

DESENVOLVIMENTO DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS
COM INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA INDÚSTRIA DE
PAPEL DE CELULOSE

AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JANEIRO – 2018

DESENVOLVIMENTO DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS
COM INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA INDÚSTRIA DE
PAPEL DE CELULOSE

AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e
Tecnologia da Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para a obtenção de
título de Doutor em Engenharia Civil.”

Orientador: D.Sc. Jonas Alexandre

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO –
UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
JANEIRO – 2018

DESENVOLVIMENTO DE PLACAS CIMENTÍCIAS REFORÇADAS
COM INCORPORAÇÃO DO LODO PRIMÁRIO DA INDÚSTRIA DE
PAPEL DE CELULOSE

AFONSO RANGEL GARCEZ DE AZEVEDO

“Tese apresentada ao Centro de Ciência e
Tecnologia da Universidade Estadual do
Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como
parte das exigências para a obtenção de
título de Doutor em Engenharia Civil.”

Aprovada em 24 de Janeiro de 2018
Comissão Examinadora:

D.Sc. Gustavo de Castro Xavier - UENF

D.^{ra}.Sc. Crislene Rodrigues da Silva Moraes - UFCG

D.^{ra}.Sc. Maria Lucia Pereira Antunes - UNESP

D. Sc. Jonas Alexandre – UENF – Orientador

Aos meus pais,
meu eterno agradecimento e amor

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível graças ao incentivo, ajuda e motivação de diversas pessoas e instituições que me ajudaram de diversas maneiras para a sua finalização, assim permito-me agradecer:

- A Deus por ter me permitido chegar até aqui e nunca me abandonado, mesmo nos momentos de maior dificuldade;
- A toda minha família, em especial aos meus pais, irmã e meu sobrinho, pela compreensão nos momentos de ausência e dificuldades passados ao longo destes nove anos de vida acadêmica;
- A minha namorada pela compreensão dos momentos de ausência e dedicação necessária para a pesquisa além da motivação para sua conclusão;
- Ao professor Jonas Alexandre, que ao longo de todos esses anos além de me orientar na condução dos trabalhos acadêmicos tornou-se um infundável amigo para todos os momentos, minha grande gratidão;
- Ao grande amigo Markssuel Teixeira Marvila pelo apoio dado nos experimentos e pelo convívio ao longo destes anos, sem o qual a finalização deste trabalho seria difícil, meu grande agradecimento;
- Ao professor Gustavo de Castro Xavier pelos conselhos e ajudas que me nortearam ao longo dos anos;
- Aos professores Leonardo Gonçalves Pedroti (UFV), Sergio Neves Monteiro (LAMAV) e Carlos Mauricio Fontes Vieira (LAMAV) pelas grandes ajudas e aconselhamentos ao longo desta pesquisa;

- Aos técnicos e demais professores do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) onde convivi ao longo dos últimos nove anos, pelos ensinamentos transmitidos;
- Aos inúmeros amigos que conheci durante a trajetória acadêmica, que sempre me ajudaram em momentos difíceis e incentivaram na conclusão;
- Aos meus amigos e companheiros do Instituto Federal Fluminense, que me deram suporte e auxílio para conseguir conciliar este doutorado com minhas atividades laborais;
- As agências de fomento (CAPES, FAPERJ e CNPQ) pelo suporte indireto na participação de congressos e divulgação científica;
- À Cia Paduana de Papeis – COPAPA, pelo fornecimento do material utilizado.

SUMÁRIO

RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xviii
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 INEDITISMO DO TRABALHO.....	5
1.4 JUSTIFICATIVA	6
1.5 ESTRUTURA DA TESE	9
Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE	11
2.2 HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO BRASIL	14
2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	15
2.4 RESÍDUOS PROVENIENTES DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE	18
2.5 CELULOSE	24
2.6 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.	26
2.7 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO EM OUTRAS FINALIDADES.....	27
2.8 ARGAMASSA	27
2.9 ARGAMASSA ARMADA	28
2.10 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	30
2.11 MATERIAIS DE REFORÇO	31
2.11.1 REFORÇO COM FIBRAS NATURAIS.....	31
2.11.2 REFORÇO COM TELAS DE PLÁSTICO.....	33
2.11.3 REFORÇO COM TELAS METÁLICAS	34
2.12 PLACAS CIMENTÍCIAS	35
2.13 DURABILIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	37
2.14 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	39

2.14.1 TRABALHABILIDADE.....	39
2.14.2 REOLOGIA	41
2.14.3 MASSA ESPECIFICA E TEOR DE AR INCORPORADO	42
2.14.4 RETENÇÃO DE ÁGUA.....	43
2.15 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO ...	44
2.15.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA	44
2.15.2 DENSIDADE APARENTE.....	45
2.15.3 POROSIDADE EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	46
2.16 PROPRIEDADES DAS PLACAS CIMENTÍCIAS	46
2.16.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PLACAS CIMENTÍCIAS.....	46
2.16.2 ABSORÇÃO E PERMEABILIDADE DE ÁGUA.....	48
2.16.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM	48
2.16.4 EXPANÇÃO POR TEMPERTURA.....	50
2.16.5 EXPANÇÃO POR UMIDADE (EPU)	51
2.16.6 DESEMPENHO ACUSTÍCO	51
2.16.7 DURABILIDADE DAS PLACAS CIMENTÍCIAS	52
2.17 TRABALHOS RELACIONADOS AO TEMA	53
2.17.1 FRIAS et al, 2015.....	53
2.17.2 GARCIA et al, 2010	54
2.17.3 CAVDAR et al, 2017	55
2.17.4 OUTROS TRABALHOS.....	57
Capítulo 3 - METODOLOGIA	60
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	61
3.1.1 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL DE CELULOSE	61
3.1.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA ARGAMASSA.....	61
3.1.3 ADITIVO DE AR INCORPORADO.....	62
3.1.4 MATERIAL DE REFORÇO	62
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63

3.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA	64
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE PAPEL.....	65
3.2.2.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	65
3.2.2.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	66
3.2.2.3	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	66
3.2.3	CARACTERIZAÇÃO DA CAL E DO CIMENTO.....	66
3.2.4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE REFORÇO	67
3.3	ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO IDEAL.....	68
3.3.1	BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO PARA USO	68
3.3.2	DETERMINAÇÃO DO TRAÇO UTILIZADO.....	69
3.3.3	ENSAIOS TECNOLÓGICOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	71
3.3.4	ENSAIOS TÉCNOLOGICOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	72
3.4	ENSAIOS EM PLACA CIMENTÍCIA	73
3.4.1	CONFECÇÃO DAS PLACAS CIMENTÍCIAS.....	74
3.4.2	ENSAIOS GEOMÉTRICOS NAS PLACAS.....	76
3.4.3	ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS PLACAS.....	78
3.4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DAS PLACAS	79
3.4.5	ENSAIOS DE ACEITAÇÃO EM CORPOS DE PROVA	81
3.4.5.1	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	81
3.4.5.2	ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	82
3.4.5.3	ENSAIOS DE DENSIDADE APARENTE.....	83
3.4.5.4	ENSAIOS DE DURABILIDADE POR CICLAGEM	84
3.4.5.5	ENSAIOS DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL.....	85
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	86
Capítulo 4	– RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA	87
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	89

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REFORÇO	94
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA SIMPLES	95
4.4.1. ARGAMASSA SIMPLES NO ESTADO FRESCO	95
4.4.2. ARGAMASSA SIMPLES NO ESTADO ENDURECIDO	104
4.4.3 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DA ARGAMASSA SIMPLES	109
4.5 ENSAIOS EM PLACA CIMENTÍCIA	111
4.5.1 ENSAIO DE TOLERÂNCIA GEOMETRICA	112
4.5.2 ENSAIO DE PERMEABILIDADE	115
4.5.3 COMPORTAMENTO AO FOGO	117
4.6 ENSAIOS EM CORPO DE PROVA DA PLACA	120
4.6.1 DENSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA	120
4.6.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA	122
4.6.3 DURABILIDADE POR EFEITO DE CICLAGEM	127
4.6.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL	128
4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS	129
Capítulo 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	132
5.1 CONCLUSÕES DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	132
5.2 CONCLUSÕES DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO	133
5.3 CONCLUSÕES DA DEFINIÇÃO DO TRAÇO	134
5.4 CONCLUSÕES DAS PLACAS CIMENTÍCIAS COM REFORÇO	135
5.5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	137
Capítulo 6 - REFERÊNCIAS	138
ANEXO A	155
ANEXO B	156
ANEXO C	157
ANEXO D	158
ANEXO E	159

ANEXO F	161
ANEXO G	163
ANEXO H	166
ANEXO I	168

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Cobertura da coleta de resíduos sólidos nos domicílios brasileiros, total e por região (N – Norte; NE – Nordeste; CO – Centro-Oeste; SE – Sudeste; S – Sul e BR – Brasil).....	6
Fig. 1.2 - Disposição dos resíduos sólidos urbanos brasileiros, em ton/ano.	7
Fig. 1.3 – Evolução da produção brasileira de celulose, em 1.000 ton.....	8
Fig. 1.4 - Evolução da produção brasileira de papel, em 1.000 ton.....	8
Fig. 2.1 – Arranjo produtivo atual e o proposto para a indústria de papel e celulose.....	13
Fig. 2.2 - Etapas do processo de produção de papel e celulose e os resíduos gerados.....	20
Fig. 2.3 - Processo de recuperação de químicos e energia.....	22
Fig. 2.4 - Vista de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel de celulose.....	23
Fig. 2.5 - Representação esquemática da estrutura de uma fibra proveniente da madeira, comparando suas resistências à tração em diversas etapas do processamento da madeira.	25
Fig. 2.6 - Exemplos de (a) Fibras vegetais. (b) Fibras minerais (c) Fibras animais.	31
Fig. 2.7 – Exemplo de placa cimentícia comercial.....	36
Fig. 2.8 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência.	40
Fig. 2.9 – Exemplo de execução do ensaio de squeeze-flow.....	42
Fig. 2.10 – Execução do ensaio de resistência a flexão em corpos de prova prismáticos.....	45
Fig. 2.11 – Exemplo de Execução do ensaio de resistência mecânica em placas.	47
Fig. 2.12 – Efeito Curling em placa cimentícia.....	49
Fig. 2.13 – Instrumentação da placa para acompanhamento do empenamento das bordas (curling).....	50
Fig. 3.1 – Fluxograma das principais etapas de execução do trabalho.	60
Fig. 3.2 – (a) Exemplo de tela metálica. (b) Exemplo de tela de plástico.	63
Fig. 3.3 – Esquema proposto para forma metálica.	75
Fig. 3.4 – Exemplo do processo de moldagem da placa cimentícias.	75
Fig. 3.5 – Exemplificação das medidas de espessura da placa.....	77
Fig. 3.6 – (a) Medida da linearidade das bordas (b) Medida do esquadro das bordas.....	78
Fig. 3.7 – Esquema proposto para ensaio de permeabilidade.....	78
Fig. 3.8 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão.	82

Fig. 4.1 – Resultado do ensaio de granulometria da areia utilizada.	87
Fig. 4.2 – Comparação da (%) retira da areia utilizada com os limites da norma brasileira.	88
Fig. 4.3 – Interação superficial do resíduo com uma matriz cimentícia.	92
Fig. 4.4 - Micrografias de MEV do lodo. (a) 30 x; (b) 500 x; (c) 1000 x; (d) 3000 x.....	92
Fig. 4.5 – Difração de Raio-X do lodo estudado.	93
Fig. 4.6 – Resultado do ensaio de consistência dos traços de argamassa simples.	96
Fig. 4.7 – Resultado do ensaio de teor de ar incorporado (%).	97
Fig. 4.8 – Resultados da retenção de água (%).	99
Fig. 4.9 – Resultado do ensaio de Squeeze Flow para uma taxa de 3 mm/s.	101
Fig. 4.10 - Resultado do ensaio de squeeze flow para uma taxa de 0,1 mm/s.....	101
Fig. 4.11 – Faixas de agrupamento de característica reológica de argamassas proposto por ENGMANN et al, 2005.....	102
Fig. 4.12 – Resultados da densidade de massa no estado endurecido, em g/cm ³	104
Fig. 4.13 - Resultados do coeficiente de capilaridade médio no estado endurecido, em g/dm ² .min ^{1/2}	106
Fig. 4.14 - Resultados compilados da resistência mecânica no estado endurecido, em MPa	108
Fig. 4.15 – Comparativo dos ensaios realizados com argamassa simples.....	110
Fig. 4.16 – Face inferior da placa a no estado natural antes do ensaio de permeabilidade.	115
Fig. 4.17 – Face inferior da placa após ensaio de permeabilidade – TIPO 1.	116
Fig. 4.18 – Face inferior da placa após ensaio de permeabilidade – TIPO 2.	116
Fig. 4.19 – Variação do I _p nos traços analisados.....	119
Fig. 4.20 – Resultados da densidade aparente média, em g/cm ³ , nos traços avaliados.	121
Fig. 4.21 - Resultados da absorção de água das placas, em %, nos diferentes traços avaliados.....	121
Fig. 4.22 – Resultados da resistência mecânica (MPa) para os traços de referência.	122
Fig. 4.23 - Resultados da resistência mecânica (MPa) para o traço PTIAF.	124
Fig. 4.24 - Resultados da resistência mecânica (MPa) para o traço PTIF.....	125
Fig. 4.25 – Efeito comparativo da resistência mecânica em placas cimentícias.....	126
Fig. 4.26 – Coeficiente de durabilidade proposto pela NBR 15498/2016.	127

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1 – Principais tipos de resíduos gerados e suas potencialidades de uso na construção civil. (adaptado de Pappu et al, 2007).....	16
Tab. 2.2 - Produção mundial de Papel e Celulose, em mil ton.	18
Tab. 3.1 – Caracterização química e física do cimento utilizado.	67
Tab. 3.2 – Resultados das análises referentes a cal.	67
Tab. 3.3 – Tabela demonstrativa dos traços para realização dos ensaios tecnológicos em argamassas.	70
Tab. 3.4 – Ensaio realizado no estado fresco e suas respectivas normas técnicas.	71
Tab. 3.6 – Possibilidades de traço das placas cimentícias.....	76
Tab. 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo.	88
Tab. 4.2 – Resultado do ensaio de granulometria do resíduo utilizado.	89
Tab. 4.3 – Resultados da massa específica (g/cm^3) e teor de umidade (%).	90
Tab. 4.4 – Resultado da pozzolanicidade do resíduo.....	90
Tab. 4.5 – Faixas de atividade pozzolânica propostas por Lúxan, 1989.	91
Tab. 4.6 - Caracterização química por EDX do resíduo da produção de papel em % de componente.....	91
Tab. 4.7 – Caracterização do material de reforço segundo NBR 10122/2014.....	94
Tab. 4.8 – Resultados do ensaio de caracterização dos materiais de reforço.....	94
Tab. 4.9 – Resultados ampliados da densidade de massa no estado endurecido, em g/cm^3	104
Tab. 4.10 - Resultados do coeficiente de capilaridade médio, em $\text{g}/\text{dm}^2.\text{min}^{1/2}$	105
Tab. 4.11 – Resultados da resistência mecânica média, em MPa.	107
Tab. 4.12 – Nomenclatura das placas cimentícias confeccionadas.....	112
Tab. 4.13 – Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço de referência com os dois tipos de material de reforço, em mm.	112
Tab. 4.14 - Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço com líquido fino e incorporador de ar usando os dois tipos de material de reforço, em mm.....	112
Tab. 4.15 - Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço com líquido fino usando os dois tipos de material de reforço, em mm.	113
Tab. 4.16 – Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.....	114

Tab. 4.17 - Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.....	114
Tab. 4.18 - Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.....	114
Tab. 4.19 – Resultado do índice de propagação de chamas (Ip)	118
Tab. 4.20 – Classificação do Ip médio (FONTE: NBR 9442/1988).....	118
Tab. 4.21 – Resultados dos ensaios de densidade aparente média e absorção de água.....	120
Tab. 4.22 – Subdivisão das placas por categorias, proposto pela NBR 15498/2016.	126
Tab. 4.23 – Classificação das placas analisadas neste trabalho.....	126
Tab. 4.24 – Resultados da variação dimensional das placas cimentícias.	128

RESUMO

O setor da construção civil é o maior consumidor de matérias-primas naturais do mundo, gerando grande impacto ambiental. No intuito de adequar a atividade realizada ao desenvolvimento sustentável proposto nas últimas décadas em todo o mundo, tem-se investido em pesquisas no setor. As placas cimentícias são estruturas finas (entre 6 a 40 mm) que tem na sua composição uma argamassa que pode ou não ser reforçada, sejam com pequenas barras e fios de aço, ou outro material. Estas placas têm variadas aplicações que vão desde elementos de vedação interna, acabamento externo e elemento de divisão sanitária. Já a indústria de papel e celulose, que está em constante crescimento, sendo responsável pela geração de uma grande quantidade de resíduos em suas etapas de produção que, geralmente, se dispõem em Estações de Tratamento de Efluentes para um posterior destino, como aterros sanitários, o que acaba onerando os custos finais do produto. Assim o objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de placa cimentícia com estrutura de reforço que utiliza uma metodologia inovadora de beneficiamento e incorporação do resíduo proveniente da indústria de papel e celulose, atendendo o produto final as especificações normativas brasileiras e melhorando os padrões comerciais dos modelos já existentes. Para tanto foi elaborado um programa experimental que visou a caracterização dos materiais utilizados, desenvolvimento de uma metodologia de beneficiamento do resíduo utilizado, desenvolvimento do traço (ensaios de argamassa simples no estado fresco e endurecido, escolha do material de reforço e aditivos incorporadores de ar), definição e execução do processo de produção das placas (PRF, PTIAF e PTIF) e os respectivos ensaios de aceitação do produto final (resistência mecânica, tolerância geométrica, absorção de água, densidade aparente, permeabilidade, resistência ao fogo, variação dimensional e durabilidade). Os resultados indicaram que o uso do resíduo na forma solubilizado em água (7,5% em solução de água), passando por peneiramento, denominado de líquido fino (PTIF), obteve os melhores resultados de conformação da placa, adotando o reforço com telas de plástico, atendendo aos critérios da norma brasileira. O uso de incorporadores de ar em combinação com o resíduo não apresentou resultados satisfatórios, principalmente quanto a resistência e durabilidade. Assim pode-se concluir que a metodologia adotada para incorporação e beneficiamento do resíduo da indústria de papel e celulose, em seu estado fino,

com reforço de tela de plástico tem viabilidade no uso e produção de placas cimentícias para utilização na construção civil.

Palavras-chave: Beneficiamento, incorporação, papel, placa cimentícia.

ABSTRACT

The construction industry is the largest consumer of natural raw materials in the world, generating great environmental impact. In order to adapt the activity carried out to sustainable development around the world, we have invested in research without sector. The cementitious plates are thin structures (6 to 40 mm) which have a composition as a framework or a restructuring, such as small bars and steel wires, or other material. These plates have varied applications from internal sealing elements, external finish and sanitary dividing element. It is already a pulp and paper industry, which is constantly growing, being responsible for the generation of a large amount of waste in its production stages, are generally available in Effluent Treatment Stations for a later destination, such as landfills sanitary, what has just sent the final costs of the product. Thus, the objective of this work in the development of cement board with reinforcement structure is to use an innovative methodology for processing and incorporating the proven waste from the pulp and paper industry, attending the final product as Brazilian normative specifications and improving the commercial patterns of the models already existing. For the development of materials used, development of a methodology to improve the waste used, development of a methodology to improve the waste used, development of a methodology to improve the waste used, development of a methodology to improve the waste used, development of a methodology of waste treatment used. (PRF, PTIAF and PTIF) and final product acceptance test systems (mechanical strength, geometric tolerance, water absorption, apparent density, permeability, fire resistance, dimensional durability). The results indicated that the use of the residue in the form solubilized in water (7.5% in water solution), through sieving, called fine liquid (PTIF), obtains the best results of the matter of the plate, adopting reinforcement with screens of plastic, meeting the criteria of the Brazilian standard. The use of air incorporators in combination with the residue did not present satisfactory results, mainly regarding the resistance and durability. Thus, it can be concluded that the methodology adopted for the incorporation and processing of waste from the pulp and paper industry, in its fine state, with reforestation of plastic screen without viability without use and production of cement slabs for use in civil construction.

Keywords: Processing, incorporation, sludge, paper, cement board.

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

O setor da construção civil tem crescido consideravelmente nas últimas décadas, sendo um dos ramos mais influentes em termos sociais e econômicos, prova disso são os indicadores de empregabilidade do setor que representa cerca de 8% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017). O setor sofreu nos últimos anos com a acentuada crise econômica que assolou o país, mas vem dando sinais de retomada devido ao retorno de programas sociais como o Minha Casa, minha vida do governo federal e os pacotes de privatizações de portos e aeroporto. Pode-se afirmar que, a atividade da construção civil, é uma das maiores consumidoras de recursos naturais do planeta, tanto na fabricação dos materiais aplicados, como no processo construtivo; areias, calcário, argila, água e energia são altamente consumidos em diferentes etapas (SAFIUDDIN et al, 2010). Somente para se ter uma ideia, segundo MEHTA (1994) o segundo produto mais consumido do mundo atualmente é o cimento, perdendo apenas para a água. Há ainda o fato do ramo da construção civil ser um dos vilões no que se refere à poluição ambiental, a própria indústria cimenteira é altamente poluidora e causa uma infinidade de danos ambientais, prova disso são os altos índices de dióxido de carbono que são liberados na produção de cimentos e outros aglomerantes. Outra situação é a quantidade de resíduos sólidos gerados nos canteiros de obras, que é assustadora, e representa grande prejuízo as construtoras pelo país no momento de seu descarte (COSTA et al, 2013).

A indústria de papel e celulose mostra-se altamente diversificada e de grande importância visto sua forte abrangência em diferentes setores. Dados da BRACELPA (2017) mostram que o Brasil é um dos maiores produtores do mundo e contribui significativamente para a exportação deste produto, principalmente com a celulose. Uma das explicações é o grande mercado consumidor interno além de disponibilidade de grandes áreas para plantação de madeira, produto necessário à extração da celulose. A indústria papeleira tem um estigma de altamente danosa ao meio ambiente devido a extração de recursos naturais como madeira, para extração da celulose, liberação de gases durante seu processo produtivo além de

grande quantidade de resíduos sólidos em diferentes etapas do processo produtivo (BOHARB et al, 2017).

Esta situação se confronta com a atual realidade, na qual vêm se destacando conceitos como desenvolvimento sustentável e responsabilidade socioambiental. Em países desenvolvidos essa preocupação já vem acontecendo a muitos anos, onde existem medidas protetivas significativas em relação a este e outros setores produtivos industriais, o que forçou muitas empresas a mudarem para países com legislação ambiental menos rígida (SCHIERSCH, 2013).

O Brasil destaca-se nesse setor pela implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, que é regida pela lei 12.305 de 2010 sendo considerada um marco regulatório do setor. Esta legislação trouxe um compilado de ideias, como por exemplo, a obrigatoriedade da execução do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), extinção dos vazadouros a céu aberto, ampliação dos conceitos de logística reversa e outros que fizeram o país figurar no mundo todo com uma legislação sólida e consolidada do setor de resíduos sólidos.

A NBR 10004/2004, define resíduos sólidos, como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Assim surgiu uma grande demanda por possibilidades economicamente viáveis para destinar resíduos sólidos, que vão desde os resíduos sólidos municipais (RSM) e os industriais (RSI), onde o descarte em aterros sanitários apesar de ser o mais usual e apresentar reduzido impacto ambiental, mas não é o adequado. O lançamento em aterros sanitários geram alguns impactos (menores que descarte e vazadouros a céu aberto) como os elevados custos para as indústrias, o que acabam afetando a rentabilidade de sua produção (BAREITHER et al, 2010). Uma solução, que pode ser economicamente viável e ecologicamente aceitável, é a incorporação destes resíduos em outras cadeias produtivas, seja no seu processo ou na própria constituição dos materiais.

Embora haja vários estudos envolvendo a reciclagem de resíduos para fins de construção civil, muitas pesquisas ainda precisam ser desenvolvidas de modo a se obter informações sobre o comportamento e as propriedades destes materiais ao longo do tempo, inclusive buscando o aprimoramento das técnicas de reciclagem. Este entendimento possibilitará estabelecer a real relação entre reciclagem, desempenho tecnológico e ecologia, contribuindo na busca por desenvolvimento sustentável, amparando-o em fundamentos científicos (U.S. Environmental Protection Agency, 2017).

Dentre os diversos materiais de construção existentes pode-se destacar a argamassa como um dos mais utilizados, seja para revestimento ou para fim de assentamento de alvenarias. O estudo de novas técnicas de aplicação e de preparo de novas misturas é de extrema importância para as grandes construtoras e incorporadoras do país, pois podem impactar financeiramente suas atividades, gerando economia de recursos o que é essencial a sobrevivência dessas empresas (AZEVEDO, 2015).

A argamassa armada é um material que tem grande aplicabilidade no setor da construção civil e vem sendo cada dia mais utilizada, nada mais é que uma argamassa (constituída de cimento e areia) com a presença de uma estrutura de reforço (podendo ser aço, plástico, fibras naturais e outros), geralmente destinada a elementos estruturais de pequena espessura, pois apresentam grande facilidade de manuseio e formatação (são elementos pré-moldados em geral), dispõe de algumas propriedades similares ao do concreto entretanto devido a sua pequena espessura apresentam limitações como o tamanho do agregado utilizado e cobertura por exemplo (TOPÇU e CANBAZ, 2015). Podem ter função desde estética até como elementos de transição estrutural e reforço, sendo inclusive objetos de dimensionamentos em alguns casos específicos. Este tipo de material é muito aplicado a estruturas em casca, além de pequenos reservatórios, divisórias de vedação, silos agrícolas e outras estruturas.

As placas cimentícias, nada mais são do que argamassas armadas, só que apresentam uma formatação mais rígida, quanto as dimensões, que podem variar de 6 mm a 40 mm de espessura, podem ser aplicadas na confecção de paredes internas e externas (pequenos acabamentos ou até mesmo steel frame), para revestimentos (forros e divisórias simples), construção de shafts para instalações prediais, brises entre outras. Apresentam vantagens, como a facilidade de

manuseio e moldagem (pode ser pré-moldada), com adição do resíduo em estudo tende a desempenhar um comportamento superior quanto ao conforto térmico e acústico. Outras vantagens serão analisadas no decorrer deste trabalho.

O estudo de aplicação de resíduos sólidos em outros processos produtivos, como os materiais de construção, é cada dia mais importante, pois representam diminuição significativa no impacto ambiental além de proporcionarem, em geral, redução do uso de alguma matéria prima já utilizada.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é verificar a viabilidade do desenvolvimento de placas cimentícias reforçada, incorporando o lodo primário da indústria de papel e celulose *in natura*, proveniente de uma indústria de papel localizada no Noroeste Fluminense.

Apesar das variadas aplicações que podem ser dadas a esta placa, neste trabalho optou-se pela destinação como elementos de vedação, que ao longo deste texto será devidamente justificado, verificando-se a potencialidade de uso em espaços internos e/ou externos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Caracterizar (física, química e mineralógica) os materiais utilizados nesta pesquisa de modo a permitir a escolha dos materiais adequados ao comportamento do compósito.
- Desenvolver metodologia inovadora que vise sua padronização para o beneficiamento e incorporação do resíduo da indústria de papel e celulose em materiais cimentícios.
- Identificar o melhor traço a ser utilizado, com as devidas proporções de materiais e usos de aditivos para adequação de propriedades do produto final.
- Definir a melhor estrutura de reforço para o produto final, de modo a atender as especificações normativas e de uso do produto final.

- Adequar as placas cimentícias para atendimento as normas de desempenho, possibilitando seu uso em larga escala na construção civil.
- Desenvolver uma metodologia para confecção das placas e delimitação de condições de produção de acordo com seu uso.
- Verificar o atendimento do produto final de acordo com as normas técnicas brasileiras quanto ao seu uso e durabilidade.

1.3 INEDITISMO DO TRABALHO

O uso do resíduo proveniente da indústria de papel em materiais de construção a base de cimento não é algo inédito no mundo científico, diversas pesquisas já foram executadas visando à substituição ou incorporação deste material em matrizes cimentícias e cerâmicas. Entretanto todos os estudos desenvolvidos até hoje utilizaram o beneficiamento deste resíduo, que tem forma de lama extremamente úmida após o processo de produção do papel, em via seca. Este processo tradicional consiste na secagem, moagem e homogeneização do resíduo, transformando-o em um pó que é incorporado seco a mistura.

O processo tradicional de uso deste resíduo é extremamente oneroso para as indústrias, pois geram custos excessivos com energia e transporte do material, o que em vezes pode inviabilizar sua utilização.

Assim, esta tese, tem como principal ineditismo o desenvolvimento de uma nova metodologia de beneficiamento e incorporação do resíduo da indústria de papel em materiais cimentícios, que se dará através da solubilização em água e incorporação por via úmida na matriz. Esta nova metodologia além de trazer benefícios de ordem econômica, acarreta também na redução de impactos ambientais devido ao mau descarte do mesmo no ambiente.

Outra contribuição inédita deste trabalho é o desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas, com uso do resíduo solubilizado, verificando a nova norma brasileira, além de criar parâmetros futuros de normatização deste produto para o mercado da construção civil.

1.4 JUSTIFICATIVA

A busca por uma construção civil mais eficiente traz à tona alguns questionamentos acerca da atual metodologia construtiva empregada no país. O uso das tradicionais alvenarias de vedação apresenta diversos problemas, como a alta taxa de retrabalho devido à ausência de alinhamento vertical (prumo), custos demasiados com camadas de revestimentos (chapisco, emboço e reboco), além da geração de enormes resíduos com a passagem das instalações prediais, onde é necessária a quebra de parte da alvenaria. Há ainda, em alguns casos, problemas relacionados ao desempenho termo acústico e excessivo peso próprio, que dependendo do bloco a ser empregado pode não ser aceitável.

Existem estudos que abordam os custos inerentes ao desperdício gerado pelo uso de alvenarias com blocos cerâmicos, que podem chegar à ordem de 10% do custo do serviço de alvenaria. Sendo assim a busca por metodologias inovadoras que reduzam estes custos é de extrema importância para o segmento da construção civil, racionalizando seus processos produtivos e aumentando a confiabilidade do setor.

A geração de resíduos sólidos municipais (RSM) é crescente no país, dados da BRACELPA de 2017 a produção de resíduos sólidos no país foi de 78,3 milhões de toneladas, dos quais 58,40% foram encaminhados a aterros sanitários, mostrando como ainda é deficiente este setor. Quanto à cobertura da coleta dos resíduos sólidos, dados mostram que 91% dos domicílios recebem esta coleta, conforme visto na Fig. 1.1.

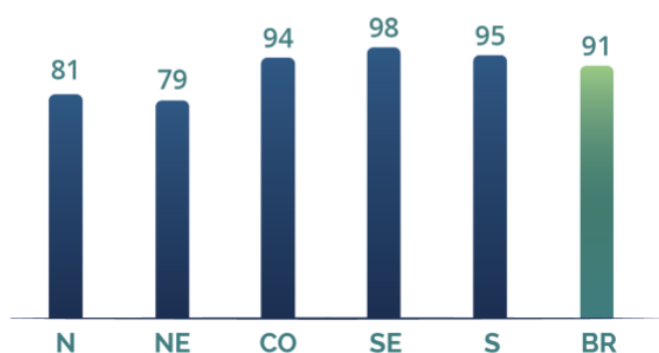


Fig. 1.1 - Cobertura da coleta de resíduos sólidos nos domicílios brasileiros, total e por região (N – Norte; NE – Nordeste; CO – Centro-Oeste; SE – Sudeste; S – Sul e BR – Brasil).

Fonte: BRACELPA, 2017.

Quanto a disposição dos resíduos coletados, os dados mostram que apesar da implementação da PNRS os vazadouros a céu aberto ainda representam significativa parte da destinação apresentando uma pequena redução entre os anos de 2015 e 2016, conforme visto na Fig. 1.2 da ABRACELPE.

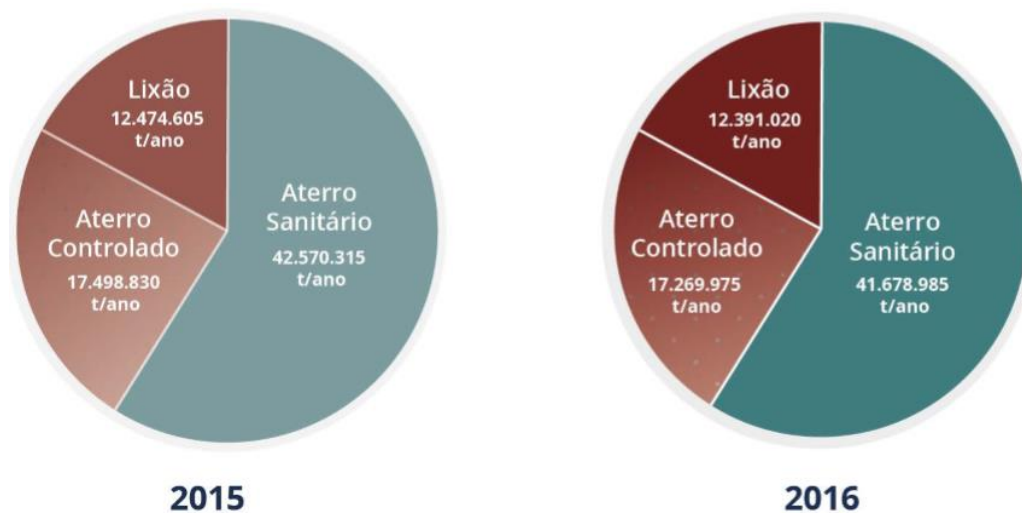


Fig. 1.2 - Disposição dos resíduos sólidos urbanos brasileiros, em ton/ano.

Fonte: BRACELPA, 2017.

O Brasil destaca-se no cenário mundial de produção de papel e celulose, dados da Associação Brasileira de Papel e Celulose (BRACELPA, 2017), mostram um constante ritmo de crescimento da produção de celulose, que tem como destino o mercado nacional e internacional, conforme visto na Fig. 1.3.

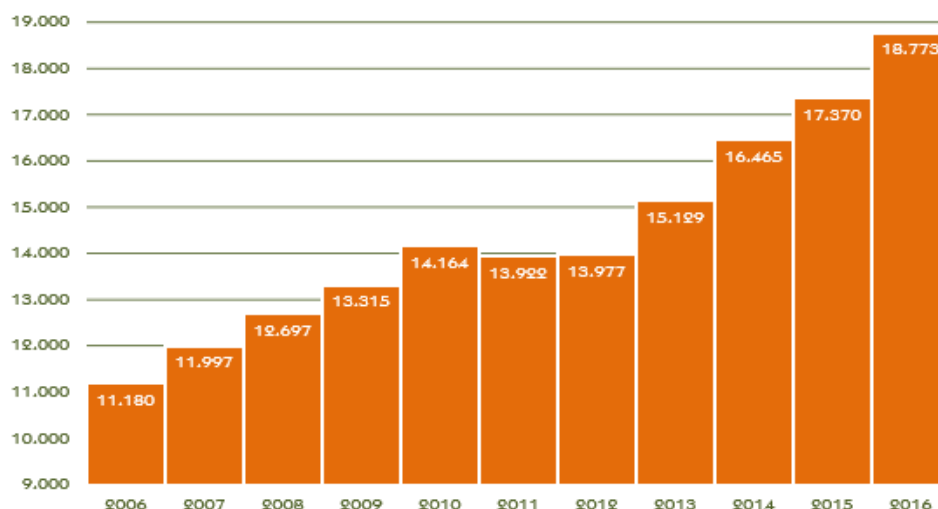


Fig. 1.3 – Evolução da produção brasileira de celulose, em 1.000 ton.

FONTE: BRACELPA, 2017.

Já quando se descreve a produção de papel os números sofrem uma redução, conforme visto na Fig. 1.4 devido à exportação da celulose, que não é toda consumida no Brasil e a conversão que não se dá em 100%.

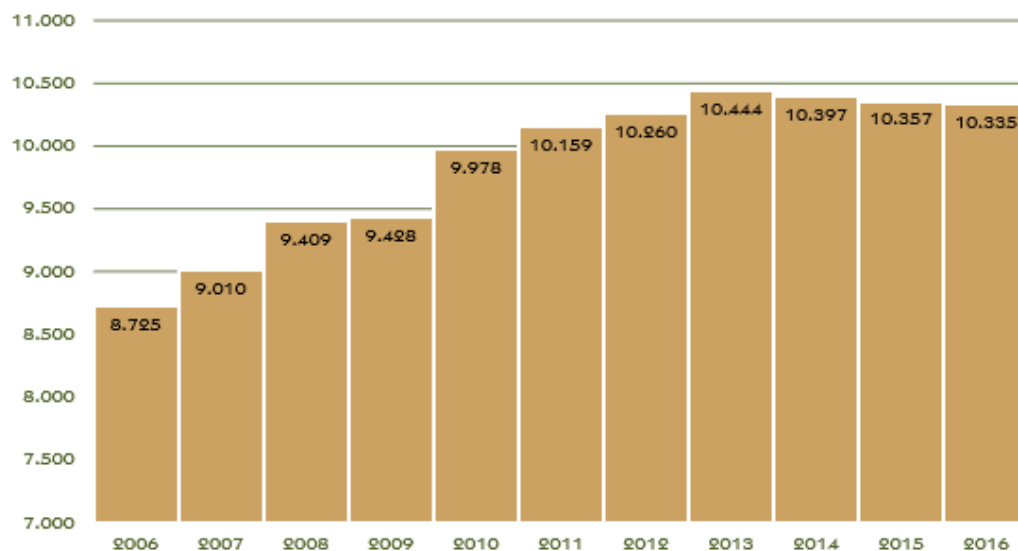


Fig. 1.4 - Evolução da produção brasileira de papel, em 1.000 ton.

FONTE: BRACELPA, 2017.

Logo este trabalho justifica-se sob a ótica da busca de materiais alternativos, ou melhor, metodologias construtivas inovadoras podem trazer significativa vantagem, como exemplo pode-se citar o Steel Frame ou divisórias simples de

placas cimentícias, propiciar um destino adequado aos resíduos gerados nas indústrias de papel e celulose, que tem apresentado crescente evolução ao longo dos últimos anos, além de permitir a redução nos custos destas empresas que ao invés de destinar os resíduos em aterros sanitários, meio de disposição mais comum para esse material, será utilizado em outro processo produtivo, desde que verificado sua viabilidade financeira.

O resíduo gerado apresenta-se extremamente úmido quando gerado, assunto esse que será abordado de maneira mais detalhada adiante, o que acarreta em elevados custos para seu transporte ou até mesmo o seu beneficiamento tradicional para uso em materiais de construção, como cerâmicos ou cimentícios, sendo assim necessita-se do desenvolvimento de uma nova metodologia de beneficiamento e incorporação deste material tornando-o mais viável economicamente, justificando o seu estudo.

Há ainda a questão de aceitação de novos produtos frente a norma técnica brasileira de desempenho e de placas de fibrocimento das edificações, que estipulam parâmetros das edificações para possibilitar conforto aos usuários e comparação com os valores obtidos dos principais produtos comerciais.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Após este capítulo que aborda a introdução ao tema, objetiva (gerais e específicos) e justificativa, o texto organiza-se na seguinte maneira:

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica dos principais temas relacionados, apresentando os principais conceitos e os trabalhos científicos de significativa importância, mostrando o atual estado da arte dos temas abordados neste texto;

No Capítulo 3, apresenta-se a minuciosa descrição dos materiais utilizados na etapa experimental além da sua respectiva descrição, mostrando os avanços das metodologias consagradas nas normas técnicas brasileiras e internacionais, em alguns casos possibilitando a execução dos objetivos desta tese.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais da pesquisa, sendo divididos nos subitens de acordo com seu agrupamento, todos os resultados são precedidos das respectivas discussões, sempre referenciadas com artigos técnicos

de alto impacto científico, mostrando os avanços que os mesmos desempenham no estado da arte do produto gerado.

Já o Capítulo 5 mostra as principais conclusões encontradas e indicando os pontos positivos e negativos visualizados durante a execução deste trabalho, além de sugerir propostas de continuidade de desenvolvimento do tema proposto.

O último Capítulo, de número 6, fornece as referências bibliográficas utilizadas para execução da tese. Ao final ainda são apresentados os anexos, que serviram de apoio à execução do trabalho.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

A questão ambiental tem tido sua importância aumentada a cada dia mais, principalmente nas últimas décadas, tendo inclusive superado a questão da qualidade, pois o que se discute hoje supera questões relacionadas somente ao produto final dando importância significativa a sustentabilidade (JOHN, 2000) (CYR et al, 2004).

A indústria de papel e celulose no mundo inteiro é de grande importância econômica e social, seja pela geração de renda e recursos e até mesmo de empregos. Estima-se que a produção e consumo de papel vem crescendo de maneira consistente nos últimos vinte anos, sendo que a taxa média verificada no mundo de cerca de 3,5% ao ano (BNDES, 2014).

Os números atuais do mercado brasileiro, oriundos da BRACELPA, denotam sua pujança, a produção de celulose vem crescendo de maneira consistente (Fig. 1.3) mesmo em meio à crise que assola o país devido à exportação deste produto, já a produção de papel sofreu uma queda nos últimos anos (Fig. 1.4), impactado pela crise, pois seus produtos em grande parte destinam-se ao mercado interno, entretanto apresentam uma tendência de crescimento nos próximos anos. Ainda segundo a BRACELPA a matéria-prima utilizada é em sua maioria de florestas plantadas especialmente de pinus e eucalipto, sendo a área plantada de aproximadamente 2,0 milhões de hectares, em sua maioria de eucalipto.

Tradicionalmente a indústria de papel e celulose está ligada a uma infinidade de problemas, o que acaba gerando uma imagem negativa perante a sociedade como um todo, mesmo sendo fonte geradora de recursos econômicos. Pode-se citar como exemplos de graves problemas ambientais ligados ao setor o grande consumo de recursos naturais, tais como madeira para produção, geração de uma quantidade considerável de resíduos sólidos, como efluentes, poluição de atmosfera com a geração de gases podendo assim causar danos ao solo, água e ar (DEMIREL e ALTIN, 2017). Entretanto esse panorama vem mudando nos países desenvolvidos onde a implantação de uma legislação rígida está presente, no caso brasileiro, a legislação vem se intensificando desde 2010 com a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

As indústrias de papel e celulose tem alta potencialidade poluidora do ambiente devido a elevada descarga de material orgânico e outras substâncias tóxicas envolvidas no processo produtivo (que pode conter aditivos e outros produtos químicos), por isso necessita de especial atenção (TOCZLOWSKA-MAMINSKA et al, 2017).

A invenção do papel é atribuída a um membro da corte imperial chinesa, chamado Ts'aiLun, em 105 a.c. Desta época até 1798, ano em que a primeira máquina de papel foi construída, todo o papel produzido no mundo foi feito manualmente. A máquina de papel foi inventada pelo francês Nicholas Louis Robert e aprimorada na Inglaterra por Bryan Donkin e John Gamble. O trabalho destes homens foi financiado pelos irmãos Fourdrinier e, por isso a máquina foi batizada como máquina de papel Fourdrinier (FARDIM, 2002).

Posteriormente outros tipos de máquinas foram desenvolvidos, seguindo a mesma metodologia de Fourdrinier. Uma máquina de papel tem um conjunto de componentes que consiste em: caixa de entrada, seção de formatação da folha, seção de prensagem, seção de secagem, seção de tratamento superficial (opcional) e seção de enrolamento (LAMBERG et al, 2012).

As etapas de fabricação e conversão do papel envolvem várias interações químicas de superfície. Refino, preparação de massa, revestimento e interações são importantes para a consolidação e desempenho do produto. Interações entre fibras e partículas coloidais, polímeros, minerais e corantes são fundamentais para a fabricação do papel. As matérias-primas utilizadas para a fabricação do papel podem ser resumidas em matérias-primas fibrosas e matérias-primas não fibrosas (LAMBERG et al, 2012) (FARDIM, 2002).

O arranjo da cadeia produtiva de papel é extremamente complexo pois envolve uma sequência de etapas interdependentes que precisam interagir entre si em constante sinergia. Existe uma proposição de alteração destas etapas (Fig. 2.1) onde os mercados exteriores e interiores irão interagir, entretanto ainda existem entraves governamentais para a implementação desta mudança, que envolvem quebra de barreiras fiscais. Essa alteração do arranjo produtivo ainda apresenta vantagens do ponto de vista ecológico, pois reduz a quantidade de resíduos gerados devido a otimização dos processos (BRACELPA, 2017).

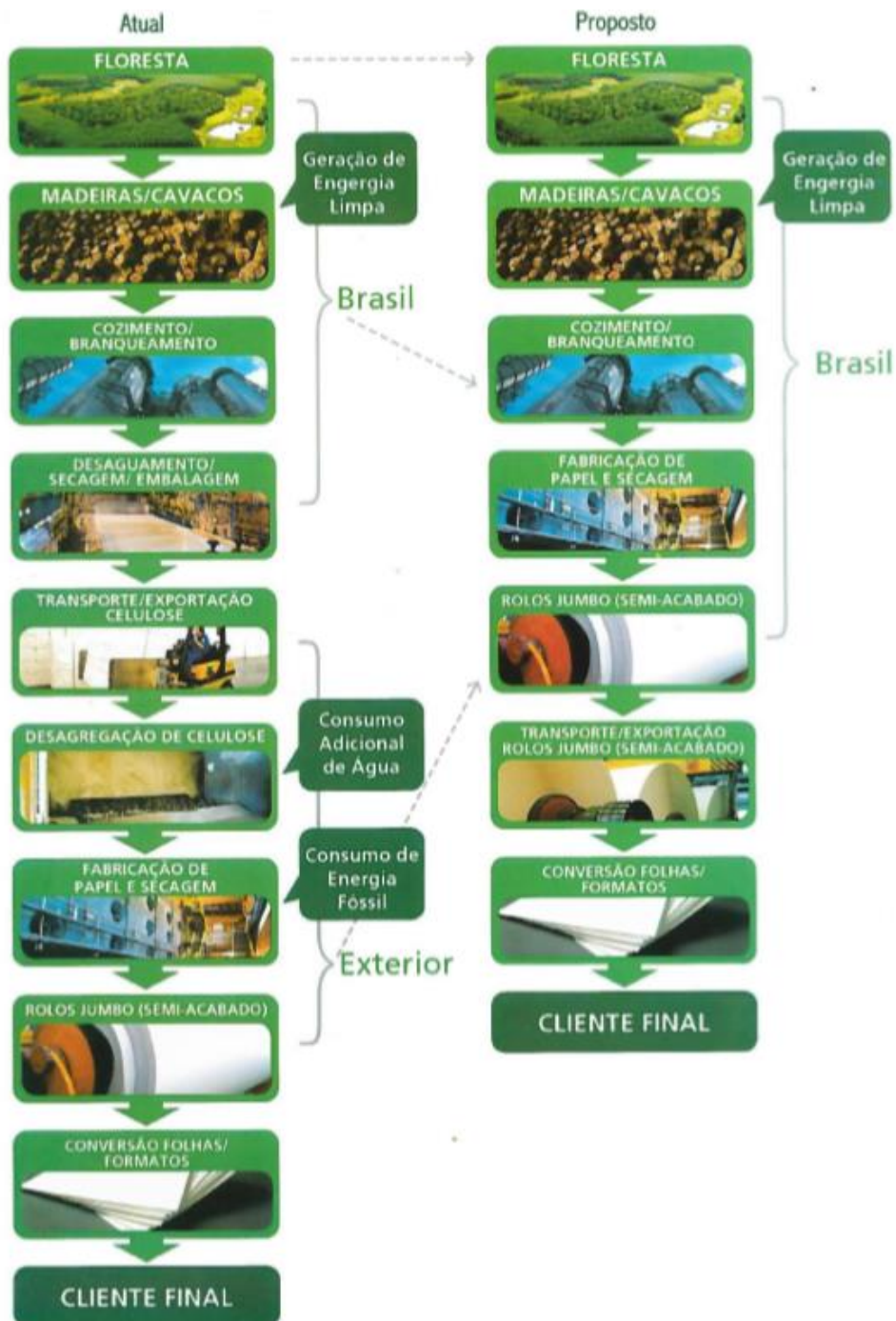


Fig. 2.1 – Arranjo produtivo atual e o proposto para a indústria de papel e celulose.

Fonte: BRACELPA, 2017.

Segundo LÉBEIS (2003) as matérias-primas fibrosas podem ser de origem vegetal, animal e artificial. As fibras usadas na fabricação de pasta celulósica para papel são obtidas, quase que exclusivamente, a partir de matérias-primas vegetais, sendo várias as fibras vegetais usadas na fabricação de pasta celulósica para papel, desde a sua invenção. Inicialmente foram utilizadas fibras que necessitavam

de menor processamento, como, por exemplo, trapos, fibras provenientes de linho de algodão. O aumento do consumo de papel ao longo dos anos levou à procura de novas fontes de fibras vegetais, encontrando-se na madeira uma excelente matéria-prima, entretanto devido aos entraves ambientais que a cada dia mais estão presentes o uso da madeira tem-se tornado um problema a ser enfrentado em diversos países do mundo, principalmente devido a legislação ambiental.

2.2 HISTÓRICO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NO BRASIL

O histórico nacional da indústria de papel e celulose remonta a época da chegada da família imperial ao Brasil, mas somente nos anos de 1952 tomou proporções significativas onde produziam-se cerca de 262 mil toneladas de todos os tipos de papel, com destaque para os de embalagem, que correspondiam a 48% do total. Já a produção de fibras totalizava 121 mil toneladas, das quais 45% de celulose, a maioria fibras longa, e 54% de pastas de alto rendimento (BRACELPA, 2017).

No período compreendido entre 1957 e 1973, a produção de papel aumentou cerca de quatro vezes, e o consumo três. Por outro lado, a produção de celulose e pastas de alto rendimento aumentou substancialmente mais que o consumo, possibilitando o início das exportações, em especial da celulose derivada do eucalipto (BNDES, 2014).

Entre 1974 e 1980, a produção brasileira de celulose cresceu 201%, atingindo 2,9 milhões de toneladas. No mesmo período, a fabricação de papéis aumentou 81%, com destaque para os papéis para embalagem e os de imprimir e escrever, os quais cresceram 98% e 84%, respectivamente (BNDES, 2014).

Nos anos 1980, a desaceleração da economia brasileira e mundial, aliada ao aumento do custo do capital e ao colapso do sistema internacional de crédito, fez a indústria reforçar seus esforços para exportar mais e reduzir custos. Sendo assim, o período 1986-1992 representou a consolidação da indústria de celulose e papel, foi nessa fase que se realizaram investimentos em modernização e em ganho de produtividade, quando a profissionalização da gestão das empresas se tornou a maior preocupação. Já nos anos 1990, a indústria de celulose e papel atingiu a maturidade e passou a ter seu avanço ditado pelo mercado e pelas necessidades

de expansão das empresas, e não mais pelas exigências do desenvolvimento planejado do país. Para os grandes do setor, o BNDES deixou de ser o alicerce principal e passou a constituir uma alternativa de financiamento, com os demais instrumentos disponíveis no mercado (BNDES, 2014).

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a NBR 10004/2004, resíduos sólidos são aqueles que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Ainda segundo a norma brasileira, os resíduos sólidos são classificados em três classes:

- Resíduos classe I – Perigosos: São aqueles que apresentam riscos à saúde pública em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Resíduos classe II A – Não inertes. Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007/2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006/2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor

A maioria das atividades industriais é geradora de resíduos. Os subprodutos recorrentes destas atividades são os que apresentam, à partida, maior dificuldade

de manuseamento, pela sua complexidade e potencial toxicidade (RAUPP, 2006). Ainda assim, estes resíduos podem ser utilizados em substituição aos materiais convencionais ou até mesmo no desenvolvimento de novos produtos.

A viabilidade da utilização dos resíduos depende de fatores como: proximidade da instalação de processamento, custo do transporte, volume de resíduos disponíveis para o reprocessamento e custo de estocagem, caso seja necessário. Uma criteriosa análise destes fatores é fundamental antes que qualquer estudo acerca da utilização de resíduos sólidos em materiais ou novos processos de produção (GOVIDAN, 2016).

O crescente crescimento populacional aliado ao aumento das taxas de urbanização, longevidade e inovações tecnológica recorrentes contribuíram significativamente para o incremento da produção de resíduos sólidos em torno do mundo, oriundos de diferentes fontes (SAFIUDDIN et al, 2010).

A nível mundial a geração de resíduos sólidos foi de 12 bilhões de toneladas no ano de 2002 (PAPPU et al, 2007), onde deste valor, 11 bilhões de toneladas são os classificados como industriais e o restante são os chamados resíduos sólidos municipais, oriundo do uso doméstico. Espera-se que em torno de 19 bilhões de toneladas de resíduos sólidos sejam gerados anualmente até 2025 (YOSHIZAWA et al, 2004).

A Tab. 2.1 mostra os principais tipos de resíduos gerados e seu respectivo potencial de uso.

Tab. 2.1 – Principais tipos de resíduos gerados e suas potencialidades de uso na construção civil. (adaptado de Pappu et al, 2007).

Tipo de Resíduo	Detalhe da fonte geradora	Potencial de uso
Agro-resíduos (orgânicos)	Bagaço, arroz e palha e casca de trigo, desperdício de serra, casca de nozes, juta, sisal, caule de algodão, resíduos vegetais	Placas de cimento, painéis de partículas, painéis de isolamento, painéis de parede, folhas de telhado, aglutinante, painéis de construção fibrosos, tijolos, cimento à prova de ácido, fibra de coco, compósitos reforçados, compósitos de polímero

Resíduos industriais (inorgânicos)	Resíduos de combustão de carvão, escória de aço, lama vermelha de bauxita, detritos de construção	Tijolos, blocos, azulejos, cimento, pintura, agregados finos e grosseiros, produtos de substituição de madeira, produtos cerâmicos
Mineração / resíduos minerais	Lavagem de carvão, resíduos de mineração de resíduos de indústrias de ferro, cobre, zinco, ouro e alumínio	Tijolos, agregados leves e graudos, azulejos
Resíduos não perigosos	Resíduos de gesso, lamas de cal, vidro quebrado e cerâmica, resíduos de processamento de mármore, resíduo da indústria de papel e celulose.	Blocos, tijolos, clínquer, aglutinante hidráulico, placas de gesso fibroso, gesso, cimento super-sulfatado, concreto argamassas e placas cimentícias.
Resíduos perigosos	Materiais de jateamento contaminado, resíduos de galvanização, resíduos metalúrgicos, resíduos de curtume.	Placas, tijolos, cimento, cerâmica, azulejos (todos com ressalvas)

A determinação de dados quantitativos dos resíduos, como a quantidade gerada e grau de homogeneidade temporal, locais de produção e perigosidade, também assumem importância relevante na definição da potencialidade de reutilização (RAUPP, 2006). Faz-se necessária a obtenção de informações imprescindíveis sobre os subprodutos a fim de que sejam formuladas estratégias de reciclagem viáveis, tanto do ponto de vista ambiental quanto do socioeconômico. Para tal, deve-se proceder à realização de métodos e ensaios para a caracterização físico-química, além do estudo e compreensão do processo que dá origem ao resíduo (AUBERT et al, 2006).

Quanto à incorporação de resíduos em materiais de construção ou técnicas construtivas, há trabalhos como o de Menezes *et al.* (2009), que estudaram o aproveitamento de resíduos provenientes da construção civil na produção de argamassas. Costa *et al.* (2013) desenvolveram um projeto para analisar o efeito

da adição de escória de forno de panela, resíduo da indústria siderúrgica, no clínquer Portland, a fim de se obter um cimento com menor impacto ambiental.

Assim existe hoje uma infinidade de pesquisas concluídas e em andamento acerca de reutilização de resíduos sólidos, municipais e industriais, em diversos materiais de construção civil, porém várias destas pesquisas mostram-se inconsistentes devido à ausência de análise de viabilidade do quantitativo de material gerado, custos adicionais além de estudos complementarem, como de degradação destes materiais, que são imprescindíveis ao sucesso de um novo produto ao mercado.

2.4 RESÍDUOS PROVENIENTES DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

O Brasil é um dos maiores produtores de papel e celulose, segundo dados da BRACELPA (Tab. 2.2), essa posição de destaque no cenário mundial torna esse setor extremamente importante para o desenvolvimento do país.

Tab. 2.2 - Produção mundial de Papel e Celulose, em mil ton.

CELULOSE		PAPEL	
País	mil toneladas	País	mil toneladas
1. EUA	50.351	1. China	102.500
2. China	18.198	2. EUA	74.375
3. Canadá	17.073	3. Japão	26.083
4. Brasil *	13.977	4. Alemanha	22.630
5. Suécia	11.672	5. Suécia	11.417
6. Finlândia	10.237	6. Coreia do Sul	11.333
7. Japão	8.642	7. Canadá	10.751
8. Rússia	7.519	8. Finlândia	10.694
9. Indonésia	6.710	9. Brasil	10.260
10. Chile	5.155	10. Indonésia	10.247
11. Índia	4.095	11. Índia	10.242
12. Alemanha	2.636	12. Itália	8.664
Demais	10.376	Demais	90.789
TOTAL MUNDO	166.641	TOTAL MUNDO	399.985

Fonte: Associação Brasileira de Papel e Celulose, 2014.

A posição consolidada do Brasil, e mostrada na Tab. 2.2, é fruto de uma série de políticas governamentais aplicadas ao setor, porém sofreu com o atual cenário econômico do país. A elevada quantidade de produto gerado por esta indústria traz à tona o grande problema ambiental que deve ser enfrentado pelas

mesmas durante seu descarte, principalmente para atendimento a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que instituiu uma legislação mais restritiva a este descarte.

A instalação e operação de novas plantas industriais passa por um rigoroso processo de supervisão, o que acarretou em aumento significativo dos custos. Os elevados investimentos da indústria e o desenvolvimento econômico do Brasil nas últimas décadas, tiveram impactos expressivos na produção de celulose. O segmento praticamente dobrou o volume de celulose produzido nesse período, com um crescimento médio de 6,5% ao ano, que se justifica pela crescente demanda de exportação (MÜLLER, 2012).

Outra justificativa para esses números é o grande aumento na produtividade das florestas plantadas devido não só a fatores ambientais ou climáticos, mas também à organização do setor, aos avanços tecnológicos no que diz respeito à genética e biotecnologia e à realização de um planejamento socioambiental. De acordo com dados disponibilizados pela BRACELPA (2014), no ano de 2010, o país já contava com aproximadamente sete milhões de hectares de florestas destinadas à produção de celulose e papel.

No Brasil, as principais espécies utilizadas como matérias-primas são o eucalipto, seguido do pinus. O eucalipto é o mais utilizado por apresentar ótimas características em relação ao rápido crescimento da espécie, atingindo em média 30 metros de altura em apenas sete anos (RIBEIRO, 2010). Apresenta, ainda, boa proporção de fibras.

O desenvolvimento florestal inicia-se com a formação de mudas, passando pelo plantio e manutenção florestal até chegar ao corte e transporte. Após a colheita, a madeira é descascada e picada em pequenos pedaços, que recebem o nome de cavacos. Em seguida, os cavacos são selecionados para a remoção de lascas e serragens e, depois, submetidos a processos mecânicos e químicos para a produção da celulose (BRACELPA, 2014).

O objetivo destes processos é a remoção da lignina, presente nas fibras da madeira para dar consistência e densidade, sem afetá-las, e gerando o máximo rendimento possível em fibras úteis. O processo mais tradicional para esta separação é o químico, conhecido como Processo *Kraft* (força, em alemão) este processo é utilizado por cerca de 98% das empresas no Brasil. Esse processo também é conhecido como “sulfato”, pois é utilizado o sulfato de sódio (Na_2SO_4)

para reposição das perdas dos compostos químicos inorgânicos, durante a recuperação química do licor negro no processo (MÜLLER, 2012).

A Fig. 2.2 mostra o processo detalhado de produção de papel e celulose pelo método Kraft, similar a indústria que foi utilizada neste trabalho, e todos os principais resíduos gerados nas respectivas etapas de produção (mostrados na cor vermelha e azul).

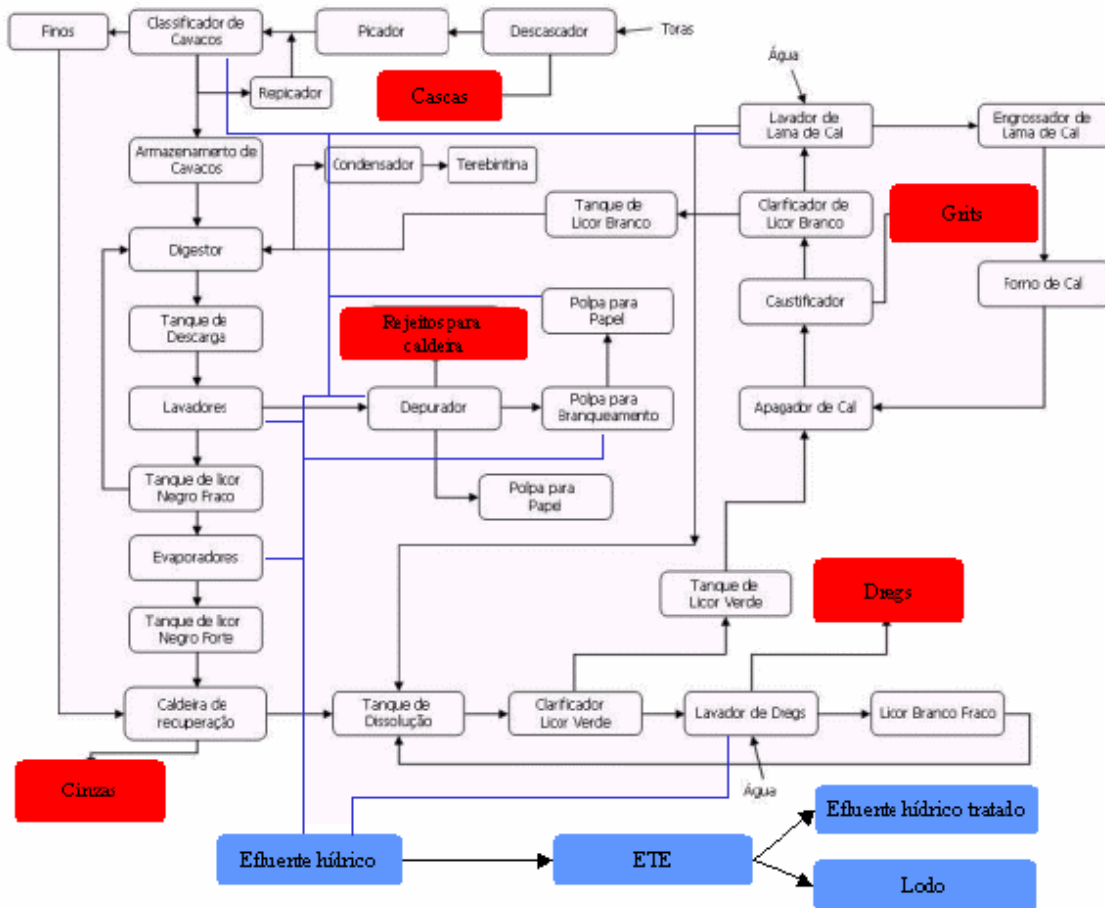


Fig. 2.2 - Etapas do processo de produção de papel e celulose e os resíduos gerados.

Fonte: PAIVA, 2007

Na primeira etapa, os cavacos de madeira são dissolvidos por meio de um cozimento com soda cáustica líquida (conhecida como Licor Branco), sob alta temperatura e pressão em um digestor contínuo, por cerca de 4 horas. O digestor descarrega pelo fundo, constantemente, a pasta de celulose já cozida e, no meio, é extraído o licor negro. O licor negro é constituído de madeira dissolvida que não se transformou em celulose, além de grande parte da soda líquida utilizada.

A pasta de celulose, ainda marrom, é levada para as etapas posteriores de purificação, como a lavagem e depuração. A lavagem com água quente tem a finalidade de retirar os resíduos de licor negro e facilita o posterior branqueamento, reduzindo o consumo de alvejantes e tornando o efluente mais limpo. A depuração é um peneiramento da pasta de celulose para eliminação dos não cozidos de madeira.

A pasta resultante é a seguir branqueada por oxidação e destruição dos pigmentos de madeira, por exemplo, pela ação do dióxido de cloro (PINTO, 2011). Após o branqueamento, a pasta é novamente lavada e armazenada em torres de abastecimento para fabrico do papel ou convertidas em mantas secas para serem transportadas às fábricas.

Durante o processo de produção de papel são gerados resíduos em diferentes etapas do processo, como o *grits*, degress e a própria lama que é destinada a uma estação de tratamento de efluentes. Em geral esta lama gerada apresenta 50% do seu peso composto por água, além de outros elementos, sendo esta característica uma das mais prejudiciais à sua utilização (CUSIDÓ et al, 2015).

O *grits* é formado no processo de recuperação de químicos e energia, mostrado na Fig. 2.3, além dele são gerados outros resíduos durante a etapa de produção do papel.

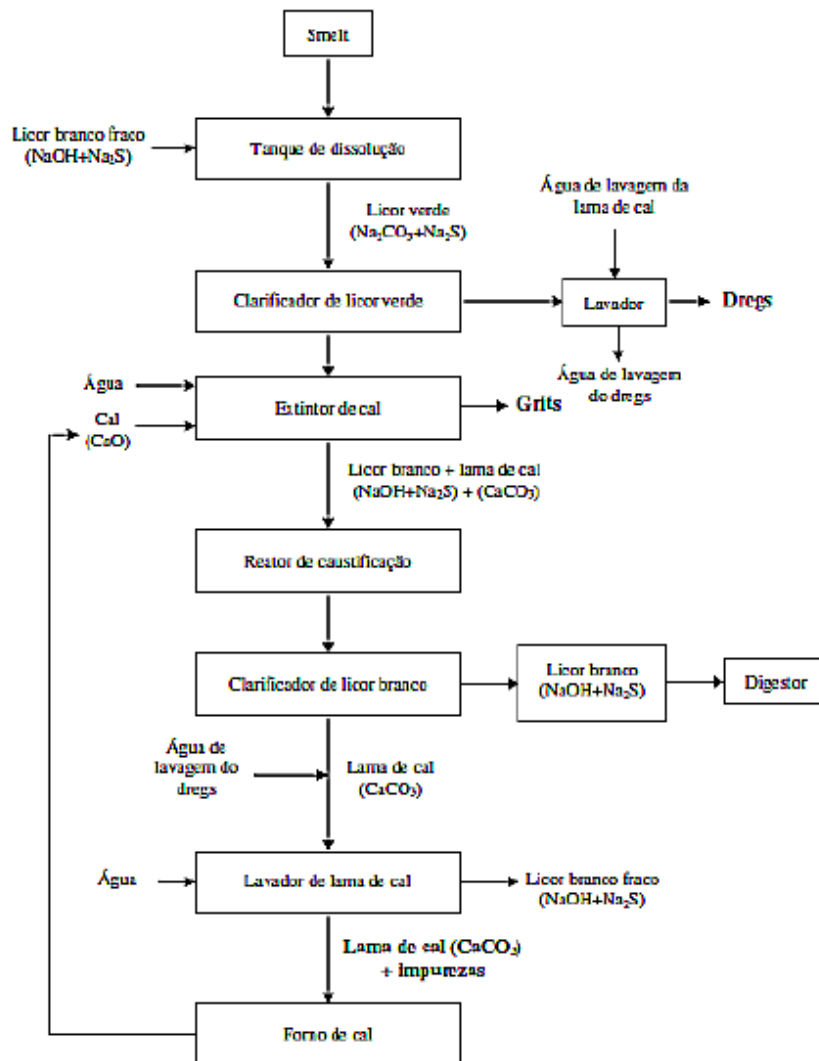


Fig. 2.3 - Processo de recuperação de químicos e energia.

Fonte: WOLFF, 2008.

As impurezas da cal adicionada, como areia, calcário, outras escórias e inertes, são retiradas do fundo do apagador, passando pelo classificador de resíduos e pelos chuveiros de lavagem. A estas impurezas, dá-se o nome de *grits*. O teor de umidade varia entre 8 e 22% (WOLFF, 2008)

Para cada tonelada de celulose produzida são gerados, no mínimo, em torno de 60 kg ou 6% de resíduos sólidos (RIBEIRO, 2010), sendo aproximadamente 0,3% correspondente ao *grits*. Na conjuntura atual, na qual o país produz cerca de 14 milhões de toneladas de celulose, estima-se que sejam produzidos, por ano, 42 mil toneladas de *grits* por todo o Brasil.

Conforme observado na Fig. 2.2 são gerados diversos resíduos durante diferentes etapas. O resíduo que será utilizado neste trabalho é o lodo que pode ser dividido em primário, secundário ou terciário. O lodo primário é o material

sedimentado nos decantadores primários do sistema de tratamento de efluentes, tem como constituintes fibras, areia, caulim, celulose e outros minerais. Já o lodo secundário tem a presença de material orgânico solúvel, rico em nutrientes como fósforo e potássio. O terciário é gerado através de precipitação química, normalmente com sulfato de alumínio e algum polieletrólito (PAIVA, 2007).

Assim a diferença entre a caracterização do lodo gerado (primário, secundário e terciário) dar-se-á em função do nível de tratamento existente no tanque de decantação. A grande maioria das indústrias brasileiras adota o tratamento a nível primário, devido aos custos envolvidos no processo, e o resíduo utilizado neste trabalho será deste tipo.

Os efluentes hídricos, com uma considerável quantidade de sólidos em suspensão, da produção de celulose e papel são enviados a uma Estação de Tratamento de Efluentes – E.T.E. (ZUPANCIC, 2013), podendo ser observado na Fig. 2.4 o exemplo da ETE da indústria pesquisada neste trabalho, existente em geral dentro da própria indústria, onde segue para o tratamento primário, secundário e terciário, estes dois últimos em alguns casos, denominando-se assim o nome do lodo, que no nosso caso, o primário, é oriundo da retirada de sólidos grosseiros pelo processo de gradeamento e decantação simples.



Fig. 2.4 - Vista de uma estação de tratamento de efluentes de uma indústria de papel de celulose.

Fonte: Próprio Autor.

Segundo a literatura o lodo primário apresenta propriedades de isolamento termoacústico, tanto que sua aplicação na produção de blocos cerâmicos já foi

fruto de diversos trabalhos na literatura mundial e indica uma tendência para seu uso em outros materiais (PINHEIRO, 2008).

Este lodo apresenta-se com um aspecto visual peculiar, extremamente úmido (entre 50% e 60%) na coloração cinza, sendo constituído na grande parte de caulim e celulose, além de outros materiais que irão variar de acordo com o tipo de papel produzido (CUSIDÓ et al, 2015). As indústrias geralmente destinam este material, após a estocagem nas ETE, para aterros sanitários onde são dispostos, salvo em alguns casos onde já são utilizados em outras indústrias. Sendo assim, os custos com esse transporte, estocagem e destino devem ser levados em conta na hora de se apurar a viabilidade (VIEIRA et al, 2016).

Outro fator quanto a viabilidade de uso é a quantidade de material gerado, um resíduo para ser utilizado em outra cadeia produtiva deve ter sua produção em uma elevada proporção, justificando assim os custos de seu uso. No caso do resíduo da indústria de papel, este trabalho, já justificou amplamente através de números a significância deste setor denotando-se assim as elevadas quantidades geradas destes resíduos, viabilizando, neste aspecto, a utilização do mesmo (MONTE et al, 2009).

2.5 CELULOSE

A celulose é o principal componente das fibras vegetais, é constituída de dois núcleos químicos bastantes similares entre si, que se reúnem formando pares. Esses pares se repetem por “n” vezes, formando cadeias cujo tamanho varia em função da origem da celulose, da idade e de fatores ambientais. É possível encontrar cadeias de 200 até 10.000 unidades repetitivas, sendo comuns os valores de 600 a 2.000 (MAROUSEK et al, 2015).

Ainda de acordo com LÉBEIS (2003), as células vegetais, por terem forma alongada e de pequeno diâmetro (finas), são frequentemente chamadas de “fibras”, sendo que a celulose é um dos seus principais componentes. A lignina e a hemicelulose são outros componentes relevantes encontrados nas células vegetais. As fibras podem ser consideradas cilindros ocos. Conforme o tipo de madeira, podem variar em largura, diâmetro, resistência e flexibilidade, e, dependendo do tipo de cozimento a que foram submetidas, variam também em rigidez e resistência ao tratamento mecânico.

AGOPYAN (1992) efetuou uma análise sobre as fibras vegetais disponíveis no Brasil e a possibilidade do seu emprego na construção civil, destacando a importância do conhecimento da sua disposição no território nacional e sua quantidade disponível para uso. A avaliação das principais características físicas, valores, durabilidade e possibilidade de cultivo no Brasil, definiu as mais adequadas ao uso como método de reforço de matrizes cimentícias, em comparação a outras fibras já utilizadas, como as de amianto e as de polipropileno, usadas largamente na construção civil. Por seu custo reduzido, larga disponibilidade e atributos adequados ao emprego como contribuição, os resíduos provenientes da indústria de fibras vegetais são vistos como extraordinária opção para produção de fibrocimentos alternativos nos países em desenvolvimento (SAVASTANO Jr., 2000).

O que se chama em geral de fibra é um conjunto de filamentos individuais, formados por fibrilas e unidas por espécies químicas orgânicas não cristalinas (lignina e hemicelulose). As fibrilas são compostas por moléculas de celulose e estão orientadas em ângulos distintos, formando as diversas camadas que compõem a macrofibra. Assim, de forma simplificada, a denominação “macrofibra” é dada ao conjunto de filamentos, compostos preferencialmente por moléculas de celulose e unidos por hemicelulose e lignina. Em função de sua maior cristalinidade e do seu alto grau de polimerização (GP), a celulose, costuma apresentar uma maior estabilidade aos efeitos da degradação, seja ela mecânica, química ou térmica, quando comparadas aos componentes não-celulósicos co-formadores das fibras, observadas na Fig. 2.5 (SILVA, 2003) (MAROUSEK et al, 2015).

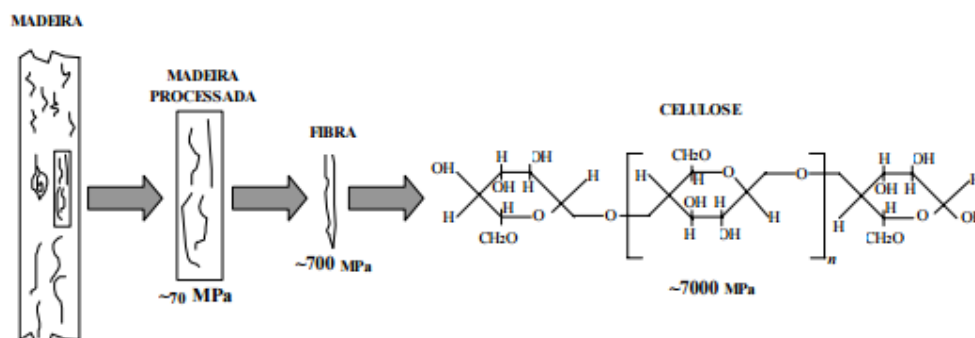


Fig. 2.5 - Representação esquemática da estrutura de uma fibra proveniente da madeira, comparando suas resistências à tração em diversas etapas do processamento da madeira.

Fonte: SILVA, 2003

2.6 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.

A utilização dos resíduos provenientes da indústria de papel e celulose em materiais de construção tem precedentes em todo o mundo, devido a diversidade de seu parque produtivo e necessidades ambientais, sendo mais diversificada nos países desenvolvidos. Começando uma análise pelos países europeus, trabalhos desenvolvidos na Alemanha (GELLER e BIENERT, 1993) (JUNGE, 2000) (KHOLER, 1988) e na Itália (TENAGLIA et al, 1992) (ZANI et al, 1990) ajudaram a contribuir significativamente para o atual estado da arte do uso deste resíduo, aplicando-os basicamente em materiais cerâmicos e fazendo uma análise da interação do mesmo com a massa argilosa constituinte.

Mais recentemente, outros estudos aprofundaram a incorporação deste resíduo em materiais a base de cimento, como concreto e argamassas, estes estudos apresentaram significativo avanço pois demonstraram o comportamento do resíduo frente ao processo de hidratação do cimento, que é extremamente particular. O aprofundamento desta análise será dado no último item deste capítulo onde iremos abordar alguns trabalhos selecionados que estudaram esta interação de maneira mais aprofundada.

Em comum, a maioria destes trabalhos, demonstraram a grande dificuldade de incorporação deste resíduo devido a sua excessiva umidade, que dificulta a estabilização do mesmo dentro da matriz, dificulta o transporte (tornando-o mais oneroso) e torna o processo de beneficiamento, que em todos os trabalhos se deu via secagem do resíduo, muito dispendioso em termos de custos financeiros e energéticos, o que pode inviabilizar a sua aplicação. Sendo assim esta tese contribui de maneira significativa através da padronização de uma metodologia que não se adequa na secagem do material, utilizando-o no estado natural de geração, ou seja, úmido.

2.7 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO EM OUTRAS FINALIDADES

A importância do material estudado evidencia-se na diversificação das aplicações que podem ser dadas ao mesmo (Tab. 2.1), prova disso que não se restringe seus estudos na construção civil, sendo assim são apresentados alguns estudos, principalmente na área de aplicação de solos e na área geotécnica.

MACHADO, (2007) avaliou o emprego dos resíduos da indústria de celulose, em especial o *grits*, como estabilizantes do solo, visando a melhoria de subleitos de estradas florestais.

SILVA JUNIOR, W.S. (2010) avaliou, em laboratório, as propriedades físicas e mecânicas de misturas de solo, cal e resíduo da fabricação de papel, visando sua utilização rodoviária. Foram realizados ensaios de compactação, extremamente importante para avaliar desempenho de materiais geotécnicos, além de ensaios de compressão simples, diametral e triaxial. Foram escolhidos teores de 0 a 40% de incorporação de resíduo e teores de 0, 5 e 10% de cal. Avaliou-se também a rigidez do material mediante o módulo tangencial inicial e o módulo de resiliência. Os corpos de prova foram ensaiados sem imersão e após imersão em água de 4 horas, decorridos 7 dias de cura em câmara úmida. Posteriormente foi analisada a influência do tempo de cura para 0, 2, 7, 28 e 84 dias de permanência em câmara úmida. Foram executados ensaios de lixiviação e solubilização que demonstraram que o resíduo não apresenta nenhum perigo. Os resultados mostraram que a adição do resíduo e a influência da água agiram como agentes redutores das propriedades mecânicas. Entretanto as misturas de solo-cal e solo-cal-resíduo atendem as especificações técnicas da Stateofheart – Lime stabilization (TRB, 1987) oferecendo assim uma solução viável para a utilização destas misturas na construção rodoviária, além de verificar-se que um aumento no tempo de cura e teor de cal conduziu a valores maiores de aplicação destes resíduos em camadas de base e sub-base de pavimentos.

2.8 ARGAMASSA

Dentre os diversos materiais de construção existentes pode-se destacar a argamassa como um dos mais utilizados, seja para revestimento interno e externo ou para fim de assentamento de alvenarias. O estudo de novas técnicas de

aplicação e de preparo de novas misturas é de extrema importância para as grandes construtoras e incorporadoras do país, pois podem impactar financeiramente suas atividades, gerando economia de recursos o que é essencial a sobrevivência dessas empresas no atual cenário econômico (BOUMIZ et al, 1996).

A argamassa é um material compósito que tem como constituído tradicionalmente de cimento, areia e cal, podendo ter algum outro tipo de aditivo, que lhe confira melhora em alguma propriedade, como plastificantes e incorporadores de ar. Existem diversas classificações e divisões possíveis para as argamassas e uma das mais utilizadas é a que as subdivide em colante e para assentamento de blocos e revestimento de paredes e tetos (chamadas de múltiplo-uso).

A argamassa colante tem propriedades que lhe conferem aderência entre um substrato e algum material de revestimento, como piso ou revestimento cerâmico para parede. Já a argamassa denominada de múltiplo-uso é usada para assentamento de blocos (fazendo juntas horizontais e verticais) e execução de camadas de revestimento, como emboço e reboco de paredes e tetos. Para cada tipo de argamassa existem propriedades tecnológicas (estado fresco e endurecido) importantes para cada aplicação, que são normalizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (AZEVEDO et al, 2017).

O desenvolvimento de compostos cimentícios que utilizam a adição de algum resíduo industrial já vem sendo estudado ao longo dos últimos anos, inclusive tendo gerado patentes já comercializadas. Entretanto algumas aplicações ainda se mostram inovadoras, principalmente sob o aspecto do modo como são incorporadas, visto que esta etapa (beneficiamento do material) é custosa ao processo final principalmente quando tratamos de estruturas que podem sugerir necessidade de reforço, pela adição de fibras naturais ou de outros elementos, como barras de aço, incluindo um estudo da durabilidade e efeito de agente externo ao compósito (RANACHOWSKI e SCHABOWICZ, 2017).

2.9 ARGAMASSA ARMADA

A argamassa armada é um material que tem grande aplicabilidade no setor da construção civil e vem sendo a cada dia mais utilizada, nada mais é que uma

argamassa (constituída de cimento e areia) com a presença de armadura (formando uma tela), geralmente destinam-se a elementos estruturais de pequena espessura e apresentam grande facilidade de manuseio e formatação, tem algumas propriedades similares ao do concreto entretanto devido a sua pequena espessura apresentam limitações como tamanho do agregado utilizado e cobertura por exemplo (MEDDAH e BENCHEIKN, 2009). Podem ter função desde estética até como elementos de transição estrutural e reforço, sendo inclusive objetos de dimensionamentos. Este tipo de material é muito aplicado a estruturas em casca, além de pequenos reservatórios, silos agrícolas e outras estruturas (SIVARAJA et al, 2010) (BANTHIA et al, 2014).

Segundo (HANAI, 1992), em 1848, Joseph Louis Lambot desenvolveu na França o material chamado por ele de “fer-ciment”, que consistia em “uma rede ou conjunto de arames ou barras metálicas cimentadas junto com cimento hidráulico, de tal maneira a formar vigas e pranchas de qualquer tamanho desejado”. No entanto, o emprego desta tecnologia ficou restrito apenas na construção de pequenas embarcações e artefatos diversos. Em 1943, o engenheiro italiano Luigi Nervi iniciou experiências com o que ele denominou “ferro cimento” para construção de barcos de 150 t e 400 t para a Marinha Italiana. Ao longo dos anos, o engenheiro foi desenvolvendo sua técnica através da execução de projetos, como o armazém de sua própria empresa em 1946, o palácio de exposição de Turim em 1948 e o Palacete de Esportes de Roma em 1957, todos com elementos pré-moldados em argamassa armada.

No Brasil esta tecnologia começou a ser pesquisada e utilizada a partir da década de 1950 por um grupo de professores da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, influenciados por Nervi e desenvolveram o que atualmente chamamos de pré-moldados em argamassa armada. O arquiteto João Filgueiras Lima, passou a empregar argamassa armada em seus projetos de forma a tornar-se especialista, através de inovações tecnológicas e pela qualidade arquitetônica. Ele implantou o conceito de pré-fabricação em argamassa armada implantando os projetos “Fábrica de Escolas”; “Fábrica de Canais da Cedae”, no Rio de Janeiro e o desenvolvimento e construção da Rede Sara de hospitais (HANAI, 1992).

2.10 MATERIAIS COMPÓSITOS

Material compósito é definido como uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si e que quando combinados formam um material de engenharia útil, tendo na sua interface boas propriedades predeterminadas. (ASTM D3878-95)

O concreto, enquanto material compósito, e o cimento, como um de seus constituintes, são alguns dos materiais mais consumidos na construção civil. Atualmente o seu processo de fabricação gera considerável impacto ambiental e sua qualidade final depende de uma série de fatores, que vão deste a produção dos materiais constituintes do concreto até o seu processo de moldagem. (METHA; MONTEIRO, 2014)

Os materiais cimentícios estão presentes em diferentes etapas do processo de construção de uma edificação. Eles possuem diferentes graus de exposição ao ambiente dependendo da sua localização. Não obstante, apresentam diversas vantagens de utilização frente a outros materiais, sendo sua facilidade de moldagem e confecção uma das mais importantes.

Entretanto, são considerados não homogêneos e, predominantemente frágeis, possuem baixa resistência à tração, não apresentando a capacidade de suportar grandes deformações. Essa característica pode levar os materiais cimentícios à uma ruptura abrupta. (DESNERCK et al, 2015)

Para atenuar os efeitos da baixa resistência à tração e garantir a aplicabilidade dos materiais cimentícios em elementos estruturais, utiliza-se, com frequência, mecanismos de reforço do material, possibilitando uma ruptura menos brusca. Assim, os materiais compósitos servem de reforço para uma matriz constituída por outro material e são formados por três categorias diferentes: os fibrosos (consistem de fibras de um determinado material), os particulados (compostos de partículas macroscópicas de um material) e os laminados (constituídos de camadas de diferentes materiais, incluindo compósitos dos dois primeiros tipos, ou até mesmo materiais isotrópicos tradicionais). (REDDY, 1997)

2.11 MATERIAIS DE REFORÇO

O reforço em placas cimentícias pode ser feito com uso de fibras naturais (como fibras de vidro ou de celulose) ou com uso de telas, que podem ser metálicas, de plástico (argamassa armada) ou outro material. A determinação de qual material de reforço adotar passa pelo conhecimento das propriedades do compósito, neste trabalho a matriz é uma argamassa a base de cal e cimento e a definição do material de reforço passou por algumas análises que dependem de características mecânicas e de durabilidade.

2.11.1 REFORÇO COM FIBRAS NATURAIS

As fibras podem ser divididas em dois subtipos, as naturais e as artificiais. As fibras naturais, apresentam origens diversas (vegetal, mineral e animal – Fig. 2.6.a,b,c) (GUVEN, 2016) (PICKERING et al, 2016).



Fig. 2.6 - Exemplos de (a) Fibras vegetais. (b) Fibras minerais (c) Fibras animais.

Fonte: (THAKUR et al, 2014)

O uso de fibras minerais em materiais cimentícios é comum em telhas de fibrocimento, que apresentam como material de reforço fibras de amianto ou asbesto. As fibras de amianto, ou asbesto, são fibras minerais naturais abundantes, constituídas de silicatos minerais fibrosos cristalinos, e que exibem propriedades físicas e químicas únicas. (HANNANT, 1978) (COUTTS; WARDEN, 1992)

A geração de produtos à base de amianto passou por sérias restrições em diversos países devido ao risco de doenças respiratórias que a sua produção apresenta à população, sendo assim, há uma tendência pela redução de seu uso (SILVA, 2004). No ano de 2017 o Superior Tribunal Federal julgou uma ação que prevê a proibição do uso do amianto, ação esta que foi deferida pelo plenário,

passando produtos a base de amianto serem proibidos quanto ao uso e fabricação no país, logo a busca de soluções para este problema torna-se importante.

As fibras naturais têm influência sobre o impacto destes compósitos, melhorando assim a ductilidade e absorção de energia do material.

Entretanto, existem algumas desvantagens ligadas à sua utilização. A principal delas refere-se à durabilidade dos materiais cimentícios com incorporação de fibras naturais para reforço (SILVA, 2002) (BENTUR; MINDESS, 1990).

Para que o reforço seja eficiente deve-se levar em conta critérios básicos como, por exemplo, o aumento da resistência e da tenacidade dos compósitos, quando comparados com a matriz sem nenhum reforço. Todos esses efeitos dependem do comprimento da fibra, da sua orientação e da adesão interfacial fibra-matriz (SILVA, 2002).

Um dos grandes problemas no uso de materiais cimentícios como matrizes em compósitos reforçados com fibras naturais deve-se à alta alcalinidade apresentada pelos produtos hidratados. Existem estudos que visam a proteção das fibras, através da sua impregnação com substâncias, sua mineralização, ou a utilização de revestimentos externos como barreira física. Entretanto, não se tem um consenso sobre a real eficácia desses métodos. (AGOPYAN, 1992)

As soluções para o aumento da durabilidade das fibras devem, então, obrigatoriamente passar pela adoção de matrizes menos alcalinas que, hidratadas, não comprometem o desempenho da fibra como reforço ao longo do tempo.

Desta forma, pode-se explicar a agressividade da matriz pela presença de produtos alcalinos na água presente nos poros da matriz hidratada. A alta alcalinidade é de responsabilidade da portlandita $[Ca(OH)_2]$, que é liberada em grande quantidade no momento da hidratação do cimento. Existe ainda a contribuição de álcalis solúveis, como o óxido de potássio $[K_2O]$ e de sódio $[Na_2O]$.

Além da matriz, a estrutura interna do material cimentício com reforço e a interação entre seus componentes são extremamente importantes. A aderência entre a fibra e a matriz, zona de interface, influencia diretamente no desempenho do produto e na sua durabilidade. (SAVASTANO et al, 2003)

A aderência é influenciada pelas características atribuídas à zona de transição, que podem ser aperfeiçoadas com análise da morfologia e rugosidade da fibra, sua absorção e porosidade. A presença de grande quantidade de portlandita na matriz também influencia negativamente na interface fibra-matriz.

Assim, devido aos diversos fatores relativos a durabilidade e disponibilidade, o uso das fibras naturais foi descartada para este trabalho, visto que o produto a ser desenvolvido tem grande potencial de exposição ao ambiente e a agentes degradantes, como o meio externo, água, umidade, sol e outros que irão provavelmente influenciar negativamente na durabilidade final.

2.11.2 REFORÇO COM TELAS DE PLÁSTICO

As telas de plástico surgem como uma solução de reforço pois são compostas basicamente com polipropileno e apresentam propriedades mecânicas compatíveis com o que se espera de um material de reforço. Estes materiais apresentam elevado grau de deformação e facilidade de manipulação, devido ao tipo de ligações químicas existentes entre os monômeros do polímero, até o momento de ruptura (MITCHELL, 2014).

O uso de telas plásticas tem uma grande gama de aplicações que vão desde agricultura, agropecuária, piscicultura e construção civil, onde são utilizadas como estuque para argamassas de revestimento de parede, evitando trincas de retração, e material de reforço em diversos reparos estruturais.

Quanto as suas propriedades físico-mecânicas o seu uso deve ser pautado em elementos que confirmam a resistência mecânica necessária. Em geral as resistências das telas de plástico são compatíveis com o que se espera de seu uso e corrigem um grande problema do uso das fibras vegetais que são a grande variabilidade devido ao fato de serem um material natural além da questão ambiental levado ao momento de sua extração (LAYAPIDEVSKAYA e SHERSTNEV, 2016).

Um fator que deve ser levado em conta são propriedades como o ponto de amolecimento, pois este material poderá ser levado a altas temperaturas, em situações de incêndio, por exemplo, o que pode comprometer a integridade estrutural do produto e inviabiliza-lo para reforço. Há ainda a preocupação das transformações que ocorrem em algumas situações, como elevadas temperaturas e em ambientes agressivos (salinos e altamente concentrados com CO₂), pois este material pode liberar elementos tóxicos danosos aos usuários (LAYAPIDEVSKAYA e SHERSTNEV, 2016).

Tradicionalmente as telas de plásticos comercialmente utilizadas no Brasil apresentam-se com uma resistência mecânica compatível, apresentam um ponto de amolecimento aceitável e não liberam materiais tóxicos em condição de fogo.

2.11.3 REFORÇO COM TELAS METÁLICAS

O uso de telas metálicas pode ser uma opção de reforço em materiais compósitos cimentícios, tradicionalmente estas matrizes já apresentam bom desempenho quando trabalhados juntos, prova disso é o concreto armado, isso deve-se a diversos fatores como a aderência entre ambos materiais e coeficientes de dilatação similares que fazem com que o conjunto trabalhe de maneira mais eficiente.

Um problema recorrente no uso de materiais metálicos como reforço é quanto a durabilidade, pois devido a presença de CO₂ no interior da matriz, devido aos poros, essas estruturas sofrem um processo de oxidação que pode ser prejudicial ao reforço a que se propõem (ANTUNES e MASUERO, 2016).

Em geral, a trama metálica pode ser especificada para aplicação sobre o revestimento ou forro devido aos seus requisitos de proteção e sombreamento. Quando tensionado e ancorado na estrutura, pode resistir a esforços e solicitações resultantes de seu peso próprio e de cargas de trabalho, sem sofrer possíveis deformações que prejudiquem sua estabilidade. Também deve oferecer boa resistência ao impacto e permeabilidade adequada (MEDEIROS, 2008).

O uso de telas, que podem ser soldadas ou entrelaçadas por fios, na construção civil se difundiu principalmente devido às vantagens obtidas na substituição das armaduras convencionais, montadas no local de execução, para estruturas de concreto, por exemplo. No Brasil o uso destas armaduras soldadas, em forma de tela é recente, havendo muito espaço para o crescimento e pesquisas (GAVA, 2003).

As telas entrelaçadas por fios metálicos apresentam vantagens sob as soldadas pois tem uma menor espessura, o que facilita a aplicação desejada, que são placas cimentícias de baixa espessura além de manter o cobrimento necessário a correta proteção da armadura.

Não há necessidade de dimensionamento destas estruturas, visto que as mesmas não trabalham como um material plenamente armado, devido à baixa taxa

de aço e poucos esforços envolvidos (sem fins estruturais). Casos de dimensionamentos levariam a estruturas de armadura mínima que mesmo assim apresentaria elevada taxa para o fim desejado, prejudicando a finalidade do produto (ANTUNES e MASUERO, 2016).

Quanto as demais propriedades necessárias, como ponto de amolecimento, resistência mecânica e outras, apresentam em média melhores valores que as telas de plástico, entretanto quando analisadas em conjunto com matriz esse resultado podem sofrer algumas alterações (ANTUNES e MASUERO, 2016).

2.12 PLACAS CIMENTÍCIAS

As placas cimentícias com reforço são constituídas por argamassa com uma trama (que pode ser de diferentes materiais com fios metálicos ou plásticos), conferindo maior resistência à placa e possibilitando que atinja tamanhos maiores, pois a trama representa a parte mais rígida da estrutura, sendo habitualmente constituída com fios de 0,20 a 0,50 mm. Os fios geralmente são unidos para formar a trama (GAVA, 2003).

Toda chapa delgada que contenha cimento Portland na composição é chamada de cimentícia. O desenvolvimento destas placas remonta aos anos 70, mas só começaram a ser utilizadas em maior escala depois do desenvolvimento de tecnologia e avanço da chamada construção aa seco (AKHAVAN et al, 2017). Estas placas tem uma infinidade de aplicações que vão desde divisórias internas, revestimento externo, brises e forros além de apresentarem vantagens diversas como menor peso que uma alvenaria tradicional, ausência de revestimento se for o caso, melhor desempenho acústico e outros que serão descritas ao longo deste trabalho.

As placas são constituídas em geral de cimento, fibras de celulose ou sintéticas e agregados, como areia. Possuem dimensões variadas dependendo da sua aplicação e uso, podendo ter uma grande variação de tamanho e espessura, que em geral varia entre 16 a 36 mm, mais podem ter espessura aumentada dependendo do seu uso (KHORAMI et al, 2016).

Sua superfície pode ser simplesmente polida e usada diretamente ou receber pintura ao até mesmo algum tipo de revestimento (para áreas molhadas),

ou incorporação de algum tipo de aditivo químico para conferir a melhora de alguma propriedade. Entre as vantagens do uso das placas cimentícia (Fig. 2.7) pode-se destacar seu custo em comparação com outras metodologias de vedação, facilidade de fabricação e manuseio, propriedades mecânicas e físicas animadoras, além de oferecer relativa redução de manutenção, quando comparada a outros produtos.



Fig. 2.7 – Exemplo de placa cimentícia comercial.
Fonte: SPECK, 2014

O uso de algum material a mais na composição deste compósito pode garantir a ele a melhora de suas propriedades, como resistência, ou até mesmo melhora em propriedades de desempenho e uso, como a temperatura e resistência ao fogo. No caso desta pesquisa propõe-se a incorporação do lodo proveniente da indústria de papel e celulose neste produto, algo ainda não estudado, que devido a sua constituição natural, com fibras de celulose, e sua grande abundância, tem grande potencialidade, além de propiciar melhora em algumas propriedades de desempenho (CAVDAR et al, 2017).

A construção civil emprega matrizes frágeis: as pastas, argamassas e concretos. Estas matrizes, na sua maioria derivadas de aglomerantes minerais, rompem-se sem deformação plástica e, apesar de resistentes a esforços de compressão, não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Para compensar esta deficiência, outros materiais (como o aço) são empregados como reforço aos materiais à base de cimento. O concreto armado pode ser

descrito como exemplo clássico. Em caso de componentes esbeltos ou em aplicações onde a massa específica deva ser considerada, como os painéis, as telhas e as divisórias, o reforço deve ser feito com materiais compatíveis, em dimensão e massa, com a aplicação desejada. O uso das fibras surge então como alternativa técnica recomendada (CAVDAR, 2017).

2.13 DURABILIDADE DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

As pesquisas sobre durabilidade de materiais alternativos são incipientes, podendo se destacar os resíduos da construção civil na forma de agregados para uso em concretos, argamassas e compósitos com fibras vegetais, etc. Nestes estudos são avaliados diferentes tratamentos e condições de exposição. Entretanto, devemos salientar que não existe um modelo ou metodologia padrão para realização de estudo da durabilidade. Os resultados dos trabalhos desenvolvidos, até o momento, tendem a apontar diretrizes a serem seguidas e metas a serem alcançadas (FARIAS FILHO, 1999).

A dificuldade na avaliação da durabilidade dos materiais alternativos, produzidos com resíduos reciclados, está associada à complexidade dos constituintes desses resíduos, que dependem diretamente do ambiente onde foram originados, fase ou estágio da obra quando foi gerado, tipo ou tratamento a que o material que lhe deu origem foi processado, como também sua interação com os agentes ou mecanismos de degradação ambiental aos quais serão submetidos para avaliação dos indicadores da durabilidade (ZANELLA et al, 2014).

O estudo da durabilidade da argamassa armada mostra-se extremamente importante do ponto de vista da avaliação do desempenho ao longo do tempo da armadura que a compõe (LEVY, 2004). O uso de aditivos na constituição da argamassa como o resíduo proveniente da uma indústria de papel, deve prover a massa de um arranjo granulométrico que diminua a porosidade do material além de boa interação com a armadura utilizada provendo de melhoria de sua vida útil. A natureza do resíduo é fator de extrema importância principalmente na dosagem das argamassas e na sua relação água/ cimento afetando seus diversos parâmetros.

Segundo (SELMO, 1989), pode-se definir durabilidade e vida útil como:

a) **durabilidade** é a capacidade que um produto manter suas condições de serviço, para o qual foi projetado e construído, durante determinado período de tempo. A durabilidade do produto pode ser avaliada pelo seu tempo de vida em anos ou pela sua resistência a agentes que afetam seu desempenho;

b) **vida útil** é o período de tempo que, um material, componente construtivo ou edificação, mantém seu desempenho acima dos níveis aceitáveis, desde que sofram manutenções rotineiras.

Alguns conceitos relacionados a durabilidade devem ser entendidos para proporcionar um entendimento dos resultados gerados ao longo das análises, como por exemplo os explicitados por SILVA, 2002.

- Agentes de degradação: São ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causam a degradação do material.
- Mecanismo de degradação: Forma como os agentes causam uma sequência de mudanças físicas e/ou químicas que levam à perda das propriedades esperadas de um material.

Os materiais cimentícios em geral estão submetidos a alguns agentes de degradação como, por exemplo:

- A hidratação do cimento, através da liberação de compostos de elevada alcalinidade;
- A presença de CO₂ na atmosfera, que em alguns casos pode provocar a carbonatação da matriz;
- A água e a temperatura, que podem provocar a lixiviação de compostos.

Em geral a incompatibilidade química é o principal problema em materiais cimentícios com reforço de fibras naturais, pois decorre da sensibilidade das fibras em meio alcalino. A presença abundante de íons alcalinos gera a alcalinidade da água presente nos poros da matriz e, conseqüentemente, a hidratação do cimento. Esse meio alcalino produz a degradação da fibra, quebrando suas adesões ou destruindo suas cadeias moleculares. A elevação da temperatura ambiente pode provocar uma aceleração na velocidade da reação de degradação, sendo assim pode inviabilizar seu uso. (SILVA, 2002)

A água é um dos mais importantes fatores de degradação e sua ação em conjunto com outros fatores pode levar à decomposição de compostos presentes no material de reforço e a lixiviação de produtos hidratados que foram decompostos, por exemplo, pela carbonatação. A variação da umidade ambiente, questões relacionadas às dimensões e a quantidade de ciclos de molhagem e secagem a que são submetidos na situação de uso em geral (SAVASTANO Jr, 2000).

O CO₂ presente na atmosfera contribui em partes para a degradação dos compósitos reforçados com matrizes de cimento Portland, principalmente com uso do aço e plástico como reforço. Já com uso de fibras naturais colabora para a diminuição da alcalinidade do meio e para a redução da porosidade do material. Através da obturação dos poros pelo carbonato de cálcio [CaCO₃], mais denso que o hidróxido [Ca(OH)₂], torna-se, assim, benéfico ao invés de degradante (MARTINS et al, 2018).

A questão física também deve ser levada em conta, a movimentação do material de reforço que devido à umidade é capaz de provocar microfissuras que afetam a durabilidade do material cimentício. Esse mecanismo é conhecido como dano progressivo, podendo afetar a resistência mecânica do material e a ligação da matriz com as fibras (interface) (MIRA et al, 2002).

2.14 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

2.14.1 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade é uma propriedade que está diretamente relacionada com a consistência. Em termos objetivos, pode-se dizer que a trabalhabilidade é a facilidade de manuseio de um material. Pode-se assim dizer que uma massa trabalhável se distribui facilmente quando assentada em um molde, não apresentando segregação durante o transporte, não grudando nas ferramentas durante a aplicação, não endurecendo em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica o suficiente até o final de sua utilização (HAACH et al, 2011).

A trabalhabilidade é uma complexa propriedade que sofre influência direta de uma série de outras propriedades como a plasticidade, coesão, consistência, retenção de água e outras, por isso a maioria das metodologias utilizadas para

determinar a trabalhabilidade passam pela avaliação da consistência e plasticidade, sendo o método de abatimento de troco de cone o mais utilizado (RILEM, 1980)

A trabalhabilidade é uma característica atrelada às argamassas de revestimento e determinará a facilidade com a qual o traço pode ser misturado, transportado, aplicado e acabado, em condições de homogeneidade. Segundo CARASEK (2007) a complexidade desta propriedade tem referência a diversos fatores como a consistência (que é a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas), a plasticidade (que é a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação aplicadas a ela), a retenção de água (que é a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água), a coesão (que refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante), a exsudação (que é a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade), a densidade de massa e a adesão inicial.

Para a determinação da trabalhabilidade existem diferentes metodologias que avaliam a consistência em argamassas, uma destas é através do ensaio de determinação do índice de consistência, o qual utiliza-se a mesa de consistência (*flow-table*), consistindo em medir o espalhamento horizontal da argamassa moldada em um tronco de cone padronizado, após a submissão de inúmeros impactos e retirada da forma, conforme verificado na Fig. 2.8.

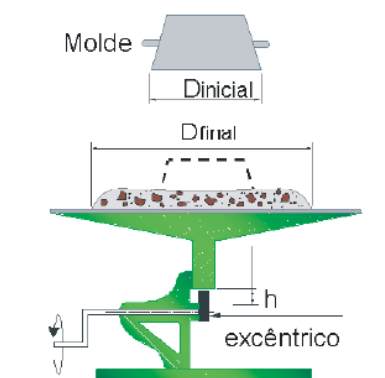


Fig. 2.8 - Representação esquemática da mesa de fluidez ou consistência.

Fonte: CARDOSO (2009).

A prática da construção civil mostra que o ensaio padronizado pela ABNT (determinação do índice de consistência) é muito dispersivo em ambientes fora dos laboratoriais, por isso existem alguns estudos que visam à determinação da trabalhabilidade por outras análises, mesmo assim é um dos mais consagrados. Uma destas possibilidades consiste em um ensaio de Vicat adaptado, que através de ação de um peso de uma barra metálica, calculado para propiciar uma tensão equivalente (peso da unidade sobre área de assentamento) à verificada no assentamento de blocos de concreto (OLIVEIRA et al, 2011).

2.14.2 REOLOGIA

Reologia (*Rheos* = fluir, *Logos* = estudo) é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, avaliando as relações entre a tensão de cisalhamento aplicada, e a deformação em determinado período de tempo (GLATTHOR E SCHWEIZER, 1994).

As propriedades reológicas são de extrema importância para matrizes cimentícias, principalmente no seu estado fresco, devido às concentrações de tensões existentes e o confinamento dos compostos existentes na matriz, colaborando para sua eficiência, influenciando seu desempenho final (CARDOSO et al, 2015).

O comportamento reológico é verificado por curvas tensão x deslocamento em determinado período de tempo, onde a amostra ainda no estado fresco sofre deformação devido à aplicação de uma carga (CAPPELARI et al, 2013). A reologia de um material cimentício pode variar de forma significativa conforme se alteram os materiais ou as características dos mesmos (AZEVEDO et al, 2017).

A reometria por *squeeze-flow* baseia-se na compressão de uma amostra cilíndrica entre placas paralelas, como observado na Fig. 2.9. Similar ao que ocorre na reometria rotacional pode-se controlar de força ou deslocamento (AZEVEDO et al, 2017).



Fig. 2.9 – Exemplo de execução do ensaio de squeeze-flow.

FONTE: ENGMANN et al, 2005

Este ensaio permite avaliar a coesão da massa e a retirada de diversos parâmetros importantes relativos ao estado fresco que irão influenciar diretamente na qualidade final do produto e utilizado também para avaliação de trabalhabilidade da massa encontrando-se parâmetros como viscosidade e tensão de cisalhamento e a influência que a variação de parâmetros de ensaio pode fornecer nas argamassas.

2.14.3 MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE AR INCORPORADO

A massa específica de uma argamassa é determinada através da relação entre massa da argamassa e o seu volume:

- Massa específica absoluta: Não são considerados os vazios existentes no volume do material.
- Massa específica relativa: Também pode ser chamada de massa unitária. Consideram-se os vazios presentes.

As argamassas em geral podem apresentar teor de ar incorporado em excesso no estado fresco, este fato deve-se pelo processo de mistura mecânica ou pelo uso de aditivos que tem esta finalidade específica (WOJCIECH e HUBERT, 2015).

O teor de ar incorporado é a quantidade relativa de bolhas de ar incorporadas, intencionalmente ou não, na argamassa no estado fresco durante o seu processo de mistura. Quanto maior for o teor de ar incorporado, maior a trabalhabilidade da argamassa, porém, em excesso pode reduzir a resistência de

aderência dos revestimentos, logo deve-se controlar esta propriedade em argamassas (WOJCIECH e HUBERT, 2015).

ISAIA (2007) afirma que há uma série de fatores que interferem no ar incorporado são eles: tipo de misturador, tempo de mistura, relação a/c, granulometria do agregado, viscosidade, velocidade de mistura, tamanho do recipiente de mistura em relação ao misturador, presença de aditivo incorporador de ar, dentre outros. Quando nenhum agente é incorporado, os valores obtidos são geralmente baixos e praticamente independentes destes fatores devido à instabilidade das bolhas.

O uso de aditivos incorporadores de ar implica em melhora significativa da trabalhabilidade através da formação de uma elevada quantidade de microbolhas de ar independentes (ALVES, 2002). Entretanto os efeitos desta adição em outras propriedades da argamassa devem ser analisados, o excesso de microbolhas provoca menor resistência mecânica, aumento da porosidade e outras alterações no compósito que pode ser prejudicial em elevados valores (AZEVEDO et al, 2017).

2.14.4 RETENÇÃO DE ÁGUA

A definição retratada por CINCOTTO *et al.* (1995) diz que a retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato, ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal.

Segundo MARILERE et al, 2012, a retenção de água influencia na argamassa o tempo disponível para sua aplicação, regularização e desempenho. Há uma mudança também em algumas propriedades no estado endurecido, influenciando as reações dos aglomerantes durante a cura. Esta propriedade pode ser relacionada com a retenção de consistência e retração por secagem. A primeira, porque a argamassa tende a conservar a água necessária para molhar a superfície dos materiais, possibilitando que as reações de hidratação dos aglomerantes se processem; já segundo CARNEIRO (1999) a segunda refere-se à influência na retração por secagem, que é uma das principais causas de fissuração das argamassas no estado endurecido, devido à velocidade de evaporação da

água de amassamento, prejudicando a estanqueidade e a durabilidade do revestimento.

2.15 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

2.15.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Segundo definição expressa por SELMO (1989), a resistência mecânica é definida como “a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento”.

Influenciam na resistência mecânica de argamassas simples o consumo de cimento e a quantidade cal utilizada. Em argamassas simples a resistência tem relação direta com o tipo de uso e aplicação que se tenha, já no caso das placas cimentícia está resistência torna-se mais importante devido ao fato do seu uso final, tendo que ao menos se autoportar, evitando o surgimento de deformações excessivas que possam comprometer seu uso, para os casos de usos somente como elemento de vedação. Aplicações que exigem maiores esforços merecem maior atenção quanto a resistência mecânica.

Atualmente existem diferentes ensaios, normalizados por organismos nacionais e internacionais, para a determinação da resistência mecânica. No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, seguindo a NBR 13279/2005 que determina a resistência à compressão simples e a tração através de flexão (Fig. 2.10) utilizando corpos de prova prismáticos (4 x 4 x 16 cm).



Fig. 2.10 – Execução do ensaio de resistência a flexão em corpos de prova prismáticos.
Fonte: Próprio Autor

Existem diversos fatores que influenciam na resistência mecânica das argamassas, estes fatores vão desde as propriedades no estado fresco aos materiais utilizados na mistura. A finura do cimento e seus agregados tem impacto significativo, cimentos com menores módulos de finura tem uma tendência de maior resistência devido ao aumento da área superficial específica que propicia aumento da taxa de hidratação da pasta, que se inicia na região interfacial (SWAIDANI et al, 2016).

2.15.2 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente é uma propriedade fundamental para o produto acabado pois irá definir a massa final que o mesmo irá ter podendo inviabilizar algumas aplicações. A determinação desta propriedade é dada de maneira simples em função da massa e volume ocupado, utilizando as normas técnicas nacionais. O valor da densidade tem referência direta com a quantidade de vazios existentes e a densidade dos materiais que constituem a matriz, por isso que a propriedade no estado fresco tem influência direta (SWAIDANI et al, 2016).

2.15.3 POROSIDADE EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Afirma NEVILLE (1997) que a porosidade em compósitos de cimento, geralmente expressa em porcentagem, é a medida da proporção ao volume total ocupado pelos poros. O volume de poros é um fator preponderante para a capacidade do compósito em resistir à carga, enquanto que a permeabilidade é afetada pela intercomunicabilidade dos poros. Ou seja, caso o volume de poros seja grande e os poros estejam interligados, a permeabilidade é alta. Por outro lado, se os poros forem descontínuos, a permeabilidade será baixa, mesmo com um elevado volume de poros.

Para se determinar através de uma análise a microestrutura e a porosidade das argamassas a determinação da absorção de água é um ensaio de grande importância, já que em materiais cimentícios, como argamassas, a permeabilidade influencia diretamente a durabilidade desses materiais.

Os vazios capilares, presentes na pasta de cimento já endurecida, tem referência com a quantidade de água de amassamento adicionada logo no início do processo de hidratação do cimento. Assim a quantidade de água quimicamente combinada chega a um estágio de saturação e após esse momento resulta em água livre que geram poros após a ocorrência do processo de evaporação, causando redução da resistência mecânica (VAN GERVEN, T.et al, 2007).

2.16 PROPRIEDADES DAS PLACAS CIMENTÍCIAS

O Brasil institui uma norma específica para determinação de parâmetros de análise das placas cimentícia com uso de reforço, a NBR 15498/2016 que instituí diretrizes para padronização e nomenclatura específica, todas abordadas nesta tese.

2.16.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS PLACAS CIMENTÍCIAS

Para a aplicação da placa como um produto comercial necessita-se de um rigoroso conhecimento das propriedades no que tangem a resistência mecânica, seja no estado de equilíbrio, que é a temperatura ambiente, ou no estado saturado, exposta ao efeito de água. Como a aplicação principal avaliada neste trabalho é o

uso destas placas para fins de vedação, seja interna ou externa, faz-se necessário o estudo desta característica em ambas situações (SPECK, 2014).

Pode-se realizar flexão em diferentes pontos, neste caso opta-se pela flexão por três apoios, conhecido como “carregamento nos terços” (Fig. 2.11), este ensaio é normalizado pela NBR 15498/2016 que explicita as condições de ensaio em equilíbrio e saturado em determinado lote amostral.



Fig. 2.11 – Exemplo de Execução do ensaio de resistência mecânica em placas.
Fonte: PUC CAMPINAS

A carga de ruptura está relacionada com as dimensões da placa, incluindo se a mesma será armada ou não, enquanto o módulo de resistência à flexão está ligado ao material na qual ela é constituída (SPEK, 2014).

Ao analisarmos os diagramas de esforços solicitantes das placas, pode-se notar a existência de região de momento fletor máximo coincidente com a região de esforço cortante nulo, no trecho central da placa, logo nesta região existe a chamada flexão pura. Logo, faz-se necessário a adoção de algum tipo de estrutura auxiliar para melhorar o desempenho mecânico das placas, seja pela colocação de reforço de fibras naturais ou estruturas em telas metálicas (PEKMEZCI, 2015).

A instrumentação do ensaio de resistência mecânica permite a obtenção das deformações na região de flecha máxima, região central, possibilitando o encontro

do módulo de elasticidade que pode ser utilizado em diversas características de modelagem do material, possibilitando inclusive a otimização da secção transversal ótima.

2.16.2 ABSORÇÃO E PERMEABILIDADE DE ÁGUA

A permeabilidade e a absorção de água situam-se dentre os principais mecanismos de transporte de agentes agressivos para o interior de uma massa cimentícia. A taxa de transporte de agentes agressivos, por meio da absorção e permeabilidade, é governada pela taxa de penetração de água, pois através da umidade os agentes agressivos são transportados para dentro do concreto (BARDELLA; BARBOSA, 2006).

Segundo (NEVILE, 1997), o volume ocupado pelos poros do concreto, que não deve ser confundido com permeabilidade, é o medido pela absorção, que pode ser medida secando-se uma amostra até a constância de massa e após isso imergir a mesma em água, determinando o acréscimo de massa, expressa em porcentagem de massa seca.

Elevados valores de permeabilidade de água ou de absorção podem ter influência direta da durabilidade pois permitem a passagem de fatores externos, como a água ou CO₂, que pode ser extremamente prejudicial ao produto final reduzindo sua vida útil. Logo espera-se um controle desta propriedade dentro de parâmetros de uso das mesmas (MARTINS et al, 2018).

2.16.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM

A retração inicial da argamassa, proporcionada pela secagem por evaporação da água de mistura para o ambiente e por sucção da base, que se dá no estado de argamassa fresca, foi denominada de primeira retração por DÉTRICHÉ (1977), citado por BASTOS e CINCOTTO (2001) ao estudarem a retração de argamassas mistas. É neste estágio que se podem desenvolver as fissuras, oriunda do processo de retração.

A retração por secagem indica a deformação do material ocasionada pela troca de água com o ambiente externo. Estes valores representam a combinação

entre a dessecação e a carbonatação, que depende da porosidade da microestrutura e sua capacidade para suportar a secagem (ITIM et al. 2011).

A avaliação da fissurabilidade de argamassas de revestimento diretamente em alvenarias tem sido feita utilizando placas com espessuras variáveis em painéis chapiscados, com finalidade de comparação entre argamassas feitas com diferentes materiais. No sentido de obter-se uma formulação adequada para argamassas, discutindo a fissuração (CAMPITELI, 2005).

O empenamento das bordas em placas pode ocorrer devido ao gradiente de umidade que surge dentro da espessura da placa. O empenamento das bordas, também denominado de efeito Curling, que é causado pelo encolhimento diferencial entre a parte superior e a parte inferior de uma laje, ou uma placa, principalmente devido à retração por secagem. A superfície da laje (topo) seca e encolhe devido às ações externas do meio ambiente, enquanto que a parte inferior fica molhada e sofre poucas alterações nas dimensões. Esse fenômeno foi analisado, através de experimentos desenvolvidos por Pera e Ambroise (2004), conforme analisada no Fig. 2.12.

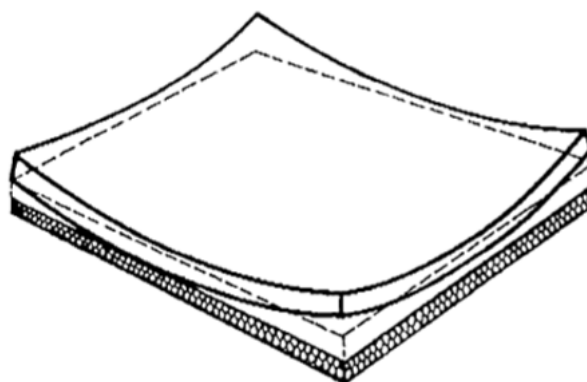


Fig. 2.12 – Efeito Curling em placa cimentícia.
FONTE: Pera e Ambroise (2004)

É nítido que a variação dimensional ocorre preferencialmente nas bordas das placas (curling) que acaba gerando fissuração em toda a placa, existem metodologias que avaliam o grau de empenamento que ocorre baseando-se na instrumentação da placa e acompanhamento da evolução da variação volumétrica da mesma, conforme observado na Fig. 2.13 (LE-BIHAN et al, 2012).



Fig. 2.13 – Instrumentação da placa para acompanhamento do empenamento das bordas (curling).

FONTE: LE-BIHAN et al, 2012

2.16.4 EXPANÇÃO POR TEMPERTURA

É importante a verificação do comportamento dos materiais constituintes das placas, como o resíduo incorporado, quanto à expansão térmica, quando as placas são submetidas a calor ou resfriamento. A grande exposição no momento de uso, principalmente em ambientes externos, sugere a necessidade de verificação desta propriedade.

Devido à ausência de normalização acerca deste processo faz-se necessário uma revisão de trabalhos realizados onde este tipo de propriedade foi analisado. Juntamente com esta propriedade analisa-se a dilatação térmica da placa, e devido a sua constituição de diferentes materiais esta situação torna-se imprescindível para possibilitar o seu uso (SPEK, 2014).

Esta propriedade já é analisada em pisos cerâmicos que em exposição normal dilatam-se, daí a necessidade da execução de juntas entre os mesmos. Deve-se realizar uma análise das juntas a serem utilizadas nas placas. Outro fator importante de ser mencionado e a exposição das placas a condições críticas de aumento de temperatura, como em incêndios, pois nestas condições há uma maior tendência de expansão (LE-BIHAN et al, 2012).

Ao imaginarmos que as placas, para uso como sistemas de vedação, precisam de juntas para se unir, o conhecimento da expansão delas em função da

temperatura na qual estão expostas faz-se extremamente necessária, inclusive para determinar qual produto será utilizada esta junção.

2.16.5 EXPANÇÃO POR UMIDADE (EPU)

A expansão por umidade é um fenômeno que ocorre quando um revestimento absorve água do meio ambiente, aumentando seu volume e conseqüentemente suas dimensões lineares. “A EPU, também chamada de dilatação higroscópica, é, portanto, o aumento de tamanho da placa cerâmica ou cimentícia na presença de umidade” (OLIVEIRA, 2004).

A expansão por umidade inicia-se desde o momento em que o produto está considerado pronto e continua ocorrendo durante a vida útil do mesmo. Essa expansão muda de acordo com as características do ambiente exposto e do tipo de produtos, assim como sua composição (SPEK, 2014).

O grande problema relacionado à expansão por umidade ocorre com o aumento das dimensões da placa cimentícia após seu assentamento, gerando aumento das tensões que poderão prejudicar a estabilidade do mesmo (SPEK, 2014).

2.16.6 DESEMPENHO ACUSTÍCO

O surgimento da norma brasileira de desempenho das edificações, a NBR 15575/2013, trouxe à tona uma maior preocupação em propriedades como o desempenho acústico das edificações, principalmente em elementos de vedação. A norma fixou índices de insolação sonora em vedações e compartimentos das edificações, passando a ser uma exigência mínima as edificações, inclusive como condicionante para financiamentos em bancos públicos no primeiro momento e hoje obrigatória na construção civil.

Segundo PINTO (2011) os materiais que apresentam menor densidade, como tijolos vazados, devem apresentar valores de desempenho acústico superiores a alvenarias com materiais mais densos. Logo o conhecimento das propriedades dos materiais constituintes torna-se mais importante.

As vedações normalmente executadas na construção civil brasileira adotam os blocos cerâmicos, que possuem suas propriedades sonoras já conhecidas, inclusive já publicadas na norma de desempenho (SILVA, et al, 2015).

2.16.7 DURABILIDADE DAS PLACAS CIMENTÍCIAS

Segundo WANG e LEE, 2009 a hidratação do cimento gera, genericamente, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), que conferem resistência ao material, e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), principal responsável pela geração de um ambiente alcalino (pH próximo de 13). No concreto armado, a elevada alcalinidade gera uma camada passivante ao longo das barras de aço, que as protegem do fenômeno da corrosão.

A carbonatação, que ocorre naturalmente em estruturas de concreto, é um fenômeno físico-químico que resulta em mudanças na microestrutura e na diminuição do pH do concreto. Esse fenômeno pode despassar o aço utilizado nas estruturas de concreto armado, permitindo a corrosão das armaduras, e por esse motivo são realizados diversos estudos sobre o tema (PAPADAKIS e BEKIL, 2015) (HUI-SHENG et al, 2009). O fenômeno da carbonatação pode ser ocasionado pelas reações químicas provenientes da interação entre os principais constituintes presentes na atmosfera, como o CO_2 (gás carbônico) com os produtos da hidratação do cimento, que se encontram no líquido intersticial dos poros (CUNHA e HELENE, 2001). A reação ocorre, principalmente, com os íons cálcio, contidos na solução aquosa dos poros, em equilíbrio com os produtos de hidratação do cimento.

Ainda de acordo com WANG e LEE, 2009 o fenômeno da carbonatação é diretamente dependente da concentração de CO_2 no ambiente, do percentual de umidade do ar, da temperatura a que a estrutura está submetida e dos condicionantes intrínsecos do concreto, como o tipo de cimento, as adições, os agregados e a cura, que definem a composição da mistura e sua estrutura de poros.

Adições realizadas em matrizes cimentícias tendem a exercer influência sobre a carbonatação, acelerando em vezes o fenômeno, proporcionando o fechamento dos poros, dificultando a entrada de gás carbônico e influenciando a

sua durabilidade. Pauletti (2004) observou que concretos confeccionados com cimentos que possuem adições tendem a carbonatar mais do que concretos confeccionados com cimentos comuns. Utilizando cimento pozolânico e cimento comum, confirmou que a profundidade de carbonatação é maior para argamassas confeccionadas com adição de pozolana em relação ao cimento comum. Foram encontradas profundidades maiores de carbonatação em concretos com adições de maior finura. Quanto mais fina a adição, mais reativa, reagindo mais rapidamente com Ca(OH)_2 e diminuindo a reserva alcalina do meio, sujeito à carbonatação. Observou-se que em corpos de prova contendo sílica ativa, após passarem pela carbonatação, há uma alteração na distribuição de poros, que diminui o acesso de água aos poros do material.

2.17 TRABALHOS RELACIONADOS AO TEMA

2.17.1 FRIAS et al, 2015

Lodo de papel, uma fonte alternativa ambientalmente sólida baseada em materiais cimentícios. Uma revisão

Frias et al, 2015 fez uma abordagem ampliada do uso do lodo da indústria de papel e celulose em materiais cimentícios, mostrando os principais números referentes a produção industrial deste segmento da Europa e sua importância. A grande parte do lodo gerado nos países europeus é disposta em aterros sanitários, o que acarreta elevados custos as empresas do setor.

Partindo desta análise o autor fez um apanhado da caracterização do resíduo oriundo de diferentes indústrias europeias, mostrando que algumas propriedades são similares, como a elevada umidade presente (em torno de 40% a 70%) e a composição química, constituindo-se basicamente de CaO , SiO_2 e Al_2O_3 , com exceção de um resíduo proveniente de uma indústria Australiana onde verificou-se a presença de elevadas concentrações de óxido de titânio devido ao seu processo produtivo peculiar e aditivos utilizados na produção.

Quanto à caracterização mineralógica houve uma forte presença de calcita, caulinita e matéria orgânica não apresentando riscos à saúde e utilizado a conversão em pozolanas. Assim os resultados destas análises mostraram

claramente que as altas temperaturas não afetam a composição mineralógica dos minerais iniciais (talco, calcita, quartzo, ilíta).

O estudo mostrou ainda que o efeito da pozolonicidade do resíduo é mediano, sendo que o mesmo pode ser usado como adição pozolânica na fabricação de misturas de cimentos, devendo ser capaz de reagir com a portlandita formada durante a hidratação do cimento. A literatura sobre o lodo da indústria de papel descreve apenas dois métodos para avaliar a pozolanidade do material, através da condutibilidade e avaliações diversas, sendo ao final todos classificados como média pozolanidade.

A inclusão de adições pozolânicas modifica o cimento e a microestrutura da matriz, variando fatores tais como a demanda de água de viscosidade para consistência e configuração normais. Estas condições reológicas influenciam nas propriedades e têm sido fortemente dependentes da relação água/pasta, tipo e dosagem da substituição do cimento além dos materiais utilizados e a distribuição granulométrica dos sólidos presentes.

A resistência mecânica segue um padrão segundo as taxas de substituição de até 20% do material na matriz de cimento, onde os cimentos misturados ao lodo de papel atendem requisitos químicos, físicos e mecânicos estabelecidos na legislação existente nos países europeus.

Assim, concluíram-se que as argamassas misturadas possuem alta resistência química a agentes agressivos, como cloretos, sulfatos, água do mar e mudanças abruptas de temperatura, sendo menos resistentes aos ambientes saturados de CO₂. Assim é possível o uso deste material como uns compósitos cimentícios, além de apresentar uma considerável vantagem do ponto de vista ambiental.

2.17.2 GARCIA et al, 2010

Estudo de fases hidratadas presentes em lamas de papel calcinadas (metacaulinita) / sistema de dissolução de CaO saturado curado a 40 ° C e 28 dias de reação.

Segundo Garcia et al, 2010 a indústria do cimento tem sido a primeira na reciclagem e valorização de subprodutos e resíduos industriais, bem como materiais naturais, incorporando-os às diferentes etapas de produção da fabricação

de cimentos misturados. Nos últimos anos, houve um crescente interesse no uso de metacaulinita (MK) obtido a partir de caulinita natural, como uma mistura mineral para aumentar a resistência e durabilidade de concretos. O lodo da indústria de papel e celulose foi caracterizado porque a sua composição possui alto teor de matéria orgânica (celulose) e compostos inorgânicos, como argilas, carbonato de cálcio, que sob uma pressão, controlada a calcinação e transforma os materiais argilosos, principalmente a caulinita, em produtos calcinados, como a metacaulonita, através da térmicativação e obtenção de altas propriedades pozolanas. O estudo relata a alta atividade pozolânica dessas lâminas de papel calcinadas de outros subprodutos pozolânicos industriais, usados normalmente em cimentos como cinzas volantes, fumaça de sílica, escória de alto forno e outros. As condições ideais para obter a máxima atividade pozolânica do resíduo são lamas que são elevadas a temperatura de 700 °C a 2 h de permanência no forno na faixa estudada (700-800 °C).

O objetivo do presente trabalho foi estudar a formação de fases minerais hidratadas formadas por reações na metacaulina (MK) / sistema de dissolução de CaO saturado curado a 40°C em 28 dias de reação, quando o MK vem da calcinação de lodo de papel em diferentes temperaturas e colocadas no forno. Assim a pesquisa fez um estudo experimental sobre a obtenção de metacaulinita reciclada de uma lama de papel espanhola.

Assim, pode-se concluir que os produtos de hidratação da reação pozolânica entre a calcinação do lodo de papel e dissolução de cal saturada são favoráveis ao uso em materiais cimentícios. Os hidratos de aluminato de cálcio são formados a partir dos estágios iniciais, mas depois desaparecem, enquanto as gerações de outros produtos hidratados ocasionam um tamponamento dos poros que reduz a porosidade e aumenta a resistência mecânica dos compósitos, comportando-se como um material pozolânico.

2.17.3 CAVDAR et al, 2017

Painéis compostos de cimento fabricados com lodo de fábrica de papel como enchimento.

Cavdar et al, 2017 avaliou placas de cimento de madeira (WCB) que são comumente usadas em superfícies de revestimento, como painéis de revestimento,

telhado, em revestimento de parede de edifícios públicos, elementos de proteção para a prova de fogo por apresentar uma boa resistência ao fogo, pavimentos especializados, térmicos e acústicos com fins de isolamento, trabalhos de renovação dos edifícios. As placas de cimento de madeira desempenham uma ótima atenção nos campos industriais nos últimos anos devido à falta de fonte de partículas de madeira, aumento do uso de resíduos de madeira e industriais e processamento de mudança dos regimes de manejo florestal em todo o mundo. As principais vantagens da WCB são altamente resistentes à absorção de umidade e pode ser usado onde a eficiência energética é necessária.

Os resíduos lignocelulósicos são obtidos de diferentes fontes, como palha de trigo, fibra de coco, casca de arroz, poeira de serra, casca de avelã, casca de amendoim, cana-de-açúcar, bagaço, fibra de coco, resíduos de chá, casca de várias espécies de madeira, resíduos de óleo de palma, raspadeira produzida da usinagem de madeira seca. Apesar dos resíduos originarem vários problemas ambientais durante a fabricação de madeira, como móveis, e painéis de fibras de densidade média; eles foram usados como enchimento em WCBs.

A indústria de celulose e papel é uma das que mais gasta energia no mundo, sendo também um dos maiores produtores de águas residuais. O processo de tratamento de águas residuais é muito importante devido ao aumento das restrições ambientais. Entre 2012 e 2020, espera-se aumentar 60% no mercado global de tratamento de lixo na indústria, neste caso foram usadas algumas técnicas como o uso de bactérias aeróbica, anaeróbica e combinada para tratamentos de águas residuais. Após o desperdício no tratamento de água, o lixo de pasta de papel e papel é gerado, o que consiste em pequenas fibras de celulose, alta concentração de metais pesados, um coquetel das tintas, enchimentos minerais, materiais inorgânicos tais como caulim, argila e carbonato de cálcio além de compostos orgânicos e água.

A avaliação das lamas oriundas da pasta de papel presente na matriz de cimento foi estudada por algumas pesquisas, mas não há comparação com técnicas de tratamento de águas residuais nesses estudos. O objetivo deste estudo foi investigar os efeitos do lodo em processo de beneficiamento em moinho com alguns aspectos físicos, incluindo absorção de água e espessura, inchaço e propriedades mecânicas, que são o módulo de ruptura e módulo de elasticidade,

WCBs. O modo de uso do resíduo gerado é seco, após processo de beneficiamento tradicional, sendo de caracterizado visualmente como lodo cinza e escuro.

Assim, pode-se concluir que a grande quantidade de resíduo gerada pelas indústrias de papel e celulose está causando vários problemas ambientais. O tratamento de água em painéis à base de cimento não foi investigado em detalhes até agora. As lamas foram avaliadas para fabricação de placas de cimento de madeira. Com base nos achados do estudo, as propriedades das lamas pretas são mais eficientes, utilizando-a no estado seco. A WCB adicionada é melhor do que aquelas de lodos minerais adicionados. Concluiu-se que o lodo preto-cinzento e lodo preto podem ser utilizados até 5, 10 e 20% em massa na produção de WCB, respectivamente, atendem aos requisitos e o padrão relevante, sendo competitivos contra os WCB comercialmente disponíveis no mercado. Nesse caminho, a necessidade de disposição em aterros dos resíduos poderia ser reduzida e a utilização de materiais de eficiência energética torna o processo sustentável.

2.17.4 OUTROS TRABALHOS

Vieira et al. (2016) avaliou o uso da lama oriunda da estação de tratamento de efluentes de águas residuais de uma indústria de papel e celulose em cerâmica vermelha, avaliando as emissões de gases durante a etapa de queima deste produto. A lama foi adicionada a uma mistura de argilas para melhorar as propriedades técnicas de tijolos de construção. Ambos os tijolos, adicionou-se 10% em peso de lamas e tijolos de barro puros convencionais para comparação, foram simultaneamente cozidos a uma temperatura relativamente baixa de 750 °C, de acordo com o processo de fabricação de cerâmica. A caracterização técnica foi realizada por retração linear, absorção de água e testes de compressão mecânica como os padrões brasileiros. A estrutura consolidada tijolo foi analisada por microscopia óptica. O monitoramento ambiental através da liberação de padrões de SO₂. Os resultados mostraram que, em virtude da sua composição e da temperatura de queima, a adição de lamas de papel em tijolos de argila contribui para uma redução substancial no preço associado com uma diminuição de 3% de combustível semelhante ao relatado para fornos espanhóis, durante a fase de

cozedura industrial. Assim concluiu-se que a lama pode ser utilizada em incorporações de cerâmicas atendendo as normas brasileiras.

MAVROULIDOU et al (2013) avaliaram a substituição do cimento pelo lodo oriundo da produção de papel onde afirmam que a eliminação ou diminuição da quantidade de lodo gerada constitui um grande problema econômico e ambiental para a indústria de papel e cartão. No Reino Unido, cerca de 1 milhão de toneladas de lamas de fábrica de papel são produzidas anualmente. Enquanto as principais alternativas à deposição em aterro são o uso do lodo como combustível e sua terra-se espalhando como fertilizante agrícola, novas saídas para estes resíduos (ou subproduto) materiais são necessários, como sua incorporação na construção civil. O resíduo passou por um processo de incineração para atuar como um substituto parcial de cimento Portland ordinário (OPC) para a produção de concreto armado. A produção de cimento é responsável por aproximadamente 10% da emissão global de dióxido de carbono causada pela atividade antropogênica. Por isso a necessidade de usar alternativas. No trabalho, uma série de testes foram realizados em misturas de concreto armado nos quais em um o tipo de cimento foi parcialmente substituída por papel de lamas de cinzas (PSA), a fim de identificar as melhores misturas que também poderia proporcionar as maiores substituições. Misturas também foram feitas no qual, além de PSA outros constituintes tais como ligante terra granulada escória de alto forno (GGBS), ou metacaulinita foram usados para prevenir reações prejudiciais potenciais e a produção de produtos expansivos pelo consumo de CaO, levando a inconsistência concreto. Os ensaios analisaram um número de propriedades do concreto fresco e endurecido, incluindo trabalhabilidade, densidade, resistência mecânica, bem como a solidez do cimento resultante. Os resultados mostraram que a cinza pode parcialmente substituir o OPC e que, quando usados em níveis de substituição OPC modestos pode realmente melhorar a resistência do concreto armado. Por conseguinte, pode concluir-se que a cinza pode ser utilizada para substituir parcialmente os OPC com vantagens ambientais globais e ao mesmo tempo tem um efeito benéfico sobre as propriedades do concreto armado.

SOROUSHIAN et al (2013) desenvolveram uma abordagem eficiente para o processamento de compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose, que faz uso de valor agregado de dióxido de carbono. Foram avaliadas duas categorias de placas de fibrocimento de celulose: pressionado e não pressionado. Foram

feitas comparações entre as propriedades físicas e mecânicas dos produtos de fibrocimento de celulose fabricadas com cura convencional e CO₂ usando diferentes condições de processamento. Os resultados de uma tentativa de processamento sustentável de produtos de preferência compósitos cimentícios ambientalmente amigável que incorporam fibra de celulose. Os resultados das análises indicaram que as condições de processamento das placas de fibrocimento de celulose são favoráveis. Em ambas as placas prensadas e não prensadas, a temperatura e duração no forno influenciaram no desempenho das mesmas. Sendo assim mostrou-se a viabilidade do seu uso.

Capítulo 3 - METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado toda a sequência de execução dos trabalhos que objetivam a validação da hipótese enunciada neste trabalho, a Fig. 3.1 demonstra de maneira sucinta algumas etapas de execução.

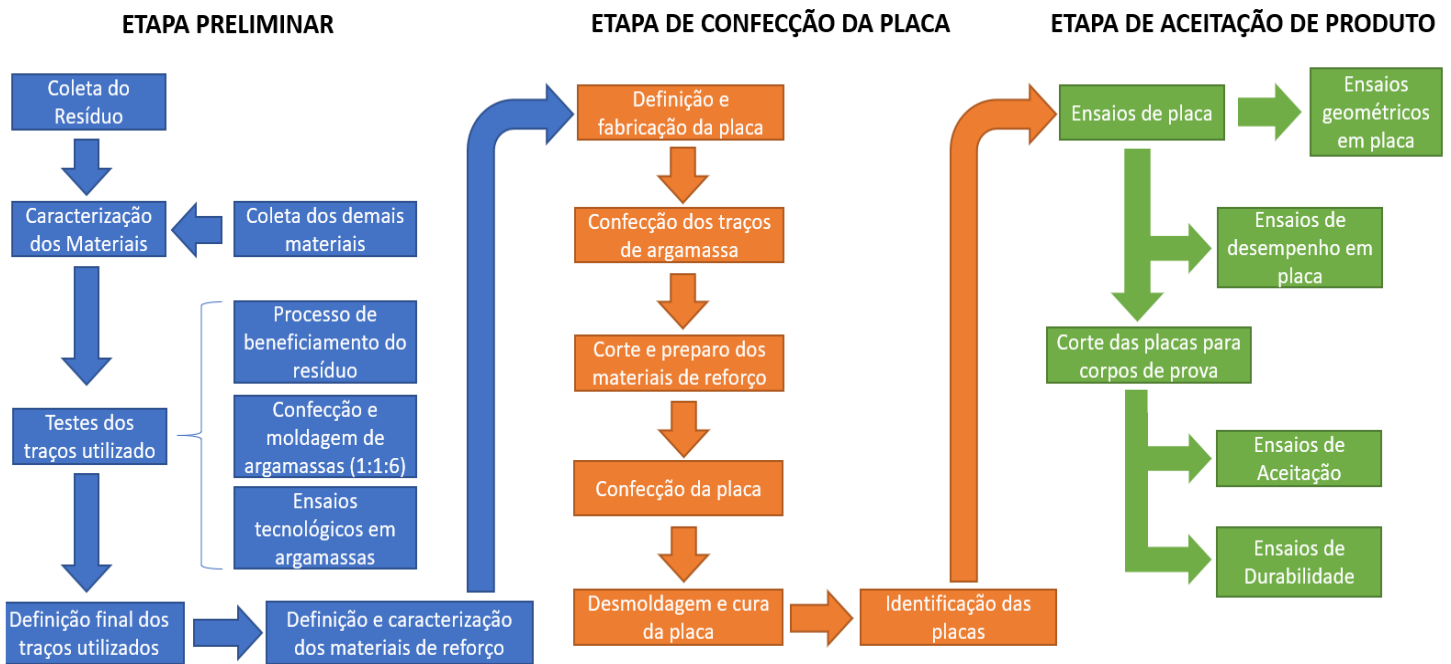


Fig. 3.1 – Fluxograma das principais etapas de execução do trabalho.
FONTE: Próprio autor.

A execução foi subdividida em três grandes grupos, a etapa preliminar, que destina-se toda a caracterização dos materiais utilizados e definição dos traços que serão estudados, a etapa de confecção da placa, que destina-se a definição de metodologia de execução da placa cimentícia com reforço em todas suas etapas até chegar a última etapa que refere-se a aceitação do produto final, através de uma sequência de ensaios normatizados a nível nacional e internacional que visam a validação final da hipótese proposta neste trabalho através de uma extensa discussão e análise dos resultados encontrados.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL DE CELULOSE

O resíduo utilizado neste trabalho é um lodo oriundo do processo de produção de papel, que após ser coletado na planta industrial é direcionado para um tanque de decantação primário, é neste local que é devidamente coletado e direcionado, em seu estado natural, para o Laboratório de Engenharia Civil – LECIV da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

A indústria que forneceu este resíduo, denominada Companhia Paduana de Papeis – COPAPA, está localizada no município de Santo Antônio de Pádua, noroeste fluminense, distante cerca de 127 Km da cidade de Campos dos Goytacazes. A empresa é uma das maiores produtoras de papel no Estado do Rio de Janeiro e do Brasil, sendo sua produção predominantemente de papel higiênico. Sua produção é estimada em cerca de 36.000 ton/ano, o que faz com que tenha considerável interesse em dar um destino adequado a este material.

Ao chegar nas dependências da universidade o material é devidamente identificado, com o lote de produção oriundo, e ensacado sempre preservando seu estado natural, que é uma lama cinzenta com elevada umidade.

3.1.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA ARGAMASSA

A argamassa utilizada neste trabalho é aquela constituída de cimento, cal e agregado miúdo, neste caso areia. O cimento utilizado é o CII E32, que é o cimento Portland com adição de escória de alto forno (comumente utilizado no Brasil), da marca Votorantin, adquirido no comércio varejista local. A escolha deste tipo de cimento deve-se ao fato de ser o mais utilizado na região além dos custos incidentes sobre ele, favorecendo a redução dos custos do produto final, sendo adquiridos em sacos de 50 Kg e tomando-se o cuidado de manter o mesmo lote e um correto armazenamento do mesmo, evitando casos de hidratação antecipada (empedramento).

Foi utilizada a cal hidratada do tipo III, denominada CHIII, da marca SuperCal, devido a ser a mais utilizada na região da pesquisa, além da mesma atender a todos os requisitos técnicos estipulados para este produto. A

denominação da cal, segundo seu tipo CH I, II ou III deve-se a quantidade de anidrido carbônico existente e outras restrições normativas, a CHIII apresenta a melhor relação custo-benefício, quanto ao seu custo e propriedades tecnológicas que pode oferecer a argamassa ao final.

Tanto a cal quanto o cimento tiveram seus resultados de caracterização baseados nos resultados fornecidos pelos fabricantes e disponíveis em relatórios específicos, onde todos os parâmetros avaliados estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras.

O agregado miúdo utilizado neste trabalho é uma areia quartzosa, proveniente da bacia de sedimentação do Rio Paraíba do Sul que foi devidamente lavada, homogeneizada e seca para o uso nos traços de argamassas.

3.1.3 ADITIVO DE AR INCORPORADO

Os aditivos são materiais utilizados em concretos e argamassas que conferem a estes a melhora de alguma propriedade, como a retenção de água, ar incorporado ou plasticidade da massa, em geral são relacionadas às propriedades no estado fresco, mas influenciam também o estado endurecido.

Neste trabalho optou-se pelo uso de aditivo que conferem maior teor de ar incorporado em alguns traços, sempre os comparando com traços com e sem o aditivo. O uso foi motivado pela tentativa de redução da densidade do produto, melhorando sua aplicabilidade. O aditivo utilizado neste trabalho foi o SIKA AER[®] que é um aditivo utilizado em concretos e argamassa encontrado na rede de varejo local e que incorpora minúsculas bolhas de ar esféricas, de maneira uniforme a massa. Este aditivo atende a todas as exigências da NBR 11768/2011 que trata de aditivos para concretos e argamassas.

3.1.4 MATERIAL DE REFORÇO

Neste trabalho optou-se pelo uso de dois tipos de material de reforço, as telas metálicas entrelaçadas e telas de polietileno plástico, para possibilitar a análise de qual será melhor para o produto final. Conforme relatado na revisão bibliográfica, os reforços utilizando fibras naturais não foram considerados para execução desta tese.

As telas metálicas utilizadas são compostas por tecidos em arame galvanizado, aço inoxidável, ou em outros arames específicos, como cobre, latão etc., cujas malhas tem formato hexagonal e composto por fios entrelaçados (Fig. 3.2.a), e por serem telas de alta produção, seus preços normalmente são bem mais baixos que aqueles das telas tipo alambrado ou malhas soldadas, sendo assim, extremamente úteis para este fim. São utilizadas em diversa utilidades e são vendidas em geral em rolos de 50 metros.

As telas metálicas devem atender aos requisitos da NBR 10122/2014 que traz uma série de requisitos para seu uso e classificação, logo optou-se pelo uso de produtos comerciais que são devidamente certificados quanto as exigências normativas, com malha de ½ polegada.

Outro material de reforço que foi avaliado neste trabalho foram as telas de polietileno de alta densidade (Fig. 3.2.b), que são plásticos de elevada resistência e tem uma grande variedade de usos. São resistentes as intempéries e a ambientes mais agressivos pela sua própria constituição e vendidas em rolos de 50 metros.

Existem uma variedade de tipos e configurações destas telas, entretanto para este trabalho optou-se pelo uso de telas em formato hexagonal com a mesma abertura da metálica, propiciando um fator de comparação.

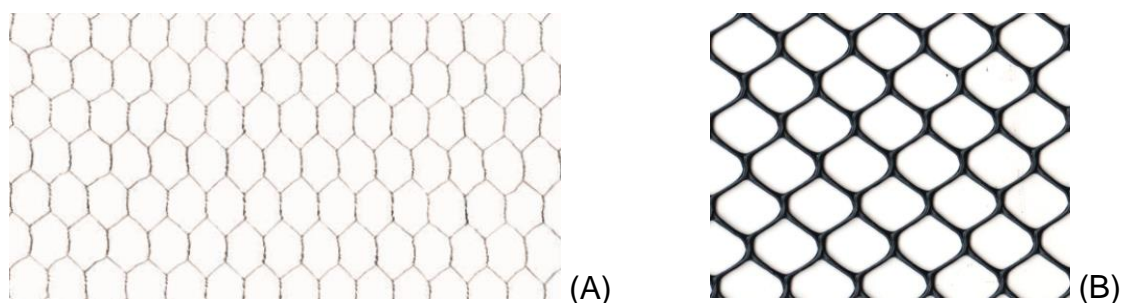


Fig. 3.2 – (a) Exemplo de tela metálica. (b) Exemplo de tela de plástico.

FONTE: Casa do construtor

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais, que foram utilizados para a produção das placas cimentícias, é de fundamental importância para dar subsídios na composição dos traços a serem avaliados além de possibilitar a interpretação dos resultados dos principais ensaios realizados nas placas.

Assim neste trabalho optou-se pela caracterização dos materiais ditos não comerciais, ou seja, aqueles que sofrem com a variação de suas propriedades ou não são comumente utilizados, enquadrando-se neste caso a areia e o resíduo basicamente. Mesmo assim os demais materiais utilizados, como a cal hidratada, cimento e material de reforço são demonstradas e foram obtidas através de relatórios técnicos dos respectivos fabricantes.

Os principais ensaios de caracterização foram realizados nas dependências do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) e do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), ambos da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), além da contribuição em alguns ensaios específicos do Instituto Militar de Engenharia (IME) e Universidade Federal de Viçosa (UFV).

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

Para a caracterização dos agregados miúdos foram realizados ensaios de granulometria, por peneiramento e sedimentação, onde a curva de distribuição granulométrica foi determinada, segundo a prescrição da ABNT NBR 7181/2016, que consiste na combinação entre peneiramento e sedimentação do material.

Foi determinada a massa específica através da NBR 9775/2011, onde o procedimento prevê a colocação de água no frasco de Chapman até a marca de 200ml, posterior adição de 500g do agregado miúdo seco em estufa no frasco de Chapman e agitação do mesmo, retirando-se as bolhas de ar, ao final procedeu-se anotando a leitura final no frasco.

Já a determinação da massa unitária no estado solto foi realizada utilizando-se a NBR NM 52/2009, considerando-se que a areia tinha o dobro do volume do recipiente utilizado onde foi lançado o agregado a uma altura de aproximadamente 10 a 12 cm do topo do recipiente, sendo regularizada a superfície com uma régua. Ao final, determinou-se a massa do agregado.

Já a porcentagem de vazios do agregado miúdo foi determinada utilizando-se a metodologia proposta por MARGALHA et al. (2007), que consiste no uso de dois recipientes graduados, um dos quais foi cheio até 500 ml de água e o outro na mesma medida com areia seca. Posteriormente, saturou-se a areia com água e, verificou-se o gasto de água. Foi calculada a porcentagem de volumes vazios de cada uma das areias, que corresponde à quantidade de água para preencher o

volume de vazios. Considera-se adequada a areia ou mistura de areias com porcentagem de volumes vazios entre 30 e 35%.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE PAPEL

Os ensaios de caracterização do resíduo proveniente da indústria de papel e celulose são fundamentais para o conhecimento do seu comportamento em conjunto com os demais materiais, para isso foi realizado a caracterização física, química, mineralógica frente à norma técnica brasileira.

Para a execução do processo de caracterização fez-se necessário beneficiá-lo pelo processo tradicional de secagem e moagem. Assim o material foi seco em estufa por um período mínimo de 24 horas a uma temperatura de aproximadamente 100 °C, após esse período verificou-se a estabilização da massa do material através de pesagem sucessivas no intervalo de 1 hora. Logo após foi levado para a moagem em um moinho de bolas, com 30 rotações por minuto com corpos moedores de aço, atendendo as especificações da NBR NM 51/2001.

3.2.2.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Foi realizado o peneiramento através do método de peneiramento padronizado pela ABNT, onde se obteve a porcentagem de material retido na série de peneiras, segundo a prescrição da ABNT NBR 7181/2016. Além do ensaio de granulometria foi determinada a massa específica pela norma NBR NM 52/2002, e umidade pelo método gravimétrico, realizado em triplicata.

Apesar do material utilizado neste trabalho encontrar-se no estado úmido, os resultados do processo de caracterização foram validos para o conhecimento de propriedades desejáveis, como a umidade do material in natura.

Para a determinação da pozolanicidade do resíduo optou-se pela metodologia de LUXÁN et al (1989), que através do ensaio de condutividade elétrica, método que mede a evolução da atividade pozolânica. O método monitora a variação da condutividade elétrica no intervalo de 2 minutos após inclusão do resíduo à mistura. Conforme descrito por Barroso (2011), o ensaio consiste na adição de 98,7mg de hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ em 70 g de água destilada à temperatura de $40 \pm 1^\circ C$. Com o auxílio de um agitador magnético, a solução se estabiliza em 20 minutos, para então a inclusão de 1,75 g do resíduo de papel em pó.

3.2.2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Somente a análise química não é suficiente para uma avaliação final a respeito da composição mineralógica e às propriedades físico-químicas do resíduo, oferece dados que são extremamente importantes no estudo e emprego de tais materiais (SANTOS, 1975).

Para análise, uma parte da amostra do resíduo foi previamente peneirada na peneira nº40 e seca em estufa a 110°C por um período de 24 horas e foi colocada em um moinho de esferas planetário (Fritsh, Pulverisette, Alemanha) a 200 RPM por dois ciclos de 20 minutos cada. O material natural foi então passado na peneira nº 200 (0,075 mm) para a determinação da sua composição química.

A composição química da matéria-prima foi obtida por meio da técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDX) em um equipamento (Shimadzu, EDX700, Japão), sob condição de ajuste de vácuo de dois canais com o material em pó finíssimo foi colocado no porta amostra.

3.2.2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Para essa análise, uma parte da amostra obtida anteriormente por meio do moinho de esferas planetário (Fritsh, Pulverisette, Alemanha) a 200 RPM por 2 ciclos de 20 minutos cada e passada na peneira nº 200 (0,075 mm) foi submetida à difração de raios-X (DRX) para identificação dos argilominerais e minerais presentes na mesma. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Avançados, LAMAV/CCT/UENF, equipamento (Shimadzu, XRD700, Japão), com radiação Cu-K α , com 40 kV e 30 mA. A varredura foi efetuada com θ variando entre os ângulos de 5° a 80° com velocidade de varredura de 2°/minuto

Com o padrão de difração de raios-X foi obtido por meio do programa Excel o gráfico e comparado com valores de fichas Joint Comitee of Powder Diffraction Standards (JCPDS) foi possível fazer a identificação dos minerais presentes.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO DA CAL E DO CIMENTO

Conforme relatado no início deste item, a caracterização da cal e do cimento não foi realizada devido ao fato dos materiais serem comerciais e os garantem um rigoroso processo de produção, por isso suas caracterizações são comumente

fornecidas pelos seus fabricantes. Assim a Tab. 3.1 fornece a caracterização química e física do cimento fornecida pela empresa.

Tab. 3.1 – Caracterização química e física do cimento utilizado.

Propriedades		Resultados
Análise Química	CaO (%)	71,94
	SiO ₂ (%)	15,95
	Al ₂ O ₃ (%)	5,60
	SO ₃ (%)	3,00
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,11
	K ₂ O (%)	0,57
	TiO ₂ (%)	0,35
	Outros (%)	0,31
Análise física	Massa específica (g/cm ³)	2,87
	Área específica de Blaine (m ² /Kg)	402,80
	Finura #325 (%)	5,6

FONTE: Votoran Cimento

Já a Tab. 3.2 nos fornece os resultados de análises realizadas na Cal utilizada e fornecida pelo fabricante em manual técnico.

Tab. 3.2 – Resultados das análises referentes a cal.

Determinação	Limites estabelecidos pela norma para CHIII	Cal Hidratada
Retenção de água (%)	≥ 70	85,20
Finura (0,60 mm) (%)	≤ 0,50	0,25
Finura (0,075 mm) (%)	≤ 15,0	7,92
Densidade Real dos Grãos	-	2,41
Quantidade de CO ₂ liberado	≤ 15,0	9,2

FONTE: SuperCal

3.2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE REFORÇO

Os materiais utilizados como mecanismos de reforço, que foram as telas metálicas e de plástico, foram devidamente identificadas e caracterizadas, quanto a abertura da malha e resistência a tração, que foram realizados segundo as normas técnicas nacionais para este fim. O ponto de amolecimento foi observado nos ensaios realizados em conjunto com a placa cimentícia.

Os ensaios básicos de caracterização dos materiais de reforço serviram como um importante balizador para a definição do traço ideal. Quanto a durabilidade dos mesmos não foi realizada ensaios de degradação do material de maneira isolada, visto que seu comportamento dentro da matriz é mais significativo é preponderante para as análises esperadas.

3.3 ENSAIOS PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO IDEAL

Antes de se iniciar a execução das placas cimentícias faz-se necessário a definição do melhor traço a ser utilizado, chamado de traço ótimo, que é aquele que irá conferir ao material final as melhores propriedades de uso e desempenho.

Sendo assim optou-se pela execução de testes iniciais em argamassa simples, conforme recomendações das normas técnicas brasileiras, para ajudar na definição deste traço. A composição básica do traço foi o cimento, areia, cal e o resíduo, podendo-se ainda incluir algum tipo de aditivo e a definição do material de reforço, completando assim todos os constituintes necessários a fabricação da placa cimentícia.

3.3.1 BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO PARA USO

Conforme já relatado em diversas partes deste texto, o resíduo é formado por uma lama muito úmida de coloração cinza cuja composição é em grande parte de caulim e celulose, chamada de lodo. Um dos grandes desafios no uso deste material, principalmente em cimentícios, é a sua elevada umidade e ser processo de beneficiamento, que se for feito pela maneira tradicional, que consiste em secagem, moagem e peneiramento é extremamente caro e oneroso para as indústrias.

Assim, nesta tese, optou-se pelo desenvolvimento de uma metodologia padrão para uso do material de forma que possibilite seu uso em estado líquido dentro da argamassa. Este processo consistiu na determinação do coeficiente de solubilidade do resíduo (soluto) para a água (solvente) de modo que reduza a formação do corpo de fundo.

Outro fator importante é a temperatura do local de processamento, visto que a mesma interfere na velocidade da reação e pode gerar custos, assim optou-se

pelo uso de todo o processo em temperatura ambiente (em torno de 23 °C), mesmo considerando que esse aumento agregaria maior quantidade de resíduo.

Assim foi desenvolvida a curva de solubilização do resíduo de beneficiamento do papel *in natura* em relação à água, disponível na rede de fornecimento, onde encontrou-se o percentual de material que pode ser misturado a água. Assim o processo de beneficiamento consistiu na mistura de 90 gramas de resíduo no seu estado natural (*in natura*) com 1 litro de água natural, coletada da rede de fornecimento do município, chegando-se a um nível de 9% de incorporação, o processo de mistura foi feito com um misturador automatizado com rotação constante durante um período de 2 minutos aproximadamente, gerando uma água em coloração cinza e visualmente mais densa.

Com o líquido gerado optou-se por trabalhar em duas situações, a primeira é o uso desta mistura logo após o processo de beneficiamento (chamado ao longo do trabalho de líquido grosso) e outra que consistiu no peneiramento do mesmo em peneira número 20 (serie ABNT), gerando outro subproduto (uma nova lama, menos densa), este segundo tipo foi denominado ao longo do trabalho de líquido fino.

Após o processo de beneficiamento dos dois tipos, foi determinada a porcentagem final de resíduo presente dentro da mistura, através da secagem de uma quantidade padrão em estufa e pesagem do material restante, a mistura denominada como líquido grosso apresentou cerca de 9% de presença de resíduo enquanto a de líquido fino apresentou um valor de cerca de 7,5%, essa redução deve-se a parte do material retido na peneira.

Tomou-se todo o cuidado no processo de beneficiamento para padronizar o processo e tentar chegar a líquidos normatizados, evitando variações nos traços. Esses líquidos foram utilizados no traço como a quantidade de água na mistura, assim foi necessário a execução de todos os ensaios tecnológicos de modo a caracterizar a argamassa com esse novo líquido, que desempenhou papel específico na matriz.

3.3.2 DETERMINAÇÃO DO TRAÇO UTILIZADO

A determinação dos traços a serem utilizados considerou três variáveis principais:

- O traço típico da região para argamassas;
- O uso ou não de aditivo incorporador de ar, proporcionando redução do peso específico da placa;
- Quanto ao tipo de substituição feita na água de amassamento (líquido fino ou grosso).

Assim foi levado em conta cada variável na definição do traço, a primeira quanto ao traço típico da região, onde encontram-se argamassas dosadas com proporção em massa de 1:1:6 (cimento: cal: areia), este traço além do fato de ser muito utilizado garante uma relação custo-benefício considerável, pelos dados da literatura, além de atender aos parâmetros tecnológicos, segundo diversos estudos realizados (AZEVEDO, 2015).

Quanto ao uso do aditivo incorporador de ar utilizou-se uma relação fixa de 0,5% em relação a massa de cimento, esse valor foi determinado dados da literatura, pois valores excessivos comprometem a qualidade final do produto (ALVES, 2002).

Quanto ao material de reforço durante a execução deste trabalho fixou-se dois tipos de materiais, as telas metálicas e de plástico, entretanto para a execução dos ensaios tecnológicos em argamassas, visando obter o melhor traço, esta variável foi desconsiderada. É há ainda os dois tipos de líquidos que serão utilizados, que serão incorporados na argamassa em substituição a água, o líquido denominado de fino e grosso.

Assim a Tab. 3.3 mostra a distribuição dos traços e seus respectivos condicionantes.

Tab. 3.3 – Tabela demonstrativa dos traços para realização dos ensaios tecnológicos em argamassas.

Nomenclatura do Traço	Cimento	Cal	Areia	Incorporador de ar*	Tipo de incorporação
REF**	1	1	6	-	-
TIF	1	1	6	-	Fino
TIG	1	1	6	-	Grosso
TIAF	0,995	1	6	0,005	Fino
TIAG	0,995	1	6	0,005	Grosso

*Em relação a massa de cimento

** Neste traço, denominado de referência, utilizou-se água normal e não há nenhum tipo de adição.

A Tab. 3.3 demonstra somente os traços utilizados para a os ensaios tecnológicos, que foram realizados nas argamassas, em corpos de prova prismáticos e de acordo com seus respectivos resultados foi determinado os melhores traços para execução dos ensaios em placa.

3.3.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Todas as argamassas foram produzidas seguindo a NBR 13276/2005. Para argamassas dosadas em laboratório à base de cimento e cal hidratada o preparo seguiu as seguintes etapas:

- Preparou-se, com antecedência de 16 a 24 horas da utilização, uma argamassa de cal hidratada. Misturou-se em velocidade baixa durante 4 minutos no recipiente do misturador: areia, cal hidratada e água em quantidades de acordo com a dosagem e fazer a pesagem do material preparado.
- Após o intervalo de maturação (16 a 24 horas), o material preparado foi pesado novamente e acrescentou-se água eventualmente perdida por evaporação. Em seguida é acrescentada a quantidade de cimento definido no traço. Para finalizar, realiza-se nova homogeneização por 4 minutos, em velocidade baixa.

Os ensaios realizados no estado fresco e suas respectivas normas estão descritos na Tab. 3.4. Todos os ensaios no estado fresco foram realizados para os diferentes traços, demonstrados em Tab. 3.3.

Tab. 3.4 – Ensaios realizados no estado fresco e suas respectivas normas técnicas.

Ensaio	Norma
Índice de Consistência	13276 (ABNT, 2016)
Teor de ar incorporado e densidade de massa no estado fresco	13278 (ABNT, 2005)
Retenção de água	13277 (ABNT, 2005)
Avaliação reológica por squeeze-flow	15839 (ABNT, 2010)

As propriedades que foram avaliadas no estado fresco mostram-se extremamente importante ao desenvolvimento de um produto aceitável, pois

contribuem para a capacidade de adensamento da massa na fôrma utilizada para produção de placa cimentícia e impacta do seu estado endurecido, como o teor de ar incorporado e retenção de água.

O ensaio de Squeeze Flow fornece dados relativos a reologia da argamassa, que é verificado por curvas tensão x deslocamento em determinado período de tempo, onde a amostra ainda no estado fresco sofre deformação devido à aplicação de uma carga (AZEVEDO et al, 2017).

A reologia de um material cimentício pode variar de forma significativa conforme se alteram os materiais ou as características dos mesmos, sendo seu conhecimento imprescindível ao sucesso de sua aplicação (AZEVEDO et al, 2017). A metodologia do ensaio baseou-se na compressão dos diferentes tipos de argamassas no estado fresco que foram moldadas em formato cilíndrico entre dois pratos paralelos (NBR15839/2010). A velocidade da taxa de deslocamento influencia nos resultados obtidos, portanto, duas taxas foram utilizadas para os ensaios de Squeeze Flow, 0,1mm/s e 3mm/s. Os ensaios foram limitados à deslocamentos de 9mm e carga máxima de 1kN (CARDOSO et al, 2015)

3.3.4 ENSAIOS TÉCNOLOGICOS DE ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Outra sequência de ensaios desenvolvida refere-se à execução dos mesmos no estado endurecido, onde será utilizada a NBR 13276/2005. Após a confecção da argamassa foram preparados corpos de prova de acordo com a NBR 13279/2005, que descreve a aparelhagem necessária, em moldes prismáticos metálicos, que formam três compartimentos quando montados, servindo de molde para três corpos-de-prova de 4 cm x 4 cm x 16 cm cada. Os moldes foram fixados sobre a mesa de consistência e preenchidos com duas camadas de altura aproximadamente iguais. A cada camada executada foram realizadas 30 quedas na mesa de consistência (“*flowtable*”). Em seguida, foi realizado o rasamento da argamassa passando-se uma régua metálica de modo que a superfície ficasse plana, eliminado assim os excessos de argamassa nas bordas, este procedimento foi realizado com todo cuidado e perícia necessário.

Logo após os moldes foram colocados em local plano com temperatura controlada (aproximadamente 23 °C) para cura ao ar. A desforma dos corpos-de-

prova foi realizada após 24 horas de moldagem, sendo esse o tempo mínimo recomendado pela norma.

Os ensaios que foram executados na argamassa no estado endurecido e suas respectivas normas estão descritos na Tab. 3.5.

Tab. – Descrição dos ensaios e respectivas normas de argamassa no estado endurecido.

Ensaio	Norma
Resistência à tração na flexão	13279 (ABNT, 2005)
Resistência à compressão axial	13279 (ABNT, 2005)
Coefficiente de capilaridade	15259 (ABNT, 2005)
Densidade de massa no estado endurecido	13280 (ABNT, 2005)

Os ensaios de resistência mecânica foram imprescindíveis para a aceitabilidade e escolha de qual o melhor traço a ser utilizado, mostrando sua eficiência. Quando falamos em desenvolvimento de placas cimentícias, para uso de divisórias por exemplo, a resistência a flexão mostra-se preponderantemente mais importante que a compressão axial, visto a disposição do produto no momento de sua aplicação.

O coeficiente de capilaridade é um valor determinado pela diferença de massa dos corpos de prova submetidos à condição específica de imersão durante 90 e 10 minutos, conseguindo assim avaliar a capacidade da água em penetrar e percorrer os poros da argamassa, que neste caso devem se intercomunicar, tem especial referência a parâmetros de durabilidade que foram avaliados nos ensaios em placa.

Quanto a densidade aparente no estado endurecido tem muita importância devido ao tipo de aplicação do produto, placas com elevado peso podem torna-se inviáveis do ponto de vista de aplicação do produto, podendo justificar o uso do aditivo de ar incorporado no trabalho.

3.4 ENSAIOS EM PLACA CIMENTÍCIA

Os ensaios em placa destinam-se a validação final da hipótese apresentada nesta tese e são em maioria baseadas na NBR 15495/2016, uma norma relativamente nova que abrange placas cimentícias com materiais de reforço, sem amianto.

Assim para a execução desta etapa dividiu-se as placas em dois grupos, aqueles que os ensaios foram realizados com a placa inteira, em seu tamanho real (como tolerância geometria e resistência ao fogo) e outros realizados em corpos de prova, oriundos do processo de corte da placa, que serão descritos mais a frente (resistência mecânica, absorção de água, permeabilidade, densidade aparente e de durabilidade).

3.4.1 CONFECÇÃO DAS PLACAS CIMENTÍCIAS

O processo de confecção da placa cimentícia iniciou-se pela determinação do tamanho que a placa deveria possuir levando-se em conta o caráter de vedação que se pretende como produto, assim estipulou-se a confecção de placas medindo 46 cm x 46 cm onde as junções foram feitas utilizando-se uma estrutura metálica auxiliar, essa dimensão deve-se ao fato de facilitar o corte para execução dos corpos de prova. A adoção desta medida teve caráter demonstrativo para execução em escala laboratorial, mas seus resultados podem ser perfeitamente extrapolados para tamanhos maiores.

A norma técnica brasileira que versa sobre esse tema não estipula tamanhos, somente faz recomendações quanto a espessura, que não deve ser superior a 3 cm, e define como placa o produto resultante da mistura de Cimento Portland, agregados, adições ou aditivos com reforço de fibras, fios, filamentos ou telas, com exceção de fibras de amianto.

Assim quanto a dimensão a placa moldada utilizada neste trabalho tem 46 cm x 46 cm x 2 cm. Para o processo de moldagem foi necessário a confecção de uma forma que atendesse as dimensões estipuladas deixando a mínima margem de tolerância possível, assim foram confeccionadas fôrmas metálicas com estrutura de suporte e com laterais moveis, conforme pode ser vista na Fig. 3.3, a opção pelo material metálico, apesar de mais pesado, deve-se ao fato de prover maior rigidez na etapa de moldagem, evitando possíveis empenamentos.

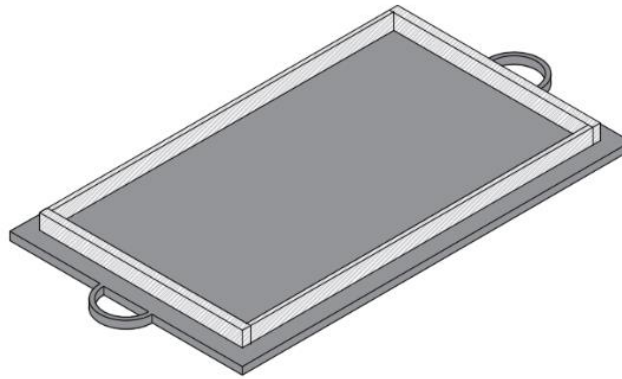


Fig. 3.3 – Esquema proposto para forma metálica.
FONTE: Próprio Autor.

De posse das formas iniciou-se o processo de moldagem que consistiu na limpeza da forma, passagem de desmoldante comercial para formas metálicas, confecção da argamassa segundo o traço desejado, seguindo toda metodologia da norma. O processo de preenchimento da forma pela argamassa foi executado sob mesa vibratória, tendo-se o cuidado de evitar segregação, evitando-se a formação de falhas de moldagem (chamadas popularmente de brocas) que podem afetar as propriedades avaliadas.

O material de reforço foi previamente cortado (no tamanho do molde) e colocado na posição mediana da forma, garantindo sua proteção através da camada de cobertura de argamassa (matriz protegendo o reforço) (Fig. 3.4). Logo após todo o preenchimento foi feito o arrasamento da forma com régua metálica padronizada e plana, evitando ondulações superficiais e defeitos estéticos. Um cuidado adicional foi tomado no preenchimento da região de arestas internas, evitando que seja um ponto preferências de quebra no manuseio da placa.



Fig. 3.4 – Exemplo do processo de moldagem da placa cimentícias.
FONTE: Próprio Autor

Concluído o processo de moldagem as placas permaneceram em superfície rígida com o mínimo de movimentação possível, por um período de 4 dias, onde este período foi determinado através de tentativas através da execuções de testes, para somente depois passarem pelo processo de desenforma. Este processo foi realizado com perícia para evitar quebras e fragilizações do produto. A cura das placas foi feita com exposição ao ar à temperatura ambiente para após 28 dias serem respectivamente ensaiadas, segundo programa experimental.

Quanto aos traços utilizados para a confecção da placa cimentícia com reforço escolheu-se dentre os resultados apurados nos ensaios tecnológicos de argamassa qual teria uma melhor tendência de atender aos requisitos mínimos da norma para o produto, sendo assim são possíveis combinações de traço os mostrados na Tab. 3.6.

Tab. 3.5 – Possibilidades de traço das placas cimentícias.

Nomenclatura do Traço	Cimento	Cal	Areia	Incorporador de ar*	Tipo de incorporação	Material de reforço
TRP1	1	1	6	-	-	Plástico
TRP2	1	1	6	-	-	Metálico
TRP3	1	1	6	-	Fino	Plástico
TRP4	1	1	6	-	Fino	Metálico
TRP5	1	1	6	-	Grosso	Plástico
TRP6	1	1	6	-	Grosso	Metálico
TRP7	0,95	1	6	0,50	-	Plástico
TRP8	0,95	1	6	0,50	-	Metálico
TRP9	0,95	1	6	0,50	Fino	Plástico
TRP10	0,95	1	6	0,50	Fino	Metálico
TRP11	0,95	1	6	0,50	Grosso	Plástico
TRP12	0,95	1	6	0,50	Grosso	Metálico

Obviamente não foram executados todos os doze traços propostos, pois não faria sentido já que foram executados testes preliminares com argamassas em moldes prismáticos, logo baseado nos resultados encontrados foi possível à determinação de quais traços seriam executados.

3.4.2 ENSAIOS GEOMÉTRICOS NAS PLACAS

Para a execução deste ensaio a NBR 15498/2016 estipula uma rotina para a medição das placas, utilizou-se neste ensaio duas réguas metálicas em ângulo reto ao longo das bordas de superfície de controle, tendo uma linearidade de $\pm 0,30$

mm/m e menos que 1 mm de desvio por metro. Em alguns casos foram utilizados esquadros metálicos mantendo-se as mesmas restrições anteriores.

Outra régua graduada fez-se necessário para medidas das maiores dimensões (largura e comprimento) além de um micrômetro com resolução de ao menos $\pm 0,05$ mm, com discos metálicos planos de 10 mm a 15 mm de diâmetro para medidas da espessura.

Quanto às placas foram corrigidas as rebarbas para garantir que as medições tenham coerência e realizadas para cada dimensão (largura e comprimento) três medidas (uma central e duas a 50 mm das laterais), já para a espessura foram realizadas seis medidas ao menos 20 mm das bordas, sendo no mínimo três de cada lado, conforme visto na Fig. 3.5.

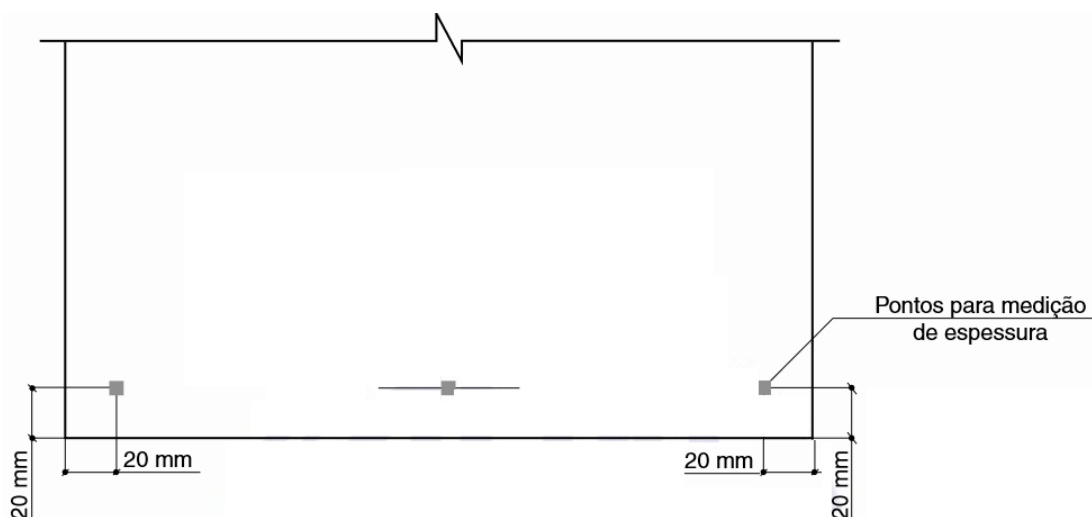


Fig. 3.5 – Exemplificação das medidas de espessura da placa.
FONTE: NBR 15498/2016

Assim de posse dos valores foi calculada a média das dimensões geométricas. Outra análise quanto à geometria das placas foi à questão da linearidade das bordas, importante característica para a aplicabilidade do produto final, assim este ensaio baseou-se em medir, com a régua graduada em milímetros, a distância máxima que existe entre a borda da placa e o braço do esquadro, conforme mostra a Fig.3.6.a.

Por último foi realizado e medida do desvio do esquadro, neste ensaio mediu-se o desvio total das laterais da placa (Fig. 3.6.b), atentando-se as tolerâncias da norma.

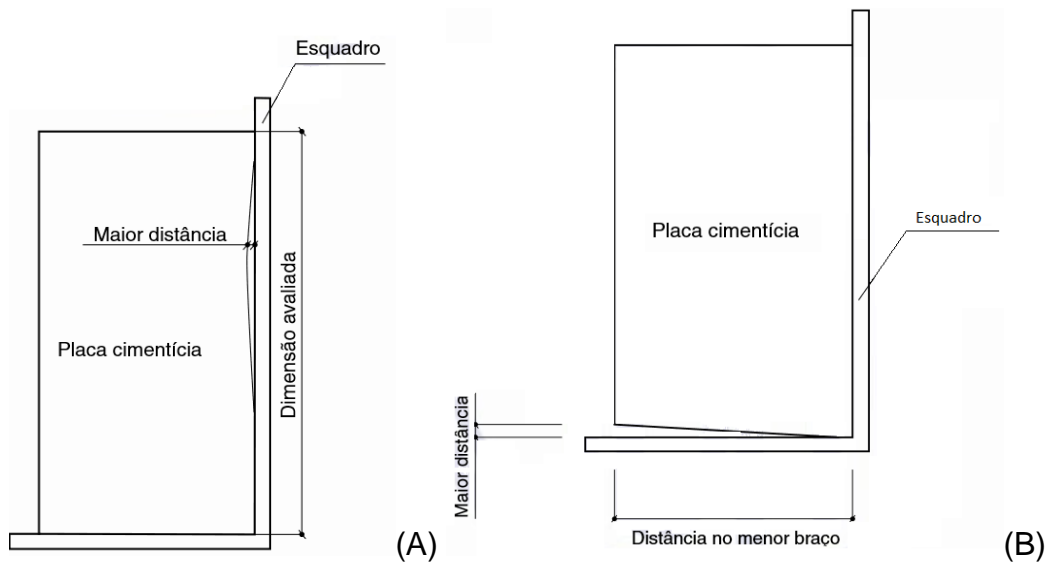


Fig. 3.6 – (a) Medida da linearidade das bordas (b) Medida do esquadro das bordas

FONTE: NBR 15498/2016

3.4.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DAS PLACAS

Para este ensaio, que foi realizado com a placa em tamanho real, foram necessárias no mínimo três amostras para validação, sempre após o respectivo tempo de cura.

Assim foi desenvolvida uma caixa de acrílico (Fig. 3.7) devidamente selada na parte superior da placa, que deve ficar elevada (em média 600 mm) para possibilitar a visualização da mesma. A norma recomenda que seja deixado um espaço nas laterais das bordas.

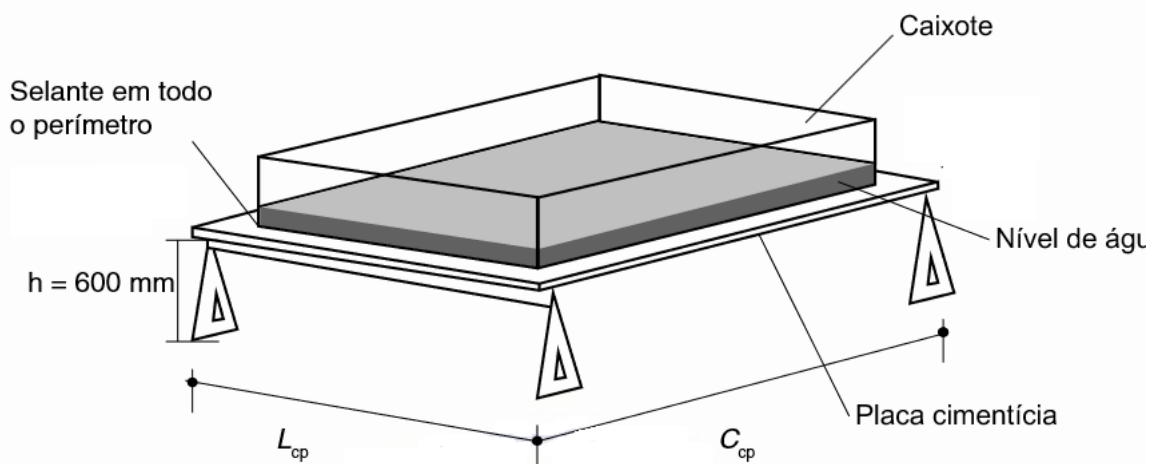


Fig. 3.7 – Esquema proposto para ensaio de permeabilidade.

FONTE: NBR 15498/2016

onde:

L_{cp} = largura da placa (460 mm)

C_{cp} = comprimento da placa (460 mm)

Após a selagem da caixa deve-se encher o recipiente com um nível de 20 mm acima da superfície da placa (valor mínimo pela norma), e deixou o conjunto a uma atmosfera controlada com temperatura (23 ± 10) °C e umidade relativa de (50 ± 20) % durante um período de 24 horas.

Após esse período foram retiradas fotografias para análise da face inferior da placa, comparando-o com os resultados anteriores, segundo a NBR 15498/2016 pode-se permitir a formação de umidade nesta face, mas em nenhum caso pode-se considerar aceito placas que formem gotas de água, sendo estas rejeitadas nesta análise.

3.4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO FOGO DAS PLACAS

Uma das condições críticas para uso de materiais de construção é a situação em que são expostos a elevadas temperaturas, como em incêndios, neste momento os materiais devem ter exigências mínimas para não provocar danos significativos aos usuários.

Quando se descreve a exposição em condições mais agressivas, como em uma situação de incêndio, a diferença de temperatura existente entre um lado e outro possibilita a transferência de calor através da placa. Este fenômeno é complexo, pois o aquecimento das placas, que é constituída de diversos materiais, pode exalar gases tóxicos aos usuários, podendo causar inclusive a morte, além de reações químicas diversas que devem alterar a constituição da argamassa. Além disto, com a mudança de fase da umidade presente nos materiais, ocorre transporte de massa através do meio poroso parcialmente saturado, afetando a transferência de calor. A transferência de calor pode ser definida como o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura num meio, ou entre vários meios (INCROPERA; DEWITT, 1992; BUCHANAN, 2002). A transmissão de calor em placas pode ocorrer pelos processos de condução, radiação e convecção.

Primeiramente, com o início do fogo, a temperatura dos gases no interior do compartimento submetido ao incêndio irá aumentar, apresentando uma

temperatura $T_{\infty 1}$, superior à temperatura da superfície da placa exposta à ação do fogo T_{S1} , ocorrendo a transferência de calor por convecção e radiação do ar aquecido no interior do compartimento para a face da parede (NGUYEN et al, 2009). Com a elevação da temperatura da superfície da face exposta ao fogo T_{S1} , haverá uma diferença entre esta e a temperatura da superfície não exposta ao fogo T_{S2} , que se traduzirá na troca de calor entre as duas superfícies (ROSEMANN et al, 2010).

Para este trabalho optou-se pelo uso da NBR 9442/1986 que é utilizada para a determinação da propagação de chama de materiais de construção utilizando-se o método do painel radiante.

Para o ensaio, que foi realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT da Universidade de São Paulo, foi confeccionado um total de seis corpos de prova para cada traço analisado com 150 mm de largura por 460 mm de comprimento com espessura de 25 mm. Estes corpos de provas foram inseridos em um painel radiante poroso, com 300 mm de largura e 460 mm de comprimento, alimentado por gás propano e ar. O conjunto (suporte e corpo de prova) foi posicionado em frente ao painel com uma inclinação de 60° de modo a expor o corpo de prova a um fluxo radiante padronizado.

Assim o ensaio resulta na determinação do fator de propagação de chama desenvolvido na superfície do material (P_c), que foi medido através do tempo para atingir as distâncias padronizadas no suporte metálico com os corpos de prova, e o fato de evolução de calor desenvolvido pelo material (Q), medido através de sensores de temperatura (termopares). O índice de propagação superficial de chama é dado pela Eq. A:

$$I_p = P_c \times Q \quad (\text{Eq. A})$$

onde:

I_p = Índice de propagação superficial de chama;

P_c = Fator de propagação de chama;

Q = Fator de evolução do calor.

3.4.5 ENSAIOS DE ACEITAÇÃO EM CORPOS DE PROVA

Na sequência foram realizados ensaios em corpos de prova, que foram retirados das placas confeccionadas, seguindo toda a prescrição da NBR 15498/2016 que determina que estes ensaios sejam realizados com corpos de prova. Assim subdividiu-se em dois grupos, os ensaios de aceitação, que englobam a resistência a tração na flexão (em equilíbrio e saturado), absorção de água, densidade aparente, variação dimensional e os de durabilidade que são imersões em ciclos de molhagem e secagem.

Assim para a confecção dos corpos de prova a norma recomenda que sejam retirados quatro corpos de prova em cada placa a ser ensaiada, sendo dois para ensaios na direção transversal e dois na longitudinal, procedendo a sua respectiva identificação. Um dos critérios utilizados para a determinação do tamanho da placa foi possibilitar uma redução do corte a ser feito nas placas.

Para placas com espessura entre 9 mm e 30 mm os corpos de prova podem ser quadrados ou retangulares, optou-se por corpos de prova quadrados com 23 cm x 23 cm. Para o corte dos corpos de prova na placa fez-se a devida marcação de maneira e dividi-la em quatro partes de igual tamanho.

Para a realização dos ensaios de aceitação conceituou-se os corpos de prova em estado de equilíbrio (três dias em atmosfera controlada com temperatura ambiente e umidade do ar controlados, tendo todas suas faces ventiladas) e saturados (imersão em água à temperatura de 5 °C a 40 °C por no mínimo 24 h, tomando-se o cuidado de realizar os ensaios em até 15 min após retirada e retirada do excesso de água superficial).

3.4.5.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Quando falamos de placas cimentícias, a resistência à flexão simples mostra-se como um importante parâmetro a ser analisado, e sua resistência é um condicionante as dimensões da placa e sua respectiva aplicação. Este método de cálculo utiliza uma determinada carga aos 28 dias após a moldagem das placas, expresso pela *Eq. B*:

$$R_f = \frac{3 \times P_{max} \times L}{2 \times b \times e^2} \quad (\text{Eq. B})$$

onde:

R_f = Resistência à tração na flexão (Mpa);

P_m = Carga máxima de ruptura por flexão (N);

L = Distância entre os eixos (mm);

b = largura dos corpos de prova (mm);

e = espessura média (mm).

A distância entre os eixos do suporte para o ensaio foi fixada em 210 mm seguindo orientação da NBR 15498/2016. Assim a resistência à tração na flexão da placa foi a média aritmética dos quatro valores encontrados, no estado de equilíbrio e saturado. O ensaio foi realizado na prensa EMIC 23-1MN DE 100.000 kgf com uma velocidade de carregamento de (50 ± 10) N/s, seguindo padrões das normas técnicas brasileira para este tipo de ensaio em argamassas. A Fig. 3.8 mostra a execução do ensaio.



Fig. 3.8 – Execução do ensaio de resistência à tração na flexão.
FONTE: Próprio Autor

3.4.5.2 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a execução do ensaio de absorção de água a NBR 15498/2016 exige ao menos quatro corpos de prova com área superficial de pelo menos 20 cm^2 que podem ser resultantes do processo de ruptura mecânica, desde que de regiões não

danificadas. Sendo assim verificou-se que todas as partes dos corpos de prova resultantes da ruptura atendem a esse critério, sendo totalizados para este ensaio quatro corpos de prova para cada traço.

A execução deste ensaio foi relativamente simples, onde colocou-se os corpos de prova submerso em água e determinou sua massa (m_i), logo após os mesmos foram colocados em estufa para secagem mantidos à temperatura de 100 °C por 24 h, ou até massa constante (variação inferior a 0,1 %), onde determinou-se outra massa (m_f). Duas medidas de massa consecutivas devem ser obtidas observando um intervalo de pelo menos 1 h entre elas.

Assim determinou-se a absorção de água através da *Eq. C*:

$$AA = \left(\frac{m_i - m_f}{m_f} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. C})$$

onde:

AA = Absorção de água (%);

m_i = massa inicial suturada (g);

m_f = massa final seca (g).

3.4.5.3 ENSAIOS DE DENSIDADE APARENTE

Para a execução deste ensaio segue-se a mesma normativa de extração de corpos de prova para a absorção de água de água, onde exige-se ao menos quatro corpos de prova com área superficial de pelo menos 20 cm² que podem ser resultantes do processo de ruptura mecânica. Sendo assim verificou-se que todas as partes dos corpos de prova resultantes da ruptura atendem a esse critério, sendo totalizados para este ensaio quatro corpos de prova para cada traço.

O ensaio consistiu-se em saturar os corpos de prova por um período mínimo de 24 h, retirar as amostras de água após esse período e enxugar a superfície com um pano úmido determinado a massa úmida saturada (m_u) pela pesagem direta. Logo após determinar a massa imersa (m_i) através de balança com dispositivo hidrostático.

Posteriormente colocou-se os corpos de prova em estufa para secagem mantidos à temperatura de 100 °C por 24 h, ou até massa constante (variação inferior a 0,1 %), onde determinou-se outra massa (m_f), teve-se o cuidado de fazer duas medidas de massa consecutivas devem ser obtidas observando um intervalo de pelo menos 1 h entre elas.

O volume (V) foi determinado pela diferença entre a massa úmida saturada (m_u) e a massa imersa (m_i), expressada em centímetro cúbicos (cm^3), considerando a densidade da água igual a 1,0 g/cm^3 .

Assim determinou-se a densidade aparente através da Eq. D:

$$\rho = \frac{m_f}{V} \quad (\text{Eq. D})$$

onde:

ρ = densidade aparente (g/cm^3);

m_f = massa do corpo de prova após secagem (g);

V = volume do corpo de prova (cm^3).

3.4.5.4 ENSAIOS DE DURABILIDADE POR CICLAGEM

O procedimento do ensaio de ciclos de molhagem e secagem consistiram na imersão dos corpos de prova em tanque de água a temperatura ambiente e posterior colocação em estufa, a uma temperatura de 100 °C em média, para secagem, completando-se assim um ciclo.

A duração das etapas de um ciclo depende de alguns critérios e do material a ser avaliado, assim como o número de ciclos que devem ser executados, para posterior avaliação das propriedades, que podem ser a massa do material (perda de massa), resistência mecânica ou outra propriedade conveniente.

Para a realização deste ensaio, a NBR 15498/2016 estipula uma amostragem de dez placas inteiras, das quais foram extraídos corpos de prova da mesma dimensão dos demais ensaios relatados em pares, totalizando-se assim dez pares de corpos de prova, tendo os pares a mesma numeração para efeito de comparação.

Assim procedeu-se separando os pares, formando-se assim dois lotes de dez corpos de prova cada, onde o primeiro lote foi submetido a ensaios de

resistência à tração na flexão no estado saturado, sem nenhum tipo de ciclo, e o segundo lote foi submetido a 50 ciclos de molhagem e secagem.

Cada ciclo teve a imersão em tanque de água à uma temperatura ambiente (entre 5°C e 40°C) durante um período de 18 h e posteriormente foi colocado em estufa ventilada a temperatura de (60 ±5) °C e umidade relativa inferior a 20% durante um período de 6 h. Após a execução dos 50 ciclos os corpos de prova foram submetidos a ensaio de resistência à tração na flexão no estado saturado, possibilitando comparação com os valores encontrados no outro lote.

Assim com os resultados obtidos, procedeu-se com a calculo relativo a cada par de corpos de prova, de maneira individual, segundo a Eq. E.

$$r_i = \frac{R_{fi}}{R_{fci}} \quad (\text{Eq. E})$$

onde:

r_i = é o resultado individual de envelhecimento acelerado por ciclos de imersão/secagem do i-ésimo corpo de prova;

R_{fi} = é a resistência à tração na flexão do i-ésimo corpo de prova após os ciclos de imersão/secagem, expressada em MPa;

R_{fci} = é a resistência à tração na flexão do i-ésimo corpo de prova de referência (primeiro lote), expressada em Mpa.

3.4.5.5 ENSAIOS DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL

O ensaio de variação dimensional visou aferir a capacidade de alteração das dimensões nominais dos corpos de prova em situação de imersão em água e secagem. Assim para a execução deste ensaio a NBR 15498/2016 recomenda a retirada de quatro corpos de prova de cada placa medindo 100 mm x 200 mm, sendo os mesmos identificados com a direção longitudinal da placa.

Para a execução do ensaio mediu-se os corpos de prova na posição central e posteriormente emergiu-os em água, mantendo-os nesta condição durante um período de 24 h, após esse período os mesmos foram retirados, secados superficialmente, e retirada as medidas na região central (l_i), posteriormente colocou-se os mesmo em estufa durante 24 h à temperatura de 100 °C a 110 °C,

ou até massa constante (variação inferior a 0,1 %), quando duas medidas de massa consecutivas devem ser obtidas, observando um intervalo de pelo menos 1 h entre elas. Retirou-se os corpos de prova da estufa, esperando o mesmo atingir a temperatura ambiente, onde efetuou-se nova medição na mesma posição anterior (l_f).

Os valores da variação dimensional por umidade devem ser obtidos pela média aritmética dos quatro valores obtidos (dois em cada direção), conforme a Eq. F:

$$v = \frac{l_i - l_f}{l_f} \quad (\text{Eq. F})$$

onde:

v = variação dimensional (%);

l_i = comprimento inicial (mm);

l_f = comprimento final (mm).

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados apurados na pesquisa foram submetidos a testes estatísticos para verificar a variância, a fim de comparar a influência de cada um dos fatores controláveis sobre as variáveis de resposta (propriedades avaliadas).

O efeito de um fator controlável sobre as variáveis respostas será determinado por um teste de comparação entre valores calculados ($F_{\text{calculado}}$) e os valores Tabelados (F_{tabelado}) de uma função de distribuição de probabilidade de Fisher. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados deverá ser confirmada se o $F_{\text{calculado}}$ for maior do que o F_{tabelado} (SANTOS, 2016).

A adoção de uma metodologia estatística mostra-se extremamente importante para a validação e interpretação dos dados que serão obtidos nos experimentos, dando uma maior confiança nos valores apurados e norteando possíveis correções e realização de novos ensaios.

Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados encontrados neste trabalho, seguindo a proposta experimental descrita no capítulo anterior, estes resultados estão agrupados de acordo com a sequência lógica apresentada no texto e estão auxiliados por discussões acerca dos mesmos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

A Fig. 4.1 mostra o resultado do ensaio de caracterização física do agregado miúdo que foi utilizado neste trabalho, que é uma areia proveniente do rio Paraíba do Sul.

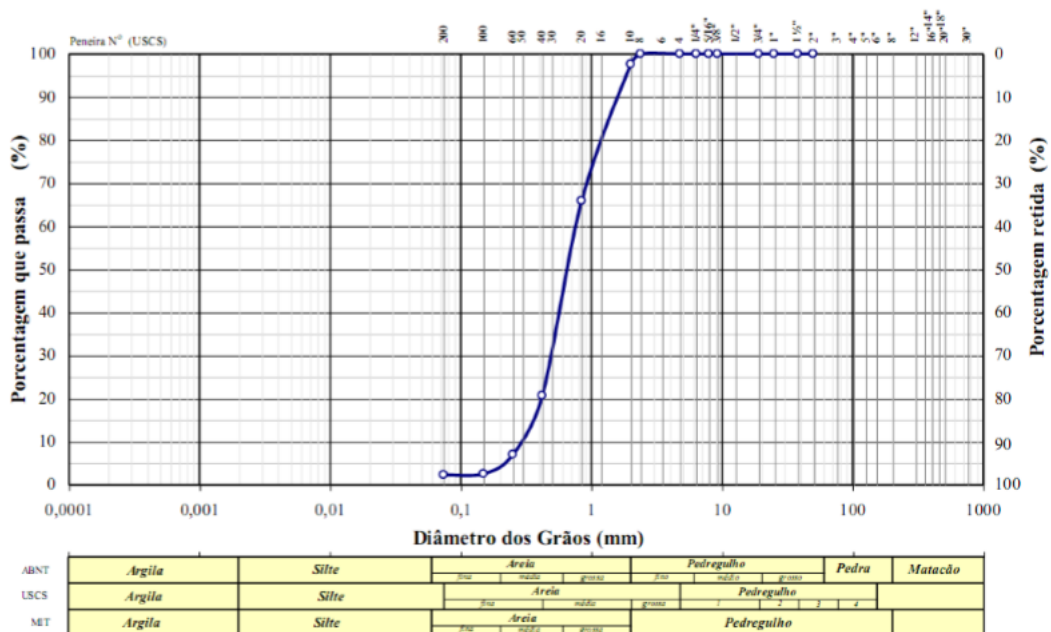


Fig. 4.1 – Resultado do ensaio de granulometria da areia utilizada.

O resultado expresso pela Fig. 4.1 mostra que a areia utilizada é constituída de 56% de areia grossa, 37% média, pouco mais de 3% de areia fina e 3% de fração silte. A NBR 7211/2009 faz considerações acerca das faixas granulométricas que os agregados miúdos devem possuir para serem utilizados em concretos e argamassas, e com os resultados encontrados no ensaio de

granulometria (Fig. 4.1) juntamente com os estipulados pela norma (limite inferior e superior) constatou-se a viabilidade do seu uso, conforme visto na Fig. 4.2 a seguir.

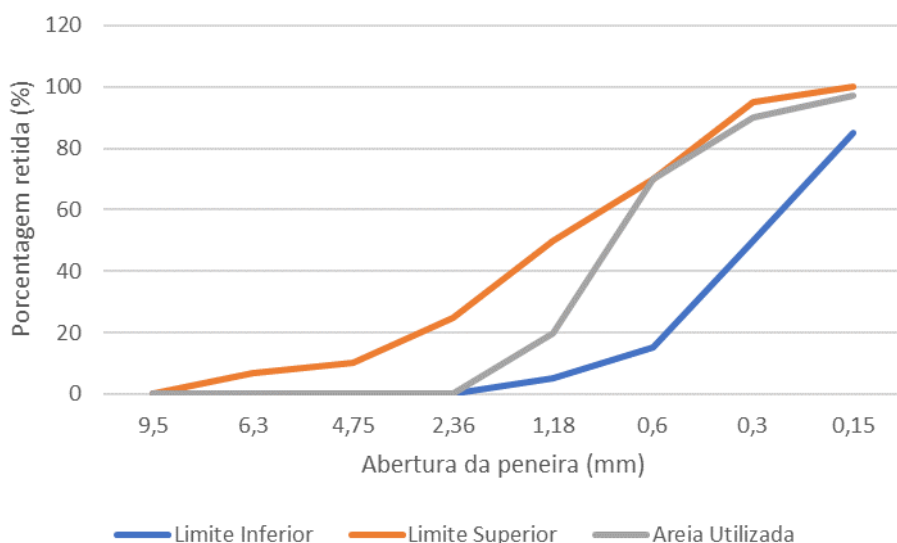


Fig. 4.2 – Comparação da (%) retira da areia utilizada com os limites da norma brasileira.

Assim a Fig. 4.2 comprova a viabilidade do uso deste tipo de agregado em argamassas. A distribuição granulométrica uniformizada do agregado, que além de proposto na norma técnica brasileira e relatada na literatura internacional, possibilita um melhor efeito de preenchimento da matriz cimentícia, reduzindo a existência de espaços entre a pasta e garantindo a argamassa maior compacidade, além da redução dos custos devido ao seu custo frente aos demais materiais que compõe a argamassa (GRATTAN-BELLEW, et al, 1988).

Outros importantes ensaios foram realizados na areia utilizada, que são os de massa específica (NBR 9770/1987), porcentagem de vazios, com uma metodologia proposta por MARGALHA et al, 2007 e massa unitária no estado solto (NBR NM 45/2006), cujos resultados estão demonstrados na Tab. 4.1 a seguir.

Tab. 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo.

Ensaio Realizado	Resultado Apurado
Massa específica (g/cm ³)	2,63
Porcentagem de vazios (%)	32
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	1,38

Os resultados encontrados na Tab. 4.1 demonstram a característica de uso do agregado miúdo, a literatura descreve que a massa específica real destes agregados deve variar em torno de $2,70 \text{ g/cm}^3$, valor esse encontrado através do ensaio realizado, a porcentagem de vazios, de 32%, tem relação direta com a massa unitária no estado solto, muito utilizada para conversão do traço de massa para volume, pois descontam-se os vazios internos, sendo os resultados encontrados similares a outros autores, como MARGALHA et al, 2007; ITIM et al, 2011 e NEVILE, 1997.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

Foi realizada a análise granulométrica do resíduo após seu processo de beneficiamento tradicional via secagem, tornando-o um pó de coloração cinza, o resultado desta caracterização encontra-se disponível na Tab. 4.2 a seguir.

Tab. 4.2 – Resultado do ensaio de granulometria do resíduo utilizado.

Pedregulho (%)			Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)
Grosso	Médio	Fino	Grosso	Médio	Fino		
-	-	-	-	2,80	8,40	50,80	37,80

Com o resultado encontrado na análise granulométrica, podemos concluir que o material utilizado apresenta uma elevada porcentagem de fração silte (50,80%) e argila (37,80%) podendo ser classificado como um material silte-argiloso. Esta informação tem grande aplicabilidade quanto a sua utilização em matrizes cerâmicas, conforme estudos realizados por Viera et al, 2016 que utilizaram o resíduo da indústria de papel e celulose na produção de tijolos cerâmicos. No caso de materiais cimentícios, devido ao próprio modo de incorporação, que se deu no estado líquido, esta informação tem pouca representatividade.

Outra informação deste material, que tem importância significativa, é a determinação da massa específica e da sua umidade, que seguem na Tab. 4.3 a seguir.

Tab. 4.3 – Resultados da massa específica (g/cm³) e teor de umidade (%).

Massa específica (g/cm ³)	1,95
Umidade média (%)	55,70

Conforme pode ser visto na Tab. 4.3 o resíduo tem uma massa específica menor que a do agregado miúdo utilizado, essa menor massa específica deve-se ao fato de maiores volumes internos do material não preenchido em sua constituição, que podem ser confirmados pelas análises químicas e micrografias contidas neste trabalho. Segundo Alda (2008) a configuração tubular, originada pela presença de elevada quantidade de celulose, confere uma redução na massa específica do resíduo. Quanto a sua umidade, o elevado valor encontrado, cerca de 55,70%, refere-se a elevada quantidade de água oriunda do processo de produção que fica aprisionada nos poros internos (Vieira et al, 2016), estando estes dentro das médias encontradas na literatura nacional e internacional.

A atividade pozolânica foi determinada através do método de Lúxan, que avalia a diferença de condutividade, para este ensaio foram preparadas três amostras, que passaram por três peneiras diferentes (#100, #200 e # 270), avaliando assim a influência da finura do material na pozolanicidade. Os resultados estão demonstrados na Tab. 4.4.

Tab. 4.4 – Resultado da pozolanicidade do resíduo.

Amostra	Condutividade (ms/cm a 25°C)		Diferença de condutividade (ms/cm a 25°C)
	Inicial	Final	
# 270 (0,053 mm)	6,27	5,17	1,10
# 200 (0,075 mm)	6,41	5,53	0,88
# 100 (0,150 mm)	6,32	5,60	0,72

Segundo Lúxan, 1989 a atividade pozolânica é determinada através da diferença de condutividade inicial e final, sendo sua classificação padronizada com as faixas disponíveis na Tab. 4.5.

Tab. 4.5 – Faixas de atividade pozolânica propostas por Lúxan, 1989.

Grau de pozolanicidade	Condutividade
Sem atividade pozolânica	< 0,40 mS/cm
Atividade pozolânica moderada	$0,40 \leq \text{condutividade} < 1,20$ mS/cm
Boa atividade pozolânica.	> 1,20 mS/cm

Todas as três amostras, verificadas na Tab. 4.4, encontram-se com média atividade pozolânica, o que garantem ao material uma variabilidade maior de aplicações, além de justificar alguns comportamentos citados na literatura, além de que com a presença do hidróxido de cálcio a temperatura ambiente podem originar compostos com propriedades cimentícias (NURCHASANA, 2013).

Outra característica observada e que quanto maior a finura do material maior tende ser sua condutividade, isso deve-se ao aumento da área superficial que garante maior disponibilidade de reações com o ambiente, favorecendo a condutividade, entretanto existem limites para que esta finura não prejudique outras propriedades (MOROPOULOU et al, 2004).

A análise química, realizada com a técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (EDX) pode ser observada na Tab. 4.6 a seguir.

Tab. 4.6 - Caracterização química por EDX do resíduo da produção de papel em % de componente.

CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SrO	ZnO	ZrO ₂
79,006	8,898	8,559	1,163	1,106	0,751	0,352	0,105	0,052	0,007

Os resultados apresentados na Tab. 4.6 mostram que o resíduo é constituído predominantemente de óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃). O CaO está associado à calcita. Já o SiO₂ e o Al₂O₃, estão combinados formando a estrutura da caulinita. O carbono está associado à presença de celulose. Os demais óxidos presentes TiO₂ e Fe₂O₃, são possivelmente de impurezas presentes no caulim e na calcita.

A quantidade elevada, 79%, de CaO contribui para as reações em pasta. Na verdade, o CaO pode aumentar a força mecânica da argamassa, no entanto, as

propriedades finais da argamassa incorporada dependem de vários outros fatores além da composição de resíduos (PORTER et al, 2017).

A Fig. 4.3 mostra uma micrografia do resíduo com características similares (em dois aumentos diferentes), dispersos em uma matriz cimentícia, oriundo da literatura, que mostra a presença de hidróxidos de cálcio (CH) e a formação de hidrato de silicato de cálcio (CSH), que são oriundos do processo de hidratação do cimento.

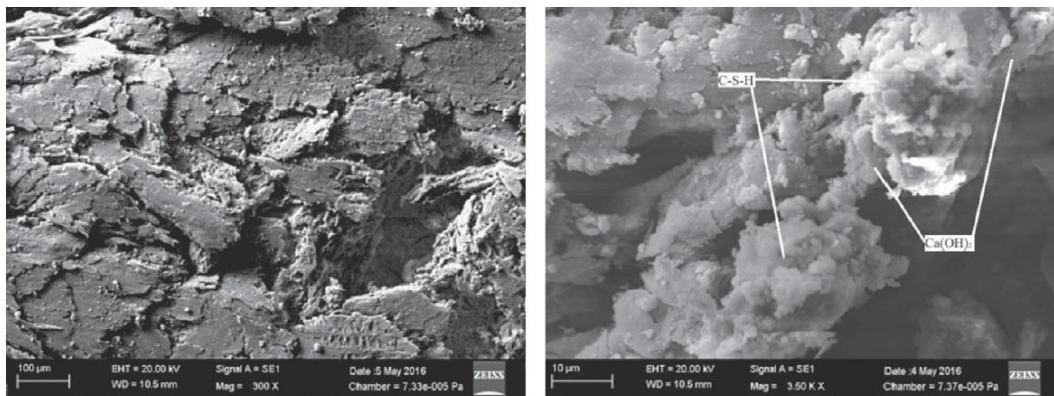


Fig. 4.3 – Interação superficial do resíduo com uma matriz cimentícia.
FONTE: CAVDAR et al, 2017.

Outra micrografia, agora somente do resíduo, proposta por PINHEIRO et al, 2008, pode ser observada na Fig. 4.4 abaixo, em diferentes aumentos.

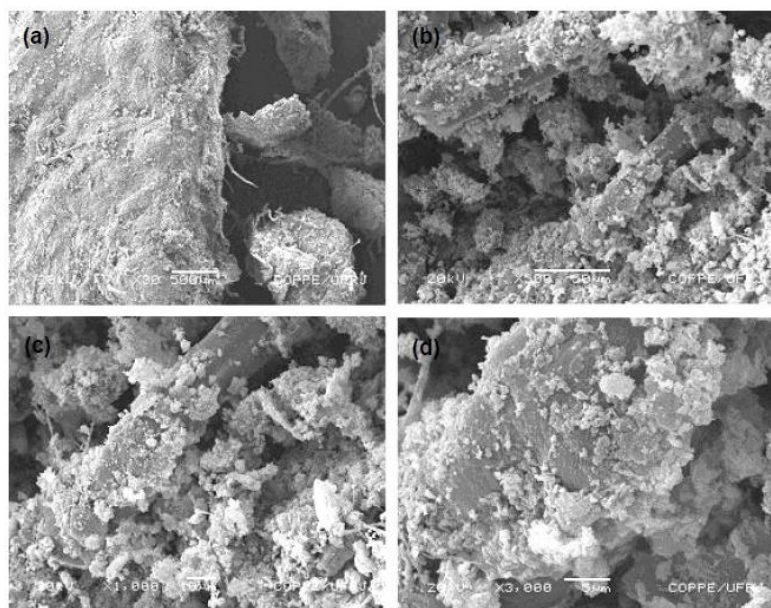


Fig. 4.4 - Micrografias de MEV do lodo. (a) 30 x; (b) 500 x; (c) 1000 x; (d) 3000 x.

FONTE: PINHEIRO et al, 2008.

Pode-se observar que o lodo apresenta pequenos tubos entrelaçados entre si que possivelmente representam as fibras de celulose. Na Fig. 4.4(a) o resíduo apresenta-se em forma mais compacta, possivelmente trata-se de um aglomerado constituído de celulose, calcita e caulinita. Já na 4.4 (b), 3 (c) e 3 (d) ocorre o aparecimento bastante visível das fibras de celulose, com partículas associadas em sua superfície. Esta constituição morfológica do resíduo incorporado indica que devido a presença de fibras de celulose o mesmo pode se comportar como um material de reforço dentro da matriz cimentícia, o que acarretará em uma argamassa mais resistente e com maior empacotamento, melhorando parâmetros relativos a durabilidade.

A Fig. 4.5 mostra o difratograma de raios-X do lodo, onde C = Calcita e CC = Caulinita.

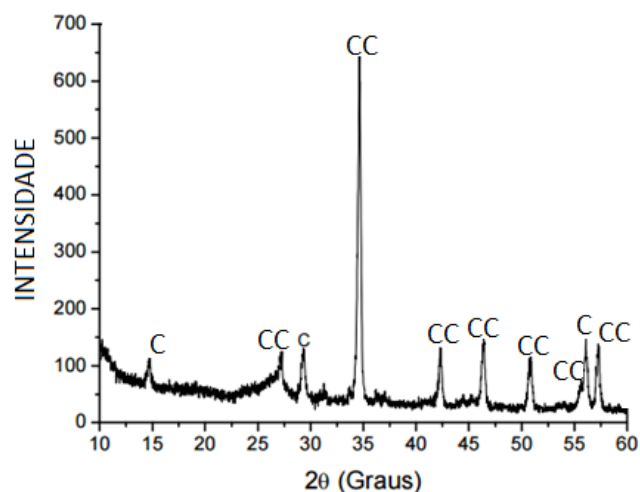


Fig. 4.5 – Difração de Raio-X do lodo estudado.

Na Fig. 4.5 é possível observar que o lodo apresenta como fases cristalinas majoritárias a caulinita, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, que é o principal constituinte do caulim, presente em grandes proporções no resíduo, e a calcita, carbonato de cálcio, CaCO_3 . Estes materiais são provenientes das aparas de papel presentes no processo produção da indústria de onde o material é originado.

Segundo Vieira et al, 2016 este material quando submetido a elevações de temperaturas (900°C) forma compostos como silicatos de cálcio, a portlandita e o óxido de cálcio. As reações de hidratação do cimento, que ocorrem em materiais cimentícios, provocam um natural aumento da temperatura interna, o que sugere o

início da formação destes compostos, porém devido ao curto período e as temperaturas finais alcançadas, inferiores as verificadas por Vieira et al, 2016, a formação fica comprometida (WONG e BUENFELD, 2009).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REFORÇO

Foram utilizadas neste trabalho dois tipos de materiais de reforço, a tela metálica de formato hexagonal composta de fios entrelaçados, denominada aqui de RM, e as telas de polietileno de alta densidade também em formato hexagonal, denominada neste trabalho como RP.

Inicialmente procedeu-se com a caracterização dos materiais de reforço segundo a NBR 10122/2014, conforme a Tab. 4.7 a seguir:

Tab. 4.7 – Caracterização do material de reforço segundo NBR 10122/2014.

Tipo	Malha (pol)	Diâmetro (mm)	Gramatura (g/m ²)	Altura comercial (m)	Comprimento do rolo (m)
RM	½	0,56	20	1,50	50,0
RP	½	0,61	28	1,50	50,0

Foram escolhidas telas, de ambos materiais, comerciais do mercado, que são vendidas em rolos de altura de 1,50 m e comprimento de 50,0 m, também foi mantido a característica geométrica da abertura de ambas, com formato hexagonal em malha de meia polegada. Os diâmetros e gramatura foram fornecidos pelos fabricantes e atendem aos requisitos da NBR 10122/2014.

Ambos os materiais foram ensaiados quanto a sua tração, onde foi aferida a carga de ruptura máxima, conforme a Tab. 4.8 a seguir.

Tab. 4.8 – Resultados do ensaio de caracterização dos materiais de reforço.

Reforço	Carga máxima de ruptura média (kN)	Modulo de Elasticidade E (Mpa)
RM	4,80 ± 0,45	7,2 x 10 ⁴
RP	5,10 ± 0,32	2,1 x 10 ²

Os resultados apresentados na Tab. 4.8 são as verificações médias, foram ensaiadas dez amostras de telas de cada tipo, todas do mesmo lote utilizado nos ensaios. Duas análises foram realizadas além da carga máxima de ruptura, a primeira refere-se ao local onde ocorreram as rupturas, se na região dos fios ou na região de junção, no caso das telas metálicas onde a região da junção é composta por um entrelace de fios de menores dimensões a ruptura ocorreu preferencialmente nos fios, regiões mais frágeis, já nas telas de plástico verificou-se o contrário, onde as rupturas ocorreram em geral na região de junção.

A segunda análise relaciona ao tipo de ruptura global, onde nas telas metálicas a ruptura é mais abrupta do que no caso das telas de plástico, onde pela própria característica do material a uma maior deformação antes da ruptura, o que justifica seu reduzido módulo de elasticidade, que é a relação entre a tensão e a deformação na direção de aplicação da carga.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA SIMPLES

Na definição do traço, ou dos traços, a serem utilizados para confecção das placas cimentícias utilizou-se os principais ensaios tecnológicos de argamassa simples, seja no estado fresco ou endurecido, cujos resultados serão demonstrados a seguir.

4.4.1. ARGAMASSA SIMPLES NO ESTADO FRESCO

O primeiro ensaio a ser realizado quando se utiliza argamassa é a definição do seu índice de consistência, esse ensaio é normatizado pela NBR 13276/2016 e visa determinar a quantidade de água a ser utilizada no traço de modo deixá-lo trabalhável.

No contexto desta pesquisa, que visa a incorporação do resíduo em forma líquida, este ensaio é de suma importância e seu resultado é mostrado na Fig. 4.6.

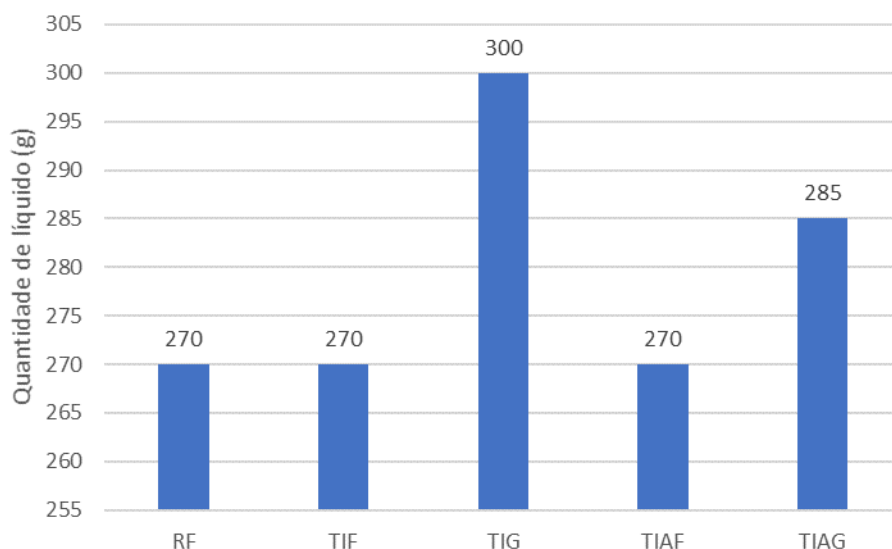


Fig. 4.6 – Resultado do ensaio de consistência dos traços de argamassa simples.

A Fig. 4.6 mostra a influência que os diferentes tipos de incorporação desempenham sobre a consistência da argamassa, resultando na quantidade de líquido necessária para atender a um espalhamento médio de 260 mm \pm 10 mm, cujos resultados de todas as tentativas estão disponíveis no ANEXO A.

Quando se relaciona a relação de material líquido por sólido na composição dos traços observa-se que esta relação gira em torno de 0,19, aumentando para 0,20 quando utilizou-se aditivo incorporador de ar, isso deve-se a uma natural redução da parte sólida proporcionada pelo uso do aditivo.

Nas argamassas com substituição pelo líquido fino, o seu consumo manteve-se constante, mesmo sabendo-se que nele há adição de resíduo, isso deve-se a boa solubilização que teve na água e o processo de peneiramento no qual foi submetido, apresentando pouco ou quase nenhum material particulado, justificando a constância dos valores.

Quando se utiliza o líquido denominado grosso, ou seja, que não passou pelo processo de peneiramento prévio, há uma maior concentração de material particulado o que se sugere a necessidade de maior quantidade de líquido para manter a mesma trabalhabilidade. Estas partículas em suspensão, que são constituídas de celulose, dificultam a coesão entre os materiais constituintes, aumentando o atrito entre eles, esse fenômeno é verificado em estudos que utilizaram o material no estado seco para produção de argamassas simples (Zanella et al, 2014).

O excesso de fluidez da argamassa prejudica diretamente seu comportamento no momento de moldagem dos corpos de prova, ou das placas, além de afetarem as propriedades mecânicas do estado endurecido (KARATAS et al, 2017).

Outra importante propriedade relacionada com as argamassas no estado fresco é o teor de ar incorporado, que se refere a quantidade de microbolhas de ar que se constituem dentro da argamassa. No caso deste trabalho pelo uso do aditivo incorporador de ar essa propriedade é de fundamental análise, pois, elevados valores são prejudiciais a integridade final do produto, os resultados podem ser observados na Fig. 4.7.

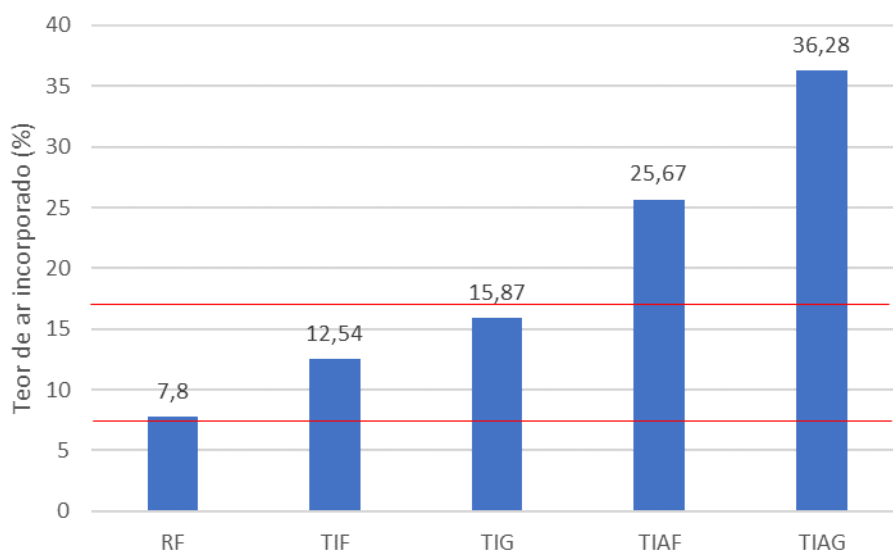


Fig. 4.7 – Resultado do ensaio de teor de ar incorporado (%).

A Fig. 4.7 demonstra o efeito do teor de ar incorporado nos traços de argamassa simples, onde a linha vermelha demonstra os limites inferior e superior de teor de ar incorporado estipulados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, que é de 7% a 17%, que garantem a massa condições de uso e aplicações adequadas.

Estes limites são questionáveis do ponto de vista do tipo de argamassa que se deseja e sua respectiva aplicação, estudos recentes (GOKCE et al, 2004) relatam argamassas com teor de ar incorporado na ordem de 20% que obtiveram desempenho satisfatório em condições de exposição adversas, como baixas

temperaturas, isso deve-se ao fato de absorverem alterações volumétricas na matriz nos poros existentes.

O teor de ar incorporado de uma argamassa é dependente de fatores como o tipo de misturador utilizado, tempo de mistura, fator a/c, granulometria dos agregados, velocidade da mistura e presença de aditivo incorporador, entre outros. No caso deste trabalho a grande parte destes fatores foi controlada de modo a possibilitar uma comparação, excluem-se neste caso o líquido utilizado (que variou de acordo com a traço) e o uso ou não do aditivo.

Verificou-se que nos traços onde há utilização do aditivo incorporador de ar houve um significativo aumento desta propriedade, o que era esperado, outra variável que contribuiu significativamente para o aumento do teor de ar incorporado foi o uso do líquido grosso, pois a presença de pequenas partículas em suspensão afetou o processo de mistura mecânica e sua respectiva velocidade, introduzindo ar dentro da argamassa e conferindo o respectivo aumento do teor de ar incorporado.

Segundo HEMALATHA et al, 2016 o uso de materiais em suspensão, ou de diferentes granulometrias, que pode ser resíduos sólidos particulados, dentro da composição da mistura, provocam uma alteração no teor de ar incorporado, tendo que ser controlado a quantidade de incorporação destes resíduos.

Um dos fatores que contribuem para a trabalhabilidade das argamassas é a perda de água de amassamento, que pode ser pela absorção de água pela base, substrato, ou por evaporação no meio em que se encontram, esta característica é chamada de retenção de água, que pode influenciar na qualidade final do produto, os resultados da retenção de água são demonstrados na Fig. 4.8.

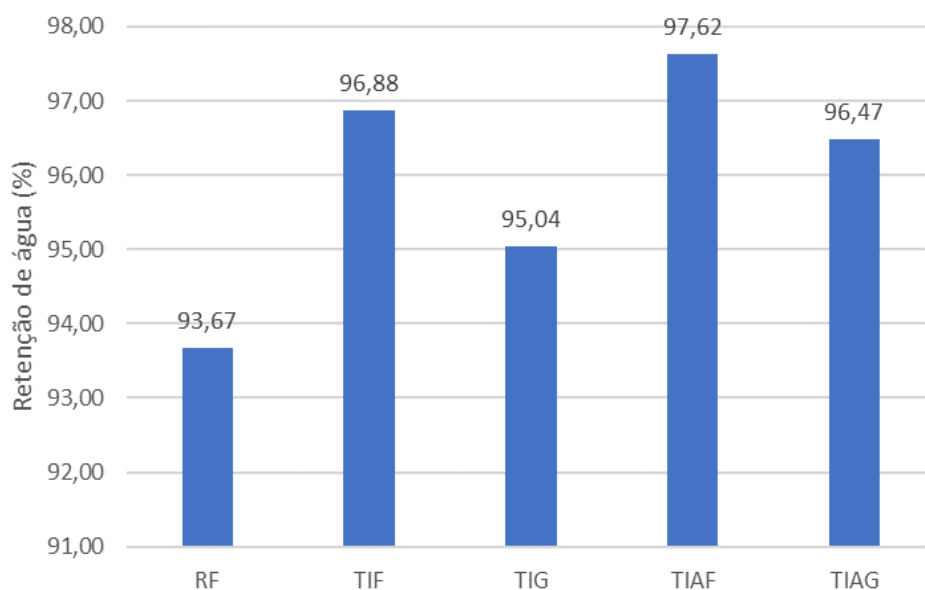


Fig. 4.8 – Resultados da retenção de água (%).

A celulose, presente no resíduo estudado, contribui para o incremento da retenção de água nas argamassas, sendo inclusive utilizada como base de alguns aditivos disponíveis no mercado, como a hidroxietil celulose (HEC), isso justifica o acréscimo da retenção verificada na Fig. 4.8, onde em todos os traços analisados houve aumento desta propriedade (MARLIERE et al, 2012).

Em argamassas onde utilizou-se o líquido fino, o aumento da retenção de água foi significativamente maior, 3,4% em relação ao traço de referência, este fato justifica-se devido a solubilização do resíduo com a água reduzir as perdas da fase líquida geral, chamada água de amassamento, para o ambiente externo, aumentando a respectiva retenção.

Outra análise a ser feita é quanto ao uso dos aditivos incorporadores de ar, em ambos traços (TIAF e TIAG) houve aumento de 4,2% e 2,9% respectivamente em relação ao traço de referência, isso deve-se ao aumento de ar dentro do compósito o que favorece ao aprisionamento da água de amassamento nestes espaços (CAPPELARI et al, 2013).

Baixos valores de retenção de água são prejudiciais pois sugerem elevada perda de água para o ambiente externo ou substrato o que gera retração na argamassa e culmina no aparecimento de fissuras superficiais, que afetam a durabilidade da mesma, principalmente para a aplicação que deseja-se, placas

cimentícias, já o efeito de elevados valores de retenção de água pode ser um problema em ambientes de elevada variação de temperatura onde a mudança de estado físico afetará o comportamento do compósito. Todos os resultados encontrados são perfeitamente aceitáveis para a finalidade a que se propõe.

Os materiais a base de cimento, quando em estado fresco, são basicamente partículas reativas de cimento juntamente com partículas inertes de agregados que encontram-se dispersas em água. As reações químicas que ocorrem entre o cimento e a água formam uma camada de produtos hidratados que reagem em um determinado tempo, se inicia o processo de endurecimento, onde este intervalo de tempo é fundamental, pois possibilita o uso destes materiais, o que se denomina de trabalhabilidade (YOUNG et al, 1998).

O comportamento reológico das argamassas é analisado sob a perspectiva da ciência do fluxo e deformações dos materiais, analisando a interação da tensão, deformação e o tempo. Estudos demonstram que as argamassas são materiais que resistem sem fluir a tensões de corte inferiores à tensão de cedência, apresentando um comportamento linear entre tensão e deformação (GLATTHOR e SCHWEIZER, 1994).

A análise reológica influi diretamente sobre a trabalhabilidade e para este trabalho analisou-se sob a perspectiva do squeeze flow, onde pode-se variar de forma significativa conforme se alteram os materiais ou as suas características (AZEVEDO et al, 2017). Os resultados dos ensaios de squeeze flow são demonstrados na Fig. 4.9 e Fig. 4.10, de acordo com a velocidade dos ensaios.

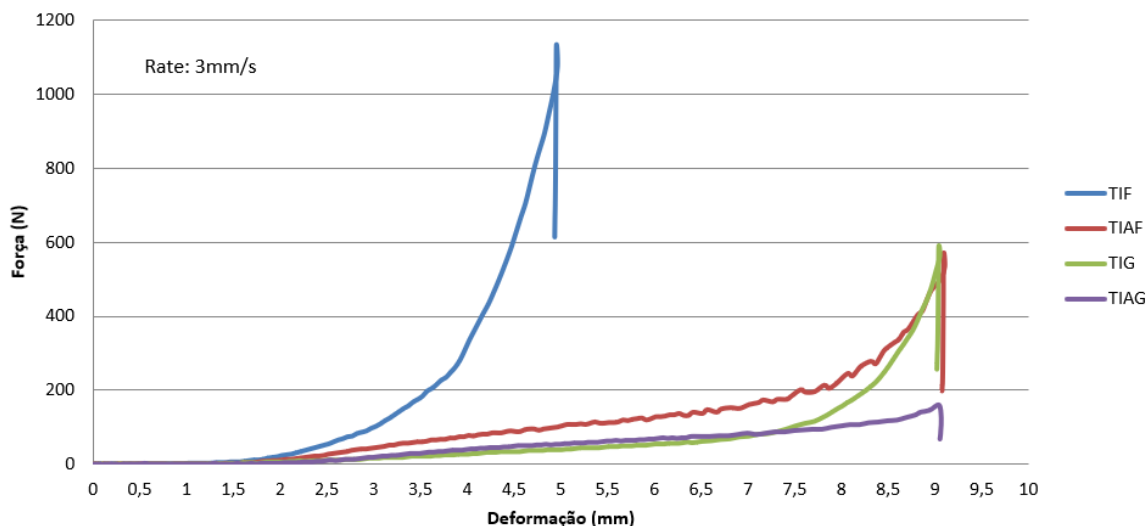


Fig. 4.9 – Resultado do ensaio de Squeeze Flow para uma taxa de 3 mm/s.

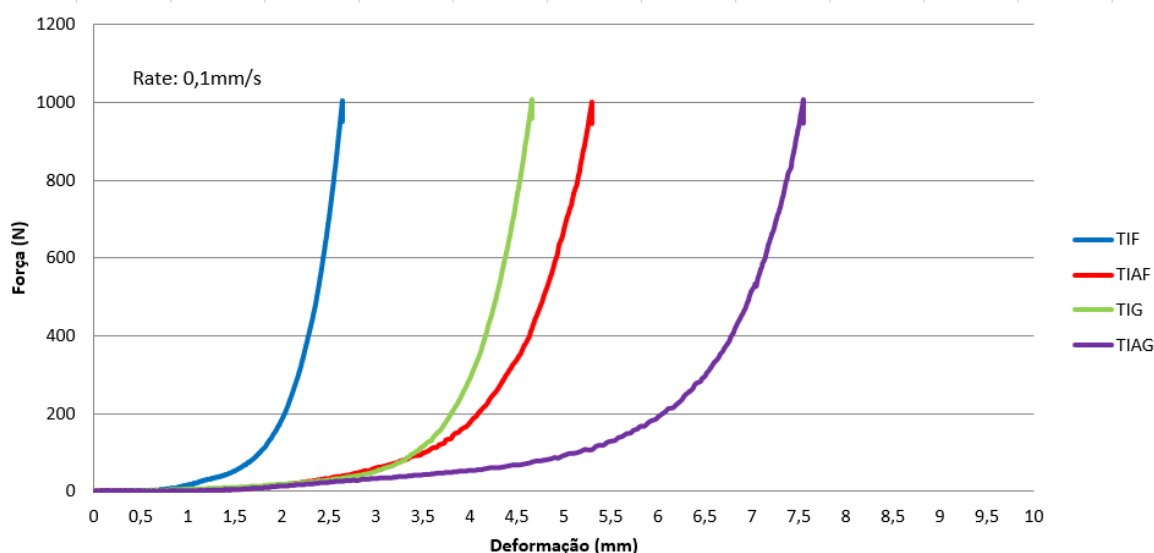


Fig. 4.10 - Resultado do ensaio de squeeze flow para uma taxa de 0,1 mm/s.

O ensaio de squeeze flow foi realizado sob influência de duas taxas, uma de 3 mm/s (Fig. 4.9) e outra de 0,1 mm/s (4.10), limitando-se os deslocamentos em 9 mm e uma carga máxima de 1 kN, seguindo a prescrição da NBR 15839/2010.

Os resultados apresentados com uma maior taxa de carregamento (Fig. 4.9) indicam que as argamassas, com exceção do traço utilizando líquido fino sem aditivo, apresentam uma elevada deformação, chegando ao máximo do ensaio (9 mm) para uma baixa carga aplicada, sendo que quando utilizado o aditivo incorporador de ar em conjunto com o líquido grosso essa carga é ainda menor. A alta dispersabilidade dos resultados encontrados sob essa taxa indica que a

argamassa tem sua fluidez acentuada, alguns autores indicam que sob elevadas taxas de carregamento a compressibilidade provoca um elevado escoamento, o que mascara os resultados, o que explica a dispensabilidade encontrada (CARDOSO et al, 2009).

Sob a análise dos resultados a taxa de compressibilidade de 0,10 mm/s os resultados mostram-se mais confiáveis e coerentes dentro de uma lógica da literatura, onde a presença de líquidos com maiores partículas em suspensão e o uso do incorporador de ar promovem aumento considerável da deformação. Em suspensões cuja concentração de partículas sólidas é alta, como no líquido grosso utilizado, acaba-se originando fortes interações o que promovem uma aglomeração que geram maiores espalhamentos da massa devido a melhora da coesão entre os constituintes (BANFILL, 1987)

O tamanho e a forma dos materiais que constituem a argamassa são determinantes para fatores reológicos que irão atuar sob o sistema, o processo de mistura pode ocasionar uma redução na resistência ao fluxo interno o que favorece a trabalhabilidade (AZEVEDO et al, 2017), como neste trabalho, os resultados de caracterização dos materiais indicaram uma combinação que vise a redução destes fatores, isso foi verificado quando nenhum traço analisado atingiu os valores limites do ensaio.

A Fig. 4.11 apresenta faixas de comportamento reológico típico de argamassas submetidas ao mesmo ensaio, proposto por ENGMANN et al, 2005.

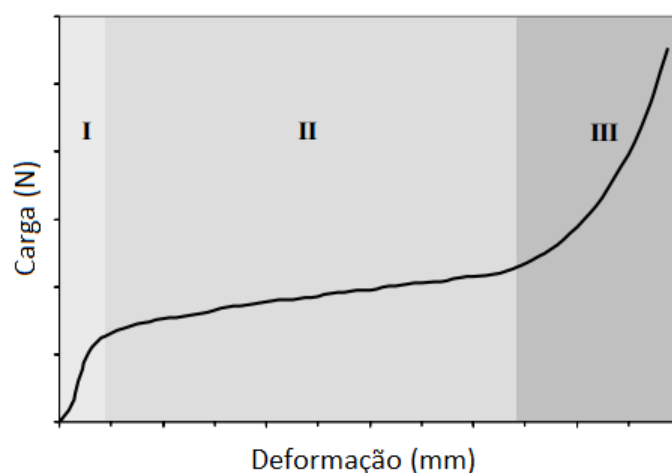


Fig. 4.11 – Faixas de agrupamento de característica reológica de argamassas proposto por ENGMANN et al, 2005.

No estágio I em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear. Uma argamassa que apresente comportamento com uma parcela significativa nesse estágio, possivelmente apresentará problemas de fissuração ainda no estado fresco devido à recuperação elástica após a retirada do esforço (após a passagem da desempenadeira) (ENGMANN et al, 2005).

Já no estágio seguinte (II), em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material submetido ao comportamento elástico, e assim, o mesmo flui por deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento de argamassas (AZEVEDO et al, 2017).

Já no terceiro estágio (III), no qual o material é submetido a grandes deformações, pode ocorrer um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para o deslocamento do mesmo. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema (fibras de celulose, por exemplo) submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação (embricamento ou entrelaçamento) das unidades móveis (CARDOSE et al, 2014). Provavelmente, este é um estágio de comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material devem ser dificultados, devido às altas cargas (tensões) necessárias para deformá-lo, possivelmente levando a um acabamento defeituoso.

As argamassas submetidas as taxas de 3 mm/s apresentam basicamente um comportamento entre os estágios II e III onde a transição ocorre de maneira média e há predominância do estágio II, com exceção do traço TIF que é tipicamente do estágio III. Já a taxas de 0,10 mm/s o comportamento é similar a taxas maiores, entretanto a transição entre a faixa II e III ocorre de maneira lenta o que favorece estas argamassas evitando os acabamentos defeituosos que podem incorrer, apesar de ter grande parcela do terceiro estágio. Na confecção de placas cimentícias esses defeitos superficiais são muito prejudiciais, principalmente na região de borda que é crítica, podendo comprometer, logo essa transição mais lenta e suave é desejável, sendo o TIAG (com incorporador) o que melhor apresenta essa característica.

4.4.2. ARGAMASSA SIMPLES NO ESTADO ENDURECIDO

Quanto aos resultados no estado endurecido em argamassas simples, as normas técnicas brasileiras estipulam algumas características tecnológicas que devem ser avaliadas, que são extremamente importantes para o sucesso do compósito. Uma primeira análise que foi realizada é em relação a densidade de massa no estado endurecido, cujos resultados são mostrados na Tab. 4.9 e Fig. 4.12 a seguir, juntamente com o ANEXO B.

Tab. 4.9 – Resultados ampliados da densidade de massa no estado endurecido, em g/cm³.

	Densidade de massa no estado endurecido (g/cm ³)	Desvio padrão	CV (%)
RF	1,83	± 0,02	1,37
TIF	1,76	± 0,01	0,13
TIG	1,69	± 0,01	0,49
TIAF	1,57	± 0,02	1,69
TIAG	1,50	± 0,02	1,51

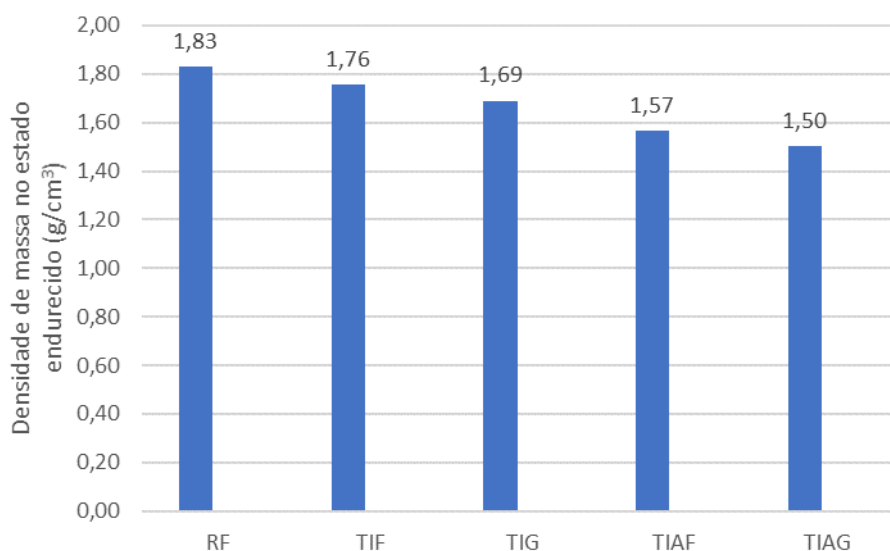


Fig. 4.12 – Resultados da densidade de massa no estado endurecido, em g/cm³.

Os resultados encontrados, presentes na Fig. 4.12, mostram uma tendência de redução da densidade de massa no estado endurecido nos traços observados, essa redução deve-se a dois fatores, a primeira refere-se ao uso do aditivo de ar

incorporado, que devido a introdução de bolhas de ar internas adicionais a argamassa, provocam aumento de vazios internos reduzindo a relação massa por área, esse fenômeno é amplamente descrito na literatura, onde o uso deste aditivo é associado em vezes a necessidade de redução desta propriedade, no caso das placas cimentícias para fins de divisórias, por exemplo, essa propriedade mostra-se fundamental para a viabilidade do produto (BARAN e PICHNIARCZYK, 2017).

O outro fator associado tem relação ao tipo de líquido utilizado, o uso do resíduo na forma dissolvida em água mostrou-se favorável nesta propriedade, onde o líquido grosso apesar de conter partículas em suspensão reduz a densidade, esse fato segundo MOROUSEK et al, 2015 deve-se a característica do material particulado, pois a celulose tem uma baixa densidade e seu formato tubular reduz a densidade de massa.

Entretanto, assim como todas as propriedades avaliadas, está também deve ser revista quanto em conjunto com o material de reforço, pois alguns mecanismos de atuação podem ser alterados.

Outra propriedade que deve ser avaliada e tem influência direta sobre a durabilidade dos materiais cimentícios é a absorção por capilaridade, esta propriedade é avaliada na Tab. 4.10 e Fig. 4.13, juntamente com o ANEXO C.

Tab. 4.10 - Resultados do coeficiente de capilaridade médio, em $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

	Coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)	Desvio padrão	CV (%)
RF	16,20	$\pm 0,45$	2,81
TIF	20,73	$\pm 0,55$	2,66
TIG	21,63	$\pm 1,64$	7,60
TIAF	7,07	$\pm 0,32$	4,55
TIAG	7,50	$\pm 0,26$	3,53

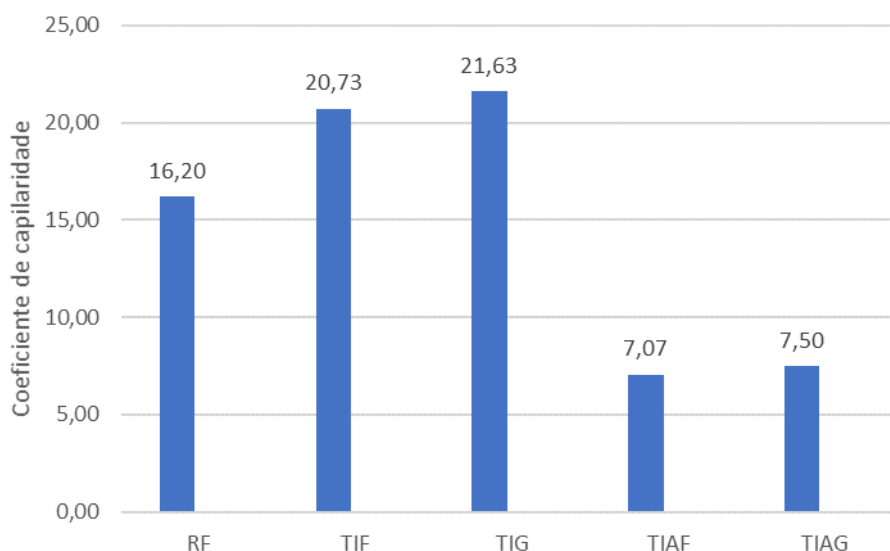


Fig. 4.13 - Resultados do coeficiente de capilaridade médio no estado endurecido, em $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$.

Os materiais cimentícios são tradicionalmente porosos, que em geral apresentam-se em duas configurações, uma são os poros que estão presentes internamente de maneira isolada e aparecem na região interfacial entre a pasta, formada pela água e aglomerantes, e agregados e os poros que trabalham de maneira comunicadas, formando grandes capilares internos dentro da matriz, onde ocorre passagem e/ou acúmulo de água e outros produtos.

Assim espera-se que a absorção de água existente através dos poros capilares, desempenhem papel importante da durabilidade e resistência mecânica das argamassas. Na Fig. 4.13 a avaliação da absorção de capilaridade é feita pelo coeficiente, onde quanto maior o seu valor maior é a intercomunicabilidade dos poros internos existentes.

Assim verificou-se que a adição do resíduo em ambos os estágios, fino e grosso, promovem um acréscimo do coeficiente, isso deve-se a característica do resíduo que em sua constituição, tem caulim e celulose, que desenvolvem uma ruptura interna, ocasionando a junção destes poros, principalmente em seu estágio particulado (HALL, 1989).

O uso de incorporadores de ar tem uma característica de redução do efeito natural que o resíduo desempenha, devido a formação de compostos de preenchimento destas rupturas internas, apesar de haver formação de bolhas internas de ar, mas estas não são comunicáveis, contribuindo somente para a

absorção simples, e não para abertura de poros capilares internos (LANZÓN e GARCIA-RUIZ, 2009).

A absorção por capilaridade é muito mais impactante na durabilidade dos compósitos do que a absorção simples, pois promove a entrada e fluxo de água interna, que pode ter elevado pH devido aos produtos alcalinos gerados pela pasta, além do fluxo de CO₂ externo, que pode prejudicar os materiais de reforço existentes (KARATAS et al, 2017).

A última propriedade analisada sob a ótica do estado endurecido e a mais utilizada para avaliar produtos é a resistência mecânica, que pode ser observada na Tab. 4.11 e Fig. 4.14 a seguir, juntamente com o ANEXO D.

Tab. 4.11 – Resultados da resistência mecânica média, em MPa.

Traço	Resistência média compressão (MPa)	Desvio padrão	CV (%)
RF	4,47	± 0,72	16,02
TIF	3,78	± 0,26	6,96
TIG	2,65	± 0,16	6,07
TIAF	2,59	± 0,33	12,59
TIAG	1,58	± 0,18	11,25
Traço	Resistência média flexão (MPa)	Desvio padrão	CV (%)
RF	1,34	± 0,10	7,61
TIF	1,12	± 0,05	4,15
TIG	0,80	± 0,07	9,05
TIAF	0,94	± 0,06	5,96
TIAG	0,51	± 0,01	1,72

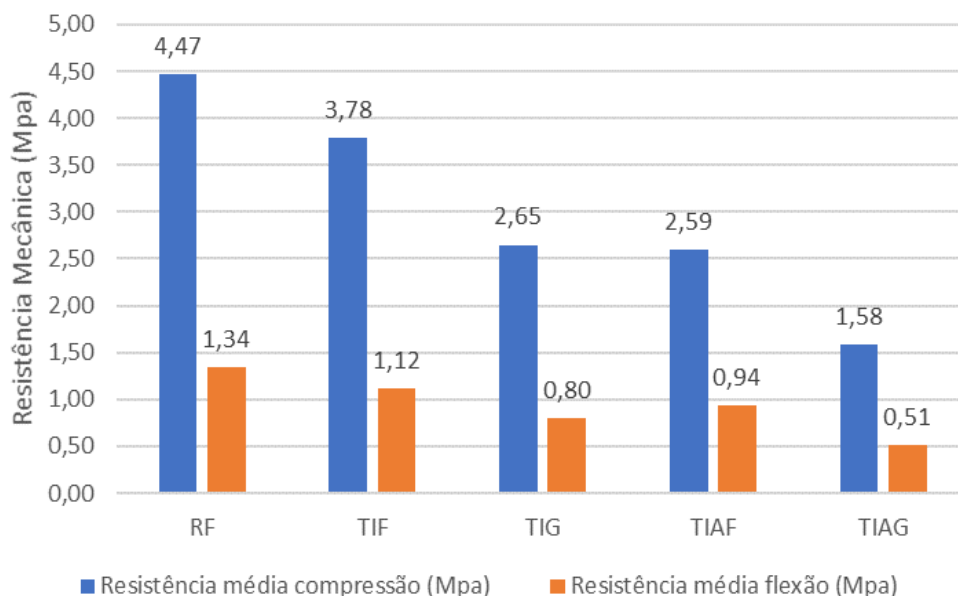


Fig. 4.14 - Resultados compilados da resistência mecânica no estado endurecido, em MPa

As argamassas são avaliadas sob o ponto de vista da resistência mecânica, quanto a ações de compressão e flexão de três pontos, ambos ensaios são normatizados e necessários para avaliar a integridade estrutural visando o uso destes compósitos. A análise dos resultados da resistência mecânica tem relação direta com propriedades no estado fresco, como o teor de ar incorporado, e no estado endurecido, como densidade de massa e capilaridade.

Segundo a Fig. 4.14, a resistência dos traços avaliados sofreu uma redução, isso pode influir causas de todas as demais propriedades. O uso de incorporadores de ar provoca uma redução da densidade de massa devido à incorporação de bolhas de ar dentro da mistura, que no estado endurecido não são comunicáveis, por isso reduz a absorção por capilaridade, porém tem reflexo direto na resistência mecânica, onde a mesma sofre uma redução quanto comparada a traços sem o uso de aditivos. Essa redução provoca uma maior fragilidade no compósito, que no caso de aplicações em placas cimentícias, se ocorrerem, poderá trazer efeitos adversos, que devem ser analisados em ensaios específicos de placa, entretanto esse comportamento pode ser alterado pelo efeito de preenchimento que o resíduo pode desempenhar na placa.

O uso do resíduo, em seu estado líquido fino, é visivelmente mais apropriada sendo essa análise, pois sua solubilização em água faz com que as reações que ele desenvolve com a pasta cimentícia, favorecido pela média pozolânicidade, diminuindo a queda de resistência visto na outra incorporação, estudos do uso deste material, em estado seco, indicam melhora das propriedades mecânicas em pequenas porcentagens de uso, substituindo-o em cal (ZUPANCIC et al, 2013). Os valores de resistência mecânica, principalmente quanto ao seu comportamento, podem ser alterados utilizando-se o ensaio em placa, devido à alteração da metodologia de moldagem, material de reforço e efeito de preenchimento do compósito.

Os elevados valores de coeficiente de variação indicam a alta dispersão dos resultados, o que pode ser um problema da metodologia de beneficiamento, isso foi verificado em outros ensaios e pode ter origem na variação de umidade do resíduo *in-natura*, por isso nos ensaios para execução das placas será aferida a umidade do resíduo a ser utilizada, utilizando-se um padrão único que inclui o controle prévio desta umidade.

4.4.3 COMPARATIVO DOS RESULTADOS DA ARGAMASSA SIMPLES

Após todos os resultados relativos à argamassa simples foi possível traçar indicativos de quais traços seriam os ideais para a confecção das placas cimentícias com reforço, a compilação dos resultados pode ser vista na Fig. 4.15.

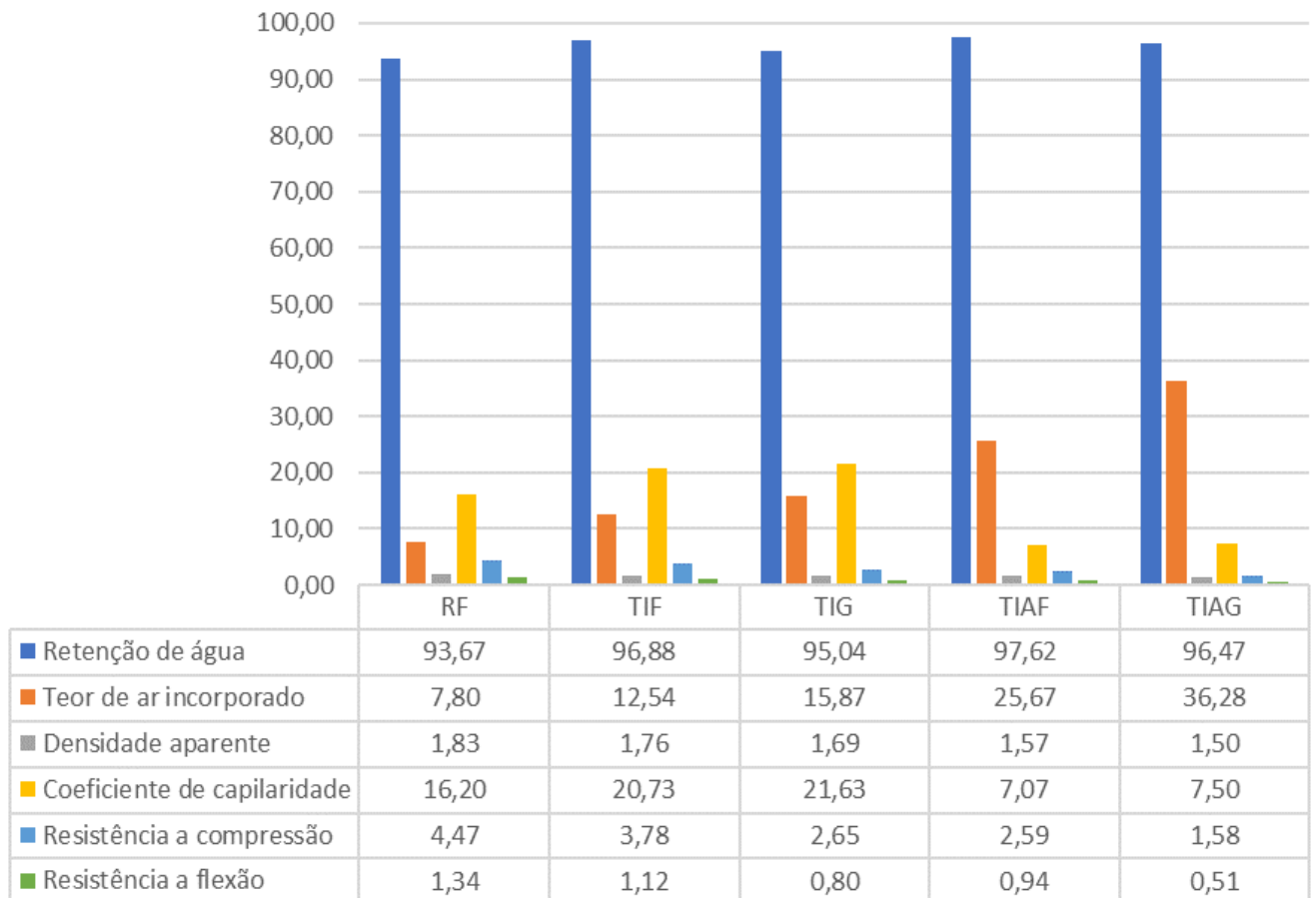


Fig. 4.15 – Comparativo dos ensaios realizados com argamassa simples.

Conforme pode-se observar na Fig. 4.15 os resultados nos permitem fazer as seguintes observações:

- Quanto à retenção de água todos os traços têm resultados dentro do que a literatura indica como o ideal, e considerando-se a aplicação da placa, que poderá atuar como substrato para aplicações de peças cerâmicas esses valores são indicativos positivos, assim todos os traços poderiam ser aplicados;
- Quanto ao teor de ar incorporado, a literatura informa que valores entre 7% a 17% são os que indicam um equilíbrio da quantidade de ar interno de modo a não afetar o compósito, assim os traços TIF e TIG atendem a essas especificações, porém considerando-se que o percentual encontrado para o traço TIAF ser próximo este dependendo de outras propriedades técnicas poderia ser plenamente utilizável;

- Quanto à densidade de massa aparente procura-se uma argamassa com menor valor possível, desde que as demais propriedades, como a resistência mecânica seja plenamente atingíveis, logo inicialmente pode-se adotar todos os traços;
- Quanto ao coeficiente de capilaridade espera-se que baixos valores desta propriedade reflitam em materiais com menor comunicação entre seus poros internos, culminando em menos acúmulo e transporte de água e CO₂ favorecendo a durabilidade, principalmente para aplicações em placas, assim os traços TIAF e TIAG seriam os melhores, porém os demais poderiam ser utilizados, desde que verificado condições de durabilidade, principalmente do material de reforço utilizado;
- Quanto à resistência mecânica, flexão e compressão, esta propriedade é mais ilustrativa visto que o desempenho da mesma nas placas se dará de maneira diferenciada, pois critérios como espessura são considerados para efeito de cálculo, porém quando analisadas de maneira conjunta com as demais indicam que os traços TIF, TIG e TIAF seriam os melhores.

Assim optou-se pela execução do traço de referência, TIF e TIAF, todos estes com os dois materiais de reforço, tela metálica e tela de plástico, possibilitando comparações e análises possíveis, assim justificando qual atenderá de melhor maneira as normas técnicas.

4.5 ENSAIOS EM PLACA CIMENTÍCIA

Os ensaios em placa cimentícia subdividem-se em ensaios que foram realizados em placas inteiras que foram moldadas e aquelas extraídas a partir de corpos de prova, extraídos da placa inteira conforme norma.

Os traços moldados seguem a descrição mostrada na Tab.4.12, onde a primeira coluna refere-se a nomenclatura utilizada para a confecção das placas cimentícias, sendo a última letra referente ao material de reforço utilizado.

Tab. 4.12 – Nomenclatura das placas cimentícias confeccionadas.

Nomenclatura do Traço em placa	Cimento	Cal	Areia	Incorporador de ar*	Tipo de incorporação	Material de reforço	Nomenclatura argamassa simples
PRF- P	1	1	6	-	-	Plástico	RF
PRF- M	1	1	6	-	-	Metálico	RF
PTIF - P	1	1	6	-	Fino	Plástico	TIF
PTIF - M	1	1	6	-	Fino	Metálico	TIF
PTIAF – P	0,995	1	6	0,005	Fino	Plástico	TIAF
PTIAF - M	0,995	1	6	0,005	Fino	Metálico	TIAF

4.5.1 ENSAIO DE TOLERÂNCIA GEOMETRICA

Para o ensaio de tolerância geométrica foram realizadas as medições em triplicata, onde os resultados estão disponíveis nas Tab. 4.13, 4.14 e 4.15 de maneira consolidada e expandida no ANEXO E.

Tab. 4.13 – Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço de referência com os dois tipos de material de reforço, em mm.

Placa	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}	Desvio padrão largura	Desvio padrão comprimento	Desvio padrão espessura	CV (%) largura	CV (%) comprimento	CV (%) espessura
PRF- P1	460,00	460,33	19,50	± 0,00	± 0,58	± 0,34	0,00	0,13	1,73
PRF- P2	461,17	460,67	19,69	± 0,29	± 0,58	± 0,64	0,06	0,13	3,27
PRF- P3	459,83	459,33	19,95	± 0,29	± 0,58	± 0,53	0,06	0,13	2,67
PRF- M1	461,00	460,67	20,26	± 0,00	± 1,15	± 1,09	0,00	0,25	5,40
PRF- M2	462,00	462,00	19,65	± 0,00	± 0,00	± 0,45	0,00	0,00	2,30
PRF- M3	461,67	462,67	18,60	± 1,53	± 0,58	± 0,16	0,33	0,12	0,86

Tab. 4.14 - Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço com líquido fino e incorporador de ar usando os dois tipos de material de reforço, em mm.

Placa	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}	Desvio padrão largura	Desvio padrão comprimento	Desvio padrão espessura	CV (%) largura	CV (%) comprimento	CV (%) espessura
PTIAF - P1	461,33	461,00	18,80	± 0,58	± 0,00	± 0,53	0,13	0,00	2,80
PTIAF - P2	456,33	458,33	19,90	± 1,15	± 0,58	± 0,40	0,25	0,13	2,01
PTIAF - P3	461,00	462,00	19,33	± 0,00	± 0,00	± 0,23	0,00	0,00	1,18
PTIAF - M1	460,67	460,33	19,10	± 0,58	± 0,58	± 0,43	0,13	0,13	2,27
PTIAF - M2	460,67	460,33	18,43	± 0,58	± 0,58	± 0,40	0,13	0,13	2,17
PTIAF - M3	460,33	461,00	19,11	± 0,58	± 1,00	± 0,76	0,13	0,22	3,99

Tab. 4.15 - Resultados consolidados das medidas nominais das placas do traço com líquido fino usando os dois tipos de material de reforço, em mm.

Placa	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}	Desvio padrão largura	Desvio padrão comprimento	Desvio padrão espessura	CV (%) largura	CV (%) comprimento	CV (%) espessura
PTIF - P1	461,33	461,33	18,93	± 0,58	± 0,58	± 0,19	0,13	0,13	1,02
PTIF - P2	459,67	460,33	19,25	± 0,58	± 0,58	± 0,69	0,13	0,13	3,58
PTIF - P3	461,00	461,00	19,00	± 1,00	± 0,00	± 0,26	0,22	0,00	1,36
PTIF - M1	461,00	461,33	18,91	± 1,00	± 0,58	± 0,20	0,22	0,13	1,06
PTIF - M2	460,33	460,00	19,11	± 2,08	± 1,00	± 0,53	0,45	0,22	2,75
PTIF - M3	460,67	460,33	18,98	± 1,53	± 0,58	± 0,26	0,33	0,13	1,39

A NBR 15498/2016 faz algumas considerações acerca das dimensões nominais das placas cimentícias, onde seu comprimento e largura devem ter ± 2 mm/m de tolerância e $\pm 10\%$ de variação de espessura, assim pode-se concluir que a tolerância nominal das placas quanto ao comprimento e largura é de $\pm 0,92$ mm em cada lado e de espessura tem-se de ± 2 mm.

Observando-se as dimensões médias, presentes nas Tab. 4.13, 4.14 e 4.15 observa-se que os valores encontrados apresentam certa dispersão, principalmente quanto as dimensões de largura e comprimento, onde em média a cada lote de seis placas três não atendiam aos limites impostos. O erro verificado foi pequeno em relação aos valores nominais e deve-se a pequenas perdas constatadas nas bordas das placas no momento da desforma, que acarretou em reduções de dimensões.

Os casos onde houve aumento das dimensões nominais deve-se a ocorrência de pequenas expansões, que ocorreram na massa durante o processo de secagem, essas variações foram mais visíveis na espessura das placas, tanto de expansão quanto de retração, confirmando a tendência de expansão por secagem destes elementos. Nas espessuras apesar destas variações verificadas, todas mantiveram-se dentro do limite de 10% preconizado pela norma.

Outras duas características geométricas que foram verificadas são a linearidade das bordas e desvio do esquadro, e estão presentes nas Tab. 4.16, 4.17 e 4.18.

Tab. 4.16 – Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.

Placa	Desvio do esquadro (mm)								Linearidade das bordas (mm)			
PRF- P1	0,00	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,50	0,00	0,50
PRF- P2	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	0,50	1,50	1,00	0,50	0,50
PRF- P3	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,50
PRF- M1	1,80	0,50	0,00	0,50	2,00	1,50	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PRF- M2	1,00	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,50	1,50	0,00
PRF- M3	0,30	1,00	1,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50

Tab. 4.17 - Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.

Placa	Desvio do esquadro (mm)								Linearidade das bordas (mm)			
PTIAF - P1	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50
PTIAF - P2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,50	1,00	1,00	0,00
PTIAF - P3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50
PTIAF - M1	0,00	1,00	1,50	1,00	0,20	0,50	0,50	1,50	0,00	1,00	1,00	0,50
PTIAF - M2	1,50	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	1,00	0,00	0,00
PTIAF - M3	1,00	0,00	0,00	1,00	2,00	1,50	0,00	0,00	1,00	1,50	1,00	0,50

Tab. 4.18 - Resultados das verificações de linearidade de borda e desvio de esquadro.

Placa	Desvio do esquadro (mm)								Linearidade das bordas (mm)			
PTIF - P1	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	1,00	0,50	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PTIF - P2	1,00	1,00	2,00	0,20	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
PTIF - P3	0,00	1,00	0,00	2,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
PTIF - M1	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00
PTIF - M2	1,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,00	0,00	0,00
PTIF - M3	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	1,00	0,00

As características de linearidade das bordas e desvio de esquadro são de respectivamente, 3 mm/m e 4 mm/m, que na condição de contorno da placa, que é de 460 mm é admitido uma linearidade de 1,38 mm e desvio de esquadro de 1,84 mm.

Observando-se os resultados mostrados nas Tab.4.16, 4.17 e 4.18, conclui-se que quanto a linearidade das bordas a grande parte das placas avaliadas enquadra-se, sendo aquelas de maior valor (1,50 mm) estão próximas do limite estabelecido (1,38 mm). Já quando ao desvio do esquadro algumas amostras apresentam valores superiores ao estipulado, que é 1,84 mm, isto deve-se

conforme relatado anteriormente ao processo de desmolde e natural distorções que ocorrem no processo de produção.

4.5.2 ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Para avaliação da permeabilidade das placas foi montado todo o aparato descrito pela norma (NBR 15498/2016) onde o ensaio baseia-se em uma análise visual das placas após a exposição a condições de permeabilidade. Assim observou-se três ocorrências básicas, listadas nas Fig. 4.16, 4.17 e 4.18:



Fig. 4.16 – Face inferior da placa a no estado natural antes do ensaio de permeabilidade.

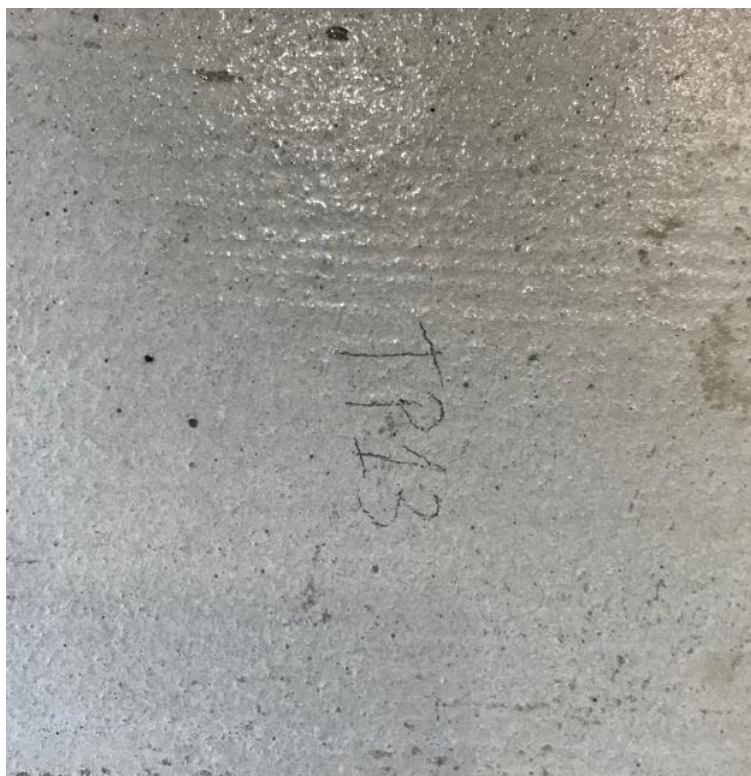


Fig. 4.17 – Face inferior da placa após ensaio de permeabilidade – TIPO 1.

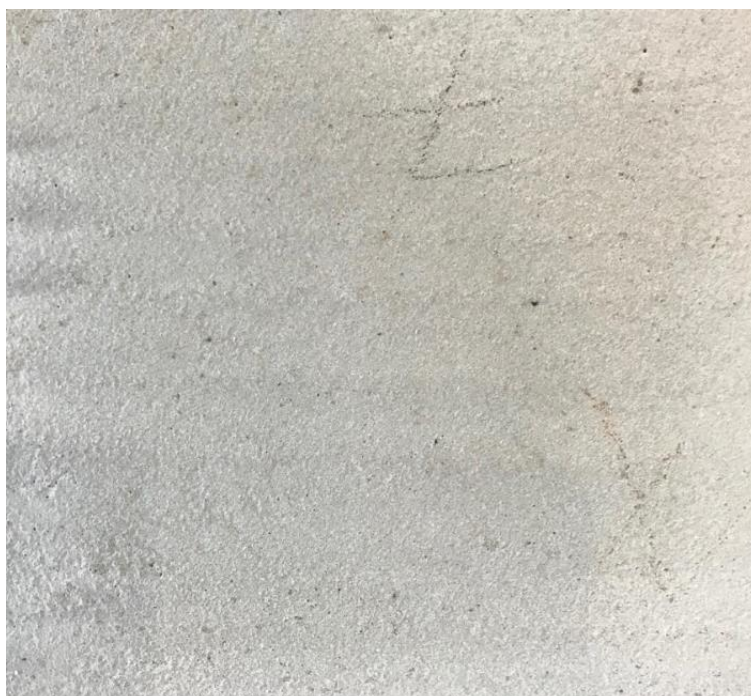


Fig. 4.18 – Face inferior da placa após ensaio de permeabilidade – TIPO 2.

A norma estipula que nas placas cimentícias, podem aparecer traços de umidade na face inferior, mas em nenhum caso pode haver formação de gotas de água nessa face, assim pode-se claramente concluir de acordo com as fotos que em nenhum dos dois casos típicos (TIPO 1 e 2) houve a formação de gotas, o que já dá aceitabilidade neste parâmetro.

O TIPO 1 caracterizou-se pela maior concentração de umidade na face inferior, que pode ser observada nos traços PTIF (P e M), onde o tipo de material de reforço foi insignificante, pois não trouxe alterações significativas dos resultados. Esse resultado pode ser explicado pelo maior coeficiente de capilaridade observado neste traço nos ensaios com argamassa simples visto que a maior comunicabilidade dos poros internos propicia o transporte da água acumulada da face superior para a inferior. A permeabilidade em sistemas de vedação ou de revestimento vai contra os princípios básicos de durabilidade e ainda tendem a causar degradação dos materiais de reforço interno, visto que a matriz ao invés de se comportar como material de proteção do reforço para ser um agente degradante, podendo haver ainda atuação de outros agentes como o CO₂ (VAN GERVEN et al, 2007).

O TIPO 2 apareceu nos traços PRF (P e M) e PTIAF (P e M), onde foi caracterizado pelo aparecimento de pouca ou quase nenhuma umidade na face inferior fruto na maior barreira interna existente, sendo estes traços mais apropriados para uso como mecanismos de vedação, apesar de ainda serem necessários algumas análises complementares.

Entretanto pode-se afirmar que ambos os tipos avaliados atendem as situações de uso, tanto externo quanto interno, mesmo apresentando os traços de umidade na face (que são pequenos).

4.5.3 COMPORTAMENTO AO FOGO

Uma preocupação constante em todo e qualquer mecanismo de vedação ou material de construção refere-se a sua atuação frente a exposição de elevadas temperaturas, como no caso de fogo, assim a metodologia do ensaio de painel radiante, normatizado pela NBR 9442/1988, faz essas referências.

Outro indicativo importante tange na classificação do material quanto à combustibilidade, previsto na ISSO 1182. Segundo MRÓZ et al, 2016 os materiais a base de celulose quando em conjunto com pastas cimentícias são incombustíveis. Há indícios relatados na literatura de que os resíduos oriundos da indústria de papel e celulose são incombustíveis, até pela configuração que desempenham frente a agentes externos (SHAH e SHARMA, 2017).

Os resultados médios resultantes do ensaio de propagação superficial de chama estão descritos a Tab. 4.19.

Tab. 4.19 – Resultado do índice de propagação de chamas (Ip)

Propriedade	PRF- P	PRF- M	PTIAF - P	PTIAF - M	PTIF - P	PTIF - M
Índice de evolução de calor (Q)	2,60	2,20	2,67	3,20	3,00	2,87
Fator de propagação de chama (Pc)	3,10	3,00	4,10	3,10	2,50	2,20
Índice de propagação de chama (Ip)	8,06	6,60	10,94	9,92	7,50	6,31

De acordo com as exigências da NBR 9442/1988, deve-se classificar o índice de propagação de chama (Ip) de acordo com as classes presentes na Tab. 4.20 abaixo.

Tab. 4.20 – Classificação do Ip médio (FONTE: NBR 9442/1988).

Classe	Índice de Propagação de Chamas (Ip) médio.
A	0 a 25
B	26 a 75
C	76 a 150
D	151 a 400
E	Superior a 400

Assim pode-se concluir que todos os traços avaliados se enquadram na classe A, que segundo a norma (NBR 9441/1988) podem ser utilizado em ambientes educacionais, tratamento de saúde, residencial, local de reuniões, comercio e serviços, indústria entre outros, pois apresenta baixa propagação de chamas, o que se espera para este material.

Entretanto outras análises podem ser feitas relativos aos valores nominais encontrados, observando a Fig. 4.19 a seguir.

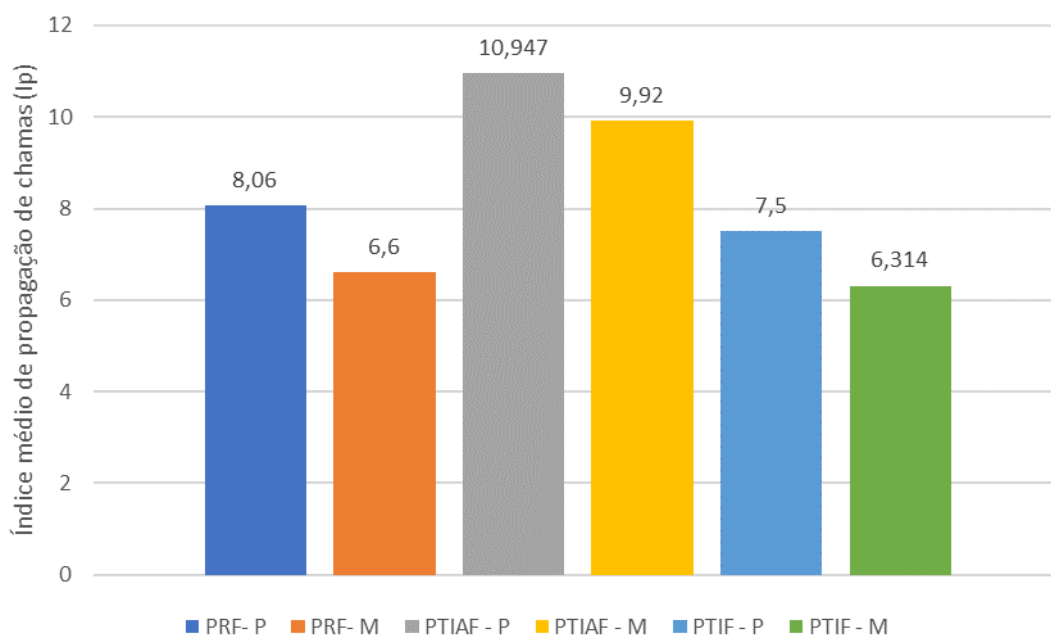


Fig. 4.19 – Variação do I_p nos traços analisados.

Observando a Fig. 4.19 constata-se que em todos os traços analisados a adição do reforço plástico aumenta o índice de propagação de chamas em comparação com o reforço metálico, isso deve-se a característica do material de maior combustibilidade natural, mesmo ele estando protegido pela matriz seu efeito é verificado. No caso do uso dos aditivos incorporadores de ar, observou-se um expressivo aumento do índice de propagação de chamas, justificado pela quantidade de ar aprisionada nestes espaços internos que trazem maior combustão e colabora para propagação do fogo superficial pelo painel radiante. Trabalhos desenvolvidos com uso destes aditivos em estruturas de concreto relatam comportamento similar, ajudando inclusive na desestabilização da armadura interna (SHAH e SHARMA, 2017).

Aqui verificou-se também o relatado anteriormente quanto ao uso do resíduo de papel e celulose, que mesmo em sua versão solubilizada em água, reduzem a

propagação superficial de chama, sendo um indicativo positivo da sua incorporação para novos materiais de construção (MRÓZ et al, 2016).

4.6 ENSAIOS EM CORPO DE PROVA DA PLACA

Alguns ensaios necessitam da extração de corpos de prova para a sua execução, como os ensaios de absorção de água, densidade aparente, resistência mecânica (estado de equilíbrio ou saturado) e de durabilidade por ciclos de imersão e secagem.

4.6.1 DENSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para os resultados da densidade aparente e absorção de água foram utilizados corpos de prova resultante da ruptura, desde que tenham área superficial superior a 20 cm². Os resultados de ambas as propriedades se encontram na Tab. 4.21 e nas Fig. 4.20 e 4.21. a seguir, além daqueles presentes no ANEXO F.

Tab. 4.21 – Resultados dos ensaios de densidade aparente média e absorção de água.

	Densidade aparente média (g/cm ³)	Desvio padrão	CV (%)	AA média (%)	Desvio padrão	CV (%)
PRF- P	1,70	± 0,01	0,64	14,75	± 0,32	2,18
PRF- M	1,61	± 0,19	11,77	13,96	± 1,16	8,32
PTIAF - P	1,41	± 0,02	1,22	11,86	± 0,40	2,65
PTIAF - M	1,46	± 0,10	7,11	16,23	± 4,56	28,09
PTIF - P	1,71	± 0,05	3,17	14,16	± 0,20	1,23
PTIF - M	1,75	± 0,03	1,77	14,28	± 0,31	2,17

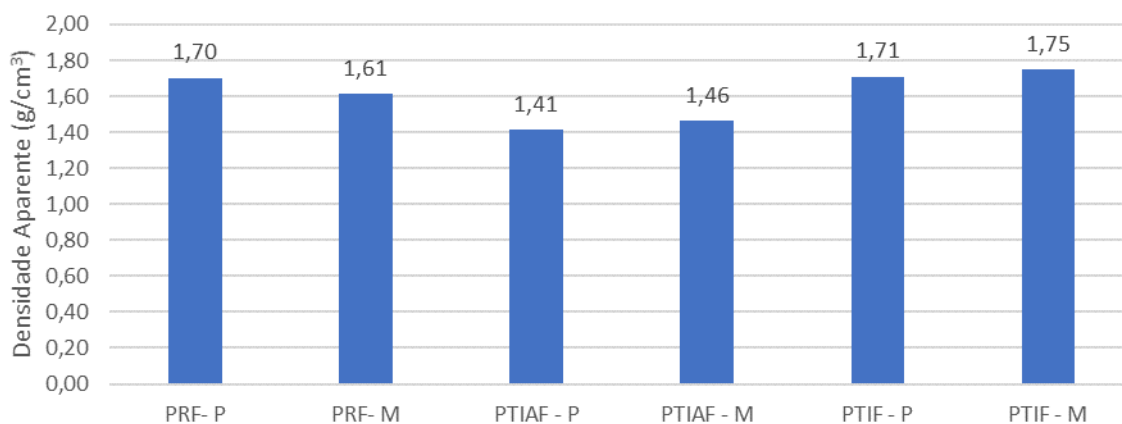


Fig. 4.20 – Resultados da densidade aparente média, em g/cm³, nos traços avaliados.

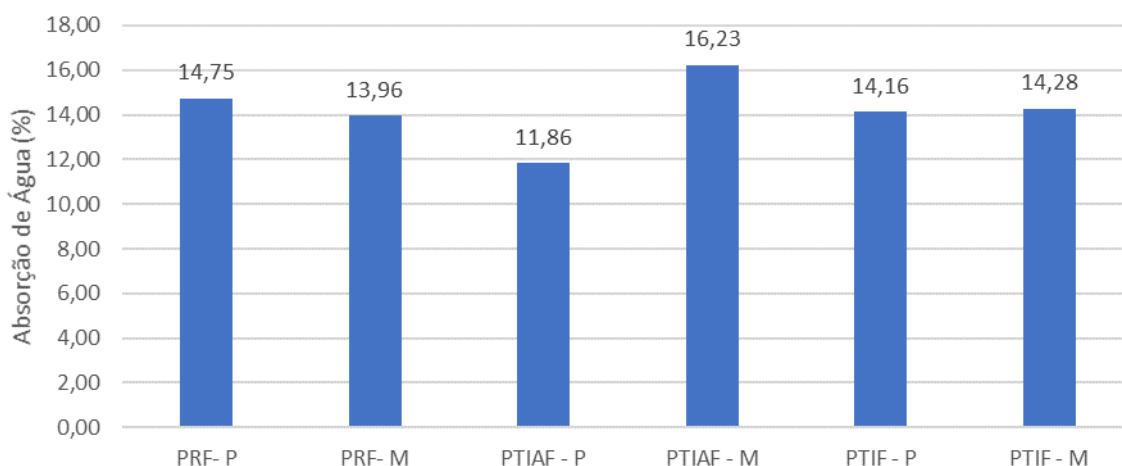


Fig. 4.21 - Resultados da absorção de água das placas, em %, nos diferentes traços avaliados.

Os resultados de ambas as propriedades avaliadas não têm requisitos mínimos estipulados pelas normas brasileiras, logo deve ser realizada uma comparação com produtos comerciais. Observa-se na Fig. 4.20 que a densidade aparente média nos traços PTIAF é o que sofreu maior redução, este fator deve-se a introdução de bolhas de ar do aditivo que tornou as placas mais leves, sendo essa uma propriedade favorável para seu uso com elemento de vedação. Entretanto baixos valores de densidade podem sugerir maior absorção de água, verificado na Fig. 4.21 que é prejudicial para elementos expostos ao ambiente. Assim pode-se indicar que o traço PTIF é o que melhor balanceia as duas

propriedades do ponto de vista tecnológico e de uso, sendo o material de reforço plástico o mais aconselhável devido à densidade aparente próxima do traço de referência e menor absorção, além de serem compatíveis com produtos comerciais disponíveis.

A menor absorção de água, verificada no traço PTIF, deve-se ao efeito de preenchimento da matriz pelas microfibras de celulose presente no resíduo que favorece o tamponamento dos poros internos, além da formação de produtos hidratados com o CaO e outros compostos presente, que contribui para esse efeito, além de contribuir para manutenção dos valores de densidade (ZANELLA et al, 2014).

4.6.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os resultados referentes à resistência mecânica estão apresentados em forma de blocos com suas respectivas considerações, enquanto os resultados unitários de todos os corpos de prova encontram-se no ANEXO G.

Assim a Fig. 4.22 representa os resultados referentes ao traço de referência (PRF) utilizando ambos os materiais de reforço (P – M) e suas respectivas condições (equilíbrio e saturado).

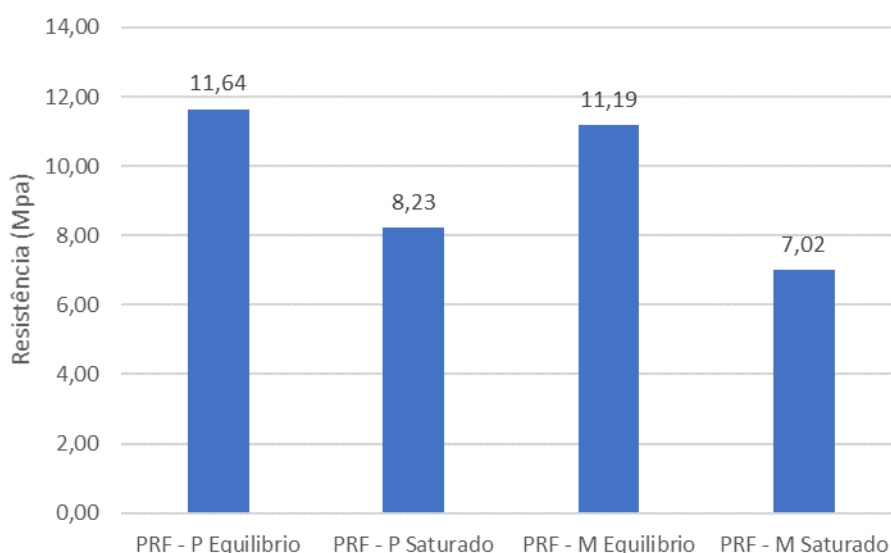


Fig. 4.22 – Resultados da resistência mecânica (MPa) para os traços de referência.

Como o traço analisado na Fig. 4.22 refere-se aos corpos de prova da argamassa de referência, ou seja, sem a adição do resíduo, o efeito desta variável

não pode ser verificado e serve como comparativo para os demais traços. Assim as condições que impactaram nesta análise são o tipo de material de reforço e a condição do ensaio.

Quanto ao material de reforço, observa-se que a tela de plástico desempenhou melhor resistência mecânica a flexão na amostra analisada, isso pode ser justificado pela resistência a tração do material individualmente, que segundo caracterização realizada neste trabalho foi maior que a do metal. Essa redução na resistência com o reforço com tela de metal deve-se ao entrelaçamento de fios metálicos que constituem a trama da tela, estas necessitam de emendas o que o torna a tela como um todo mais frágil, diferentemente da tela de plástico que é constituída de um material uniforme. Estudos indicam ainda que o plástico tem propriedades de deformação que favorecem sua introdução como reforço em matrizes cimentícias, deformando de maneira similar a argamassa (AL-TULAIAN et al, 2016).

Já quanto à condição de exposição, na saturação, após imersão em 24 horas em água, os materiais cimentícios sofrem naturalmente uma fragilização, devido ao preenchimento dos seus poros por água o que afeta sua integridade microestrutural (LU et al, 2017). Além disso, as telas metálicas são mais susceptíveis a degradação por água em relação às de plástico, prova disso é o uso destes materiais como reforço de próteses humanas e em outras finalidades (AATTACHE et al, 2017). O aço tradicionalmente desgasta mais com agentes de degradação externo, sejam a umidade ou CO₂ o que torna seu uso um desafio constante (SCHISSL, P, 1996).

Na Fig. 4.23 estão representados os resultados referentes ao traço de com uso do resíduo no estado fino juntamente com o aditivo incorporador de ar (PTIAF), além de utilizar ambos os materiais de reforço e suas respectivas condições (em equilíbrio e saturado).

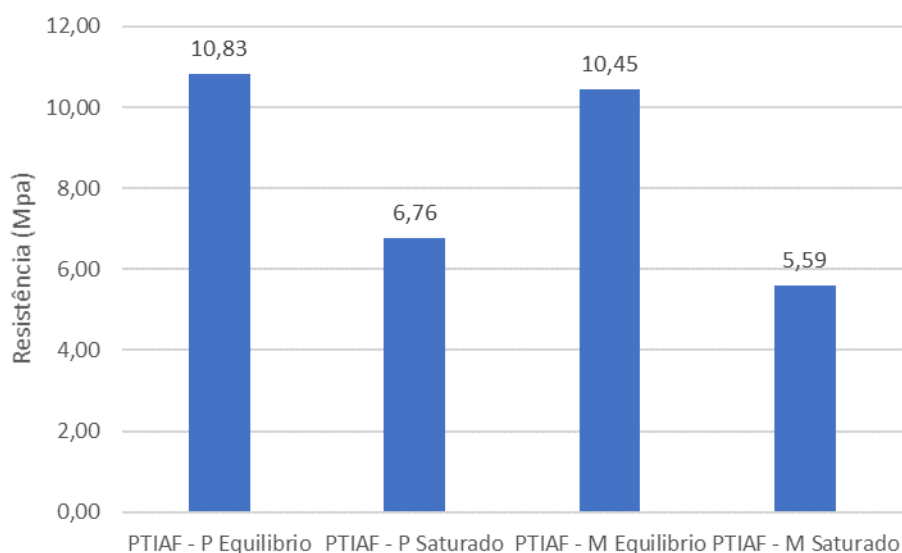


Fig. 4.23 - Resultados da resistência mecânica (MPa) para o traço PTIAF.

O uso do resíduo neste traço, em combinação com o aditivo de ar incorporado, não trouxe melhora a resistência mecânica, onde obteve uma tendência de queda em relação ao traço de referência, entretanto ainda não é possível avaliar qual das duas variáveis contribuiu para essa redução. A influência que o material de reforço desempenhou nos resultados é a mesma observada no traço de referência, o que acaba validando a hipótese anterior.

Quanto ao uso do aditivo incorporador de ar duas análises podem ser feitas, uma comparando-se os resultados com e sem seu uso, onde houve uma redução média de 7,0% para os traços em equilíbrio e de 18,0% para os traços saturados, o que é justificado pela maior ocorrência de bolhas de ar no interior da placa, o que acaba reduzindo a massa específica e por consequência a resistência mecânica do produto, esse comportamento é relatado em diversos estudos da área de materiais cimentícios (ZUPANCIC, 2013). A ocorrência de uma maior redução da resistência nos traços saturados deve-se ao preenchimento dos poros pela umidade disponível e uma possível redução da ligação entre a pasta cimentícia e o agregado (PORTER et al, 2017). Outro fator relatado na literatura é quanto ao aumento da alcalinidade da água aprisionada nos poros, potencializada pelo uso do aditivo, que ataca os materiais de reforço comprometendo sua integridade estrutural, em maior proporção os metálicos (WANG e LEE, 2009).

Na Fig. 4.24 a seguir é representado os resultados referentes ao traço de com uso do resíduo no estado fino (sem aditivo), além de utilizar ambos os materiais de reforço e suas respectivas condições (em equilíbrio e saturado).

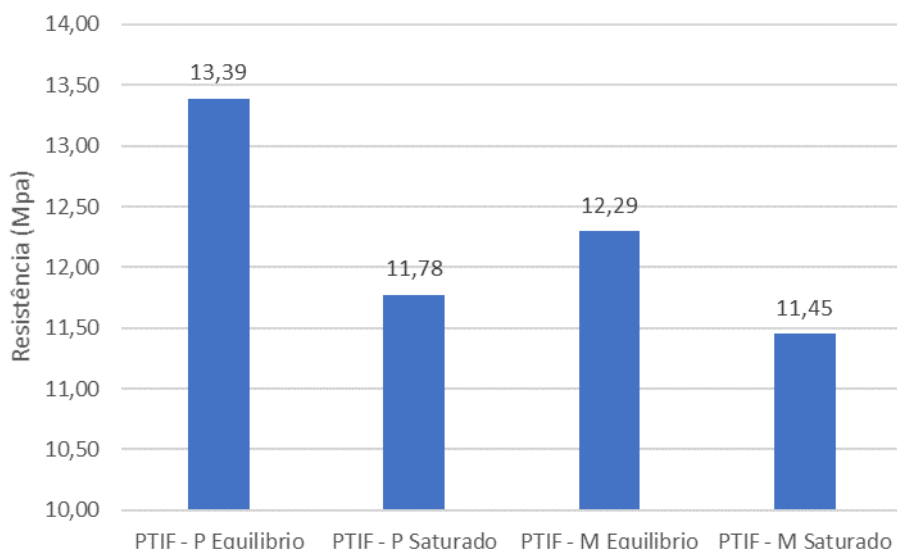


Fig. 4.24 - Resultados da resistência mecânica (MPa) para o traço PTIF.

Os resultados mostrados na Fig. 4.24 exprimem a influência que a adição do resíduo da indústria de papel e celulose desempenha nas placas cimentícias, quanto a resistência mecânica. O incremento do resíduo no estado líquido, na porcentagem avaliada neste trabalho, provocou um acréscimo da resistência mecânica em todas as situações avaliadas, possibilitando inclusive valores de resistência no estado saturado que indicam possibilidade de usos em áreas externas.

O resíduo de papel e celulose, segundo sua caracterização, possui potencial de contribuir com a resistência mecânica, podendo reagir com aglomerantes devido a sua pozolânicidade (GOEL e KALAMDHAD, 2017). Estudos utilizando este material em argamassas a base de cimento e cal, com traços similares a este trabalho, produziram aumento de resistência devido a microfibras de celulose presente no material que contribuem para o preenchimento interno, acarretando em materiais mais compactos (ZANELLA et al, 2014).

Assim na Fig. 4.25 pode-se fazer uma análise conjunta relativa à influência que os principais parâmetros avaliados tem sob a resistência das placas cimentícias, comparando com os valores propostos pela norma brasileira.

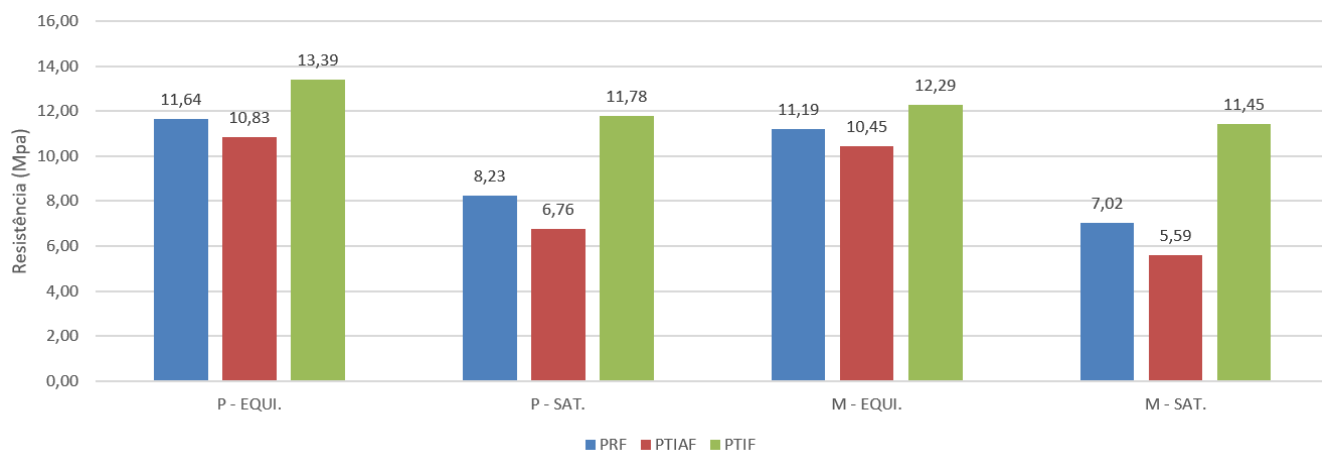


Fig. 4.25 – Efeito comparativo da resistência mecânica em placas cimentícias.

Os resultados observados na Fig. 4.25 acima nos mostram a influência dos principais parâmetros analisados na resistência mecânica, onde observa-se claramente que a adição do lodo primário da indústria de papel e celulose foi benéfico as placas cimentícias, que devem ser classificadas segundo a Tab. 4.22.

Tab. 4.22 – Subdivisão das placas por categorias, proposto pela NBR 15498/2016.

Categoria	Resistência da placa da Classe A (Mpa)	Resistência da placa da Classe B (Mpa)
1	-	4
2	4	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

Segundo a Tab. 4.22 a classe A se refere a condição saturada e a condição B a condição de equilíbrio, podendo ser utilizada em áreas externas dependendo da sua classificação, que ao final foi definida na Tab. 4.23 a seguir.

Tab. 4.23 – Classificação das placas analisadas neste trabalho.

	PRF	PTIAF	PTIF
P - EQUI.	4	4	4
P - SAT.	4	3	4
M - EQUI.	4	4	4
M - SAT.	4	3	4

Recomenda-se que placas classificadas como tipo 3 sejam utilizadas somente em ambientes internos, enquanto as do tipo 4 podem ser utilizadas em

ambientes externos e internos, por isso são preferíveis do ponto de vista comercial, sendo assim com os dados observados pode-se julgar o uso do aditivo incorporador de ar foi ineficiente para esta propriedade, sendo as placas do tipo PTIF a que apresenta melhor uso, interno e externo.

4.6.3 DURABILIDADE POR EFEITO DE CICLAGEM

A durabilidade das placas cimentícias reforçadas foram avaliadas segundo uma metodologia proposta pela NBR 15498/2016 que normatiza a quantidade e duração dos ciclos de imersão em água e secagem em estufa, encontrando-se um coeficiente que correlaciona a resistência mecânica antes e após os ciclos, denominada de Ri, demonstrado na Fig. 4.26, os valores unitários completos são demonstrados no ANEXO H.

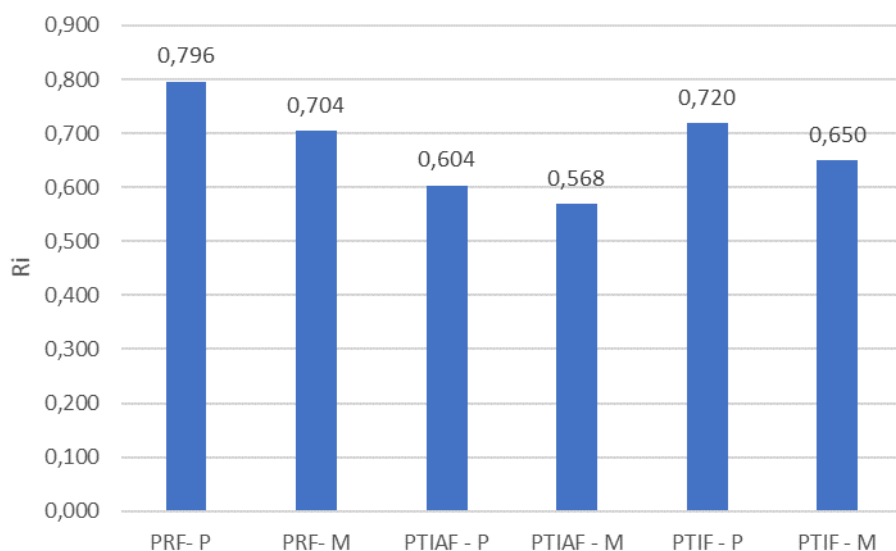


Fig. 4.26 – Coeficiente de durabilidade proposto pela NBR 15498/2016.

A NBR 15498/2016, faz considerações acerca do coeficiente de durabilidade, onde quanto mais próximo de 1,0 menor é o efeito de agentes agressivos ao produto final. Observando-se os resultados pode-se inferir que os traços que utilizam o aditivo de teor de ar incorporado são mais suscetíveis aos agentes agressivos oriundos processo de exposição a molhagem e secagem, esta condição assemelha-se a exposição que as placas cimentícias terão ao serem utilizadas como elementos de vedação interno ou externo.

Os aditivos de ar incorporado, ao adicionarem vazios internos com ar adicionais a massa, acabam sofrendo com as variações dos ambientes externos,

principalmente em matrizes cimentícias, onde acaba fragilizando e aumentando as fissuras internas, reduzindo assim a resistência mecânica das placas (KARATAS et al, 2015). Outra análise a ser sugerida é que com a diminuição da portlandita, devido a hidratação da pasta de cimento ao longo do tempo, e a forte presença de calcita, oriunda de reações da cal com o CO₂ do ar ambiente pode favorecer a carbonatação, reduzindo a resistência (FARIAS FILHO et al, 2011).

Quanto aos valores absolutos observados sugere-se que o uso de aditivos incorporadores de ar é prejudicial a durabilidade, enquanto o uso somente do resíduo líquido em forma fina tem pouca influência na redução da resistência mecânica nos ciclos avaliados, isso deve-se ao efeito da celulose dentro da matriz (AGOPYAN e JOHN, 1992).

4.6.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

A variação dimensional torna-se fundamental para as placas cimentícias com fins de vedação, visto que estes sistemas em geral ficam fixados em estruturas metálicas e quando sujeitas a exposição a umidade podem ter suas dimensões alteradas o que afeta a integridade do sistema.

Assim os resultados podem ser verificados na Tab. 4.24 e ANEXO I de maneira expandida.

Tab. 4.24 – Resultados da variação dimensional das placas cimentícias.

	$l_{i\text{medio}}$	$l_{f\text{medio}}$	$V_{\text{média}}$ (%)	Desvio padrão	CV (%)
PRF- P	201,08	199,30	0,009	± 0,005	66,18802
PRF- M	201,40	199,70	0,009	± 0,004	58,49706
PTIAF - P	200,93	199,73	0,006	± 0,004	68,47206
PTIAF - M	200,98	199,90	0,005	± 0,004	77,76197
PTIF - P	201,38	199,93	0,007	± 0,003	50,02164
PTIF - M	200,80	199,45	0,007	± 0,003	48,04443

A NBR 15498/2016 não faz referência explícita sobre quais valores seriam os ideais para placas cimentícias, mas segundo dados de produtos similares comercialmente vendidos, seus fabricantes estipulam esta variação por secagem e molhagem em no máximo 0,007%, sendo assim os valores encontrados, com exceção do traço de referência, estão dentro desta faixa.

A redução da retração verificada pelo uso do líquido fino deve-se a característica do resíduo, que mesmo com pouco percentual de partículas do resíduo, ainda desempenha um papel de absorção da umidade externa importante, além de nos casos do uso de aditivos incorporadores de ar, essa variação é compensada pelas bolhas de ar internas geradas pelo seu uso (VAN GERVEN et al, 2007).

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS

Os tratamentos estatísticos dos resultados foram realizados utilizando-se duas metodologias, o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), pois os resultados são experimentais e homogêneos com ensaios laboratoriais, onde as condições ambientais podem ser mais bem controladas, e o Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), este um pouco mais elaborado que o DIC, pois foi utilizado quando as condições experimentais não são completamente homogêneas possibilitando assim a divisão do material em blocos, desde que exista homogeneidade dentro de cada um e repetição de cada tratamento.

Assim nos ensaios que delimitaram o traço, em argamassa simples, foram utilizados o DIC para análise estatística, conforme observado nas Tab. 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 a seguir.

Tab. 4.25 - Análise de variância para DIC em ensaio de densidade de massa no estado endurecido de argamassa simples.

Tabela ANOVA para DIC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{tab}
Tratamentos	4	0,208775	0,052194	130,2511	3,48*
Resíduo	10	0,004007	0,000401		
Total	14	0,212783			
		C.V. (%)	1,18		
		*SIG			

Tab. 4.26 - Análise de variância para DIC em ensaio de coeficiente de capilaridade de argamassa simples.

Tabela ANOVA para DIC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{tab}
Tratamentos	4	589,6393	147,4098	226,0309	3,48*
Resíduo	10	6,521667	0,652167		
Total	14	596,161			
		C.V. (%)	4,98		
		*SIG			

Tab. 4.27 - Análise de variância para DIC em ensaio de resistência mecânica à flexão de argamassa simples.

Tabela ANOVA para DIC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{tab}
Tratamentos	4	1,191716	0,297929	71,15106	3,48*
Resíduo	10	0,041873	0,004187		
Total	14	1,233589			
		C.V. (%)	6,68		
		*SIG			

Tab. 4.28 - Análise de variância para DIC em ensaio de resistência mecânica a compressão de argamassa simples.

Tabela ANOVA para DIC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F _{calc}	F _{tab}
Tratamentos	4	15,23908	3,80977	25,52402	3,48*
Resíduo	10	1,492622	0,149262		
Total	14	16,7317			
		C.V. (%)	14,08		
		*SIG			

Observa-se nas Tab. 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 que o F_{calc} é superior ao F_{tab} em todos os casos, isso significa que a dispensabilidade dos dados amostrais e que os resultados são representativos, assim pelo teste F rejeita-se H_0 e concluiu-se que os tratamentos têm efeito diferenciado ao nível de significância em que foi realizado o respectivo teste.

Já o coeficiente de variação (C.V.) da ANOVA avalia a precisão dos experimentos, quanto menor o C.V. mais preciso é o experimento avaliado, assim observou-se que os resultados da resistência à compressão apresentaram menor precisão dos dados avaliados.

Outra análise refere-se às faixas, onde C.V. menores que 10% tem precisão alta, caso verificado em todas as análises exceto a resistência a compressão, que apresentou C.V. de 14,08% apresentando precisão média.

Outras análises realizadas referiram-se aos Delineamentos em Blocos Casualizados (DBC) que foram utilizados para análises nas placas cimentícias moldadas, conforme observado nas Tab. 4.29 e 4.30 a seguir. A análise de variância em blocos se fez necessária nesses dois casos porque foram utilizadas placas com dois tipos diferentes de tela, que foram considerados como blocos na ANOVA.

Tab. 4.29 - Análise de variância para DBC em ensaio de resistência mecânica à flexão de placas cimentícias.

Tabela ANOVA para DBC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F_{calc}	F_{tab}
Tratamentos	5	266,9127	53,38254	469,9705	2,45*
Blocos	1,00	7,178427	7,178427	63,19761	4,08*
Resíduo	42	4,770654	0,113587		
Total	47	278,8618			
		C.V. (%)	3,06		

Tab. 4.30 - Análise de variância para DBC em ensaio de variação dimensional de placas cimentícias.

Tabela ANOVA para DBC ($p < 0,05$)					
FV	GL	SQ	QM	F_{calc}	F_{tab}
Tratamentos	2	3,65121E-05	1,83E-05	1,085628	3,47
Blocos	1,00	1,49925E-06	1,5E-06	0,089155	4,32
Resíduo	21	0,000353138	1,68E-05		
Total	23	0,00039115			
		C.V. (%)	68,09		

Observa-se na Tab. 4.29 que F_{calc} é superior ao F_{tab} , ou seja rejeita-se H_0 ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F, logo existe pelo menos um contraste entre as médias das variedades analisadas estatisticamente diferente de zero, além de apresentar C.V. baixo, o que indica elevada precisão. Já na Tab. 4.30 que refere-se à variação dimensional observou-se comportamento diferente, onde o F_{calc} foi inferior ao F_{tab} , logo do ponto de vista estatístico todos os resultados são iguais.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES DA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Durante este trabalho, foram utilizados os materiais básicos na formulação de argamassas simples, que são areia (agregado miúdo), cimento e cal (aglomerantes) e água, além de materiais complementares como o aditivo para teor de ar incorporado e o material de reforço (telas plásticas e metálicas) e o resíduo utilizado (lodo primário da indústria de papel e celulose).

Alguns destes materiais, como o cimento, cal e aditivo de ar incorporado, são largamente industrializados o que dispensa a sua caracterização, pois passam por um rigoroso processo de produção e certificação nas plantas industriais.

Os demais materiais necessitam de alguns ensaios de caracterização, devido a sua variabilidade e importância no traço e qualidade final da argamassa, principalmente o resíduo estudado devido à ausência de significativas informações na literatura, sendo assim suas conclusões estão descritas a seguir:

- Quanto à caracterização da areia utilizada, proveniente da bacia sedimentar do Rio Paraíba do Sul, observou-se que a mesma atendeu aos requisitos das normas técnicas brasileiras, principalmente quanto a análise granulométrica, para enquadrar-se como agregado miúdo na argamassa, e sua massa específica, fundamental para efeito de preenchimento dentro da microestrutura da argamassa.
- Quanto aos materiais de reforço utilizados, foram adotadas as telas plásticas e metálicas de fornecedores devidamente certificados e padronizados, todos do mesmo lote, onde foi verificado se a mesma atendia a norma que caracteriza este produto e o certifica. Optou-se pelo formato hexagonal devido a melhoria de propriedades mecânicas referentes a tração, que foi verificada em ensaio específico. A formulação da trama da tela, principalmente nos nós, foi um fator de destaque nos ensaios mecânicos das placas, visto que foi neste ponto onde ocorreram as principais rupturas, devido a sua fragilidade. Foi constatado que a tela metálica resiste menos que a tela plástica dentro do compósito, inclusive em situação de exposição a agente

agressivo de umidade, concluindo-se assim que esta é a melhor alternativa de uso de matéria de reforço.

- Não houve preocupação significativa com a água utilizada, pois a mesma foi retirada do mesmo ponto em todos os ensaios e é proveniente da rede da concessionária de fornecimento público, que atesta e garante a qualidade da mesma dentro dos padrões estabelecidos pela portaria do CONAMA.
- Quanto ao resíduo foram realizados todos os ensaios de caracterização básicos necessários ao entendimento do mesmo, possibilitando discussões acerca dos resultados nas placas. O material é constituído basicamente de caulim e celulose e com elevada umidade (55,75%). Quanto a análise química a elevada concentração de oxido de cálcio é um indicativo de melhora nas propriedades mecânicas, o que foi atestado posteriormente. A microscopia e análise mineralógica atestam essa condição, com a formação de tubos entrelaçados, oriundos da celulose, que enrijecem a matriz em conjunto com a calcita presente. A atividade pozolânica moderada corrobora com os resultados das placas cimentícias reforçadas, onde as mesmas reagiram com o hidróxido de cálcio presente na matriz à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes, sendo benéfico ao compósito.

5.2 CONCLUSÕES DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO

O processo de beneficiamento do resíduo constituiu uma das etapas mais importantes deste trabalho, pois foi desenvolvida uma metodologia própria e inovadora de beneficiamento para o material. Estudos da literatura acadêmica sobre o uso deste resíduo em diversos materiais apontaram para seu uso em estado seco ou como lama úmida, em ambos os casos o produto apresentava problemas que vão desde os custos elevados no processo de beneficiamento (custo de transporte, energético, ambiental e outros) a dificuldades de controle e padronização do mesmo, assim pode-se concluir que:

- Neste trabalho foi adotada a incorporação do resíduo natural solubilizado em água, que foi utilizada na forma de composto na

mistura da argamassa, assim após ensaios de solubilização e análises consolidou-se duas metodologias para testes laboratoriais, uma diluindo por processo de mistura mecânica 9% de resíduo natural em volume água, denominado de líquido grosso, pois apresenta pequena porcentagem ainda de material particulado, e a outra onde se mistura a mesma porcentagem de resíduo natural mas processa-o em peneira, onde o líquido resultante foi denominado de líquido fino, pois apresenta pouco ou quase nenhum material particulado, perfazendo ao final 7,5% de incorporação.

- O material resultante do processo de beneficiamento que origina o líquido fino e rico em minerais e outros compostos e deve ser destinado, naturalmente para estabilização de solos, conforme estudos já verificados, assim não haverá geração de novos subprodutos nesse processo, além de prover uma redução nos elevados custos do beneficiamento a seco, principalmente a etapa de secagem (extremamente onerosa).

5.3 CONCLUSÕES DA DEFINIÇÃO DO TRAÇO

A definição do traço sempre é uma preocupação, pois busca-se uma mistura que otimize as propriedades tecnológicas da argamassa e reduza seus custos de produção. O traço básico utilizado foi o 1:1:6 (cimento: cal: areia) pois o mesmo já apresenta em diversos estudos estas características, mas outras análises prévias foram feitas utilizando-se os ensaios tecnológicos tradicionais de argamassa. Quanto ao uso do aditivo incorporador de ar, em pesquisas realizadas, optou-se por um uso de 0,50 % em relação à massa de cimento.

Assim foram definidos os traços para estas análises iniciais, tornando como variáveis de resposta o tipo de líquido utilizado (fino ou grosso) e com ou sem uso do aditivo, perfazendo os seguintes traços:

- RF: Traço de referência, somente com argamassa simples (1:1:6);
- TIF: Traço de referência utilizando o líquido fino, com argamassa na proporção (1:1:6);
- TIAF: Traço utilizando o líquido fino e aditivo incorporador de ar, em 0,5% do cimento;

- TIG: Traço de referência utilizando o líquido grosso, com argamassa na proporção (1:1:6);
- TIAG: Traço utilizando o líquido grosso e aditivo incorporador de ar, em 0,5% do cimento;

Ao final dos ensaios tecnológicos básicos concluiu-se que o líquido grosso não apresentava melhora nas principais propriedades, e em algumas inclusive reduzia, o que o tornou inviável para uso, assim optou-se para a formulação das placas a análise e estudos aprofundados do líquido fino, tornando como nova variável de estudo o material de reforço (plástico ou metal).

5.4 CONCLUSÕES DAS PLACAS CIMENTÍCIAS COM REFORÇO

Quanto às placas cimentícias com uso de reforço, concluiu-se neste trabalho que:

- O uso do lodo proveniente da indústria de papel e celulose é viável em materiais cimentícios, acarretando em melhora das propriedades tecnológicas como a resistência mecânica, propagação ao fogo e outras;
- O uso do resíduo solubilizado em água, em porcentagem de 7,5% e denominado neste trabalho de líquido fino, desempenhou significativo papel no produto final, tanto em aspectos microestruturais quanto macroestruturais, favorecendo a redução de geração de resíduos sólidos e acarretando em futura redução de custos para as indústrias do segmento;
- O processo de produção das placas cimentícias ainda carece de aprimoramento, algumas dificuldades foram observadas no processo de moldagem, adensamento e desmolde, que podem ser corrigidos com a adoção de produção em larga escala, diferente da laboratorial;
- A dificuldade no acabamento externo, pode ser mitigada dando-se a ele um aspecto rustico para acabamento de painel de vedação, esse estudo ainda precisa ser difundido, principalmente pela questão de mercado para o produto;

- Os resultados encontrados nos traços em que houve o uso do aditivo de incorporação de ar, não indicam um bom uso para ele, pelo menos na porcentagem estudada nesta pesquisa, sendo assim os traços com uso deste material são desencorajados;
- Quanto ao material de reforço, observou-se uma preferência pelo uso das telas plásticas, não só pelas propriedades mecânicas do material, mas pela melhor maneira de manuseá-lo durante o processo de produção, além de favorecer propriedades mecânicas e de durabilidade. Outras propriedades, como o ponto de amolecimento, foram observadas nos ensaios, onde ambos os reforços obtiveram bom desempenho;
- Os resultados das análises geométricas indicaram uma média variabilidade dos resultados, isso é fruto de erros decorrentes do processo de moldagem laboratorial e do efeito Curing, que tem potencialidade de ser superado em uma escala industrial, produzindo produtos com maior controle de qualidade.
- Quanto às propriedades tecnológicas avaliadas, foi observado que o traço PTIF foi aquele que melhor obteve desempenho, quando comparado a outros produtos comerciais disponíveis no mercado brasileiro, tendo sua viabilidade comprovada.

Assim, pode-se concluir neste trabalho, que o uso do traço PTIF - P (líquido fino, sem aditivo, com tela de plástico) é o que melhor atendeu aos padrões normativos brasileiros e comerciais, melhorando inclusive algumas propriedades, mostrando-se assim a viabilidade da produção de placas cimentícias com reforço, juntamente com o lodo da indústria de papel e celulose, para fins de vedação interna e externa de edificações em geral.

5.5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos sugere-se:

- Análise de outros materiais de reforço, como fibras de carbono ou outros materiais alternativos mais leves e que melhorem propriedades das placas cimentícias;
- Avaliação das propriedades avaliadas sob a ótica de placas em tamanho real, para aplicação como elementos de vedação;
- Análises de outras propriedades mais específicas nas placas, como acústica e temperatura, aumento as possibilidades de aplicações em outros ambientes.

Capítulo 6 - REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004:** Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 10122: **Tela de arame de aço zincado de baixo teor de carbono, com malha hexagonal - Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 13277: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** 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 13280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 13529: **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas.** Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. NBR 15498: **Placa de fibrocimento sem amianto**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 15575-4: **Edificações habitacionais – desempenho – Parte 4: Requisitos para vedações verticais internas e externas** -- SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 15839: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Avaliação de reologia por Squeeze-Flow**. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 7175: **Cal hidratada para argamassas - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 7181: **Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 9442: **Materiais de construção - Determinação do índice de propagação superficial de chama pelo método do painel radiante - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 9775: **Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

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

_____. NBR 9935: **Agregados – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR MN 51: **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

AATTACHE, A; SOLTANI, R; MAHI, R. **Investigations for properties improvement of recycled PE polymer particles-reinforced mortars for repair practice**. Construction and Building Materials, 146, p. 603-614, 2017.

AGOPYAN, V; JOHN, V. M. **Durability evaluation of vegetable fibre reinforced materials**. Building research and information. v. 20, p. 258 - 269, 1992.

AL-TULAIAN, B.S; AL-SHANNAG, M.J; AL-HOZAIMY, A.R. **Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar**. Construction and Building Materials, v. 127, p. 102-110, 2016.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Brasília: UnB. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2002.

ANTUNES, G.R; MASUERO, A.B. **Flexural tensile strength in mortar coating reinforced with different types of metal mesh: A statistical comparison**. v. 121, p. 559 - 568, 2016.

ASTM E 662, Test method for specific optical density of smoke generated by solid materials.

AUBERT, J.E; HUSSON, B; SARRAMONE, N. **Utilization of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Fly Ash in Blended Cement: Part 1: Processing and Characterization of MSWI Fly Ash**. J. Hazardous Mater. v. 136, p.624-631, 2006.

AZEVEDO, A.R.G; ALEXANDRE, J; ZANELATO, E.B; MARVILA, M.T. **Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar**. In Construction and Building Materials, v. 148, p. 359-368, 2017.

AZEVEDO, A.R.G. **Avaliação da Incorporação do Lodo Primário da ETE da Indústria de Papel Reciclado na Produção de Argamassas**. Campos dos

Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2015.

Banfill, P.G., **Feasibility study of a coaxial cylinders viscometer for mortar**, Cement and Concrete Research, 17, 329-339, 1987.

BARAN, T; PICHNIARCZYK, P. **Correlation factor between heat of hydration and compressive strength of common cement**. Construction and Building Materials. v.150 (30), p. 321 – 332, 2017.

BARDELA, B. **Estudo da permeabilidade ao ar em concretos produzidos com cimento Portland de alto-forno submetidos a diferentes procedimentos de cura**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2017.

BAREITHER, C. A; BREITMEYER, R. J; MEYER, L. L; BENSON, C. H; EDIL, T. B; BARLAZ, M. A. **Physical, chemical, and biological characterization of solid waste samples**. Proc. 2nd Global Waste Management Symp. Penton Media, New York, 1–9, 2010.

BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e químicas**. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2011.

BASTOS, P.K.X; CINCOTTO, M.A. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. São Paulo, 12 p. BT/PCC/300 – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2001.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 1ed. Belfast: Elsevier Applied Science, 449 p, 1990.

BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Relatório Técnico da Indústria de Papel e Celulose no Brasil**, 2014.

BOHARB, A; ALLOUHI, A; SAIDUR, R. **Energy conservation potential of an energy audit within the pulp and paper industry in Morocco.** Journal of Cleaner Production. v.149 (1), p. 569 - 581, 2017.

BRACELPA, Associação Brasileira de Papel e Celulose. **Panorama da Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no mundo**, 2014.

BRACELPA, Associação Brasileira de Papel e Celulose. **Panorama da Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no mundo**, 2017.

BUCHANAN, A. H. **Structural design for fire safety.** Canterbury: John Wiley & Sons, 421 p, 2002.

CAMPITELI, V. C; PRESTES, E. **Formação de fissuras visíveis devidas a retração por secagem em argamassas de revestimento de cal e areia.** VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis, 2005.

CAPPELARI, M; DAUBRESSE, A; CHAOUICHE, M. **Influence of organic thickening admixtures on the rheological properties of mortars: relationship with water retention.** Constr. Build. Mater. v. 15, p. 950–961, 2013.

CARASEK, H; OLIVEIRA, A.M; ARAÚJO, J. **Influência da maturação da cal hidratada na trabalhabilidade de argamassas.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, 7. Recife, SBTA, 2007.

CARDOSO, F.A; FUJII, A.L; PILEGGI, R.G; CHAOUICHE, M. **Parallel-plate rotation rheometry of cement paste: Influence of the squeeze velocity during gap positioning.** Cement and Concrete Research. v. 63, p. 66 – 74, 2015

CARDOSO, F.A; JOHN, V.M; PILEGGI, R.G. **Rheological behavior of mortars under different squeezing rates,** In Cement and Concrete Research, v. 39 (9), p. 748-753, 2009.

CARNEIRO, A.M.P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas.** São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), 1999.

CAVDAR, A; YEL, H; BORAN, S; PESMAN, E. **Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as Filler**. Construction and Building Materials, v. 142, p. 410–416, 2017.

CINCOTTO, M.A; SILVA, M.A.C; CASCUDO, H.C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

COSTA, E.B. **Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p.75-86, 2013.

CUNHA, A.C.Q; HELENE, P.R. **Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica, 2001.

CUSIDÓ, J.A; CREMADES, L.V; SORIANO, C; DEVANT, M. **Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: ten years of industrial experience**. Appl. Clay Sci. v.108, p. 191–198, 2015.

CYR, M; AUBERT, J.E; HUSSON, B; CLASTRES, P. **Recycling Waste in Cement Based Materials: a Studying Methodology**. In: RILEM Proceedings of the Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain, p. 306-315, 2004.

DE ALDA, J.A.G. **Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in paper and board industries**. Resour. Conserv. Recycl. 52 (7), p. 965–972, 2008.

DEMIREL, B.G; ALTIN, A. **Production of sorbent from paper industry solid waste for oil spill cleanup**. Marine Pollution Bulletin. 125 (4), p. 341 - 349, 2017.

DÉTRICHÉ, C.H. **Contribution a l'étude des déformations des couches minces de mortiers de liants hydrauliques**. Toulouse, 1977, p. 247. Tese (Docteur-ingenieur) – Université Paulo Sabatier de Toulouse.

ENGMANN, J; SERVAIS, C; BURBIDGE, A.S. **Squeeze flow theory and application to rheometry: A review**. Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics. p. 1-27, 2005.

FARDIM, P. *Papel e Química de Superfície – Parte I – A superfície da Fibra e a Química de Superfície – Parte I – A superfície da fibra e a química da parte úmida. O Papel – Ano LXIII – nº 4, p. 97- 107, 2002.*

FARIAS FILHO, J; MENEZES, R. R; FERREIRA, H.S; SANTANA, L.N.L; NEVES, G.A; FERREIRA, H.C. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos.** *Cerâmica*, 57, p. 395 - 403, 2011.

FARIA FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia), 2007.

FRIAS, M; RODRIGUEZ, O; SANCHEZ; M.I.R. **Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials.** A review. *Constr. Build. Mater.* 74 (15), p. 37–48, 2015.

GARCIA, R; LA VILLA, R.V; RODRIGUEZ, O; FRIAS, M. **Study of hydrated phases present in calcined paper sludge: metakaolinite/saturated CaO dissolution systems cured at 40 °C and 28 days of reaction.** *Mater. Sci. Eng. A* 527 (16–17), p. 3936–3941, 2010.

GAVA, G.V. **Ensaio de flexão em corpos de prova prismáticos de concreto com fibras de aço e fibras de vidro.** Trabalho acadêmico da disciplina “instrumentação de ensaios”. PPGEC UFSC, 2003.

GELLER, A.N; BIENERT, C. **The waste situation in the pulp and paper manufacturing industry in Germany.** v. 47 (10 A), p. 107–114, 1993.

GLATTHOR, A; SCHWEIZER, D; **Rheological Lab Testing of Building Formulations.** ConChem Conference, Düsseldorf, 1994.

GOEL, G; KALAMDHAD, A.S. **An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing.** *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 334-343, 2017.

GOKCE, A; NAGATAKI, S; SAEKI, T; HISADA, M. **Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete.** Cement and Concrete research. 34 (5), p. 799 – 806, 2004.

GOVIDAN, K; MADAN K.S; KANNAN D. **Sustainable material selection for construction industry – A hybrid multi criteria decision making approach.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 55, p. 1274 – 1288, 2016.

GRATTAN-BELLEW, P.E; BEAUDOIN, J.J; VALLEE, V.G. **Effect of aggregate particle size and composition on expansion of mortar bars due to delayed ettringite formation.** Cement and Concrete Research. 28 (8), p. 1147 - 1156, 1998.

HAACH, V.G; VASCONCELOS, G; LOURENÇO, P.B. **Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars.** Construction and Building Materials. 25 (6), p. 2980 – 2987, 2011.

HALL, C; **Water sorptivity of mortars and concretes: a review.** Magazine of Concrete Research. 41 (147), p. 51 – 61, 1989.

HEMALATHA, T; MAPA, M; GEORGE, N; SASMAL, S. **Physico-chemical and mechanical characterization of high volume fly ash incorporated and engineered cement system towards developing greener cement.** J. Clean. Prod. 125, p. 268 – 281, 2016.

HUI-SHENG, S; BI-WAN, X; XIAO-CHEN, Z. **Influence of Mineral Admixtures on Compressive Strength, Gas Permeability and Carbonation of High Performance Concrete.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 1980-1985, 2009.

IBGE, 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Anuário Brasileiro de Empregos.** Disponível para consulta em www.ibge.gov.br.

INCROPERA, F. P; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 455 p, 1992.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção Civil – Princípios de ciência e engenharia de materiais**. Vol. 1. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2007.

ISO 1182, **Reaction to fire tests for products – Non-combustibility test**.

ITIM, A; EZZIANE, H; KADRI, E.H. **Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions**. Construction and Building Materials, v. 25, p. 3603-3609, 2011.

JOHN, V.M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 113 f. Tese (Livre Docência), 2000.

JUNGE, K. **Additives in the brick and tile industry**. Ziegelind. Int./Brick and Tile Intl. v. 53 (12), p. 25–32, 2000.

KARATAŞ, M; BENLI, A; ERGIN, A. **Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars**. Construction and Building Materials. 150 (30), p. 467 – 479, 2017.

KHÖLER, A. Use of industrial wastes with combustible components in brick and tile industry. Ziegelind. Int./Brick and Tile Intl. v. 42 (9), p. 441 – 445, 1988.

LAMBERG, J.A; OJALA, J; PELTONIEMI, M; SÄRKKÄ, T. **The Evolution of Global Paper Industry 1800–2050**. 1a edição - Springer Netherlands, 2012.

LANZÓN, M; GARCÍA-RUIZ, P.A. **Evaluation of capillary water absorption in rendering mortars made with powdered waterproofing additives**. Construction and Building Materials. 23 (10), p. 3287 – 3291, 2009.

LÉBEIS, V.D.L. **Viabilidade do uso do resíduo da fabricação do papel em argamassas**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2003.

LE-BIHAN, T; GEORGIN, J.F; MICHEL, M; AMBROISE, J; MORESTIN, F. **Measurements and modeling of cement base materials deformation at early age: The cause of sulfoaluminous cement**. Cement and Concrete Research, v.42, p. 1055-1065, 2012.

LEI 12.305/10 PNRS - **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, de 2 de agosto de 2010.

LEVY, S. M; HELENE, P. **Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development**. Cement and Concrete Research, v. 34, p. 1975–1980, 2004.

LU, J.X; ZHAN, B.J; DUAN, Z.H; POON, C.S. **Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates**. Materials & Design, v. 135, p. 102-111, 2017.

LÚXAN M. P. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. Cement and Concrete Research, p. 63-68, 1989.

MACHADO, C.C. **Caracterização tecnológica de misturas solo-grits para pavimentos de estradas florestais: influência do tratamento térmico do grits na resistência mecânica das misturas**. Revista Árvore, Viçosa, v. 31, n. 3, p.487-494, 2007.

MAK, C.M; WANG, Z. **Recent advances in building acoustics: An overview of prediction methods and their applications**. Building and Environment, v. 91, p. 118-126, 2015.

MARGALHA, M. G; VEIGA, R. V; BRITO, J. **Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea**. APFAC, 2^o Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa – Portugal, 2007.

MARLIERE, C; MABROUK, E; LAMBLET, M; COUSSOT, P. **How water retention in porous media with cellulose ethers works**. Cement and Concrete Research. v. 42 (11), p. 1501 – 1512, 2012.

MAROUŠEK, J; HAŠKOVÁ, S; ZEMAN, R; ZAK, J; VANÍČKOVÁ, R; MAROUŠKOVÁ, A; VÁCHAL, J; MYŠKOVÁ, K. **Techno-economic assessment of processing the cellulose casings waste**. Clean Techn Environ Policy. v. 17 (8), p. 2441 – 2446, 2015.

MARTINS, R.O.G; ALVARENGA, R.C.S; PEDROTI, L.G; OLIVEIRA, A.F; MENDES, B.C; AZEVEDO, A.R.G. **Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test.** Construction and Building Materials. v. 129 (20), p.261 – 268, 2018

MAVROULIDOU, M; BOULOUKI, G; UNSWORTH, C. **Incorporation waste paper sludge ash as partial cement replacement in concrete.** PROCEEDINGS OF 13th International Conference on Environmental Science and Technology. Athens, Greece, 2013

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais** - 1a edição - Ed. PINI, São Paulo, 1994.

MENEZES, R. R. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas.** Cerâmica, v. 55, n. 1, p.263-270, 2009.

MIRA, P; PAPADAKIS, V.G; TSIMAS, S. **Effect of lime putty addition on structural and durability properties of concrete.** Cem Concr Res. v. 32, p. 683-689, 2002.

MONTE, M.C; FUENTE, E; BLANCO, A; NEGRO, C. **Waste management from pulp and paper production in the European Union.** Waste Management. v. 29 (1), p. 293 – 308, 2009.

MOROPOULOU, A; BAKOLAS, A; AGGELAKOPOULOU, E. **Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis.** Thermochemica Acta, v. 420, p. 135-140, 2004.

MRÓZ, K; HAGER, I; KORNIEJENKO, K. **Material Solutions for Passive Fire Protection of Buildings and Structures and Their Performances Testing.** Procedia Engineering, v. 151, p. 284-291, 2016.

MÜLLER, L.M. **Durabilidade da argamassa mista de revestimento interno contendo dregs-grits em substituição à areia.** 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

NEVILE, A.M. **Propriedades do concreto**. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo. PINI, 1997.

NOLASCO, A.M. **Aproveitamento do resíduo da indústria de papel na produção de bloco cerâmico**. In: workshop sul-americano sobre usos alternativos de resíduos de origem florestal e urbana, Curitiba. Anais. p.1997 – 120, 1997.

NURCHASANA, Y; **Characteristic of ‘Tulakan’ Soil as Natural Pozzolan to Substitute Portland Cement as Construction Material**. Procedia Engineering, v. 54, p. 764-773, 2013.

OLIVEIRA, A.L; CASALI, J.M; SANTOS, S; PRUDÊNCIO, L.R. **Metodologia para a Avaliação de Trabalhabilidade de argamassas de Assentamento de Alvenaria**. BTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2011.

OLIVEIRA, J. **Estudo das Propriedades de Argamassa Colante Submetidas a Saturação e Secagem**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2004.

PAIVA, S.N. **Composito cimento-lodo de E.T.E. de uma industria de papel para aplicação na construção civil**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 2007.

PAPPU, A; SAXENA, M; ASOLEKAR, S.R. **Solid Wastes Generation in India and their Recycling Potential in Building Materials**. Building and Environment, v.42, p. 2311-2320, 2007.

PAULETTI, C. **Estimativa da Carbonatação Natural de Materiais Cimentícios a partir de Ensaios Acelerados e de Modelos de Predição**. 238 f. Toulouse. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Institut National dês Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 2009.

PEKMEZCI, B. Y. **Properties of PVA-reinforced cement-bonded fiberboards processed with calender extrusion**. Science and engineering of composites. v. 23, p. 265 – 279, 2015.

PÉRA, J; AMBROISE, J. **New applications of calcium sulfoaluminate cement.** Cement and Concrete Research, v.34, p. 671-676, 2004

PINHEIRO, R.M; VIEIRA, C.M.F; SÁNCHEZ, R.J; MONTEIRO, S.N. **Recycling of waste from paper production in red ceramic.** Revista Matéria, v.13 (1), p. 220-227, 2008.

PINTO, R.B. **Determinação experimental e numérica da redução sonora aérea em paredes de alvenaria utilizadas em habitações.** Santa Maria, Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Maria, 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) , 2011.

PORTER, H; DHAMI, N.K; MUKHERJEE, A. **Synergistic chemical and microbial cementation for stabilization of aggregates.** Cement and Concrete Composites. v. 83, p. 160 – 170, 2017.

RAUPP, F.P. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias.** Aveiro: Universidade de Aveiro. 77 f. Tese (Doutorado), 2006.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS DE MATÉRIAUX ET DE CONSTRUCTION- RILEM: 13 MR Committee on Mortars and Renderings, Matériaux at Construction, Genève, 1980.

RIBEIRO, A.P. **Avaliação do uso de resíduos sólidos inorgânicos da produção de celulose em materiais cerâmicos.** São Paulo: Universidade de São Paulo. 142 f. Tese (Doutorado), 2010.

ROSEMANN, F; MORAES, P. D; ROMAN, H. R. **Thermal insulation of clay structural blockwork under fire.** In: 8th INTERNATIONAL MASONRY CONFERENCE, 2010, Dresden Proceedings. Dresden. v. 3. p. 1931-1939, 2010.

SAFIUDDIN, M.D; MOHD Z.J; SALAM, M.A; ISLAM, M.S; HASHIM, R. **Utilization of solid wastes in construction materials.** International Journal of the Physical Sciences. v.5 (13), p.1952 – 1963, 2010.

SANTOS, P.S. **Tecnologia das Argilas, aplicadas às Argilas Brasileiras**. Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

SAVASTANO Jr, H; JOHN, V. M; FERREIRA, O. P. **Weathering of vegetable fibre-clinker free cement composites**. In: Materials and structures. RILEM, v. 35, p. 64-68, 2002.

SCHIERSCH, A; **Firm size and efficiency in the German mechanical engineering industry**. Small Bus. Econ. v. 40 (2), p. 335 – 350, 2013.

SCHIESSL, P. **Durability of reinforced concrete structures**. Construction and Building Materials, v. 10 (5), p. 289-292, 1996.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 227 f. Dissertação (Mestrado), p. 1989.

SHAH, A.H; SHARMA, U.K. **Fire resistance and spalling performance of confined concrete columns**. Construction and Building Materials, v. 156 (15), p.161-174, 2017.

SILVA JUNIOR, O.J; REGO, J.J.S; PINHEIRO, M.A.S. **Desempenho acústico de divisórias verticais em blocos de gesso: Uma avaliação a partir de medições de campo e em laboratórios**. Pesquisa em Arquitetura e Construção, v. 5, p. 15-21, 2015.

SILVA JUNIOR, W.S. **Estudo para utilização de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária**. São Paulo, 2010. 210 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SILVA, A. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002 145 p. (Mestrado em engenharia civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002

SILVA, D.A; TRISTÃO, F.A; ROMAN, H.R; SOUZA, F.K. **Argamassas intermediárias de cal e areia para revestimentos: efeitos das características**

da areia. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, São Paulo, p. 299-311, 2003.

SOROUSHIAN, P; WON, J.P; HASSAN, M. **Sustainable Processing of Cellulose Fiber Cement Composites.** ACI MATERIALS JOURNAL. V. 110. 3 edição. p.305-314, 2013.

SPECK, J. A. **Análise do Desempenho de Placas Cimentícias Através da adição de fibras e telas, visando à redução de deformações térmicas e patológicas.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), 2014.

SWAIDANI, A.M; ALIYAN, S.D; ADARNALY, N. **Mechanical strength development of mortars containing volcanic scoria-based binders with different fineness.** Engineering Science and Technology, an International Journal. v. 19, (2), p. 970-979, 2016.

TENAGLIA, A; ZANI, A; PANIGADA, A. **Reuse of sludge from paper industry in the production of clay bricks (in Italian).** L'Industria dei Laterizi v. 34, p. 326–331, 1992.

TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, R. **Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 78, p. 764 – 772, 2017.

TOPÇU, I; CANBAZ, M. **Properties of concrete containing waste glass.** Cement and Concrete Research, v. 34, p. 267-274, 2015.

U.S. Environmental Protection Agency. **Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States,** 2017.

VAN GERVEN, T. **Effects of Carbonation and Leaching on Porosity in Cement-Bound Waste.** Waste Management, v. 27, n. 7, p. 977-985, 2007

VIEIRA, C.M.F; PINHEIRO, R.M; RODRIGUEZ, R.J.S; CANDIDO, V.S; MONTEIRO, S.N. **Clay bricks added with effluent sludge from paper industry:**

Technical, economic and environmental benefits. *Apply Clay*, v. 123 (11), p. 456 – 461, 2016.

WANG, X.Y; LEE, H.S. **A Model for Predicting the Carbonation Depth of Concrete Containing Low-Calcium Fly Ash.** *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 725-733, 2009.

WOJCIECH, P; SIKORAB, H. **Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes.** *Construction and Building Materials*. p. 298 – 307, 2015.

WOLFF, E. **O uso do lodo de estação de tratamento de água e resíduos da indústria de celulose (dregs, grits e lama de cal) na produção de cerâmica vermelha.** Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 188 f. Tese (Doutorado), 2008.

WONG, H.S; BUENFELD, N.R. **Determining the water-cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste: method development and validation on paste samples.** *Cem. Concr.* v. 39, p. 957-965, 2009.

YOSHIZAWA, S.T; SHEKDAR, A.V. **Global Trends in Waste Generation.** In: *Recycling, Waste Treatment and Clean Technology*, TMS Mineral, Metals and Materials Publishers, Spain. p. 1541-1552, 2004.

YOUNG, F.J; MINDESS, S; GRAY, R.J; BENTUR, A. **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**, Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey, 1998.

ZANELLA, B.P; SÁ, E.B; ACORINTI, N.O; TRANNIN, I.C.B; SIMÕES, S.J.C. **Durability of mixed mortar lining containing dregs-grits.** *American Journal of Environmental Science*. v.10 (1), p. 44-47, 2014

ZANI, A; TENAGLIA, A; PANIGADA, A. **Re-use of papermaking sludge in brick production.***Ziegelind.* *Int./Brick and Tile Ind. Intl.* v. 43 (12), p. 682–690, 1990.

ZUPANCIC, G.D. **The reuse of Waste-Activated Sludge as part of a “zero-sludge” strategy for wastewater treatments in the pulp and paper industry.** Bioresource Technology, v. 25, p. 568 – 574, 2013.

ANEXO A

Resultados completos do ensaio de consistência e suas tentativas em argamassas simples.

Traço	Cimento	Cal	Areia	Aditivo	Água	Líquido Fino	Líquido Grosso	Consistência	líquido/sólidos
TR	180	180	1080	0	270	0	0	260	0,19
TIF	180	180	1080	0	0	285	0	280	
	180	180	1080	0	0	270	0	263	0,19
TIAF	180	180	1080	0,9	0	270	0	260	0,19
TIG	180	180	1080	0	0	0	270	235	
	180	180	1080	0	0	0	280	245	
	180	180	1080	0	0	0	300	265	0,21
TIAG	180	180	1080	0,9	0	0	295	285	
	180	180	1080	0,9	0	0	285	258	0,20

ANEXO B

Resultados completos das amostras do ensaio de densidade de massa no estado endurecido em argamassas simples.

Traço	CP	massa (g)	l (cm)	h (cm)	b (cm)	Densidade de massa (g/cm ³)	Desvio Padrão	CV (%)
TIF	1,00	462,00	16,01	4,03	4,08	1,755	± 0,002	0,13
	2,00	463,20	16,05	4,00	4,11	1,755		
	3,00	462,50	16,03	4,02	4,08	1,759		
	Média	462,57	16,03	4,02	4,09			
	Densidade de massa (g/cm ³)		1,76					
TIAF	1,00	410,60	16,02	4,03	4,07	1,563	± 0,027	1,69
	2,00	412,10	16,04	4,06	4,10	1,543		
	3,00	416,20	15,98	4,01	4,07	1,596		
	Média	412,97	16,01	4,03	4,08			
	Densidade de massa (g/cm ³)		1,57					
TIG	1,00	446,10	16,06	4,01	4,12	1,681	± 0,008	0,49
	2,00	448,50	16,04	4,03	4,10	1,692		
	3,00	443,00	16,11	4,00	4,05	1,697		
	Média	445,87	16,07	4,01	4,09			
	Densidade de massa (g/cm ³)		1,69					
TIAG	1,00	408,40	16,08	4,01	4,21	1,504	± 0,023	1,51
	2,00	404,80	16,11	4,03	4,22	1,477		
	3,00	412,20	16,15	4,01	4,18	1,523		
	Média	408,47	16,11	4,02	4,20			
	Densidade de massa (g/cm ³)		1,50					
RF	Densidade de massa (g/cm ³)		1,83				± 0,025	1,37

ANEXO C

Resultados completos das amostras do ensaio de absorção por capilaridade em argamassas simples.

Traço	CP	m ₀	m ₁₀	m ₉₀	C	Desvio Padrão	CV (%)	C _{médio} (g/dm ² .min ^{1/2})
TIF	1,00	451,80	466,50	487,20	20,70	± 0,55	2,66	20,73
	2,00	448,90	464,50	485,80	21,30			
	3,00	447,80	463,00	483,20	20,20			
	Média	449,50	464,67	485,40				
TIAF	1,00	410,70	418,90	426,20	7,30	± 0,32	4,55	7,07
	2,00	404,10	413,90	420,60	6,70			
	3,00	409,40	418,80	426,00	7,20			
	Média	408,07	417,20	424,27				
TIG	1,00	452,40	467,70	491,20	23,50	± 1,64	7,60	21,63
	2,00	451,70	464,90	485,90	21,00			
	3,00	453,00	466,20	486,60	20,40			
	Média	452,37	466,27	487,90				
TIAG	1,00	420,00	429,30	437,00	7,70	± 0,26	3,53	7,50
	2,00	421,40	429,40	436,60	7,20			
	3,00	420,70	429,00	436,60	7,60			
	Média	420,70	429,23	436,73				
RF	Resultado médio					± 0,12	0,74	16,20

ANEXO D

Resultados completos das amostras do ensaio de resistência mecânica em argamassas simples.

Traço	CP	FC (N)	FF (N)	RC (MPa)	RC (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)	RF (MPa)	RF (MPa)	Desvio Padrão	CV (%)
TIF	1	5650,90	454,23	3,53	3,78	± 0,26	6,96	1,06	1,12	± 0,05	4,15
	2	6491,50	490,78	4,06				1,15			
	3	6021,60	485,55	3,76				1,14			
TIAF	1	3555,50	372,43	2,22	2,59	± 0,33	12,59	0,87	0,94	± 0,06	5,96
	2	4342,10	414,20	2,71				0,97			
	3	4544,00	413,20	2,84				0,97			
TIG	1	3941,90	367,21	2,46	2,65	± 0,16	6,07	0,86	0,80	± 0,07	9,05
	2	4385,70	313,26	2,74				0,73			
	3	4389,10	314,56	2,74				0,74			
TIAG	1	2210,20	215,80	1,38	1,58	± 0,18	11,25	0,51	0,51	± 0,01	1,72
	2	2629,70	222,76	1,64				0,52			
	3	2753,20	221,78	1,72				0,52			
RF	1	7748,00	523,84	4,84	4,47	± 0,72	16,02	1,23	1,34	± 0,10	7,61
	2	7882,00	581,27	4,93				1,36			
	3	5833,60	609,12	3,65				1,43			

ANEXO E

Resultados completos das variações geométricas das placas cimentícias, ensaio de dimensões nominais totais, para os traços PRF (plástico e metal), PTIAF (plástico e metal) e PTIF (plástico e metal).

Placa	largura 1	largura 2	largura 3	comp. 1	comp. 2	comp. 3	esp. 1	esp. 2	esp. 3	esp. 4	esp. 5	esp. 6	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}
PRF-P1	460	460	460	460	461	460	19,67	19,19	19,23	19,39	19,48	20,03	460,00	460,33	19,50
PRF-P2	461	461	461,5	461	460	461	19,7	19,36	19,47	19,24	19,53	20,82	461,17	460,67	19,69
PRF-P3	460	459,5	460	459	460	459	19,3	19,81	19,82	20,01	21,02	19,75	459,83	459,33	19,95
PRF-M1	461	461	461	460	462	460	19,14	19,18	19,67	20,6	21,92	21,07	461,00	460,67	20,26
PRF-M2	462	462	462	462	462	462	19,85	20,38	19,64	19,42	19,38	19,24	462,00	462,00	19,65
PRF-M3	460	462	463	462	463	463	18,94	18,6	18,67	18,26	18,58	18,57	461,67	462,67	18,60

Placa	largura 1	largura 2	largura 3	comp. 1	comp. 2	comp. 3	esp. 1	esp. 2	esp. 3	esp. 4	esp. 5	esp. 6	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}
PTIAF - P1	462	461	461	461	461	461	19	19,35	19,15	18,76	18	18,59	461,33	461,00	18,80
PTIAF - P2	455	457	457	459	458	458	20,2	20	19,42	19,49	19,9	20,4	456,33	458,33	19,90
PTIAF - P3	461	461	461	462	462	462	19,85	19,15	19,11	19,14	19,13	19,64	461,00	462,00	19,33
PTIAF - M1	461	460	461	460	460	461	19,4	19,6	19	18,4	19	19,2	460,67	460,33	19,10
PTIAF - M2	461	461	460	461	460	460	18,1	18	18,3	18,4	18,8	19	460,67	460,33	18,43
PTIAF - M3	461	460	460	461	460	462	20,5	20	18,1	18,2	18,9	19	460,33	461,00	19,11

Placa	largura 1	largura 2	largura 3	comp. 1	comp. 2	comp. 3	esp. 1	esp. 2	esp. 3	esp. 4	esp. 5	esp. 6	M _{larg.}	M _{comp}	M _{esp}
PTIF - P1	461	461	462	461	462	461	19	19,1	19	18,6	19	18,9	461,33	461,33	18,93
PTIF - P2	460	460	459	460	460	461	19	19,2	19,3	20,4	19,1	18,5	459,67	460,33	19,25
PTIF - P3	462	461	460	461	461	461	18,6	19	19,1	19,5	19	18,8	461,00	461,00	19,00
PTIF - M1	460	461	462	461	462	461	19	19,1	19	18,6	18,8	19	461,00	461,33	18,91
PTIF - M2	462	461	458	460	459	461	18,8	19	19,1	20,1	18,9	18,8	460,33	460	19,11
PTIF - M3	462	461	459	460	461	460	18,9	19,1	18,6	19,3	19,1	18,9	460,67	460,33	18,98

ANEXO F

Resultados completos da absorção de água e densidade aparente, para os traços PRF (plástico e metal), PTIAF (plástico e metal) e PTIF (plástico e metal).

Traço	$m_{\text{(saturado)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(hidrostática)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(seca)}} \text{ (g)}$	$V_{\text{(CP)}} \text{ (cm}^3\text{)}$	Densidade aparente $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA (%)	Densidade aparente média $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA média (%)
PRF- P1	898,50	436,50	782,90	462,00	1,69	14,77	1,70	14,75
PRF- P2	1018,10	500,50	888,00	517,60	1,72	14,65		
PRF- P3	1012,10	495,50	880,50	516,60	1,70	14,95		
PRF- P4	1012,20	494,20	879,80	518,00	1,70	15,05		
PRF- P5	904,80	438,40	785,80	466,40	1,68	15,14		
PRF- P6	1006,70	490,70	880,60	516,00	1,71	14,32		
PRF- P7	1065,00	522,10	932,10	542,90	1,72	14,26		
PRF- P8	969,60	471,70	844,40	497,90	1,70	14,83		
Traço	$m_{\text{(saturado)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(hidrostática)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(seca)}} \text{ (g)}$	$V_{\text{(CP)}} \text{ (cm}^3\text{)}$	Densidade aparente $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA (%)	Densidade aparente média $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA média (%)
PRF- M1	996,96	505,80	869,44	491,16	1,77	14,67	1,61	13,96
PRF- M2	659,56	242,10	584,06	417,46	1,40	12,93		
PRF- M3	767,39	384,90	668,18	382,49	1,75	14,85		
PRF- M4	949,62	474,70	826,67	474,92	1,74	14,87		
PRF- M5	917,71	340,60	815,92	577,11	1,41	12,48		
Traço	$m_{\text{(saturado)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(hidrostática)}} \text{ (g)}$	$m_{\text{(seca)}} \text{ (g)}$	$V_{\text{(CP)}} \text{ (cm}^3\text{)}$	Densidade aparente $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA (%)	Densidade aparente média $\text{(g/cm}^3\text{)}$	AA média (%)
PTIAF - P1	749,00	279,12	669,61	469,88	1,43	11,86	1,41	11,86
PTIAF - P2	700,50	248,70	626,25	451,80	1,39	11,86		
PTIAF - P3	662,48	242,10	592,26	420,38	1,41	11,86		
PTIAF - P4	745,30	269,70	666,30	475,60	1,40	11,86		
PTIAF - P5	732,08	273,20	654,48	458,88	1,43	11,86		
PTIAF - P6	773,40	289,90	691,42	483,50	1,43	11,86		

Traço	$m_{(saturado)}$ (g)	$m_{(hidrostática)}$ (g)	$m_{(seca)}$ (g)	$V_{(CP)}$ (cm^3)	Densidade aparente (g/cm^3)	AA (%)	Densidade aparente média (g/cm^3)	AA média (%)
PTIAF - M1	801,48	339,20	700,45	462,28	1,52	14,42	1,46	16,23
PTIAF - M2	878,75	370,10	712,45	508,65	1,40	23,34		
PTIAF - M3	849,97	298,50	705,45	551,47	1,28	20,49		
PTIAF - M4	781,63	325,00	689,45	456,63	1,51	13,37		
PTIAF - M5	842,83	360,60	741,34	482,23	1,54	13,69		
PTIAF - M6	711,15	299,40	634,57	411,75	1,54	12,07		
Traço	$m_{(saturado)}$ (g)	$m_{(hidrostática)}$ (g)	$m_{(seca)}$ (g)	$V_{(CP)}$ (cm^3)	Densidade aparente (g/cm^3)	AA (%)	Densidade aparente média (g/cm^3)	AA média (%)
PTIF - P1	953,09	471,80	834,91	481,29	1,73	14,16	1,71	14,16
PTIF - P2	973,17	481,40	852,50	491,77	1,73	14,16		
PTIF - P3	962,25	479,40	842,93	482,85	1,75	14,16		
PTIF - P4	876,65	434,20	767,95	442,45	1,74	14,16		
PTIF - P5	799,80	392,60	700,62	407,20	1,72	14,16		
PTIF - P6	1105,57	492,70	968,48	612,87	1,58	14,16		
PTIF - P7	791,90	382,90	693,70	409,00	1,70	14,16		
PTIF - P8	1066,16	525,80	933,96	540,36	1,73	14,16		
Traço	$m_{(saturado)}$ (g)	$m_{(hidrostática)}$ (g)	$m_{(seca)}$ (g)	$V_{(CP)}$ (cm^3)	Densidade aparente (g/cm^3)	AA (%)	Densidade aparente média (g/cm^3)	AA média (%)
PTIF - M1	847,48	427,30	741,12	420,18	1,76	14,35	1,75	14,28
PTIF - M2	751,38	379,40	655,82	371,98	1,76	14,57		
PTIF - M3	1025,67	513,30	900,28	512,37	1,76	13,93		
PTIF - M4	899,77	453,40	785,31	446,37	1,76	14,58		
PTIF - M5	1067,81	514,10	936,75	553,71	1,69	13,99		

ANEXO G

Resultados completos da resistência mecânica à flexão (equilíbrio e saturado), para os traços PRF (plástico e metal), PTIAF (plástico e metal) e PTIF (plástico e metal).

	L (mm)	210,00	e (mm)	19,61	b (mm)	230,00
		$P_{\text{máx}}$ (N)	$R_{\text{flexão}}$ unitá.	$R_{\text{flexão}}$ média	Desvio padrão	CV (%)
PRF - P Equilíbrio	PRF- P - E1	3299,34	11,75	11,64	± 0,11	0,91
	PRF- P - E2	3227,98	11,50			
	PRF- P - E3	3274,30	11,66			
	PRF- P - E4	3273,23	11,66			
PRF - P Saturado	PRF- P - S1	2240,00	7,98	8,23	± 0,65	7,92
	PRF- P - S2	2250,45	8,01			
	PRF- P - S3	2175,20	7,75			
	PRF- P - S4	2581,90	9,20			
PRF - M Equilíbrio	PRF- M - E1	3123,40	11,12	11,19	± 0,14	1,25
	PRF- M - E2	3175,30	11,31			
	PRF- M - E3	3096,40	11,03			
	PRF- M - E4	3175,30	11,31			
PRF - M Saturado	PRF- M - S1	1987,50	7,08	7,02	± 0,04	0,61
	PRF- M - S2	1972,40	7,02			
	PRF- M - S3	1962,40	6,99			
	PRF- M - S4	1962,00	6,99			

	L (mm)	210,00	e (mm)	19,61	b (mm)	230,00
		$P_{\text{máx}}$ (N)	$R_{\text{flexão}}$ unitá.	$R_{\text{flexão}}$ média	Desvio padrão	CV (%)
PTIAF - P Equilíbrio	PTIAF- P - E1	3024,50	10,77	10,83	$\pm 0,14$	1,30
	PTIAF- P - E2	2994,60	10,67			
	PTIAF- P - E3	3062,54	10,91			
	PTIAF- P - E4	3083,20	10,98			
PTIAF - P Saturado	PTIAF- P - S1	1963,34	6,99	6,76	$\pm 0,19$	2,88
	PTIAF- P - S2	1863,23	6,64			
	PTIAF- P - S3	1843,90	6,57			
	PTIAF- P - S4	1921,34	6,84			
PTIAF - M Equilíbrio	PTIAF- M - E1	2964,23	10,56	10,45	$\pm 0,15$	1,48
	PTIAF- M - E2	2961,23	10,55			
	PTIAF- M - E3	2941,98	10,48			
	PTIAF- M - E4	2871,20	10,23			
PTIAF - M Saturado	PTIAF- M - S1	1573,30	5,60	5,59	$\pm 0,15$	2,62
	PTIAF- M - S2	1589,45	5,66			
	PTIAF- M - S3	1509,23	5,38			
	PTIAF- M - S4	1601,49	5,70			

	L (mm)	210,00	e (mm)	19,61	b (mm)	230,00
		$P_{\text{máx}}$ (N)	$R_{\text{flexão}}$ unitá.	$R_{\text{flexão}}$ média	Desvio padrão	CV (%)
PTIF - P Equilíbrio	PTIF- P - E1	3698,45	13,17	13,39	$\pm 0,52$	3,89
	PTIF- P - E2	3712,84	13,22			
	PTIF- P - E3	3652,98	13,01			
	PTIF- P - E4	3976,00	14,16			
PTIF - P Saturado	PTIF- P - S1	3367,90	11,99	11,78	$\pm 0,24$	2,04
	PTIF- P - S2	3351,20	11,94			
	PTIF- P - S3	3287,30	11,71			
	PTIF- P - S4	3219,60	11,47			
PTIF - M Equilíbrio	PTIF- M - E1	3457,23	12,31	12,29	$\pm 0,17$	1,42
	PTIF- M - E2	3495,40	12,45			
	PTIF- M - E3	3472,90	12,37			
	PTIF- M - E4	3382,10	12,05			
PTIF - M Saturado	PTIF- M - S1	3216,34	11,45	11,45	$\pm 0,24$	2,09
	PTIF- M - S2	3275,30	11,66			
	PTIF- M - S3	3120,50	11,11			
	PTIF- M - S4	3246,70	11,56			

ANEXO H

Resultados completos da durabilidade por ciclos de molhagem e secagem, para os traços PRF (plástico e metal), PTIAF (plástico e metal) e PTIF (plástico e metal).

L (mm)	210,00	e (mm)					19,61	b (mm)	230,00		
	Lote 1 (normal)					Lote 2 (após ciclagem)					
	P _{máx} (N)	R _{flexão} unitá.	R _{fci}	Desvio padrão	CV (%)	P _{máx} (N)	R _{flexão} unitá.	R _{fi}	Desvio padrão	CV (%)	r _i
PRF- P	3245,30	11,56	11,50	0,24	2,07	2210,30	7,87	9,15	±1,07	11,68	0,796
	3278,12	11,67				2384,30	8,49				
	3187,20	11,35				2386,10	8,50				
	3187,30	11,35				2908,20	10,36				
	3298,20	11,75				2573,20	9,16				
	3301,40	11,76				2947,20	10,50				
	3298,20	11,75				2084,30	7,42				
	3209,10	11,43				2871,20	10,23				
	3107,20	11,07				2741,20	9,76				
	3167,20	11,28				2593,20	9,24				
PRF- M	3182,20	11,33	11,22	0,35	3,09	2343,20	8,35	7,90	±0,22	2,74	0,704
	3064,20	10,91				2253,40	8,03				
	3284,30	11,70				2264,20	8,06				
	3298,30	11,75				2184,30	7,78				
	3137,30	11,17				2108,10	7,51				
	3173,20	11,30				2202,10	7,84				
	3193,20	11,37				2200,34	7,84				
	3073,20	10,95				2213,25	7,88				
	2992,10	10,66				2204,30	7,85				
	3092,10	11,01				2203,50	7,85				
PTIAF - P	3023,30	10,77	10,79	0,26	2,39	1856,30	6,61	6,51	±0,10	1,52	0,604
	3072,20	10,94				1853,23	6,60				
	3072,20	10,94				1823,20	6,49				
	2973,20	10,59				1862,90	6,63				
	2943,20	10,48				1821,10	6,49				
	3023,70	10,77				1798,20	6,40				
	2953,30	10,52				1789,20	6,37				
	3013,20	10,73				1823,20	6,49				
	3192,80	11,37				1860,10	6,62				
	3023,20	10,77				1800,20	6,41				

PTIAF - M	2953,30	10,52	10,11	0,32	3,16	1503,30	5,35	5,74	±0,26	4,58	0,568
	2853,20	10,16				1603,30	5,71				
	2743,20	9,77				1550,30	5,52				
	2947,30	10,50				1558,80	5,55				
	2853,30	10,16				1604,50	5,71				
	2943,20	10,48				1653,90	5,89				
	2732,20	9,73				1670,10	5,95				
	2853,30	10,16				1578,10	5,62				
	2742,20	9,77				1642,90	5,85				
	2759,00	9,83				1764,90	6,29				
PTIF - P	3576,80	12,74	13,06	0,48	3,67	2548,30	9,08	9,40	±0,57	6,07	0,720
	3676,30	13,09				2695,40	9,60				
	3753,20	13,37				2446,30	8,71				
	3652,20	13,01				2894,30	10,31				
	3592,30	12,79				2694,30	9,60				
	3692,00	13,15				2884,30	10,27				
	3810,60	13,57				2694,30	9,60				
	3632,10	12,94				2483,30	8,84				
	3892,10	13,86				2485,30	8,85				
	3405,80	12,13				2579,00	9,18				
PTIF - M	3372,40	12,01	12,12	0,57	4,67	2045,30	7,28	7,87	±0,39	4,97	0,650
	3205,40	11,42				2173,30	7,74				
	3593,40	12,80				2293,30	8,17				
	3285,50	11,70				2045,30	7,28				
	3254,30	11,59				2272,30	8,09				
	3375,50	12,02				2194,40	7,82				
	3386,30	12,06				2264,30	8,06				
	3297,20	11,74				2145,20	7,64				
	3674,30	13,09				2296,70	8,18				
	3574,40	12,73				2375,20	8,46				

ANEXO I

Resultados completos da variação dimensional por imersão e secagem, para os traços PRF (plástico e metal), PTIAF (plástico e metal) e PTIF (plástico e metal).

	Placa 1			Placa 2		
	li	lf	v	li	lf	v
PRF- P	201,00	198,50	0,013	202,00	199,00	0,015
PRF- M	201,80	199,00	0,014	201,50	199,60	0,010
PTIAF - P	200,50	199,40	0,006	200,00	198,40	0,008
PTIAF - M	200,10	199,50	0,003	200,00	197,70	0,012
PTIF - P	201,50	199,80	0,009	200,40	199,20	0,006
PTIF - M	200,50	199,50	0,005	201,30	199,00	0,012

	Placa 3			Placa 4			Valores Médios		
	li	lf	v	li	lf	v	li	lf	v
PRF- P	200,50	200,00	0,003	200,80	199,70	0,006	201,08	199,30	0,009
PRF- M	201,30	199,60	0,009	201,00	200,60	0,002	201,40	199,70	0,009
PTIAF - P	202,00	200,00	0,010	201,20	201,10	0,000	200,93	199,73	0,006
PTIAF - M	202,10	201,50	0,003	201,70	200,90	0,004	200,98	199,90	0,005
PTIF - P	201,60	201,00	0,003	202,00	199,70	0,012	201,38	199,93	0,007
PTIF - M	200,90	200,00	0,005	200,50	199,30	0,006	200,80	199,45	0,007