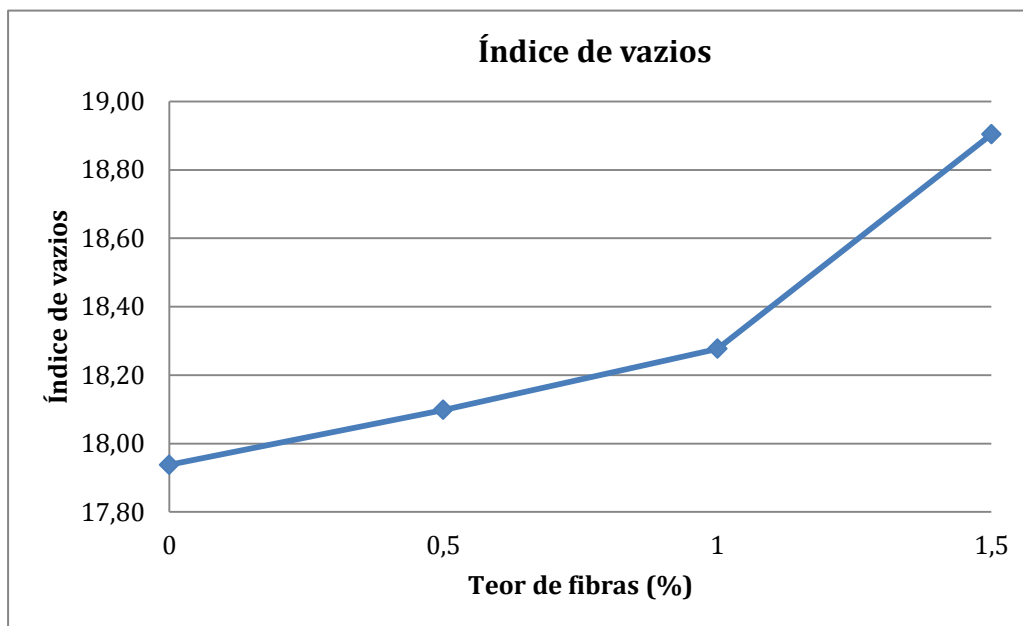


Figura 4.9: Índice de vazios em função do teor de fibras

Finalmente, os dados obtidos nesse ensaio permitem determinar diferentes tipos de massa específica da argamassa. Para cada traço foram ensaiados três corpos de prova e o resultado final corresponde à média dos três, conforme exposto na Tabela 4.13 Por outro lado, a massa específica individual de cada prisma é apresentada no Apêndice G.

Tabela 4.13: Massa específica média da argamassa

Massa específica	Referência	0,5% de fibras	1,0% de fibras	1,5% de fibras
Seca	2,11	2,04	2,01	1,96
Saturada	2,29	2,23	2,19	2,15
Real	2,57	2,50	2,46	2,42

É possível constatar que a medida que o teor de fibras adicionado aumenta, a massa específica da argamassa diminui. Esse fato é justificado, devido à reduzida massa específica da fibra quando comparada aos demais agregados, pois as argamassas com fibras possuem maior números de vazios.

Por fim, pode-se resumir todas essas características obtidas para a argamassa na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Resumo das propriedades das argamassas estudadas.

	Referência	0.5% de fibras	1.0 % de fibras	1.5% de fibras
Resistência à tração na flexão (Mpa) – 7 dias	6,6	8,2	6,4	5,6
Resistência à tração na flexão (Mpa) – 28 dias	8,3	8,4	7,0	6,6
Resistência à compressão axial (Mpa) – 7 dias	41,3	40,1	31,1	25,4
Resistência à compressão axial (Mpa) – 28 dias	52,6	44,4	41,8	32,5
Trabalhabilidade (mm) – Mesa de consistência	220	177	146	132
Trabalhabilidade (mm) – Penetração de cone	21	10	3	1
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	0,33	0,34	0,38	0,50
Absorção de água por imersão (%)	8,52	8,85	9,09	18,90
Índice de vazios (%)	17,94	18,10	18,28	18,90

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o exposto neste trabalho, é possível afirmar que o objetivo deste foi alcançado de forma satisfatória, dado que o programa experimental foi realizado conforme o planejado e foi possível avaliar as características das argamassas ao se adicionar fibras de papel kraft. Além disso, os resultados obtidos corroboram com os estudos já realizados nessa área.

A minimização das variáveis foi um ponto importante, tendo sido atingido com a padronização do preparo das argamassas, a determinação do momento de adição das fibras e, pela escolha da substituição em volume, que permitiu ter uma mesma quantidade em volume dos componentes inertes para os traços com e sem fibras. Assim, a única diferença nas argamassas foi o teor de fibras o que permitiu uma avaliação mais concreta da influencia destas nesse compósito.

Acerca do desempenho das argamassas à tração, verifica-se que com a adição de fibras obteve-se valores satisfatórios, pois os teores de 0,5% e 1,0% geraram valores próximos ao de referência e, o primeiro propiciou um aumento desse parâmetro, principalmente na idade de 7 dias. Todavia, também ficou evidente a influência da fibra na resistência à compressão, já que em todos os casos houve uma redução desta.

Quanto às propriedades do estado fresco, os compósitos com maiores teores de fibra apresentaram uma menor trabalhabilidade, essa justificada pela maior dificuldade de dispersão das fibras, maior coesão conferida à mistura e, a absorção pelas fibras de parte da água do traço. Desta forma, constata-se a necessidade de ajustar a trabalhabilidade desses compósitos para a sua utilização em obra.

No tocante a massa específica, quanto maior o teor de fibras, menor foi esse parâmetro e, maior foi o índice de vazios. Consequentemente, constata-se um aumento na capacidade de absorção de água, o que pode ser um problema em termos de durabilidade e, por sua vez um empecilho na utilização de argamassas com maiores teores de fibras de papel kraft.

Por fim, a avaliação dos parâmetros considerados nos ensaios permitiu verificar que a adição de 0,5% de fibras não exerceu muita influência nas propriedades estudadas, uma vez que se obteve uma resistência à tração superior a argamassa de referência, uma resistência à compressão ligeiramente inferior, uma pequena redução na trabalhabilidade e, pouca variação na absorção de água. Assim, com base nas propriedades analisadas, é possível considerar que o traço com adição de 0,5% pode ser aplicado na produção de argamassas. Por outro lado, para a adição de 1,0% e 1,5%, deve-se analisar melhor as demais propriedades da argamassa para verificar a sua possível utilização.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com fundamento nos estudos realizados nessa pesquisa, sugerem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros sobre a interferência da adição de fibras papel kraft, provenientes da reciclagem de sacos de cimento, em argamassas de fibras:

- Caracterização da durabilidade das fibras de papel kraft em argamassa, por exemplo, por meio de ciclos de molhagem e secagem;
- Estudo da utilização das fibras em argamassa como reforço contra a fissuração;
- Utilização de aditivos para o ajuste da trabalhabilidade;
- Analisar a viabilidade econômica da produção e implementação de argamassas com adição de fibras; e
- Avaliar, quantitativamente, a redução do impacto ambiental ao reutilizar esses resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. S. **Influência da adição de fibras de celulose (papel kraft) nas características dos blocos de concreto não estrutural**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal, 2016. 129p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 544.1-96: State-of-the-art report on fibre reinforced concrete**. 1996. Reapproved 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM C780**. Standard Test Method Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry. EUA. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: Classificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7219**. Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos: Classificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9776**; Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1988.

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

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Técnicas de Fabricação de Papéis e Cartões**. São Paulo : Klabin fabricante de papel e celulose S/A, p. 65, 1994.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO – **AMN NBR NM 45**. Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios: Classificação. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

BENTUR, A., BANTIA, N.; BAGGOT, J.D. **Fiber-Matrix Interfaces, preproceedings of International workshop on high performance fiber reinforced composites**. Ed. Naaman A. e Reinhardt H. University of Michigan, Estados Unidos, 1995.

BLANKENHORN, P. R.; SILSBEE, M. R.; BLANKENHORN, B. D.; DICOLA, M.; KESSLER, K.. Temperature and moisture effect on selected properties of wood fiber-cement composites. **Cement Concert Research**, vol. 29, 1999.

BUSON, M. A.. **Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1988.

CARVALHO, P. E. F.; VIEIRA, I.; AURIONE, D.; CARDOSO, T.; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Caracterização do papel kraft de embalagens visando o emprego como fibras em compósitos cimentícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Maceió. **Anais ENTAC**. Maceió, 2014

CARVALHO, P. E. F.; SANTOS, L. R. **Avaliação de argamassas com fibras de papel kraft proveniente de embalagens de cimento**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CENIBRA. **Processo de produção**. Disponível em: <<http://www.cenibra.com.br/index.php/fluxo-de-producao/>>. Acesso em: outubro de 2016.

COSTA, A. O. S. **Alternativas para o controle de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.164, 2000.

COUTTS, R. S. P e NI, Y. Autoclaved bamboo pulp fibre reinforced cement. **Cement & Concrete Composites**, volume 17, p. 99-106, 1995.

COUTTS, R. S. P. Autoclaved beaten wood fibre-reinforced cement composites. **Composites**, volume. 15, n. 2, p.139-143, 1984.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. CBI Research, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1983.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. In. Swamy, R. N. ed. Natural fibre reinforced cement and concrete, Glasgow, Blackie and Son Ltd, UK, 1988.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em bloco de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011. 128p

KLOCK, U., ANDRADE, A. S. de; HERNANDEZ, J; A. **Polpa e Papel**. Manual Didático. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. 3ª edição. 2013 Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplina/sklock/polpaepapel/manualpolpa2013.pdf>>. Acesso em: setembro de 2016.

LOPES, J. L.; SOUZA, J. L. de ; VERNER, J. L. F.; e FERREIRA, M. L. **Tipos de papéis. Faculdade de Telêmaco Borba**. Paraná, 2010. 48p.

MAGNIONT, C. **Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources**. Tese (Doutorado) - Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France, 2010. Disponível em: < http://thesesups.ups-tlse.fr/980/1/Magniont_Camille.pdf >. Acesso em: outubro de 2016.

MAHMOUD, T. **Étude de matériaux minéraux renforcés par des fibres organiques en vue de leur utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts**. Tese (Doutorado) - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2005. Disponível em: < <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005ISAL0047/these.pdf>>. Acesso em: setembro de 2016.

MAPEL, J. L. Jr. **Processo de produção de celulose**. Faculdades Integradas Espírito-Santenses (FAESA), Vitória, Espírito Santo. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/jmapeljr/macro-processo-da-produo-de-celulose-industrial-1423617>>. Acesso em: setembro de 2016.

MARTINS, A. P. S. **Desenvolvimento, caracterização mecânica e durabilidade de compósitos solo-cimento autoadensáveis reforçados com fibras de sisal**. Tese (Doutorado) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MARTINS, D. V. A.; SOARES, L. M.. **Avaliação do desempenho de revestimentos de argamassa com fibras de papel kraft proveniente de embalagens de cal**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

MOHR, B. J.; NANKO, H.; KURTIS, K. E. Aligned kraft pulp fiber sheets for reinforcing mortar. - cement composites. **Cement and Concret Research**. v. 38, p. 161-172, 2006.

PEREIRA, M. M. **Processamento de cerâmicas**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Editora UFMG, 2002.

OLIVARES, F. H.; VIILLANUEVA, I. O. L. de. Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fibre reinforced hemihydrate gypsum. **Composite Structures**, Volume 22, 1992.

OLIVEIRA, V. C. de. **Estudo comportamental da formulação dos requisitos e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal, 2017. 173p.

PERUZZI, A. P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia do Ambiente Construído) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18131/tde-13112002-180613/pt-br.php>>. Acesso em: outubro de 2016.

PINI. **Revista Técnica**. Distribuição granulométrica para argamassas. Edição 27, 1997. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/enharia-civil/27/artigo287132-1.aspx>>. Acesso em: junho de 2017.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel- Estudo de caso**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003. 379p.

ROBERT, N. T. F.. **Dossiê Técnico: Produção de Embalagem de Papel. Serviço Brasileiro de repositos técnicos**. Rede de Tecnologia e Inovação do Rio de Janeiro – REDETEC, 2007.

SANTANA, T. S. **Avaliação da adição de fibras de papel kraft, oriundas do saco de cimento, ao concreto utilizado na produção de blocos sem função estrutural**. 2015. 78p. Monografia de projeto final (Graduação). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

SANTOS, F. A. R. A. dos; MARTINS, M. R. **Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados**. Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas, 2010.

SAVASTANO, H. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. Tese (Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/3/tde-08102007-155734/>>. Acesso em: outubro de 2016.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P. G. Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. **Cement and Concrete Composites**, Volume 25, 2003

SAVI, O; SOUZA, R. A.; MANICARDI, A. M. F.; ROMERA, G.; PEREIRA, J. J. **Massa unitária do gesso reciclado e convencional**. IX Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura. Universidade Estadual de Maringá. Paraná, 2013.

SCHMAL, A. K.; AVILA, M. **Projeto Construa Limpo**. Artigo Técnico Científico, 2008.

SEDAN, D. **Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite**. Tese (Doutorado) - Université de Limoges, 2007

SEDAN, D. ; PAGNOUX, C. ; SMITH, A. ; CHOTARD, T. Interaction fibre de chanvre/ciment : influence sur les propriétés mécaniques du composite. **Matériaux & Techniques**, Volume 5, 2007. p. 133-142

SHREVE, R. N; BRINK Jr, A, J. **Indústrias de processos químicos**. Editora Guanabara Koogan S.A, Rio de Janeiro-RJ, 717p. 2008.

SILVA, M. A. da. **Obtenção e caracterização de compósitos cimentícios reforçado com fibras de papel de embalagens de cimento**. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <http://www.files.scire.net.br/atrio/cefet-mgposmat_upl/THESIS/10/dissertao_mestrado_myrt es.pdf>. Acesso em: outubro de 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual de 2013**. Rio de Janeiro: SNIC, 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/Relatorio Anual2013final.pdf>>. Acesso em: setembro de 2016.

UFRGS. **Alvenaria estrutural – Propriedades das argamassas**. Núcleo de Apoio Pedagógico à Educação a Distância (NAPEAD). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: http://www.ufrgs.br/napead/repositorio/objetos/alvenaria-estrutural/propriedades_de_argamassa.php. Acesso em: abril de 2017.

WOODHEAD PUBLISHING SERIES IN TEXTILES. **Fibrous and composite materials for civil engineering applications**. Número 104. Fanguero. UK, 2011

ZHU, W. H. ; TOBIAS, B. C. ; COUTTS, R.S.P. ; LANGFORS,G. Air cured banana-fibre-reinforced cement composites. **Cement and Concrete composites**, Volume 16, 1994.

ZHU, W. H. **Utilization of banana fibre in composite materials**. 1993. Dissertação (Mestrado). Victoria University of technology, Melbourne, 1993.

APÊNDICES

APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO GRANULOMÈTRICA

- Areia rosa

Tabela 1: Resultados do ensaio de composição granulométrica da primeira determinação para a areia rosa.

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa da Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	476,03	477,52	1,49	0,1	0
4,75	520,97	522,91	1,94	0,2	0
2,46	596,64	611,00	14,36	1,4	2
1,18	448,52	489,30	40,78	4,1	6
0,60	443,44	473,50	30,06	3,0	9
0,30	386,98	532,80	145,82	14,6	23
0,150	335,89	874,80	538,91	53,9	77
0,075	381,73	580,30	198,57	19,9	97
0,000	337,47	365,40	27,93	2,8	100
Total	-	-	999,86	-	-

Tabela 2: Resultados do ensaio de composição granulométrica da segunda determinação para a areia rosa.

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	476,40	478,10	1,70	0,2	0
4,75	521,03	523,16	2,13	0,2	0
2,46	596,67	613,60	16,93	1,7	2
1,18	448,59	487,20	38,61	3,9	6
0,60	443,48	464,00	20,52	2,1	8
0,30	387,03	504,50	117,47	11,7	20
0,150	335,86	911,20	575,34	57,5	77
0,075	381,68	580,30	198,62	19,9	97
Fundo	337,47	366,00	28,53	2,9	100
Total	-	-	999,85	-	-

Tabela 3: Obtenção da média dos resultados do ensaio de composição granulométrica para a areia rosa.

Abertura (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Média		Diferença entre as % retidas (<4%)
	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	
6,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0	0,0
4,75	0,2	0,3	0,2	0,4	0,2	0	0,0
2,36	1,4	1,8	1,7	2,1	1,6	2	0,3
1,18	4,1	5,9	3,9	5,9	4,0	6	-0,2
0,60	3,0	8,9	2,1	8,0	2,5	8	-1,0
0,30	14,6	23,4	11,7	19,7	13,2	22	-2,8
0,150	53,9	77,3	57,5	77,3	55,7	77	3,6
0,075	19,9	97,2	19,9	97,1	19,9	97	0,0
0,000	2,8	100,0	2,9	100,0	2,8	100	0,1

- **Pó de brita**

Tabela 4: Resultados do ensaio de composição granulométrica da primeira determinação para o pó de brita

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa da Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	476,06	480,98	4,92	0,49	0,49
4,75	520,96	528,25	7,29	0,73	1,22
2,46	596,7	791,1	194,4	19,43	20,65
1,18	448,53	803,7	355,17	35,50	56,16
0,60	443,51	594,4	150,89	15,08	71,24
0,30	387,09	497,9	110,81	11,08	82,32
0,150	335,88	393,1	57,22	5,72	88,03
0,075	381,66	427,6	45,94	4,59	92,63
Fundo	337,44	411,2	73,76	7,37	100,00
Total	-	-	1000,4	-	-

Tabela 5: Resultados do ensaio de composição granulométrica da segunda determinação para o pó de brita

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa da Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	476,07	483,79	7,72	0,77	0,77
4,75	521,02	533,23	12,21	1,22	1,99
2,46	596,66	794,5	197,84	19,77	21,76
1,18	448,54	811	362,46	36,23	57,99
0,60	443,43	594,5	151,07	15,10	73,09
0,30	387,09	493,3	106,21	10,62	83,70
0,150	335,91	389,1	53,19	5,32	89,02
0,075	381,68	423	41,32	4,13	93,15
Fundo	337,46	406	68,54	6,85	100,00
Total	-	-	1000,56	-	-

Tabela 6: Obtenção da média dos resultados do ensaio de composição granulométrica para o pó de brita

Abertura (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Média		Diferença entre as % retidas (<4%)
	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	
6,3	0,5	0,5	0,8	0,8	0,6	1	0,3
4,75	0,7	1,2	1,2	2,0	1,0	2	0,5
2,46	19,4	20,7	19,8	21,8	19,6	21	0,3
1,18	35,5	56,2	36,2	58,0	35,9	57	0,7
0,60	15,1	71,2	15,1	73,1	15,1	72	0,0
0,30	11,1	82,3	10,6	83,7	10,8	83	-0,5
0,150	5,7	88,0	5,3	89,0	5,5	89	-0,4
0,075	4,6	92,6	4,1	93,1	4,4	93	-0,5
0,000	7,4	100,0	6,9	100,0	7,1	100	-0,5

- **Areia mix**

Tabela 7: Resultados do ensaio de composição granulométrica da primeira determinação para a areia mix.

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa da Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	477,4	477,6	0,2	0,020	0,02
4,75	521	521,22	0,22	0,022	0,04
2,46	596,6	600,1	3,5	0,350	0,39
1,18	448,5	871	422,5	42,258	42,65
0,60	443,5	731,9	288,4	28,845	71,49
0,30	387,1	572,5	185,4	18,543	90,04
0,150	335,9	369,5	33,6	3,361	93,40
0,075	381,7	396,3	14,6	1,460	94,86
Fundo	337,5	388,9	51,4	5,141	100,00
Total	-	-	999,82	-	-

Tabela 8: Resultados do ensaio de composição granulométrica da segunda determinação para a areia mix.

Abertura (mm)	Massa da peneira vazia (g)	Massa da Amostra + peneira (g)	Massa da Amostra (g)	% Retida	% retida cumulada
6,3	476,39	476,42	0,030	0,003	0,003
4,75	521,04	521,04	0,000	0,000	0,003
2,46	596,73	602,2	5,470	0,547	0,550
1,18	448,5	914,2	465,700	46,582	47,132
0,60	443,51	731,1	287,590	28,766	75,899
0,30	387,09	545,4	158,310	15,835	91,734
0,150	335,89	363,5	27,610	2,762	94,496
0,075	381,7	393,8	12,100	1,210	95,706
Fundo	337,47	380,4	42,930	4,294	100,000
Total	-	-	999,74	-	-

Tabela 9: Obtenção da média dos resultados do ensaio de composição granulométrica para a areia mix.

Abertura (mm)	Amostra 2		Média		Diferença entre as % retidas (<4%)
	% Retida	% Retida acumulada	% Retida	% Retida acumulada	
6,3	0,0	0,0030	0,0	0	0,0
4,75	0,0	0,0	0,0	0	0,0
2,46	0,5	0,6	0,4	0	0,2
1,18	46,6	47,1	44,4	45	4,3
0,60	28,8	75,9	28,8	74	-0,1
0,30	15,8	91,7	17,2	91	-2,7
0,150	2,8	94,5	3,1	94	-0,6
0,075	1,2	95,7	1,3	95	-0,2
0,000	4,3	100,0	4,7	100	-0,8

APÊNDICE B – MASSA UNITÁRIA

Tabela 10: Resultados da massa específica da areia rosa

Sequencial	Leitura (cm³)	Massa específica (g/cm³)
1	389	2,646
2	389	2,646

Tabela 11: Resultados da massa específica do pó de brita

Sequencial	Leitura (cm³)	massa específica (g/cm³)
1	384,5	2,710
2	384	2,717

Tabela 12: Resultados da massa específica da areia mix

Sequencial	Leitura (cm³)	massa específica (g/cm³)
1	384	2,717
2	385	2,703

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

As tabelas abaixo indicam os valores individuais da resistência à compressão cimento, sendo que a norma determina que nos casos em que o desvio é superior a 6%, deve-se desconsiderar o corpo de prova. Assim, o corpo de prova desconsiderado no cálculo da média da resistência à compressão é indicado com “*”.

Tabela 13: Resultados individuais do corpo de prova para a idade de 1 dia.

Sequencial	Resistência à compressão (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
1	4035	20,55
2	4225	21,52
3	3885	19,79
4 *	3440	17,52

Tabela 14: Resultados individuais do corpo de prova para a idade de 3 dias.

Sequencial	Resistência à compressão (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
1	4995	25,44
2	5170	26,33
3	4905	24,98
4 *	4430	22,56

Tabela 15: Resultados individuais do corpo de prova para a idade de 7 dias.

Sequencial	Resistência à compressão (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
1	5570	28,37
2	5870	29,90
3 *	5205	26,51
4	5860	29,84

A Tabela 16 apresenta a resistência à compressão média obtida considerando, inicialmente, os quatro corpos de prova, e o resultado do desvio relativo máximo. Nos casos em que o desvio é superior ao permitido, é indicado o corpo de prova a ser desconsiderado, conforme o

sequencial das Tabelas 13, 14 e 15, e o cálculo da nova resistência e desvio relativo ao desprezar o valor discrepante.

Tabela 16: Resultados da resistência à compressão média e dos desvios relativos máximos para cada idade.

Idade (dias)	Resistência à compressão Média	Desvio relativo máximo	Desconsiderar corpo de prova (sequencial)
1	19,84	11,7	4
	20,62	-4,4	ok
3	24,83	9,1	4
	25,58	-2,9	ok
7	28,65	7,5	3
	29,37	3,4	ok

APÊNDICE D – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Tabela 17: Índice de consistência obtido pelo ensaio de penetração de cone para cada mistura.

Mistura	Referência (mm)	0,5% de fibras (mm)	1,0% de fibras (mm)	1,5% de fibras (mm)
1	21	9	2	1
	18	7	3	1
2	23	9	3	2
	25	10	3	1
3	19	14	3	1
	17	9	3	1

Tabela 18: Índice de consistência obtido pelo ensaio de *flow table* para cada mistura.

Mistura	Referência (mm)	0,5% de fibras (mm)	1,0% de fibras (mm)	1,5% de fibras (mm)
1	205	175	145	130
	215	175	145	135
	220	180	150	130
2	230	180	145	130
	225	177	145	135
	230	175	140	130
3	210	180	145	135
	215	175	150	133
	230	175	145	130

APÊNDICE E – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E À COMPRESSÃO

Nas tabelas abaixo são apresentados os resultados individuais para cada corpo de prova ensaiado, sendo R_f a resistência à tração na flexão e R_c a resistência à compressão. Além disso, a norma determina que se desconsidere o corpo de prova cujo desvio é superior a 0,3 e 0,5MPa, para a resistência à tração na flexão e compressão, respectivamente, e em seguida calcula-se novamente a média. Assim, os corpos de prova desconsiderados no cálculo da média são indicados com “*”.

- **Traço de referência**

Tabela 19: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 7 dias.

Idade: 7 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	603,30	161,88	41,43	40,29	290	6,46
CP2	601,70	161,89	41,42	40,33	340	* 7,57
CP3	600,00	161,85	41,47	40,00	301	6,70

Tabela 20: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Idade: 28 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	603,40	160,15	41,74	40,01	379	8,44
CP2	605,10	160,19	41,58	40,02	396	*8,82
CP3	609,40	160,22	41,85	40,03	363	8,08

Tabela 21: Carga de ruptura e resistência à compressão para cada corpo de prova.

Amostra	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)
1	6610,00	40,53	8255,00	*50,61
2	6620,00	40,59	8450,00	51,81
3	6990,00	42,86	7870,00	*48,25
4	7250,00	*44,45	8525,00	52,27
5	6700,00	41,08	8625,00	52,88
6	7395,00	*45,34	8700,00	53,34
Média	-	41,3	-	52,6

- **Traço com substituição de 0,5% de fibras**

Tabela 22: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 7 dias.

Idade: 7 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	594,30	160,34	41,65	40,45	375	8,35
CP2	592,60	161,89	41,42	40,42	359	7,99
CP3	584,70	160,43	41,00	40,14	343	* 7,64

Tabela 23: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Idade: 28 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	585,90	161,59	40,87	40,12	368	8,19
CP2	572,60	161,50	41,15	39,92	381	8,48
CP3	586,10	161,56	40,93	39,96	386	8,60

Tabela 24: Carga de ruptura e resistência à compressão para cada corpo de prova.

Amostra	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)
1	6670,00	40,90	7155,00	43,87
2	6680,00	40,96	7615,00	46,69
3	6640,00	40,71	7125,00	43,69
4	7015,00	*43,01	7120,00	43,65
5	6140,00	37,65	7975,00	* 48,90
6	7152,00	*43,85	7955,00	* 48,77
Média	-	40,1	-	44,5

- **Traço com substituição de 1,0% de fibras**

Tabela 25: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 7 dias.

Idade: 7 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	553,21	160,35	41,14	40,23	296	6,59
CP2	561,10	160,24	40,97	40,37	281	6,26
CP3	554,60	160,16	41,08	40,38	284	6,32

Tabela 26: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Idade: 28 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	560,40	161,07	40,61	40,04	305,00	6,79
CP2	561,50	161,28	40,85	40,11	325,00	7,24
CP3	552,60	161,32	40,79	39,93	310,00	6,90

Tabela 27: Carga de ruptura e resistência à compressão para cada corpo de prova.

Amostra	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)
1	4815,00	29,52	7500,00	* 45,98
2	5335,00	32,71	6515,00	39,95
3	4980,00	30,53	7020,00	43,04
4	5175,00	31,73	7295,00	44,73
5	3400,00	*20,85	6465,00	39,64
6	3230,00	*19,80	5775,00	* 35,41
Média	-	31,1	-	41,8

- **Traço com substituição de 1,5% de fibras**

Tabela 28: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 7 dias.

Idade: 7 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	540,90	160,39	41,38	40,26	223	*4,97
CP2	562,10	160,44	41,88	40,35	260	5,79
CP3	525,60	160,29	40,88	40,32	241	5,37

Tabela 29: Dimensões, carga de ruptura e resistência à tração na flexão dos corpos de prova com idade de 28 dias.

Idade: 28 dias						
	Massa (g)	Comprimento (mm)	Altura (mm)	Espessura (mm)	Carga (Kgf)	Rf (Mpa)
CP1	541,00	161,33	40,66	39,69	300,00	6,68
CP2	530,00	161,45	40,59	39,84	258,00	* 5,75
CP3	540,80	161,21	40,79	40,17	294,00	6,55

Tabela 30: Carga de ruptura e resistência à compressão para cada corpo de prova.

Amostra	Idade: 7 dias		Idade: 28 dias	
	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)	Carga (Kgf)	Rc (Mpa)
1	4425,00	27,13	5270,00	32,31
2	4040,00	24,77	6315,00	* 38,72
3	3850,00	23,61	5890,00	* 36,11
4	4235,00	25,97	5290,00	32,43
5	2705,00	*16,59	5250,00	32,19
6	3305,00	*20,26	5380,00	32,99
Média	-	25,4	-	32,5

APÊNDICE F – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

- **Traço de referência**

Tabela 31: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	M_0 (g)	M_{10} (g)	M_{30} (g)	M_{60} (g)	M_{90} (g)	$A_{t_{10}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{30}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{60}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{90}}$ (g/cm ²)
CP 1	576,07	577,92	579,31	580,73	581,84	0,12	0,20	0,29	0,36
CP 2	572,32	573,82	575,08	576,39	577,43	0,09	0,17	0,25	0,32
CP 3	573,90	575,45	576,66	577,85	578,85	0,10	0,17	0,25	0,31
Média	-	-	-	-	-	0,10	0,18	0,26	0,33

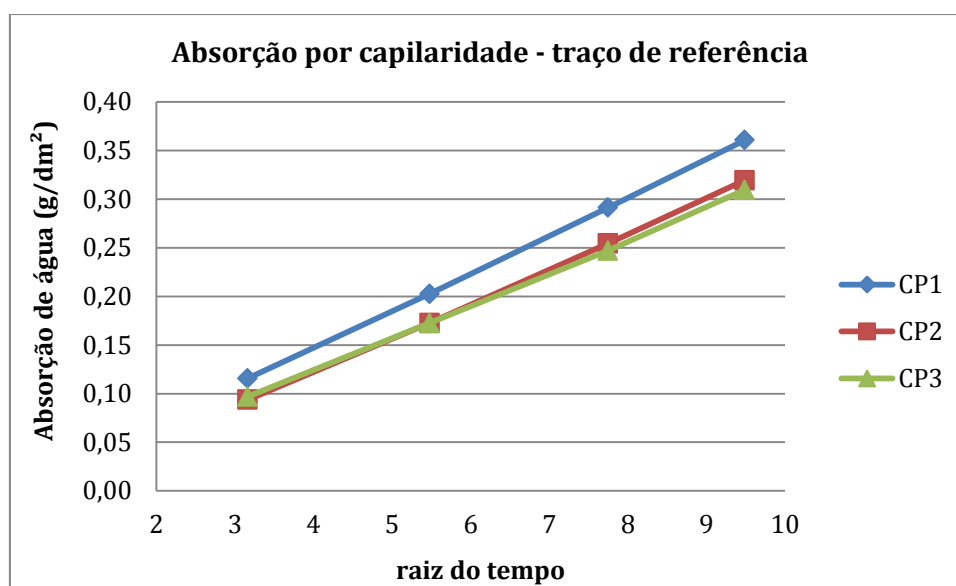


Figura 1: Absorção por capilaridade em função da raiz do tempo para as três amostras ensaiadas.

Tabela 32: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	C (g/dm ² min ^{1/2})	Equação da reta	C-Eq. Reta (g/cm ² min ^{1/2})	C-Eq. Reta (g/dm ² min ^{1/2})
CP 1	3,9	$y = 0,0388x - 0,0081$	0,0388	3,88
CP 2	3,6	$y = 0,0357x - 0,0208$	0,0357	3,57
CP 3	3,4	$y = 0,0335x - 0,0101$	0,0335	3,35
Média	3,6	-	0,0360	3,60

- Traço com substituição de 0,5% de fibras

Tabela 33: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	M_0 (g)	M_{10} (g)	M_{30} (g)	M_{60} (g)	M_{90} (g)	$A_{t_{10}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{30}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{60}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{90}}$ (g/cm ²)
543,64	543,64	545,03	546,22	547,56	548,57	0,09	0,16	0,24	0,31
536,31	536,31	538,19	539,47	540,72	541,66	0,12	0,20	0,28	0,33
551,33	551,33	553,95	554,98	556,52	557,55	0,16	0,23	0,32	0,39
Média	-	-	-	-	-	0,12	0,20	0,28	0,34

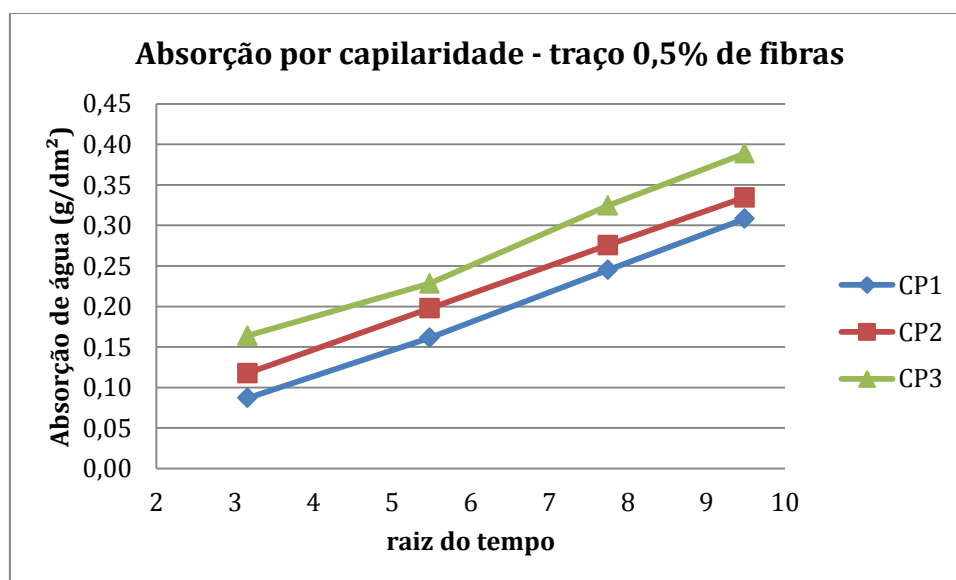


Figura 2: Absorção por capilaridade em função da raiz do tempo para as três amostras ensaiadas.

Tabela 34: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	C (g/dm ² min ^{1/2})	Equação da reta	C-Eq. Reta (g/cm ² min ^{1/2})	C-Eq. Reta (g/dm ² min ^{1/2})
CP 1	3,54	0,0351x +0,027	0,0351	3,51
CP 2	3,47	0,0343x -0,0093	0,0343	3,43
CP 3	3,60	0,0362x +0,0419	0,0362	3,62
Média	3,54	-	-	3,52

- Traço com substituição de 1,0% de fibras

Tabela 35: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	M_0 (g)	M_{10} (g)	M_{30} (g)	M_{60} (g)	M_{90} (g)	$A_{t_{10}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{30}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{60}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{90}}$ (g/cm ²)
CP 1	516,32	519,76	521,50	522,88	523,96	0,21	0,32	0,41	0,48
CP 2	529,30	531,54	532,74	533,83	534,61	0,14	0,22	0,28	0,33
CP 3	527,03	529,26	530,48	531,68	532,54	0,14	0,22	0,29	0,34
Média	-	-	-	-	-	0,16	0,25	0,33	0,38

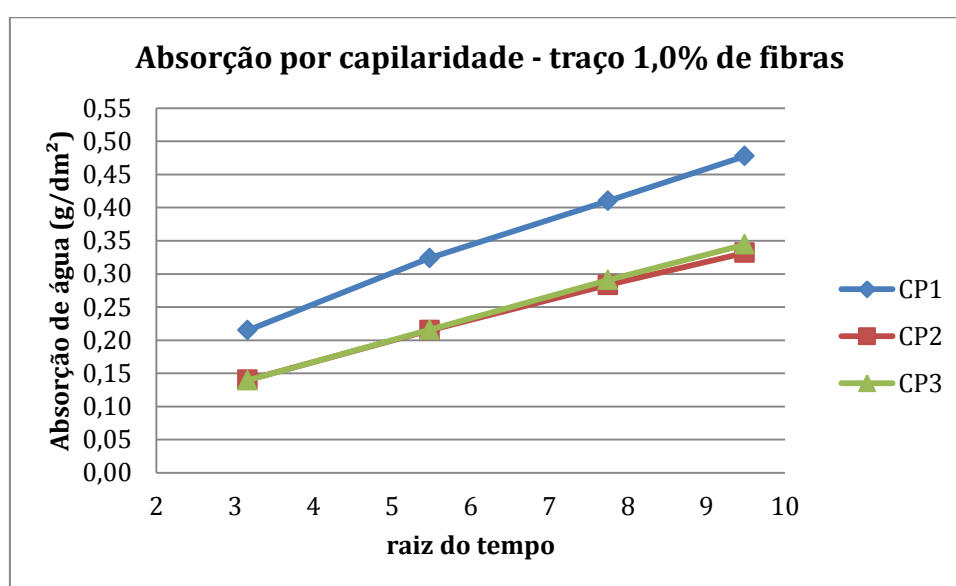


Figura 3: Absorção por capilaridade em função da raiz do tempo para as três amostras ensaiadas.

Tabela 36: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	C (g/dm ² min ^{1/2})	Equação da reta	C-Eq. Reta (g/cm ² min ^{1/2})	C-Eq. Reta (g/dm ² min ^{1/2})
CP 1	4,20	0,0412x + 0,09	0,0412	4,12
CP 2	3,07	0,0304x + 0,0461	0,0304	3,04
CP 3	3,28	0,0325x + 0,0372	0,0325	3,25
Média	3,52	-	-	3,47

- **Traço com substituição de 1,5% de fibras**

Tabela 37: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	M_0 (g)	M_{10} (g)	M_{30} (g)	M_{60} (g)	M_{90} (g)	$A_{t_{10}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{30}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{60}}$ (g/cm ²)	$A_{t_{90}}$ (g/cm ²)
CP 1	499,04	503,69	505,08	506,11	506,92	0,29	0,38	0,44	0,49
CP 2	508,96	512,99	514,45	515,68	516,58	0,25	0,34	0,42	0,48
CP 3	504,23	509,02	510,49	511,67	512,51	0,30	0,39	0,47	0,52
Média	-	-	-	-	-	0,28	0,37	0,44	0,50

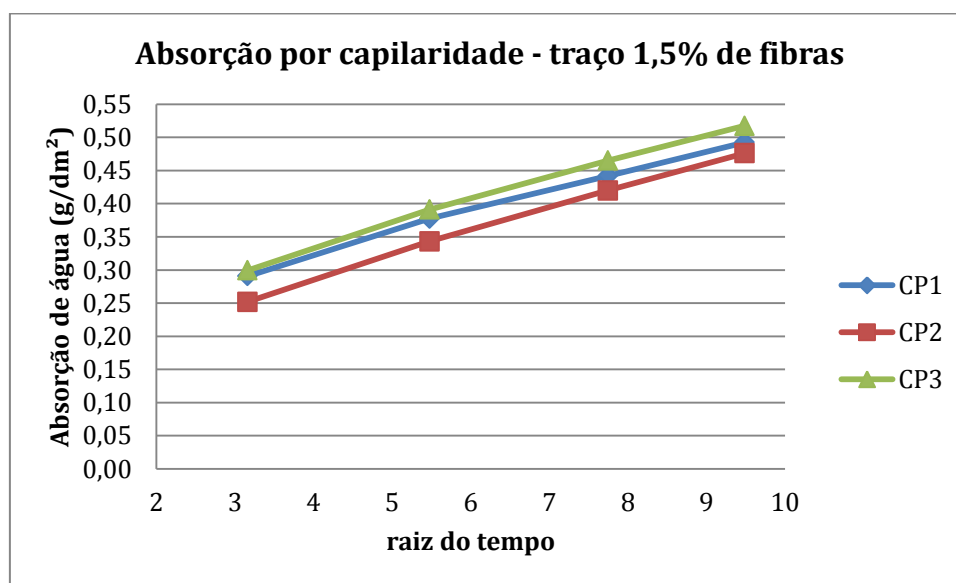


Figura 4: Absorção por capilaridade em função da raiz do tempo para as três amostras ensaiadas.

Tabela 38: Massa e índice de absorção de água por capilaridade (A_t) para os diferentes tempos de ensaio

	C (g/dm ² min ^{1/2})	Equação da reta	C-Eq. Reta (g/cm ² min ^{1/2})	C-Eq. Reta (g/dm ² min ^{1/2})
CP 1	3,2	0,0316x + 0,196	0,0316	3,16
CP 2	3,6	0,0354X + 0,1439	0,0354	3,54
CP 3	3,5	0,0344+0,1959	0,0344	3,44
Média	3,44	-	-	3,38

APÊNDICE G – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

As tabelas a seguir apresentam os resultados individuais para os três corpos de prova ensaiados para cada traço. Sendo, M_s é a massa da amostra seca em estufa, M_{24h} a massa após 24 horas de imersão, M_{48h} a massa após 48 horas de imersão, M_{72h} a massa após 72 horas de imersão, M_{sat} a massa da amostra saturada, M_i a massa da amostra imersa em água, A a absorção em porcentagem, I_v o índice de vazios em porcentagem, ρ_s a massa específica seca, ρ_{sat} a massa específica saturada e, ρ_r a massa específica real.

Tabela 39: Traço de referência: resultados individuais das massas, absorção de água por imersão, índice de vazios e, massa específica seca, real e saturada.

	M_s (g)	M_{24h} (g)	M_{48h} (g)	M_{72h} (g)	M_{sat} (g)	M_i (g)	A (%)	I_v (%)	ρ_s (g/cm³)	ρ_{sat} (g/cm³)	ρ_r (g/cm³)
CP1	576,07	624,06	624,45	624,78	624,78	352,17	8,46	17,87	2,11	2,29	2,57
CP2	572,32	620,63	621,12	621,46	621,46	349,42	8,59	18,06	2,10	2,28	2,57
CP3	573,90	621,87	622,24	622,75	622,75	349,57	8,51	17,88	2,10	2,28	2,56
Média	574,10	622,19	622,60	623,00	623,00	-	8,52	17,94	2,11	2,29	2,57

Tabela 40: Traço com 0,5% de fibras: resultados individuais das massas, absorção de água por imersão, índice de vazios e, massa específica seca, real e saturada.

	M_s (g)	M_{24h} (g)	M_{48h} (g)	M_{72h} (g)	M_{sat} (g)	M_i (g)	A (%)	I_v (%)	ρ_s (g/cm³)	ρ_{sat} (g/cm³)	ρ_r (g/cm³)
CP1	543,64	590,18	590,67	590,87	590,87	325,80	8,69	17,82	2,05	2,23	2,50
CP2	536,31	583,31	583,84	583,99	583,99	321,07	8,89	18,14	2,04	2,22	2,49
CP3	551,33	599,96	600,50	600,82	600,82	331,00	8,98	18,34	2,04	2,23	2,50
Média	543,76	591,15	591,67	591,89	591,89	-	8,85	18,10	2,04	2,23	2,50

Tabela 41: Traço com 1,0% de fibras: resultados individuais das massas, absorção de água por imersão, índice de vazios e, massa específica seca, real e saturada.

	Ms (g)	M_{24h} (g)	M_{48h} (g)	M_{72h} (g)	Msat (g)	Mi (g)	A (%)	Iv (%)	ρs (g/cm³)	ρsat (g/cm³)	ρr (g/cm³)
CP1	516,32	563,28	563,79	564,25	564,25	305,44	9,28	18,52	1,99	2,18	2,45
CP2	529,30	576,07	576,17	576,80	576,80	315,21	8,97	18,16	2,02	2,20	2,47
CP3	527,03	573,69	573,94	574,52	574,52	312,91	9,01	18,15	2,01	2,20	2,46
Média	524,22	571,01	571,30	571,86	571,86	-	9,09	18,28	2,01	2,19	2,46

Tabela 42: Traço com 1,5% de fibras: resultados individuais das massas, absorção de água por imersão, índice de vazios e, massa específica seca, real e saturada.

	Ms (g)	M_{24h} (g)	M_{48h} (g)	M_{72h} (g)	Msat (g)	Mi (g)	A (%)	Iv (%)	ρs (g/cm³)	ρsat (g/cm³)	ρr (g/cm³)
CP1	499,04	546,00	546,67	548,16	548,16	291,00	9,84	19,10	1,94	2,13	2,40
CP2	508,96	556,45	556,48	557,41	557,41	298,89	9,52	18,74	1,97	2,16	2,42
CP3	504,23	551,45	552,43	552,62	552,62	296,17	9,60	18,87	1,97	2,15	2,42
Média	504,08	551,30	551,86	552,73	552,73	-	9,65	18,90	1,96	2,15	2,42