

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

PAULO SILAS OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE RESINA EPÓXI COM
FIBRA DE VIDRO PROVENIENTE DA FABRICAÇÃO DE PÁS
EÓLICAS E SUA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO PORTLAND.

SOROCABA - SP

2017

PAULO SILAS OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE RESINA EPÓXI COM
FIBRA DE VIDRO PROVENIENTE DA FABRICAÇÃO DE PÁS
EÓLICAS E SUA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSA DE
CIMENTO PORTLAND.**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Área de concentração: Processamento de Materiais, desenvolvimento de dispositivos e aplicações.

Orientador: Profº Dr Steven Frederick Durrant

SOROCABA - SP

2017

Oliveira, Paulo Silas.

Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento Portland / Paulo Silas Oliveira, 2017

84 f. il.

Orientador: Steven Frederick Durrant

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2017

1. Resíduo. 2. Pá Eólica. 3. Argamassa de cimento. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.



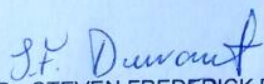
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

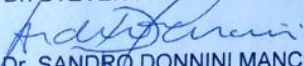
Câmpus de Bauru

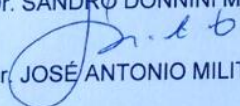


ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PAULO SILAS OLIVEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 20 dias do mês de setembro do ano de 2017, às 10:00 horas, no(a) Auditório do Câmpus de Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. STEVEN FREDERICK DURRANT - Orientador(a) do(a) Curso de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI do(a) Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia/UNESP/Sorocaba, Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO MILITO do(a) Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Sorocaba (FACENS), sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PAULO SILAS OLIVEIRA, intitulada **Caracterização do resíduo de resina epóxi com fibra de vidro proveniente da fabricação de pás eólicas e sua incorporação em argamassa de cimento portland..** Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. STEVEN FREDERICK DURRANT


Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO MILITO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Rita de Cassia (*in memorium*), a meu pai Francisco, minha esposa Franciellyn e filha Fernanda pelo apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, POSMAT, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos Professores do POSMAT, em especial ao meu orientador, Steven por toda ajuda e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

A professora Dra. Maria Lúcia do programa de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental por todas as orientações e apoio.

A empresa TECSIS, por fornecer os resíduos, possibilitando a execução deste estudo, especialmente aos funcionários Leandro de Deus e Augusto Pimentel.

Ao coordenador Luís Resende da escola SENAI – Sorocaba, por disponibilizar os tornos para triturar os resíduos.

A meu amigo, Thiago Araújo, pelo auxílio na fabricação dos moldes.

Aos colegas do POSMAT, pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Ao técnico Marcelo, do Laboratório de Construção Civil da UNIP Sorocaba, pela ajuda com os equipamentos utilizados para preparação dos corpos de prova de argamassa.

Ao técnico Lucas, do Laboratório de Matérias e Construção Civil da Universidade de Sorocaba, por sua ajuda com ensaios de tração e compressão.

Ao CNPEM; especialmente a Paula Petrini, Davi Camargo e o professor Dr. César Bof Bufon, por permitirem o uso do microscópio Ótico Confocal.

Agradeço a FAPESP pelo apoio ao LaPTec.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência”.

Henry Ford

RESUMO

Dentre as diversas maneiras de se obter energia limpa, a energia eólica é o setor que esta em grande expansão, pois apresentou no Brasil, em 2015 um crescimento de 77,1% em comparação ao ano de 2014. Este crescimento acelerado traz juntamente uma enorme quantidade de resíduos gerados no processo de fabricação dos conjuntos geradores de energia. Um dos componentes dos conjuntos geradores é a pá eólica, confeccionada basicamente de uma estrutura, envolta por resina epóxi, fibra de vidro, madeira e cola. Uma empresa localizada na cidade de Sorocaba, fabricante de pás eólicas, têm capacidade de produção de 200 pás/mês que gera uma quantidade considerável de resíduos. Este trabalho visa incorporar a resina epóxi misturada com fibra de vidro, que é um resíduo gerado na produção das pás eólicas, em argamassa fabricada com cimento Portland CPII F32, com o objetivo de utilizar o resíduo substituindo parcialmente a areia empregada, pois desta forma há possibilidade de redução do descarte em aterros, e também diminuição da utilização de recursos naturais. Inicialmente o resíduo coletado na forma sólida, foi transformado em pó através do processo de torneamento, este pó foi caracterizado pelas técnicas de ângulo de contato, massa específica, teor de inorgânicos, granulometria, Difração de Raios X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS). Posterior às caracterizações, foram confeccionados corpos de prova cimentícios com diversas proporções de substituição da areia pelo resíduo, além de um corpo de prova (CP) sem adição. Seguido da confecção dos CP foram realizados ensaios de tração na flexão, compressão, absorção de água, índice de vazios, microscopia ótica e massa específica das argamassas. Os resultados atestaram aprovação nos critérios de resistência mecânica (8 MPa), quando o resíduo substitui até 15% da areia, além de apresentar redução de massa específica, sendo vantajosa a aplicação na construção civil.

Palavras-chaves: Resíduo. Pá Eólica. Argamassa de Cimento. Construção civil.

ABSTRACT

Among the various ways to obtain clean energy, wind power has been growing rapidly. In Brazil, the use of wind power grew 77.1% in 2015 compared with the previous year. This growth results in an enormous additional amount of residue produced during the manufacture of wind power generators. Wind turbine blades, which play an important role in the whole system, are made of a structure covered with epoxy resin, fiberglass, wood and glue. A company that manufactures wind power generators located in Sorocaba can produce up to 200 wind blades per month, which produces a considerable amount of residue. This project aims to incorporate epoxy resin together with fiberglass, which is also used in the production of such blades, into mortar made with Portland CII F32 cement; that is to substitute residue for part of the sand used in this process, so that the quantity of residue (waste) can be reduced, and consequently also reduce the use of natural resources. Initially, this residue was collected in its solid form, and then turned into powder using the turning process for milling. This powder was characterized by contact angle and specific mass measurements, determination of inorganic elements, granulometry, X-ray diffraction, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). After the characterizations, some cement specimens were made with different quantities of residue substituting the sand, as well as a specimen (CP) without any substitution. Tests were then carried out, including resistance to bending traction and compression; determination of water absorption, void indices and of specific mass. The specimens showed positive results, having passed the mechanical resistance test (8MPa), when residue substituted up to 15% of the sand was substituted. In addition, the tests showed that the specific mass was also reduced, making it advantageous in applications in Civil Engineering.

Key words: Residue. Wind blades. Cement mortar. Civil Engineering.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	ENERGIA EÓLICA.....	18
2.1.1	Pás eólicas	18
2.1.2	Resíduos eólicos	18
2.1.3	Resina Epóxi.....	19
2.1.4	Fibra de vidro	19
2.2	CIMENTO PORTLAND E ARGAMASSA	20
2.2.1	Cimento Portland.....	20
2.2.2	Argamassa de cimento aplicada em revestimento	21
2.3	ESTADO DA ARTE – INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1	OBTENÇÃO DO RESÍDUO E AGREGADOS MIÚDOS DA ARGAMASSA	28
3.1.1	Obtenção do resíduo eólico	28
3.1.2	Obtenção da areia, cimento e água utilizados na argamassa.	29
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO E AGREGADOS DA ARGAMASSA (AREIA E CIMENTO).....	30
3.2.1	Ângulo de Contato.....	30
3.2.2	Área Superficial Específica – Análise Blaine.....	31
3.2.3	Determinação da massa específica do resíduo em pó.....	32
3.2.4	Determinação do teor de inorgânicos do resíduo em pó.	33
3.2.5	Granulometria.....	34
3.2.6	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	35
3.2.7	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS).....	35
3.2.8	Difração de Raios X (DRX)	36
3.3	CONFECÇÃO DA ARGAMASSA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	37
3.3.1	Preparação das Argamassas.....	37
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	40
3.4.1	Densidade aparente no estado endurecido (NBR 13280-2005).....	41
3.4.2	Ensaio de Tração na Flexão (NBR 13279-2005).....	41
3.4.3	Ensaio de Compressão (NBR 13279-2005)	43
3.4.4	Ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778 – 2005).....	44
3.4.5	Microscópio Confocal de Varrimento a Laser	45
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	49
4.1.1	Ângulo de Contato das matérias primas da argamassa.....	49
4.1.1	Área de Superficial Específica – Análise Blaine.....	49
4.1.2	Massa Específica	50
4.1.3	Determinação do teor de fibra (inorgânicos).....	50
4.1.4	Granulometria.....	51
4.1.5	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do resíduo em pó.	53
4.1.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS).....	54
4.1.2	Difração de raios X (DRX).....	57
4.2	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	59

4.2.1 Caracterização da Argamassa no Estado Fresco	59
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	60
4.3.1 Determinação da densidade da massa aparente no estado endurecido (NBR 13280)	60
4.3.2 Ensaio de Tração na Flexão (NBR 13279-2005).....	62
4.3.3 Ensaio de Compressão (NBR 13279-2005)	65
4.3.4 Ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778 – 2005).....	68
4.3.5 FTIR dos corpos de prova	70
4.3.6 Microscopia Ótica dos corpos de prova de argamassa	71
4.3.7 Ângulo de contato dos corpos de prova	74
5 CONCLUSÕES	75
6 TRABALHOS FUTUROS	77
7 REFERÊNCIAS	78
8 ANEXOS	82
8.1 ANEXO 1	82
8.1 ANEXO 2	83
9 APÊNDICE	84
9.1 TRABALHOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSO.....	84
9.2 TRABALHOS SUBMETIDOS EM REVISTA	84

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Grupo funcional Epóxi.....	19
Figura 2 – Camadas do revestimento de argamassa (ABNT – Manual de revestimento de argamassa)	23
Figura 3 – Resíduo na forma coletada (Tarugo).....	28
Figura 4 – (a) Detalhe interno do torno transformando o resíduo em pó; (b) Resíduo em pó e sólido.....	29
Figura 5 – Etapas caracterização do resíduo e agregado miúdo da argamassa	30
Figura 6 – Etapas para confecção dos corpos de prova.....	37
Figura 7 – (a) Argamassa compactada em 3 camadas no molde tronco cônico e mesa de adensamento; (b) Ampliação do item (a); (c) Argamassa sendo medida após 30 quedas na mesa de adensamento.....	39
Figura 8 – (a) Processo de moldagem dos corpos de prova; (b) corpos de prova desmoldados após 48 horas (40 x 40 x 160 mm).	39
Figura 9 – Etapas para caracterização físicas dos corpos de prova	40
Figura 10 – Dispositivo de carga para determinação de resistência a tração na flexão (Adaptado da NBR 13279 – 2005)	42
Figura 11 – Dispositivo de carga típico para ensaio de resistência compressão (NBR 13279).....	43
Figura 12 – (a) Esquema da balança hidrostática para determinação da massa dos corpos de prova; (b) Balança hidrostática utilizada (aparato experimental).....	44
Figura 13 - Ângulo de contato do resíduo em pó.	49
Figura 14 – Análise granulométrica resíduo em pó.....	52
Figura 15 – Análise granulométrica da areia e resíduo em pó comparada com a NBR 7214-2015.	53
Figura 16 – Espectro de infravermelho do resíduo em pó, resina epóxi e fibra de vidro.....	54
Figura 17 – (a) Micrografia da fibra de vidro; (b) EDS da fibra de vidro.....	55
Figura 18 – (a) Micrografia da resina epóxi; (b) EDS da resina epóxi.	55
Figura 19 – (a) Micrografia do Resíduo em pó (fibra de vidro com resina epóxi); (b) EDS do resíduo em pó.	56
Figura 20 – (a) Micrografia da areia utilizada na argamassa; (b) EDS da areia utilizada na confecção da argamassa.....	57
Figura 21 – (a) Micrografia do cimento utilizado na argamassa; (b) EDS do cimento utilizado na confecção da argamassa.	57
Figura 22 –Difratograma do cimento Portland CII-F32.....	58
Figura 23 –Difratograma do agregado miúdo (Areia).....	58
Figura 24 –Difratograma do resíduo em pó.	59
Figura 25 – Relação água/cimento para cada tipo de substituição da pelo resíduo em pó.....	60
Figura 26 – Resultado da análise da argamassa no estado endurecido	60

Figura 27 – Resistência à tração na flexão	63
Figura 28 – Resistência à compressão dos corpos de prova.....	65
Figura 29 – Característica visual dos corpos de prova com cada porcentagem por massa de substituição após ensaio de compressão.	68
Figura 30 – Índice de vazios nos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos.....	69
Figura 31 – Absorção de água dos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos. ..	69
Figura 32 – (a) Massa Específica do corpo de prova seco em estufa; (b) Massa Específica do corpo de prova saturado em água.	70
Figura 33 – Espectros de infravermelho dos corpos cimentícios com as substituições de 0% a 37,5% da areia pelo resíduo em pó.	71
Figura 34 – Micrografia ótica da morfologia (esquerda) e topografia (direita) dos corpos de prova com as substituições de: (a) 0%, (b) 7,5%, (c) 15%.	72
Figura 35 – Micrografia ótica da morfologia (esquerda) e topografia (direita) dos corpos de prova com as substituições de: (a) 22,5%,(b) 30%,(c) 37,5%.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do cimento Portland (adaptado de: ABNT, 1997; 1991a; 1991b; 1991c).	20
Tabela 2 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (adaptado de ABCP, 2002). ..	21
Tabela 3 - Argamassas - Critérios físico-químicos (CINCOTTO et al., 1995).	22
Tabela 4 - Argamassas - Funções na construção (CINCOTTO et al., 1995).	22
Tabela 5 - Composição da água fornecida pelo SAAE - Sorocaba	30
Tabela 6 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento.	34
Tabela 7 - Tabela Composição argamassa para os Corpos de Prova	38
Tabela 8 - Massa específica do resíduo eólico em pó.	50
Tabela 9 - Porcentagem de inorgânicos presentes no resíduo eólico em pó após queima.	51
Tabela 10 – Análise granulométrica resíduo em pó.	51
Tabela 11 – Porcentagem de massa elementar do resíduo eólico em pó.	56
Tabela 12 – Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias	61
Tabela 13 – Análise de Variância (ANOVA) – Densidade aparente no estado endurecido	61
Tabela 14 – Teste de Tukey – Densidade aparente no estado endurecido – 28 dias de cura ...	62
Tabela 15 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura	63
Tabela 16 – Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à tração na flexão aos 28 dias	64
Tabela 17 – Teste de Tukey – Resistência à tração na flexão – 28 dias de cura	64
Tabela 18 – Resistência à compressão aos 28 dias de cura	66
Tabela 19 – Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 28 dias	66
Tabela 20 – Teste de Tukey – Resistência à compressão – 28 dias de cura.	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

GWEC: Conselho Global de Energia Eólica.

MME: Ministério de Minas e Energias.

MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura.

EDS: Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia.

DRX: Difração de Raios X.

CP's: Corpos de prova.

MPa: Mega Pascal.

GWEC: Conselho Global de Energia Eólica.

1 INTRODUÇÃO

Com a atual demanda por energias limpas, a indústria eólica vive o momento de maior crescimento da história, tanto em termos do número de turbinas, como no tamanho das mesmas. De acordo com o Conselho Global de Energia Eólica (GWEC, na sigla em inglês), turbinas modernas estão até 100 vezes mais potentes que aquelas construídas em 1980. No Brasil a energia eólica é a forma de energia que mais cresce a cada ano, tendo atingido 7,6 MW em 2014, com previsão de chegar a 24 GW em 2024 (M.M.E., 2016).

Vinculado à expansão do uso da energia eólica existe a necessidade de se desenvolver métodos de diminuir as crescentes quantidades de resíduos associados à fabricação de pás eólicas.

Informações internas das fabricantes de pás eólicas dão conta que cada pá chega a pesar 7 toneladas e na sua fabricação é gerado de 10 a 15% de resíduo, ou seja, aproximadamente 1 tonelada (BINI et al., 2011). Estima-se que no início da próxima década serão descartadas aproximadamente 50 mil toneladas anuais de pás usadas em todo o mundo, e que esse número só tende a subir, para atingir, em 2034, aproximadamente 200 mil toneladas por ano (GUERRERO et al., 2011).

As pás para turbinas eólicas são normalmente fabricadas de material compósito, como por exemplo, os plásticos reforçados com fibras (SHACKELFORD, 2008). O compósito mais comum para a fabricação de uma pá eólica é composto de matriz termo rígida (normalmente epóxi) e fibras (geralmente de vidro) (HAU, 2010). Assim, a reciclagem de resíduos destes compósitos está intrinsecamente relacionada à dificuldade de separação dos componentes.

Isso porque durante o processamento da pá, o termo rígido, ainda no estado líquido, envolve todas as fibras. Uma vez solidificado (após a cura, ou formação de ligações cruzadas ou intermoleculares), a separação mecânica fica evidentemente complexa. Poderia ser

pensada a separação térmica, porém o termorrígido curado não funde, impedindo métodos tradicionais de reciclagem polimérica (GUERRERO et al., 2011).

Já que a reciclagem mecânica (via fusão) não se aplica, uma alternativa para esses resíduos é a reciclagem por incorporação em compostos de cimento, como exemplo a argamassa de cimento, na qual há possibilidade de substituição dos agregados, neste caso a areia, que é um recurso natural, por um material residual (fibra de vidro impregnada com resina epóxi), proveniente de um processo industrial, que atualmente é direcionado ao aterro.

O objetivo deste estudo foi testar e apresentar resultados a respeito da possibilidade de reutilização dos resíduos da fabricação de pás eólicas incorporados à argamassa de cimento, na qual o resíduo substituiu a areia em proporções definidas. Este trabalho foi dividido em alguns capítulos, os quais irão descrever uma revisão bibliográfica sobre energia eólica, argamassas de cimento, e analisar trabalhos que incorporaram resíduos em matriz cimentícia; seguido de caracterizações dos resíduos eólicos e dos agregados da argamassa (areia e cimento), que foram utilizados neste trabalho; confecção de corpos de prova de argamassa e caracterizações físicas dos corpos de prova, onde foram apresentados os resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA EÓLICA

O vento é um meio utilizado para gerar energia elétrica, neste caso é comumente chamada de energia eólica. Este tipo de energia limpa está em grande expansão desde o início desta década. A geração deste tipo de energia se dá pelo movimento rotativo de um conjunto composto por um rotor (turbina) e três pás idênticas que estão fixos a uma torre, ou seja, um conjunto similar a um “cata vento”.

2.1.1 Pás eólicas

As pás eólicas são os componentes que são forçados a movimentarem pela ação do vento, e transmite energia mecânica de rotação para o rotor que por sua vez gera a energia elétrica.

Os principais materiais utilizados na fabricação dos conjuntos eólicos são fibra de vidro e resina epóxi (BARROS, 2010). No processo a fibra de vidro é impregnada pela resina epóxi no estado líquido que com o passar do tempo se solidifica em uma reação química chamada de cura.

2.1.2 Resíduos eólicos

Durante o processo de fabricação dos conjuntos eólicos, existe grande geração de resíduos, exemplo da empresa TECSIS Sorocaba, os quais somam aproximadamente 100 toneladas mês, (GUERRERO et al., 2011). Estes resíduos incluem resina epóxi curada, fibra de vidro impregnada por resina, pó de lixamento, tintas, solventes, madeiras, espumas e telas poliméricas impregnadas por resina epóxi. Atualmente o destino destes resíduos é o aterro (BINI et al., 2011). O foco de estudo deste trabalho, foi o reaproveitamento da fibra de vidro

impregnada com resina epóxi, que representa a maior proporção dos resíduos destinados ao aterro.

2.1.3 Resina Epóxi

As resinas epóxi são polímeros termorrígidos comumente utilizados para finalidades onde se exige alta resistência mecânica e baixa densidade, exemplificada pela aplicação na fabricação de pás eólicas, na qual o produto final (pá eólica) é submetido a diversos esforços mecânicos durante o funcionamento, além de apresentar dimensões que variam de 30 a 60 metros (BARROS, 2010). Esse material apresenta alta rigidez e estabilidade térmica, ou seja, propriedades interessantes para finalidades estruturais (GONÇALVES et al., 2011).

As resinas epóxi são convertidas em polímeros termorrígidos pela ação de agentes endurecedores, conhecidos como catalizadores ou agentes de cura (BARROS, 2010). A reação química de cura ocorre com a crescente temperatura e é inconversível. Este processo de transformação é caracterizado pela presença de pelo menos dois anéis de três membros (Figura 1), intitulado de epóxi, epóxido, oxirano ou etano epóxi (ALMEIDA et al., 2005).

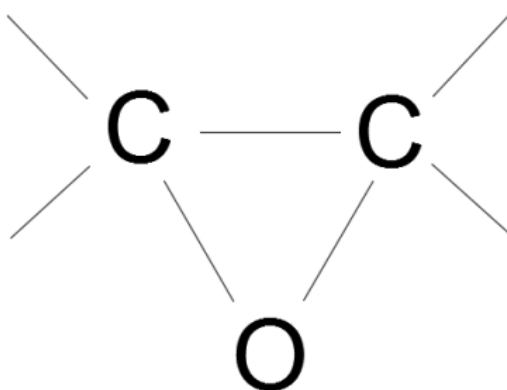


Figura 1 – Grupo funcional Epóxi.

2.1.4 Fibra de vidro

As fibras de vidro utilizadas para reforços em compósitos poliméricos podem ser subdivididas em duas categorias, sendo a primeira do tipo E-glass, composta principalmente

por dióxido de silício (SiO_2); a segunda é do tipo S-glass, que é uma combinação de SiO_2 , Alumínio (Al) e magnésio (Mg). O tipo E-glass apresenta menor custo e baixa resistência mecânica, já o tipo S-glass é amplamente utilizado para fins estruturais, ou seja, aplicada quando é necessário maior desempenho do componente, exemplo das pás eólicas, e consequentemente maior custo (MAY, 1988; BARROS, 2010).

2.2 CIMENTO PORTLAND E ARGAMASSA

2.2.1 Cimento Portland

O cimento é obtido pela moagem e calcinação de rochas de minerais calcários e argilosos. Desta forma, ele é constituído basicamente de silicatos e aluminatos de cálcio (GARCIA et al., 2012). A Tabela 1 descreve as principais características para os tipos de cimento Portland encontrados no mercado e as normas relacionadas.

Tabela 1 - Classificação do cimento Portland (adaptado de: ABNT, 1997; 1991a; 1991b; 1991c).

Cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira (ABNT)
		Clinker + Gesso	Escória de alto forno	Material Pozolânico (Z)	Material Carbonático (F)	
Comum	CP I	100	-	0	-	NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	12571	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14		
	CP II-F	94-90		-	6-10	
Alto torno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-			NBR 5736

Na Tabela 2 estão descritas as diversas aplicações do cimento Portland, a tabela permite à escolha adequada do tipo de cimento Portland para determinada aplicação. No caso deste estudo é possível que seja utilizada qualquer um dos cimentos aplicáveis para argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos.

Tabela 2 - Aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland (adaptado de ABCP, 2002).

Aplicação	Tipos de Cimento Portland
Argamassa de revestimentos e assentamento de tijolos e blocos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de alto forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de assentamento de ajulejos e ladrilhos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de rejuntamento de ajulejos e ladrilhos	Branco (CPB)
Argamassa e concretos para meios agressivos (água do mar e esgotos)	Alto forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos.

2.2.2 Argamassa de cimento aplicada em revestimento

O revestimento de argamassa tem como funcionalidade a proteção de uma superfície, podendo ser camadas sobrepostas ou únicas, apresentando espessuras regulares, que tem como efeito uma superfície conveniente para receber uma decoração final (ABNT – Manual de revestimento de Argamassa). As principais funcionalidades do uso de revestimento de argamassa são:

- Proteger a superfície, normalmente alvenaria, contra a atividade direta de fontes agressivas, além de contribuir para o isolamento térmico, acústico e a estanqueidade à água e gases;
- Possibilitar que o acabamento final suceda em uma superfície regular, apropriada para receber outros revestimentos, conforme proposta arquitetônica, através da regularização dos compostos de vedação.

Existem diversos tipos de argamassas, as quais se distinguem por sua composição, devido à variação de aglomerantes e aditivos, porém a argamassa mais utilizada é feita pela mistura homogênea de cimento (aglomerante), agregado miúdo (areia) e água, que formam um material aderente. A escolha do tipo de argamassa depende de sua aplicação, conforme ilustrado nas Tabela 3 e Tabela 4. (CINCOTTO et al., 1995).

Tabela 3 - Argamassas - Critérios físico-químicos (CINCOTTO et al., 1995).

Critério de Classificação	Tipos de Argamassa
Quanto a natureza do aglomerante	Argamassa aérea e hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal, argamassa de cimento, argamassa de cimento e cal, argamassa de gesso e argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerante	Argamassa simples e Argamassa mista
Quanto a consistência da argamassa	Argamassa seca, argamassa plástica e argamassa fluida
Quanto a plasticidade da argamassa	Argamassa pobre ou magra, argamassa pobre ou cheia e argamassa rica ou gorda
Quanto a densidade da argamassa	Argamassa leve, argamassa normal ou argamassa pesada
Quanto à forma de preparo e fornecimento	Argamassa preparada em obra, mistura semi pronta para argamassa, argamassa industrializada e argamassa dosada em central

Tabela 4 - Argamassas - Funções na construção (CINCOTTO et al., 1995).

Função	Tipos de Argamassa
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (Elevação de alvenaria)
Para revestimentos de paredes e tetos	Argamassa de fixação (alvenaria de vedação), argamassa de chapisco, argamassa de emboço, argamassa de reboco, argamassa de camada úmida e argamassa de revestimento decorativo e monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de chapisco e argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes e pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas (colante) e argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

A argamassa de revestimento pode ser à base de cal, a base de cimento ou uma mistura de cal e cimento, dependendo da razão entre seus componentes. A argamassa recebe vários nomes, que podem ser: chapisco, que é uma camada descontínua utilizada para o preparo da base, que tem como objetivo de padronizar a superfície quanto à absorção e aprimorar a aderência do revestimento; Emboço: camada de revestimento utilizada para regularizar a face de base com ou sem chapisco, proporcionando uma superfície apta a receber decoração final

ou uma camada de reboco; Reboco: camada de revestimento empregada para cobrir o emboço, que pode ser o acabamento final ou receber ornamentação; Massa Única, comumente conhecida como emboço paulista: trata-se de um revestimento executado em uma camada, ou seja, desempenha as funções do emboço e reboco (ABNT – Manual de revestimento de Argamassa). As diversas camadas de argamassa de revestimento podem ser observadas na Figura 2.

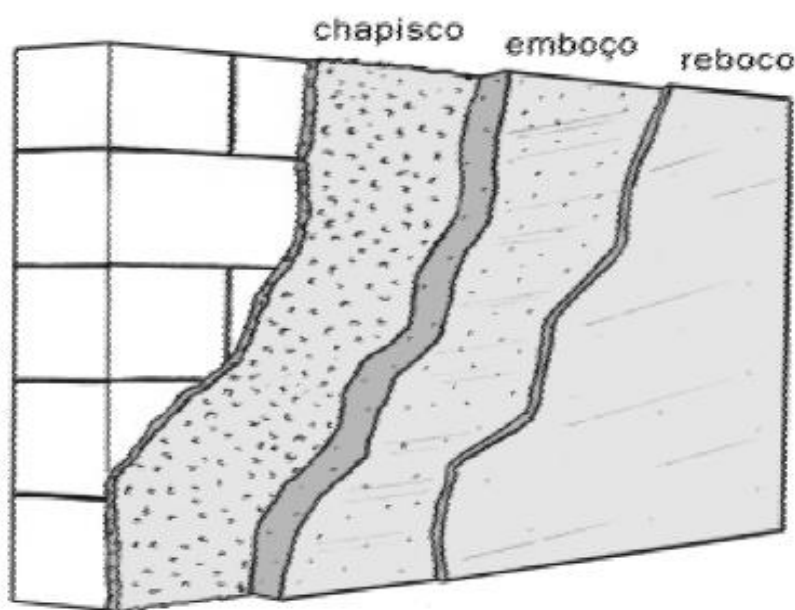


Figura 2 – Camadas do revestimento de argamassa (ABNT – Manual de revestimento de argamassa)

Para este trabalho foi utilizada como padrão a argamassa de cimento, sendo esta constituída basicamente de cimento Portland CPII F32, areia de média granulometria (NBR 7214-2005) e água, obtendo-se uma pasta de pouca trabalhabilidade e baixa retenção de água, mas com elevada resistência mecânica quando endurecida (GOMES e TRISTÃO, 2008), visando aplicações de assentamento e revestimento de paredes e tetos, as quais têm requisitos de resistência são estabelecidos pela NBR 13281 – 2005.

2.3 ESTADO DA ARTE – INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS

As massas utilizadas na indústria da construção civil, tradicionalmente são de natureza heterogênea, ou seja, apresentam uma gama de composições. Desta forma, os resíduos oriundos das diversas áreas podem ser utilizados como agregados, em matrizes de cimento. Isso tem sido foco em estudos, em inúmeras instituições, que aspiram soluções que conciliem os aspectos econômicos, de aplicação e ambientais.

CANOVA et al. (2007) avaliou argamassas de cimento, cal virgem, areia e resíduos de borracha de pneus, sendo que este último representa 0, 6, 8, 10 e 12% do volume do agregado. O trabalho avaliou a massa específica, resistência à compressão axial, resistência tração na flexão por compressão diametral, resistência à aderência a tração e fissuração dos corpos de prova, aplicados sobre o substrato. As argamassas com resíduos apresentaram redução de resistência mecânica quando comparadas com corpos com 0% de substituição, entretanto se mostraram eficientes na redução da fissuração nos revestimento, além da redução de massa específica, que está relacionada ao aumento do índice de vazios.

MODRO et al. (2009) estudou a incorporação do resíduo polimérico de tereftalato de etileno (PET) em concretos, substituindo os agregados (areia, pedrisco, pó de pedra) nas porções de 0, 10, 20,30 e 40% (em volume). No estado fresco, foi avaliado o consumo de água em função na porção de resíduo, pelo abatimento tronco cônico; e no estado endurecido, os corpos de prova cimentícios, foram analisados pelo índice de porosidades e resistência a compressão axial. Os concretos com resíduos poliméricos apresentaram redução no abatimento, indicando que a superfície específica do resíduo é maior que o agregado substituído. Foi observado, também, que ocorreu o aumento do índice de porosidades, e redução da resistência a compressão, diretamente relacionados à baixa interação do polímero com a matriz cimentícia, fato também constatado por CHOI et al. (2005).

BINI et al. (2011) substituiu resíduo de resina epóxi provenientes da fabricação de pás eólicas, nas proporções de 0, 10, 20 e 50% no lugar do agregado graúdo de concretos. O resíduo foi analisado quanto a sua densidade aparente, sendo este comparado com a densidade do agregado graúdo; os concretos foram analisados quanto à resistência a compressão. Os resultados mostraram que o resíduo apresenta menor massa específica que o agregado, indicando redução de densidades nos concretos; nas análises mecânicas, todos os corpos com substituição, apresentaram redução de resistência, quando comparados aos corpos isentos de resíduos. Entretanto, substituições de 10 e 20% podem ser vantajosas, tendo algumas aplicações na construção civil, por exemplo: em alvenaria interna de fechamento, capas para lajes nervuradas, capas para lajes pré-moldadas, material de enchimento. De forma similar, FOX (2016), substituiu resíduo eólico em concretos, no lugar do agregado graúdo em porções de 0, 25, 37,5, e 50%, porem o resíduo era composto por resina epóxi e fibra de vidro. Os resultados de resistência dos corpos com resíduo se apresentaram inferiores aos corpos com 0% de substituição, limitando as aplicações. Entretanto, o estudo de impacto ambiental, análise do ciclo de vida (LCA), relacionada à emissão de CO₂ em transportes e alocação em aterros, realizada no mesmo trabalho, indicou a vantagem desta aplicação, pois a prática de reciclagem do agregado, abstém a emissão de CO₂, em 1,0 kg por tonelada de agregado reciclado.

LOPEZ et al. (2005) e DYER e DIHR (2001) estudaram a incorporação de vidro triturado, com granulometria de 150 a 300 µm e 0,075 a 1,5 mm, em concretos, em substituição ao agregado miúdo (areia), nas proporções de até 20%. As massas no estado fresco foram analisadas quanto ao consumo de água; e no estado endurecido, foi avaliado o índice de vazios e a resistência compressão. As análises indicaram que a presença do vidro, sob essas condições granulométricas, ocasiona a necessidade do aumento de consumo de água na preparação das argamassas, pois a relação água cimento foi mantida em todas as

substituições e o abatimento foi reduzido quando foi aumentada a porção de resíduo. O índice de vazios foi reduzido, devido à diminuição do abatimento, que consequentemente corroborou para o aumento de resistência a compressão dos corpos com resíduo, quando comparados aos corpos com 0% de substituição. Entretanto, conforme estudado por MEYER e XI (1999), vidros com granulometrias grosseiras, produzem matrizes cimentícias com baixa resistência à compressão, quanto utilizados em substituição aos agregados, em virtude dos atributos superficiais pobres, método de fratura, além da alta fragilidade.

BAGHERZADEH et al. (2012) analisou a incorporação de fibras de polipropileno em concreto, nas proporções de 0,1 e 0,3% em volume. Os concretos no estado endurecido foram avaliados quanto à resistência a compressão, tração e flexão, além da análise de fissuração. Os resultados indicaram que a resistência à compressão não foi afetada com a incorporação das fibras, apresentando resultados similares às matrizes isentas de fibras. A resistência à tração na flexão aumentou na presença da fibra, indicando a capacidade da fibra unir as fissuras, tornando o corpo mais tenaz, ou seja, a adição de fibras é útil, pois melhora a microestrutura, além de restringir a formação e o crescimento de micro fissuras no concreto.

OKADA et al. (2013) incorporou sucata de fibra de vidro em argamassas utilizadas para revestimento de paredes e tetos, fabricadas a partir da mistura de cimento, cal e areia, sendo o cal substituído pelo resíduo nas porções de 0, 5, 10, 20 e 50%. As argamassas foram avaliadas no estado endurecido, relativo a sua densidade aparente, resistência tração na flexão e compressão. Os testes indicaram que a presença da fibra é vantajosa, pois os corpos de prova com sucata apresentaram redução de densidade aparente, além de mostrar resistência a compressão similar aos corpos isentos de resíduos; somada a isso, a presença do resíduo gerou o aumento de aproximadamente 0,5 MPa na resistência a tração na flexão. Resultados similares foram obtidos no estudo de WEI e MEYER (2014), que incorporaram fibra de sisal em argamassas. Os autores concluíram que a substituição do cimento Portland pelo material

fibroso aumenta à resistência a flexão para incorporação de até 20% em massa, além de controlar a formação de microfissuras, quando as fibras estão uniformemente distribuídas e aleatoriamente orientadas.

Em síntese, baseado nos estudos analisados, é possível afirmar que a incorporação de resíduos em matrizes cimentícias é vantajosa, apresentando algumas limitações quanto à aplicação, principalmente quando ocorre à incorporação de materiais poliméricos, que normalmente reduzem os valores de resistência mecânica. Entretanto, ocasionam a redução de densidade das pastas de cimento, gerando assim uma vantagem. Os estudos de incorporação de matérias fibrosos se apresentaram satisfatórios, tanto em termos de resistência quando em redução de massa, além do aumento da tenacidade, gerado pelas ligações das fibras com os demais compostos das argamassas ou concretos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 OBTENÇÃO DO RESÍDUO E AGREGADOS MIÚDOS DA ARGAMASSA

3.1.1 Obtenção do resíduo eólico

O resíduo foi obtido no estado sólido, tendo um formato cilíndrico, chamado Tarugo, com dimensões de Ø50 x 100 mm, conforme ilustrado na Figura 3, segundo informações fornecidas pela empresa geradora do resíduo e confirmação baseada nas caracterizações descritas no capítulo 3.2, o mesmo é composto apenas por resina epóxi e fibra de vidro.



Figura 3 – Resíduo na forma coletada (Tarugo).

Para que seja possível a incorporação do resíduo em argamassa de cimento Portland foi necessário transformar o resíduo sólido em um pó, através do processo de torneamento (Figura 4). Este pó foi utilizado para substituição da areia em proporções definidas na seção 3.3.1. O torneamento foi testado em passes com redução de diâmetro de 0,5 a 3 mm, sem apresentar variações na granulometria do pó resultante. O processo de torneamento e o pó obtido estão ilustrados na Figura 4.



Figura 4 – (a) Detalhe interno do torno transformando o resíduo em pó; (b) Resíduo em pó e sólido.

A direção de torneamento foi desconsiderada, pois, conforme GUERRERO et al. (2011), tanto o desbaste no diâmetro, quanto nas faces lisas deste resíduo, não interfere na composição molecular final do pó, ou seja, o teor de fibra de vidro e orgânicos se mantem de forma igualitária independente do local onde o resíduo seja obtido.

Também foram coletados resíduos que continham somente a resina epóxi e a fibra de vidro separadamente, visando facilitar as caracterizações de FTIR, MEV e EDS do resíduo estudado.

3.1.2 Obtenção da areia, cimento e água utilizados na argamassa.

A areia foi obtida em uma loja de materiais de construção situada na cidade de Sorocaba-SP, sendo comprada como uma areia de média granulometria (NBR 7214 – 2015); o cimento é do tipo Portland CII – F32 do fabricante Votoran, que tem a composição conforme NBR 11578 - 1991; a água utilizada foi obtida diretamente da rede de distribuição da cidade de Sorocaba – SP, que é tratada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE, e apresenta a composição detalhada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição da água fornecida pelo SAAE - Sorocaba**PADRÕES INORGÂNICOS E FÍSICO-QUÍMICOS**

Parâmetro	Unidade	VMP	Resultado
		Portarias	SAAE
Alumínio	mg/L	0,2	0,04
Alcalinidade Bicarbonatos	mg/L	250	18,4
Alcalinidade Carbonatos	mg/L	120	0
Alcalinidade Hidróxidos	mg/L	0	0
Cloreto	mg/L	250	11,4
Cor Aparente	uH	15	1,6
Dureza	mg/L	500	21
Ferro	mg/L	0,3	0,1
Fluoreto	mg/L	0,6 - 0,8	0,72
pH		6,0 - 9,5	6,99
Turbidez	NTU	5	0,27
Cloro Residual	mg/L	0,2 a 2,0	2

Fonte: SAAE – Sorocaba

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO E AGREGADOS DA ARGAMASSA (AREIA E CIMENTO)

A caracterização do resíduo em pó (mistura de fibra de vidro e resina epóxi trituradas), resina epóxi, fibra de vidro, cimento e areia foram realizadas conforme ilustrado na Figura 5, sendo algumas etapas excluídas para o cimento e areia devido à composição já fornecida pelo fabricante do material.



Figura 5 – Etapas caracterização do resíduo e agregado miúdo da argamassa

3.2.1 Ângulo de Contato

Uma gota de um determinado líquido apresenta um formato distinto para cada superfície onde está em contato, pois o modo como o volume deste líquido se acomoda

depende das interações entre o líquido e a superfície do material em que foi depositada (BURKARTER et al., 2006). Logo é possível medir o ângulo de uma gota depositada em superfície e com isto verificar a interação desta com o líquido.

Quando o valor do ângulo é igual a 0° , se trata de um caso extremo de máxima afinidade química entre a superfície e água, chamada super-hidrofílica. Quando o ângulo de contato é menor que 90° , a superfície é chamada de hidrofílica; se o ângulo de contato é maior que 90° , a superfície é chamada de hidrofóbica. Se esse ângulo, contudo, for superior a 165° ou igual a 180° , o líquido não apresenta qualquer interação com a superfície e esta é chamada de super-hidrofóbica (BURKARTER et al., 2006).

Os ensaios foram realizados utilizando o Goniômetro Ramé-Hart 100-00 do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba.

As amostras analisadas, resíduo em pó, areia e cimento, foram compactadas igualmente em dispositivo adequado, seguido do gotejamento de três gotas para cada superfície, e em cada uma das gotas foram realizadas 10 medições, totalizando 30 por amostra. Esta análise também foi realizada nas argamassas curadas, com as respectivas substituições.

3.2.2 Área Superficial Específica – Análise Blaine

A superfície específica de materiais particulados pode ser determinada pela técnica analítica Blaine, descrita pela NBR 16372 - 2015, que determina a finura (superfície específica), considerando o tempo necessário para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada material particulado compactado, de dimensões e porosidades específicas. A superfície específica do particulado é proporcional ao tempo (t), para determinada quantidade de ar atravessar a camada de material particulado, ou seja, o número e a faixa de tamanho dos poros individuais em uma camada específica são determinados pela

distribuição dos tamanhos das partículas, que também determina o tempo para um dado fluxo de ar.

A porção compactada de material particulado inclui um arranjo de partículas com dado volume de ar inserido entre as partículas. Esse volume de ar é determinado na forma de uma fração do volume total da porção, sendo conhecido como porosidade (ϵ); ou seja, a porção ocupada pelo particulado é $(1-\epsilon)$. Se V é o volume total, o volume absoluto de particulado (V_{abs}) é $V(1-\epsilon)$, em cm^3 , e a massa do particulado (m), é $\rho V(1-\epsilon)$, em gramas, onde ρ é a massa específica das partículas, em g/cm^3 . Conhecendo-se ρ , uma massa do particulado pode ser pesada, para produzir a porosidade desejada na camada compactada, de volume total V , que irá determinar o tempo de passagem da corrente de ar, e consequentemente determinar a área superficial, o que tornando este um método mais comparativo, que absoluto.

Esta análise foi realizada em triplicada na areia e no resíduo em pó, para obtenção de média e desvio padrão, com o objetivo de comparação entre os particulados. O equipamento utilizado foi da marca Toni Technik, modelo ToniPERM.

3.2.3 Determinação da massa específica do resíduo em pó.

A massa específica é determinada pela razão entre massa e volume de um corpo, porem por este resíduo se tratar de um polímero, pode a partícula conter poros fechados que contribuem para aumentar o seu próprio volume. Logo, para este ensaio, foi utilizada uma balança de precisão marca Shimadzu modelo AUX 220 e um Picnômetro 50 ml TecLabor devidamente calibrado, de massa conhecida (m_0). No picnômetro foi adiciona a amostra e realizada a medição de massa (m_s), posteriormente foi adiciona álcool etílico até preencher completamente o picnômetro, os bocais do picnômetro foram devidamente vedados para que não houvesse evaporação do líquido, e foram levados ao refrigerador, até que o termômetro marcasse $23^\circ C$, seguido de pesagem de massa (m_{SL}).

Tendo conhecimento dos dados descritos, da massa do picnômetro contendo somente o líquido de ensaio (m_L) e da densidade do líquido (ρ_L), é possível calcular a massa específica da amostra (ρ_P) através da equação 1.

$$\rho_P = \frac{\rho_L (m_S - m_0)}{(m_L - m_0) - (m_{SL} - m_S)} \quad (1)$$

Este ensaio foi realizado em duplicata apenas para o resíduo em pó, pois os demais compostos da argamassa (areia, cimento e água) têm densidades especificadas pelos fabricantes/fornecedores, o local de realização dos testes foi o Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas (NATEL) da UNESP Sorocaba.

3.2.4 Determinação do teor de inorgânicos do resíduo em pó.

Esta técnica consiste no aquecimento de uma amostra a altas temperaturas, durante determinado tempo, visando à queima de componentes orgânicos e consequentemente obtenção dos inorgânicos. Para este ensaio foi utilizado um forno mufla, marca Quimis, modelo Q-318M24, para o aquecimento e uma balança de precisão marca Shimadzu modelo AUX 220, para pesagem das amostras. O ensaio foi realizado apenas no resíduo em pó, seguindo a norma ASTM D 3171 - 2009.

Nos testes foram utilizados 3 cadinhos, lavados e posteriormente secados no forno de 500°C a 600°C por 20 min, resfriados em dessecador e pré pesados (M_C). Adicionou 1 g da amostra (resíduo em pó) em cada cadinho, realizou-se a pesagem (M_0) e as mesmas foram levadas ao forno pré aquecido a 500°C, aumentou-se a temperatura para 565°C e permaneceu no forno por um período de 2 horas e 30 minutos. Posteriormente as amostras foram acondicionadas em um dessecador por um período de 20 min para resfriamento, seguido de pesagem ($M_1 - 1^a$ Medição). Os cadinhos retornaram para o forno por um período de 1 hora, após novo resfriamento e pesagem ($M_2 - 2^a$ medição), os cadinhos retornaram para o forno

por um período de 40 min, ao término deste período os cadinho e amostras foram resfriados e pesados (M_3 - 3ª Medição). No total, foram 250 minutos de forno.

O Cálculo do teor de fibra (T_f) no fim do ensaio, ou seja, a parte inorgânica da amostra, foi calculada pela equação 2.

$$T_f(\%) = \left[\frac{(M_3 - M_c)}{(M_o - M_c)} \right] * 100 \quad (2)$$

Todo o procedimento experimental foi realizado no Núcleo de Automação e Tecnologias Limpas (NATEL) da UNESP Sorocaba.

3.2.5 Granulometria

A análise granulométrica consiste no peneiramento de uma determinada massa da amostra em um conjunto de peneiras empilhadas em ordem decrescente de abertura de malhas, estas aberturas representam o diâmetro das partículas.

Esta análise foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Paulista de Sorocaba – UNIP, utilizando o conjunto de peneiras descritos na Tabela 6, e um Peneirador Eletromecânico, Marca Soloteste.

Tabela 6 - Série de peneiras utilizadas no ensaio de peneiramento

Nº da Peneira (Mesh)	Abertura (NBR-mm)
Tampa -	-
4	4,750
8	2,360
16	1,180
30	0,600
40	0,425
50	0,300
100	0,150
200	0,075
Prato	-

Inicialmente foi depositada na primeira peneira de 4,75 mm, uma massa conhecida (m_o), e o conjunto de peneiras foi agitado durante 8 minutos; seguido da pesagem o material retido em cada peneira; e do cálculo da porcentagem de retenção, dividindo o peso retido pelo peso original da amostra. (NBR NM248 - 2003).

Nesta técnica foi analisado o resíduo em pó e a areia utilizada neste estudo, sendo realizada a comparação com os limites ótimos e utilizáveis descritos na NBR 7214.

3.2.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Nesta técnica de caracterização, um feixe de luz infravermelho é guiado até a amostra através de um interferômetro. Depois de passar pela amostra o detector irá captar a contribuição dos feixes como uma sobreposição de ondas, a Transformada de Fourier permite interpretar o fenômeno da interferência, podendo-se determinar a amplitude vibracional para as diferentes frequências, apresentando como resultado final um espectro que indica as bandas de absorção na faixa do infravermelho, que são derivadas das transições de estado de vibração de grupos químicos da amostra (CAMPBELL, 1991).

Os espectros foram obtidos utilizando um espectrofotômetro Jasco FTIR-410, juntamente com o software FTIR, locado no Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP de Sorocaba. Foram realizadas 128 leituras para cada amostra analisada, compreendendo o intervalo de 4.000 a 500 cm^{-1} . O acessório utilizado para todas as caracterizações realizadas foi o de refletância difusa, sendo o background realizado com um espelho.

3.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica utilizada na investigação de materiais quando se deseja obter imagens de alta resolução. A mesma se

baseia na emissão de elétrons primários, que são direcionados/guiados até a amostra por um conjunto de lentes magnéticas. Após a colisão dos elétrons primários com a amostra, ocorre a emissão de elétrons secundários, retroespalhados e Raios X (CANEVAROLO JR et al., 2003). Os elétrons ejetados após a colisão são captados por detectores e posteriormente processados para a formação da imagem.

A técnica de Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia é acoplada ao MEV, e detecta/processa os Raios X emitidos, apresentando como resultado final um espectro da composição elementar em uma região da amostra.

As caracterizações realizadas por MEV (morfologia) e EDS (composição elementar), foram realizadas no resíduo em pó, resina epóxi, fibra de vidro (sendo os dois últimos utilizados para confirmação da composição elementar do resíduo em pó), também foi analisada a areia (comparada conforme NBR 7214-2015) e o cimento Portland CP II-F32. O equipamento utilizado foi da marca Jeol, modelo JSM-6010, do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP Sorocaba.

3.2.8 Difração de Raios X (DRX)

A técnica de Difração de Raios X (DRX) é um método largamente utilizado para caracterização estrutural de materiais cristalinos. A mesma se baseia na emissão comprimentos de onda na faixa do Raio X focalizados na amostra e testados em diversos ângulos de incidência. Após a incidência do feixe na amostra, ocorre a difração com intensidade e a posição angular dos perfis, que correspondem cada qual a uma família de planos (índices de Miller), que está relacionada ao espaçamento interplanar e o parâmetro de rede da estrutura da amostra, regidos pela lei de Bragg. Os feixes difratados são detectados, processados e comparados, gerando como resultado um espectro com picos característicos dos planos de incidência do material analisado. Sabe-se que a relação das distâncias interplanares

e das intensidades de difração não se repetem para as centenas de milhares de estruturas cristalinas, ou seja, de um material para outro (TOLEDO, 2003).

Neste ensaio foi analisado o resíduo em pó, areia e cimento utilizados neste estudo. O equipamento utilizado foi o Difratorômetro de Raios X Panalytical X'Pert Powder do Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais (LMCMat) da UNESP Sorocaba.

3.3 CONFEÇÃO DA ARGAMASSA E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.3.1 Preparação das Argamassas

Para confecção das argamassas foram preparadas composições mássicas de 1:3, em termos de cimento. Foi moldado um corpo de prova isento de resíduos, utilizado como padrão, e outras 5 condições, nas quais o resíduo substitui a areia em 7,5%, 15%, 22,5%, 30% e 37,5% .

Foram moldados 54 corpos de prova, sendo que para cada condição foram confeccionados 9 amostras. A produção dos corpos de prova seguiu as etapas ilustradas na Figura 6.

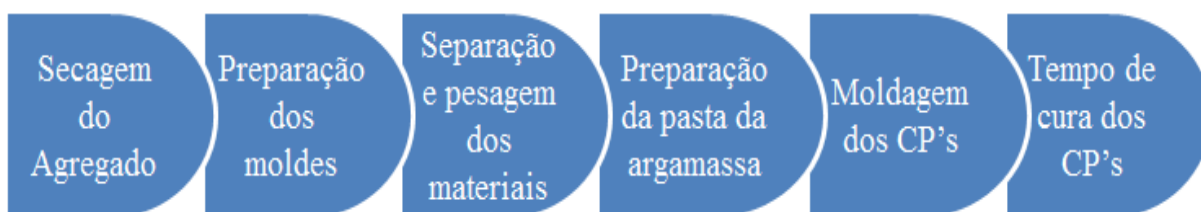


Figura 6 – Etapas para confecção dos corpos de prova

A secagem da areia, cimento e resíduo foi realizado a 50°C em estufa Quimis®, por 72 horas antes da utilização; seguido da preparação dos moldes, onde foi aplicado óleo mineral com auxílio de pincel, visando facilitar a desmoldagem dos corpos de prova, conforme descrito na NBR 13276-2005 e 7215-1996. Para separação e pesagem dos materiais (cimento, areia, resíduo e água), foi utilizada uma balança de analítica marca Marte Slim

modelo MS 10K, sendo a somatória das massas mantida em 2,5 kg aproximadamente, conforme norma NBR 16541-2016.

A composição das argamassas foi realizada conforme proporções descritas na Tabela 7, onde está exposta a massa utilizada de cada composto. A quantidade de água empregada foi apresentada em percentuais relacionados ao cimento, pois a mesma esta diretamente associada à hidratação e resistência mecânica dos corpos de prova. Para cada composição e tempo de cura (7, 14 e 28 dias) foram fabricado três corpos de prova, visando verificar a repetitividade e desvio padrão nos ensaios de caracterização.

Tabela 7 - Tabela Composição argamassa para os Corpos de Prova

Tipo de substituição	Resíduo		Água	Areia	Cimento	Água/Cimento
	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)
-	0,00	0,00	0,42	1,60	0,53	079
Areia	7,50	0,12	0,53	1,48	0,53	100
	15,0	0,24	0,65	1,36	0,53	121
	22,5	0,36	0,84	1,24	0,53	157
	30,0	0,48	1,03	1,12	0,53	193
	37,5	0,60	1,27	1,00	0,53	238

A preparação das argamassas seguiu a norma NBR 16541-2016, para realização deste procedimento foi utilizado um misturador mecânico conforme NBR 7215-1996. Toda a massa seca foi adicionada a cuba do misturador, e o mesmo foi ligado em baixa velocidade por 30 segundos, sendo que 75% da água foi adicionada nos 10 primeiros segundos; seguido da mudança de velocidade para alta e mantida por mais 60 segundos. Concluída as etapas anteriores, tanto a cuba quanto a haste do misturador foram raspadas com uma espátula (tal procedimento durou no máximo 90 segundos). Finalizado a raspagem, o misturador foi ligado novamente em baixa velocidade por 60 segundos, sendo adicionados os 25% de águas restantes nos 10 segundos iniciais deste segundo ciclo.

A quantidade de água adicionada a mistura de materiais secos, foi à necessária até que se obtivesse um índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme descrito na NBR 13276 – 2005 e NBR 16541-2016. O aparato utilizado para verificação do índice de consistência pode ser visto na Figura 7, que utiliza uma mesa de adensamento e um molde tronco cônico, medindo-se o espalhamento da argamassa quando submetido a 30 quedas de 12,5 mm.

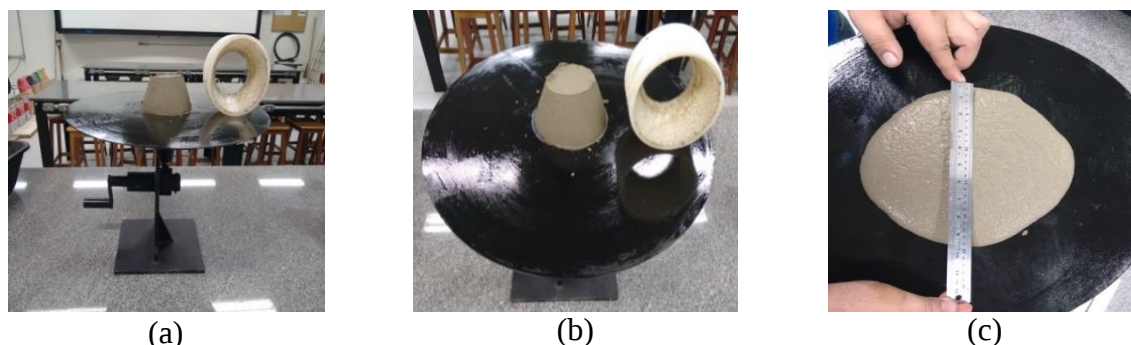


Figura 7 – (a) Argamassa compactada em 3 camadas no molde tronco cônico e mesa de adensamento; (b) Ampliação do item (a); (c) Argamassa sendo medida após 30 quedas na mesa de adensamento.

Após a validação de um índice de consistência, as argamassas foram adicionadas a moldes prismáticos com 3 cavidades, de dimensões de 40 x 40 x 160 mm, conforme descrito na NBR 13276 – 2005 e 16541 - 2016, em 2 camadas, sendo que a cada camada o molde foi fixado e submetido a 30 quedas na mesa de adensamento.

Após o procedimento de moldagem, ilustrado na Figura 8 (a), foi realizada a desmoldagem, após 48 horas (Figura 8 (b)) e mantidos na temperatura ambiente até as datas dos ensaios de resistência mecânica.



Figura 8 – (a) Processo de moldagem dos corpos de prova; (b) corpos de prova desmoldados após 48 horas (40 x 40 x 160 mm).

As etapas de preparação da argamassa até a moldagem dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Paulista de Sorocaba – UNIP.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram caracterizados fisicamente pelos ensaios de tração na flexão e compressão descritos na NBR 13276-2005, densidade aparente no estado endurecido conforme NBR 13280 – 2005, determinação do índice de absorção de água, índice de vazios e massa específica seca e saturada, conforme NBR 9778-2005. Somado a isto foram realizadas a análise da morfologia e diâmetro das porosidades da fratura, proveniente do ensaio de tração na flexão, por microscopia ótica, verificação molhabilidade (ângulo de contato com água deionizada) e FTIR, para averiguação das ligações químicas presentes na amostra e hidratação do cimento. Todo o procedimento está ilustrado na Figura 9.

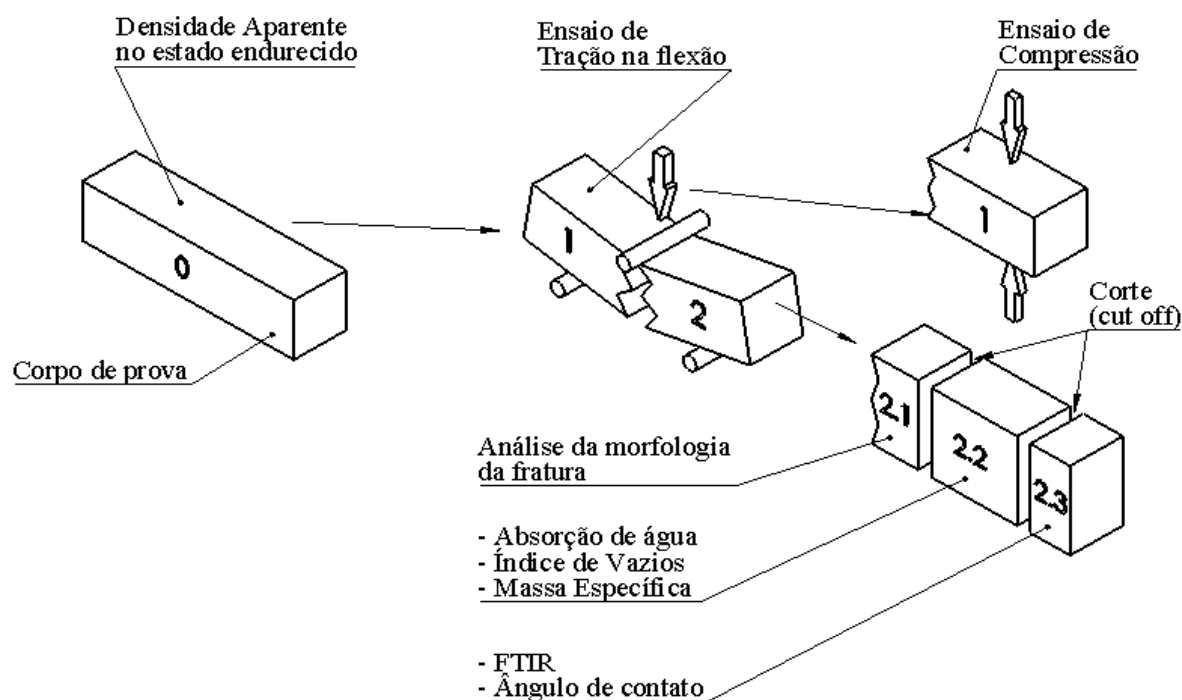


Figura 9 – Etapas para caracterização físicas dos corpos de prova

3.4.1 Densidade aparente no estado endurecido (NBR 13280-2005)

A determinação da densidade no estado endurecido foi realizada conforme NBR 13280-2005. O teste consiste em pesar o corpo de prova prismático (40 x 40 x 160 mm) com o auxílio de uma balança, foi utilizada a balança analítica Marte Slim modelo MS 10K; e medir os corpos de prova com um paquímetro em suas 3 dimensões (altura, largura e espessura), foi utilizado o paquímetro Mitutoyo de 0 a 200 mm com resolução de 0,1 mm. Após as medições foram utilizadas as equações 3 e 4 para calcular a densidade aparente no estado endurecido.

$$V = x * y * z \quad (3)$$

Onde:

V é o volume do corpo de prova, em m^3 ;

x , y e z são a largura, altura e comprimento respectivamente, em m .

$$d = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Onde:

d é a densidade aparente no estado endurecido, em kg/m^3 ;

m é a massa do corpo de prova em kg .

A densidade aparente dos corpos de prova, com idades de 28 dias, foram comparadas com as informações da norma NBR 13281-2005, que define os requisitos de aplicação de argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos, classificando os corpos de M1 (densidade menor igual a 1200 kg/m^3) a M6 (densidade maior que 1800 kg/m^3).

3.4.2 Ensaio de Tração na Flexão (NBR 13279-2005)

Ensaio estabelecido pela NBR 13279 – 2005, nos quais os corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm), após 7, 14 e 28 dias de cura, foram submetidos ao teste de tração na flexão, conforme Figura 10. A seção 40 x 40 mm do corpo de prova, apoiada em dispositivo

adequado receberá uma carga com uma taxa de $50 \pm 10 \text{ N/s}$ até a ruptura. O cálculo da resistência a tração na flexão foi feito pela equação 5.

Para esta caracterização foi utilizada prensa hidráulica de 0 a 150 toneladas, da marca ViaTest e o dispositivo de 3 pontos do Laboratório de Construção Civil da Universidade de Sorocaba.

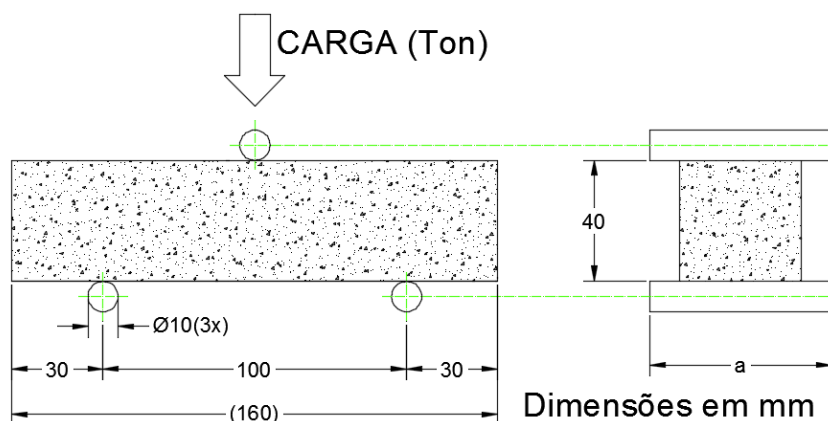


Figura 10 – Dispositivo de carga para determinação de resistência a tração na flexão (Adaptado da NBR 13279 – 2005)

$$R_f = \frac{1,5 * F_t * L}{b * d^2} \quad (5)$$

Onde:

R_f é a resistência a tração na flexão, em MPa;

F_t é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

L é a distância entre os apoios, em mm;

b é a largura média do corpo de prova, em mm;

d é a altura média do corpo de prova, em mm.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência a tração na flexão, foram comparados com a NBR 13281-2005, que classifica dos corpos de prova de R1 (Resistência menor igual 1,5 MPa) a R6 (Resistência maior ou igual a 4,5 MPa).

3.4.3 Ensaio de Compressão (NBR 13279-2005)

O ensaio de tração na flexão rompeu os corpos de prova na seção quadrada (40 x 40 mm), gerando dois corpos menores, um destes corpos foi submetido ao ensaio de compressão, na mesma data do ensaio de tração da flexão. Este ensaio também é estabelecido pela NBR 13279 – 2005, e está ilustrado na Figura 11. A seção 40 x 40 mm do corpo de prova recebe uma carga com uma taxa de $500 \pm 50 \text{ N/s}$ até sua ruptura. O cálculo de resistência a compressão foi feito através equação 6.

Para esta caracterização, foi utilizada prensa hidráulica de 0 a 150 toneladas, da marca ViaTest e um dispositivo com base metálica de 40 x 40 mm, do Laboratório de Construção Civil da Universidade de Sorocaba.

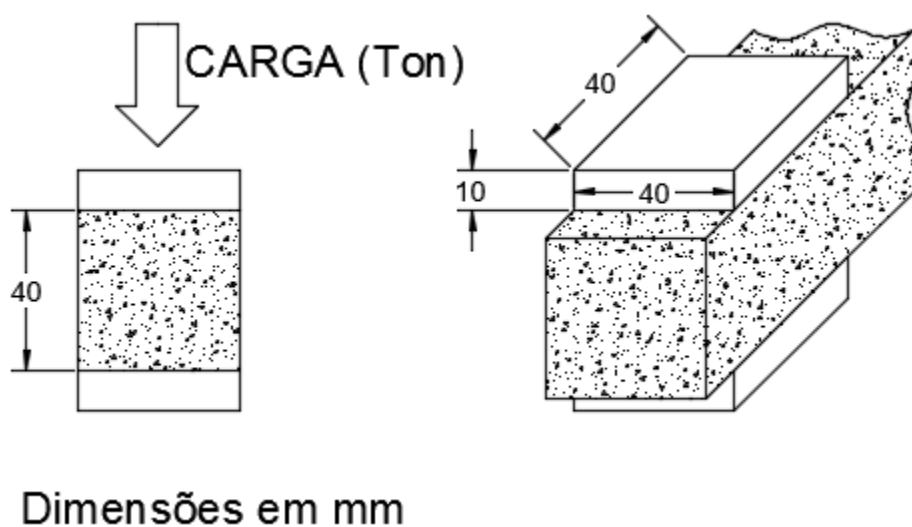


Figura 11 – Dispositivo de carga típico para ensaio de resistência compressão (NBR 13279)

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (6)$$

Onde

R_c é a resistência à compressão, em *MPa*;

F_c é a carga máxima aplicada, em *N*;

1600 é a área da sessão quadrada, em *mm*².

Os resultados do ensaio de compressão, aos 28 dias de idade, realizado conforme NBR 13279-2005, foram comparados com a NBR 13281-2005, que classifica dos corpos de prova de P1 (Resistência menor igual 2,0 MPa) a P6 (Resistência maior igual a 8 MPa).

3.4.4 Ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778 – 2005)

Os corpos de prova utilizados, foram os remanescentes do ensaio de tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias, ilustrado na Figura 9. Este ensaio foi realizado conforme NBR 9778 – 2005, no qual os corpos de prova foram mantidos em estufa pelo período de 72 h, seguidos pesagem (M_s), os mesmos retornaram a estufa por mais 24 horas para validação; posteriormente os corpos de prova, foram imersos em água por 72 h, seguido de retirada do excesso de água com um papel absorvente e nova pesagem (M_{sat}), também validado com mais 24 horas de imersão, sendo aceito um desvio de no máximo 0,5 % da menor massa. Com estes dados foi possível calcular o índice de absorção de água conforme equação 7.

$$\text{Absorção de água (\%)} = \left[\frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \right] * 100 \quad (7)$$

Os mesmos corpos de prova foram encaminhados para o ensaio ilustrado na Figura 12, no qual foi realizada a medição de massa da amostra saturada imersa em água. A equação 8 foi utilizada para transformar o valor indicado no dinamômetro em massa (M_i)

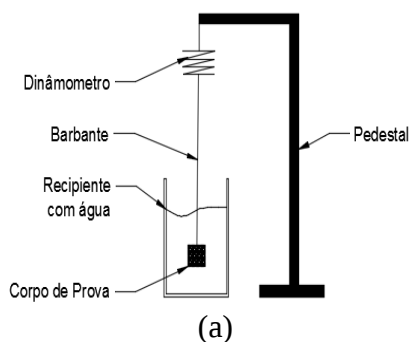


Figura 12 – (a) Esquema da balança hidrostática para determinação da massa dos corpos de prova; (b) Balança hidrostática utilizada (aparato experimental).

$$M_i = \left(\frac{W}{9,8} \right) * 1000 \quad (8)$$

Onde:

W é o peso em N, obtido com a balança hidrostática.

Contendo todos os dados das pesagens já descritas, foram calculados o índice de vazios pela equação 9, massa específica da amostra seca pela equação 10 e massa específica da amostra saturada pela equação 11.

$$\text{Índice de Vazios (\%)} = \left[\frac{(M_{sat} - M_s)}{(M_{sat} - M_i)} \right] * 100 \quad (9)$$

$$\text{Massa Específica da amostra seca (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_s}{(M_{sat} - M_i)} \rho_{\text{água}} \quad (10)$$

$$\text{Massa Específica da amostra saturada (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_{sat}}{(M_{sat} - M_i)} \rho_{\text{água}} \quad (11)$$

Onde:

M_{sat} – Massa da amostra saturada em água por 72 h

M_i – Massa da amostra saturada por 72h imersa em água (balança hidrostática)

M_s – Massa da amostra seca em estufa por 72 h

Estes ensaios foram realizados no laboratório NATEL da Unesp Sorocaba, utilizando estufa Nova Ética®, uma balança de precisão marca Shimadzu modelo AUX 220 e um dinamômetro de 0 a 2 N marca Pasco®.

3.4.5 Microscópio Confocal de Varrimento a Laser

Técnica utilizada para investigação da morfologia e topografia de materiais quando se deseja obter imagens em 2 e 3 dimensões. Trata-se de um microscópio ótico com laser acoplado. O laser detecta as informações de altura com base na intensidade da luz refletida a partir da amostra (LNNano, 2017) . A lente objetiva realiza varreduras no eixo Z, enquanto o software armazena dados para a criação de imagens tridimensionais, este processo é repetido

em vários pontos do eixo Z, de modo que se obtenha a informação da luz refletida a cada ponto. O software processa os dados de altura e intensidade de luz refletida, gerando assim as imagens morfológicas e topográficas da superfície da amostra.

Com esta técnica foram analisadas as áreas de fratura dos corpos de prova com substituições de 0% a 37,5%. A análise foi realizada no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) do Centro Nacional de Pesquisas em Energias e Materiais (CNPEM), utilizando o Microscópio Conforcal de Varrimento a Laser (LSCM), marca Keyence, modelo VK-X200, com magnificação de 10 vezes e área analisada de 4 mm². Tal escolha foi baseada no fato dos corpos de prova apresentarem poros visíveis ao ocular humano.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados dos testes de densidade aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão e compressão, aos 28 dias de cura, foram analisadas estatisticamente pelo método de análise de variância - ANOVA (COSTA NETO, 2002), realizada através da ferramenta de análise de dados do MS Excel, que verifica as hipóteses de igualdade entre as médias dos resultados avaliados ($H_0: média_1 = média_2 = \dots = média_n$) ou descarta a igualdade entre as médias ($H_1: existe diferença$), indicando que existe ao menos uma diferença entre os resultados.

Na análise de variância, utilizando o índice de significância (α) de 5% (MACÊDO, 2011), se faz necessário investigar as variações entre grupos e dentro dos grupos (resíduo), através dos cálculos da soma de quadrados entre os grupos (SQE), equação 12, e da soma dos quadrados dentro dos grupos (resíduo) (SQR), equação 13.

$$SQE = \sum_{j=1}^K \left[\frac{(\sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n} \right] - \left[\frac{(\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{N} \right] \quad (12)$$

$$SQR = \sum_{j=1}^K \sum_{i=0}^n x_{ij}^2 - \sum_{j=1}^K \left[\frac{(\sum_{i=1}^n x_{ij})^2}{n} \right] \quad (13)$$

Onde:

K - número de grupos amostrais

n - número amostras por grupo

N - número total de amostras

Somado a isto, também foi calculado os graus de liberdade entre (glE) e dentro dos grupos (glR), apresentados nas equações 14 e 15, respectivamente.

$$glE = K - 1 \quad (14)$$

$$glR = N - K \quad (15)$$

Seguido dos cálculos das médias do quadrado entre os grupos (MQE), equação 16, e médias dos quadrados dentro dos grupos (MQR), equação 17.

$$MQE = \frac{SQE}{glE} \quad (16)$$

$$MQR = \frac{SQR}{glR} \quad (17)$$

De posse dos resultados das equações 12 a 17, foi possível calcular o índice F, através da equação 18, que é comparado com o $F_{\text{crítico}}$, obtido através do cruzamento dos dados glE e glR, na tabela F de Snedecor ($\alpha=0,05$), conforme anexo 1.

$$F = \frac{MQE}{MQR} \quad (18)$$

Se o resultado de F for menor que $F_{\text{crítico}}$, é indicativo que não há diferença significativa entre os grupos analisados, validando H_0 ; e se F for maior que o $F_{\text{crítico}}$, significa que há pelo menos uma diferença significativa (válida H_1).

Sendo comprovada estatisticamente, a hipótese H_1 , é realizado o teste de Tukey (COSTA NETO, 2002), que avalia a significância ($\alpha=0,05$), entre cada resultado pertencente ao grupo amostral, relatando quais são as diferenças representativas e não representativas, ou seja, sempre que a diferença das medias de duas técnicas forem superiores a diferença mínima

simplificada (dms), pode-se afirmar que tais técnicas são diferentes. A expressão da dms está exposta na equação 19. Onde, q é o valor da amplitude estudentizada, cujo valor é encontrado em tabelas (anexo 2) , em função do cruzamento de dados do glR (Grau de liberdade dentro dos grupos) e k (número de grupos amostrais) ao nível α de probabilidade (5%).

$$dms = q \sqrt{\frac{MQR}{n^{\circ} \text{ de repetições}}} \quad (19)$$

Calculada o dms, foi realizada as comparações para averiguar se existe diferença representativa ($|\bar{X}_a - \bar{X}_b| \geq dms \rightarrow \mu_a \neq \mu_b$), ou se a diferença não é representativa ($|\bar{X}_a - \bar{X}_b| < dms \rightarrow \mu_a = \mu_b$). Os cálculos relativos ao teste de Tukey foram realizados com o auxílio do software Origin 8.6 ®.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

4.1.1 Ângulo de Contato das matérias primas da argamassa.

Não foi possível determinar o ângulo de contato na areia e cimento, pois, quando depositada uma gota de água deionizada (polar) e o diiodometano (apolar), ocorreu total absorção, impossibilitando definir a polaridade dos compostos. No resíduo em pó, foi observado o ângulo de contato de aproximadamente 108° , ilustrado na Figura 13, quando depositada uma gota de água deionizada, ou seja, o material é hidrofóbico, porém após a deposição de uma gota de diiodometano, a mesma foi totalmente absorvida pelo resíduo, impossibilitando a medição de qualquer ângulo. Isso sugere que o resíduo é apolar, e que apresenta menor interação com a água, quando comparada a areia.

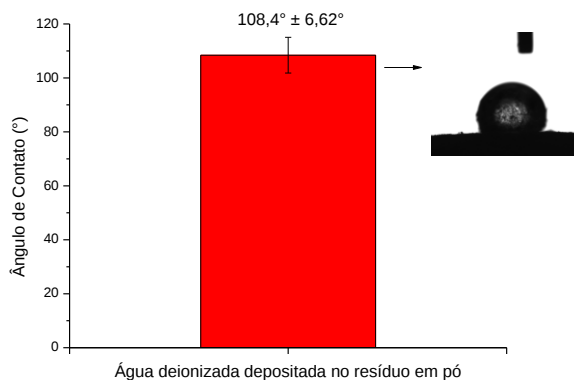


Figura 13 - Ângulo de contato do resíduo em pó.

4.1.1 Área de Superficial Específica – Análise Blaine

A análise Blaine indicou que o resíduo eólico apresentara área superficial específica de $2206 \pm 3,3 \text{ cm}^2/\text{g}$. Já a análise da areia, não apresentou resultado quando medida, indicando que a mesma tem área superficial menor que $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$, que é limite de detecção do

equipamento, ou seja, existe um aumento de área, de no mínimo 47 %, quando comparado o resíduo com a areia. Isso pode influenciar de forma significativa no consumo de água, durante o processo de preparação das pastas de cimento, pois, quanto maior a superfície do particulado, maior é o consumo de água (D'AGOSTINO et al., 2003); tal fato já foi constatado em estudos que utilizaram material particulado fino (GIVI et al., 2010; MATTOS et al., 2002; CARASEK et al., 2016)

4.1.2 Massa Específica

A Tabela 8 apresenta o resultado da análise de massa específica do resíduo em pó, realizado pela técnica do picnometro, onde, foi observado que o resíduo, composto de resina epóxi e manta de fibra de vidro, apresenta elevada densidade, $3,55 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, quando comparado aos demais materiais, que compõe a argamassa fabricada, tendo a areia, massa específica de $2,6 \text{ g/cm}^3$ e o cimento $3,1 \text{ g/cm}^3$ (BATTAGIN et al., 2002).

Tabela 8 - Massa específica do resíduo eólico em pó.

Massa Especifica - Picnometro			
Item	Amostra 1	Amostra 2	Unidade
m_0	32,46	35,12	g
m_l	73,75	76,28	
m_s	33,51	36,17	
m_{sl}	74,33	76,85	
ρ_l (Álcool Etílico)	1,59	1,59	g/cm³
ρ_p	3,57	3,54	
Média	3,55		
Desv.Pad	0,02		

4.1.3 Determinação do teor de fibra (inorgânicos)

A Tabela 9 apresenta os resultados das três análises de teor de inorgânicos realizadas com o resíduo em pó, que indicam uma média de 76,2% de inorgânicos, diretamente

relacionados à fibra de vidro, presente no resíduo. Isto auxilia na confirmação da elevada massa específica, exposta em 4.1.2.

Tabela 9 - Porcentagem de inorgânicos presentes no resíduo eólico em pó após queima.

Amostra	Massa (g)						%		
	Cadinhos	Amostras	Amostra + Cadinho	1º Medição	2º Medição	3º Medição	Teor de Fibra	Média	Desvio padrão
1	38,73	1,01	39,74	39,50	39,50	39,50	76,10%		
2	36,59	1,02	37,61	37,37	37,36	37,36	76,20%	76,20%	0,20%
3	29,57	1,02	30,59	30,35	30,35	30,35	76,40%		

4.1.4 Granulometria

A Tabela 10 mostra os percentuais de massa retida e acumulada em cada peneira, utilizada no ensaio de granulometria do resíduo em pó.

Tabela 10 – Análise granulométrica resíduo em pó.

Abertura (NBR-mm)	Massa Retida na Peneira (g)	Massa Retida na Peneira (%)	Massa Retida Acumulada (%)
Tampa	-	-	-
4,750	2,50	1,72	1,72
2,360	4,64	3,20	4,92
1,180	10,56	7,27	12,19
0,600	61,46	42,32	54,51
0,425	46,20	31,82	86,33
0,300	15,66	10,78	97,11
0,150	3,59	2,47	99,59
0,075	0,58	0,40	99,99
Prato	0,02	0,01	100,00

Tais dados foram plotados em dois gráficos distintos, sendo que a Figura 14, representa a massa do resíduo em pó retido em cada peneira utilizada, onde, conclui-se que o

pó resultante do processo de torneamento tem aproximadamente 85% do tamanho de suas partículas entre 0,3 a 0,6 mm, ou seja, pode-se considerar um pó homogêneo.

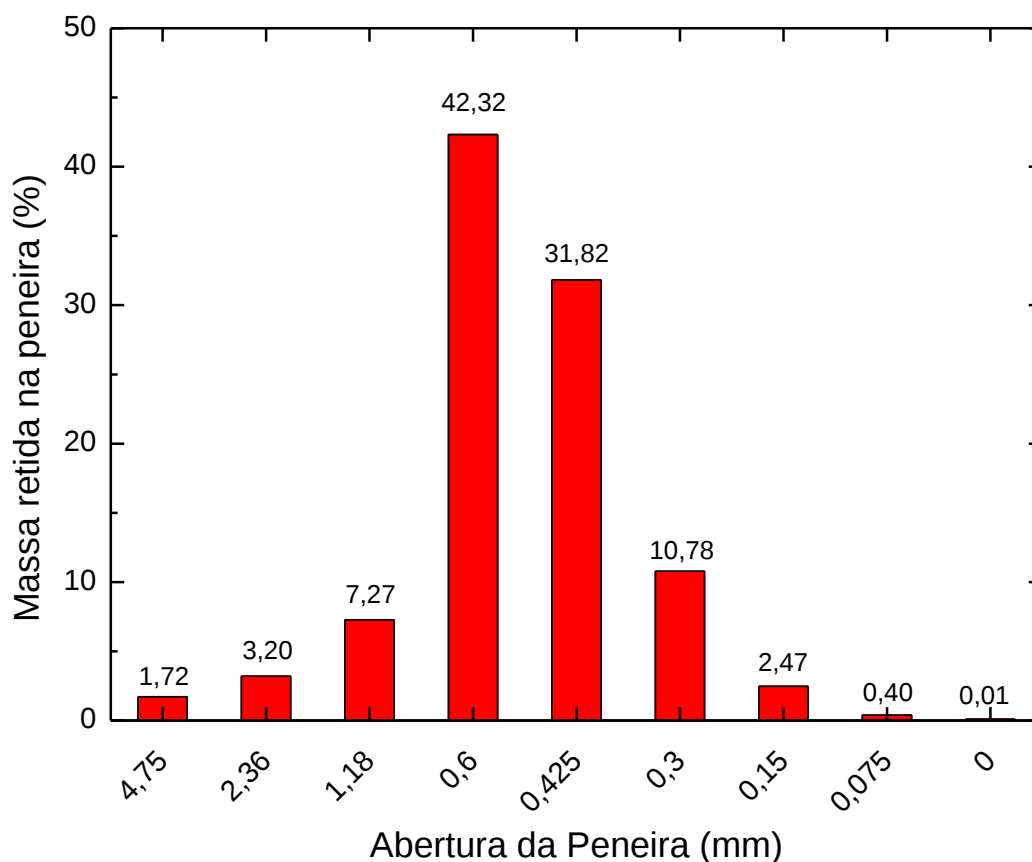


Figura 14 – Análise granulométrica resíduo em pó.

A segunda análise relacionada à granulometria, ilustrada na Figura 15, apresenta a comparação da massa acumulada em cada peneira, para o resíduo em pó e areia utilizada para confecção da argamassa, com a referência normativa, regida pela NBR 7214-2015. Foi observado que o resíduo em pó (desde que torneado com redução de diâmetro de 0,5 a 3 mm, conforme exposto em 3.1.1) e a areia utilizada na preparação das argamassas, estão dentro das zonas de utilização, pois apresentam granulometria média, validando sua aplicação na construção civil, quando analisadas por este quesito. Também excluiu a necessidade de peneiramento do resíduo em pó para utilização na argamassa, pois a granulometria apresentada atende os requisitos normativos.

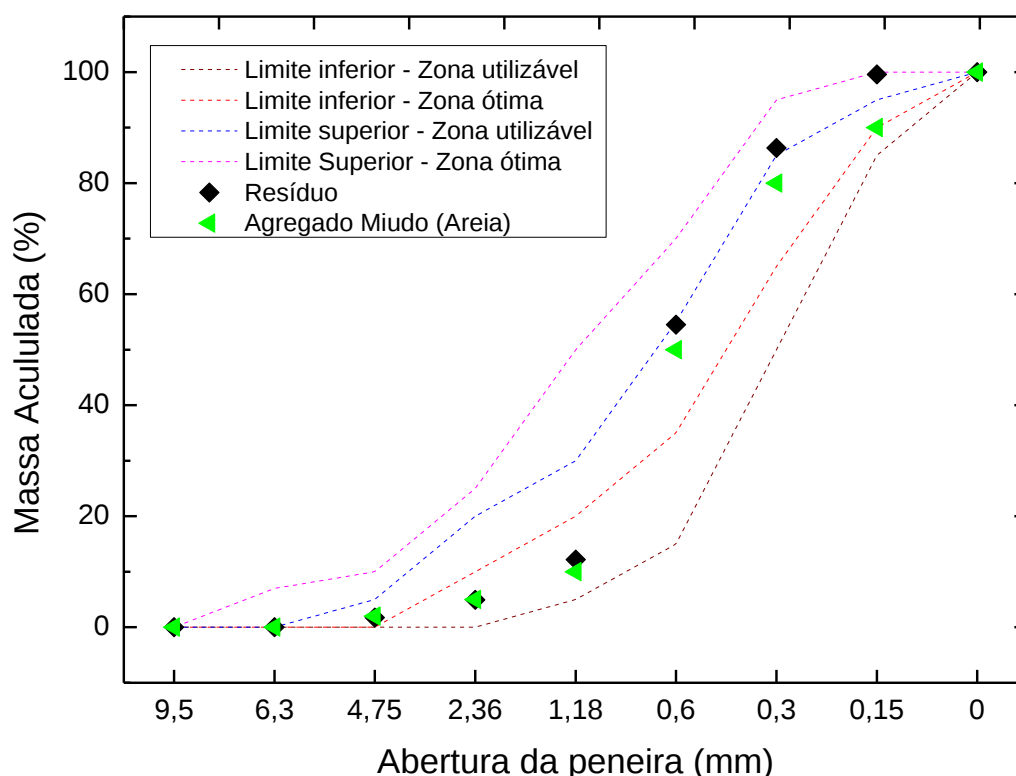


Figura 15 – Análise granulométrica da areia e resíduo em pó comparada com a NBR 7214-2015.

4.1.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do resíduo em pó.

A Figura 16 apresenta os espectros gerados da análise do resíduo em pó, resina epóxi e fibra de vidro, sendo os dois últimos realizados apenas para auxílio na análise do resíduo em pó, utilizado neste estudo.

A presença do polímero termorrígido do grupo epóxi foi constatada pelas bandas de 1885 cm^{-1} (C = O), 1756 cm^{-1} (C = O) e 1247 cm^{-1} (CO aromático), conforme descrito por ROMÃO (2007), além das bandas observadas em 1509 cm^{-1} e 1608 cm^{-1} (C=O Aromático), relacionadas aos agentes de cura da resina epóxi (PIRES et al., 2005), e da banda centrada em $3443\text{-}3114\text{ cm}^{-1}$, que corresponde ao estiramento da ligação O-H, também presente na resina epóxi, as demais bandas de absorção, em 2958 cm^{-1} , 2928 cm^{-1} e 2868 cm^{-1} , que são

característicos do estiramento da ligação C-H alifático, que é de um composto epoxídico (PANZERA et al., 2010). Já a fibra de vidro foi atestada pela banda de Si-O em torno de 556 cm^{-1} e o Quartzo entre 784-690 cm^{-1} (CARNIN, 2008). Logo as informações fornecidas pela empresa geradora dos resíduos foram confirmadas parcialmente.

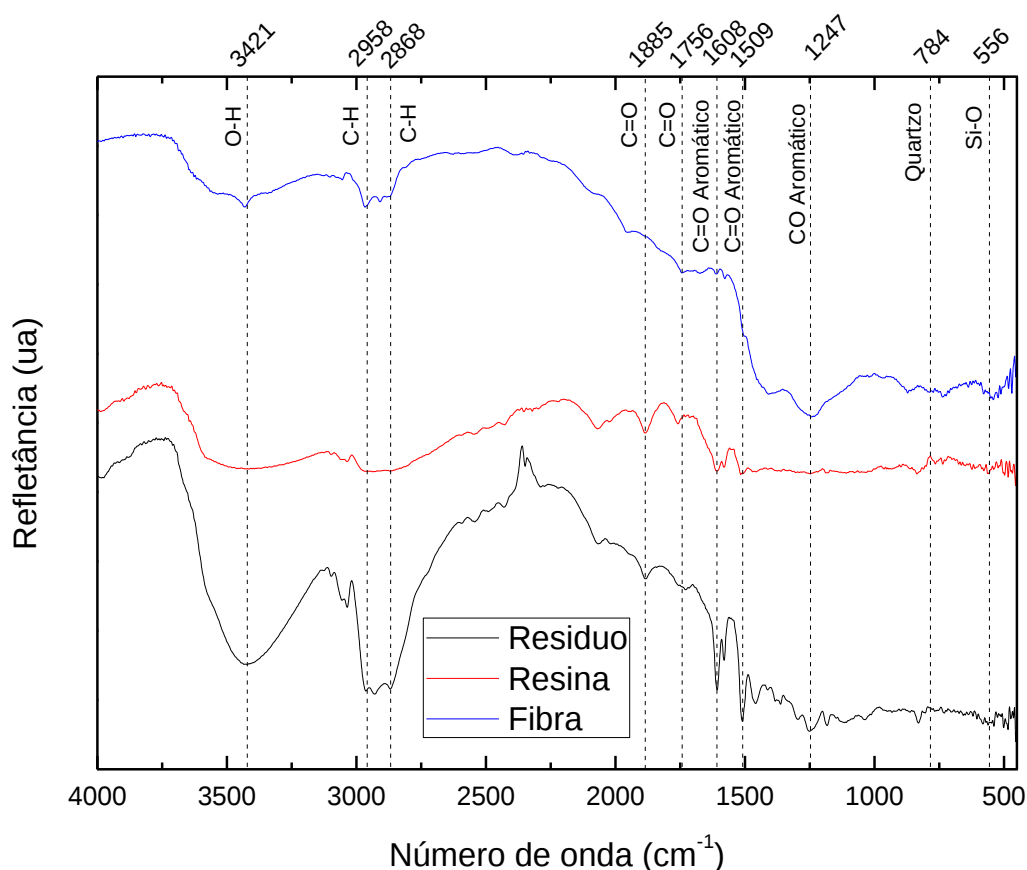


Figura 16 – Espectro de infravermelho do resíduo em pó, resina epóxi e fibra de vidro.

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão em Energia (EDS)

A Figura 17 mostra a micrografia (a) e análise elementar da fibra utilizada na fabricação das pás eólicas (b), sendo assim confirmada que a fibra é do tipo S-glass, conforme descrito por MAY (1988), pois foi constatada a presença de alumínio, silício, magnésio e cálcio.

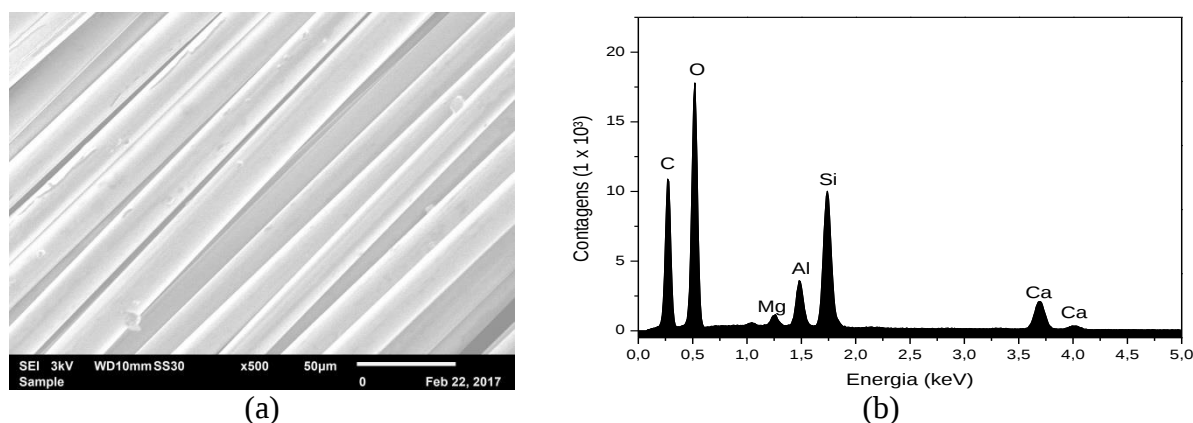


Figura 17 – (a) Micrografia da fibra de vidro; (b) EDS da fibra de vidro.

A Figura 18, apresenta os resultados nas análises de MEV e EDS da resina epóxi, e conforme esperado, devido às análises realizadas na seção 4.1.5, a espectroscopia de Raios X (EDS) acusou somente a presença de carbono e oxigênio (devido a limitações de detecção do equipamento, o hidrogênio não foi detectado), itens característicos na composição da resina epóxi.

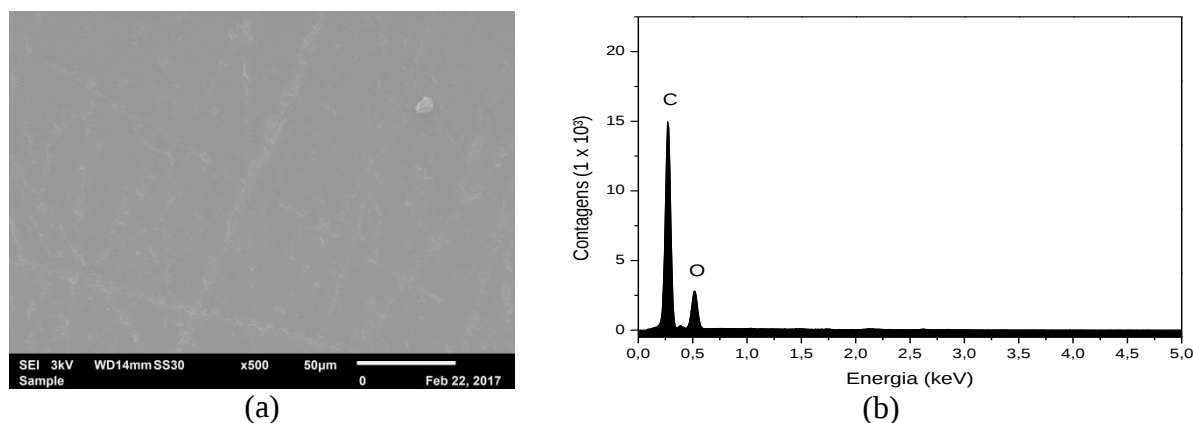


Figura 18 – (a) Micrografia da resina epóxi; (b) EDS da resina epóxi.

Na análise morfológica e elementar do resíduo em pó, apresentado na Figura 19, foi possível constatar que no processo de torneamento utilizado para transformar o resíduo sólido em pó, houve redução expressiva de tamanho dos compostos poliméricos presentes no resíduo, formando partículas irregulares, que pode influenciar na absorção de água durante confecção das argamassas, devido ao aumento da área específica do particulado

(D'AGOSTINO et al., 2003), que foi observado na análise Blaine. Já a fibra de vidro apresentou um tamanho de aproximadamente 0,15 mm, corroborando para validação do ensaio granulométrico. Também foi confirmada a presença dos elementos químicos da resina e da fibra de vidro anteriormente discutidos.

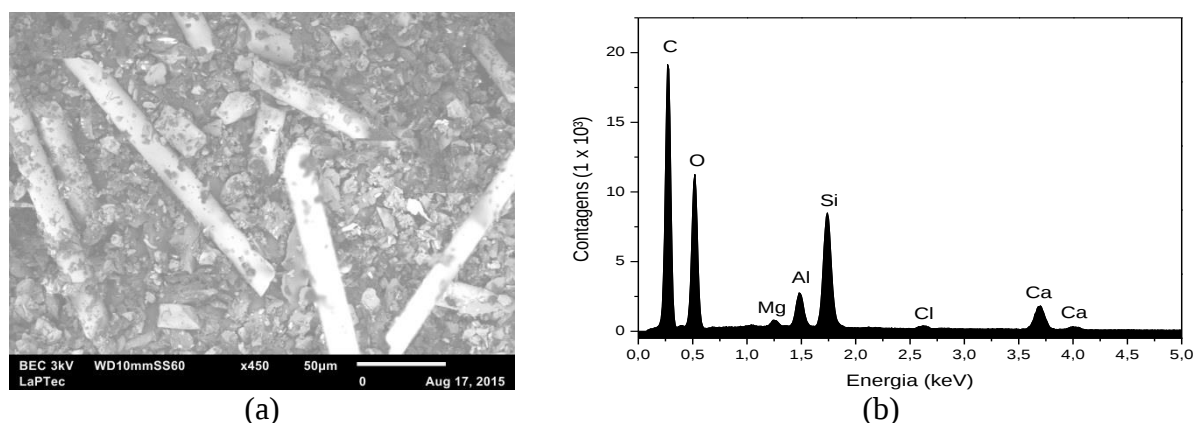


Figura 19 – (a) Micrografia do Resíduo em pó (fibra de vidro com resina epóxi); (b) EDS do resíduo em pó.

A técnica de EDS também foi empregada para análise da proporção mássica de cada elemento presente no resíduo. A Tabela 11 expõe os resultados, que corroboram com a análise de presença de inorgânicos, para comprovar que o resíduo é formado em sua maioria por fibra de vidro, pois a grande parte de sua composição mássica é proveniente de elementos presentes na fibra, conforme evidenciado na análise por MEV e EDS (Figura 17).

Tabela 11 – Porcentagem de massa elementar do resíduo eólico em pó.

Elemento	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Ca
Massa (%)	35,91	35,6	1,26	4,11	16,3	0	6,82

A Figura 20 mostra a análise morfológica e elementar realizada na areia, utilizada para preparação da argamassa. A análise elementar apresentou o resultado esperado, ou seja, silício, carbono, alumínio e outros elementos em menor proporção (potássio e cálcio, provavelmente oriundos de contaminação), além da presença do oxigênio, devido à formação dos óxidos (PANZERA et al., 2010). Na morfologia (Figura 20 (a)) da areia, também se

percebe que os grãos apresentam estruturas irregulares, porem com dimensão maior que a do resíduo eólico em pó, que comprava a menor área superficial, constatada pela técnica Blaine.

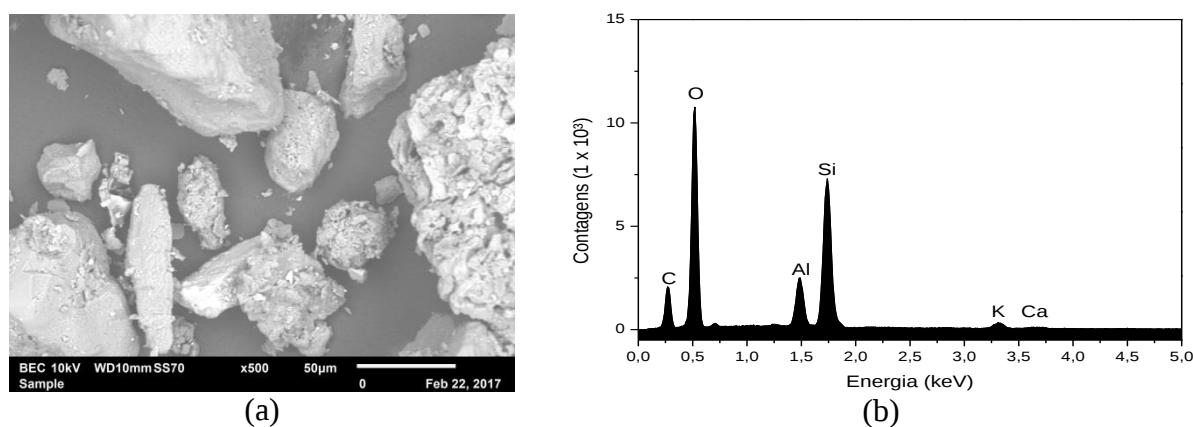


Figura 20 – (a) Micrografia da areia utilizada na argamassa; (b) EDS da areia utilizada na confecção da argamassa.

A Figura 21 ilustra as análises de MEV e EDS do cimento utilizado na confecção das argamassas, onde foi observado que se trata de um pó fino (dimensões das partículas estimadas em 15 µm) e composição elementar esperada; carbono, magnésio, alumínio, silício, enxofre, potássio e cálcio, além do oxigênio em maiores proporções, devido à formação de óxidos. Elementos esperados para o cimento CP II-F32 (PANZERA et al., 2010).

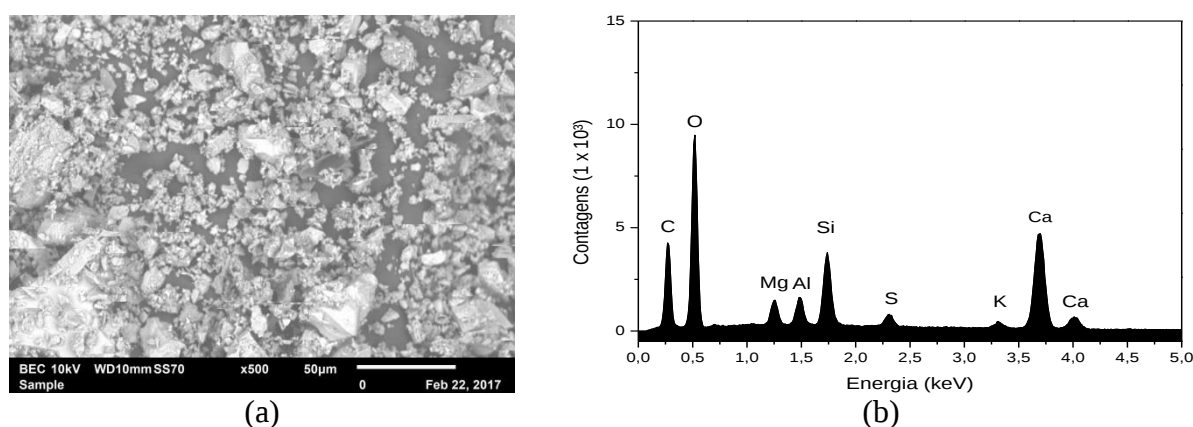


Figura 21 – (a) Micrografia do cimento utilizado na argamassa; (b) EDS do cimento utilizado na confecção da argamassa.

4.1.2 Difração de raios X (DRX)

A análise de cristalinidade do cimento, areia e resíduo são apresentados nas Figura 22, Figura 23 e Figura 24 respectivamente.

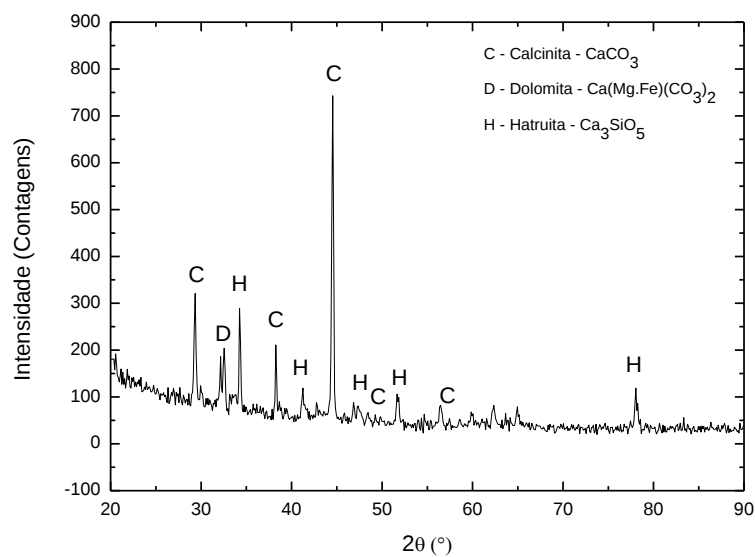


Figura 22 –Difratograma do cimento Portland CII-F32.

O difratograma do cimento apresentou calcita, dolomita e hatrúita ou alita (GOIS, 2012), comprovando as características previstas pela norma NBR 11578 - 1996, que devem conter silicatos de cálcio e materiais carbonáticos.

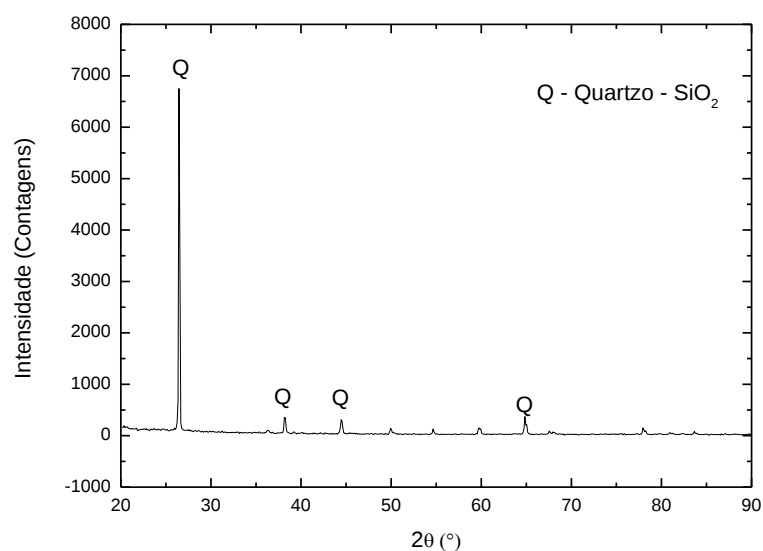


Figura 23 –Difratograma do agregado miúdo (Areia).

No difratograma da areia somente se constatou a presença de quartzo, o que se justifica, devido a este material ser areia comum, composta por sílica cristalina.

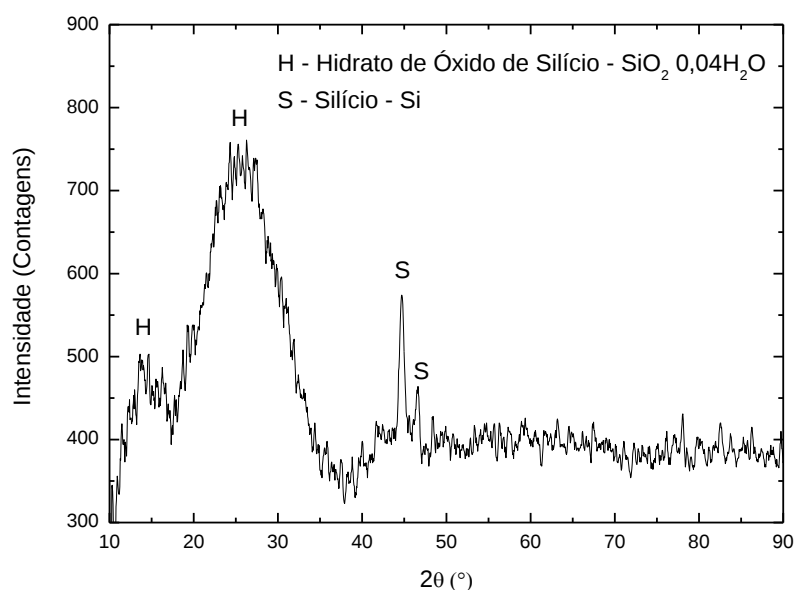


Figura 24 –Difratograma do resíduo em pó.

No difratograma do resíduo em pó (Figura 24), foi observado hidratos de óxidos de silício e sílica, que apresentam estrutura parcialmente cristalina, ou seja, componentes da fibra de vidro, presentes na composição do resíduo em pó. As bandas alargadas são causadas pela presença do polímero termifixo e da fibra de vidro, ambas amorfas.

4.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.2.1 Caracterização da Argamassa no Estado Fresco

Conforme mostra a Figura 25, o consumo de água aumenta proporcionalmente ao acréscimo de substituição da areia, quase dobrando com 22,5%. Isto pode ser explicado pelo fato do resíduo em pó apresenta menor interação com a água, quando comparado a areia (seção 4.1.1), que conseqüentemente gera um maior consumo na preparação argamassa, seguido da dificuldade de hidratação do cimento e cura dos corpos cimentícios. Outro indicador relacionado é a maior área superficial específica do resíduo, comparada com a areia, constada na análise Blaine e nas micrografias do resíduo, que também corrobora para que o consumo de água seja elevado (D'AGOSTINO et al., 2003).

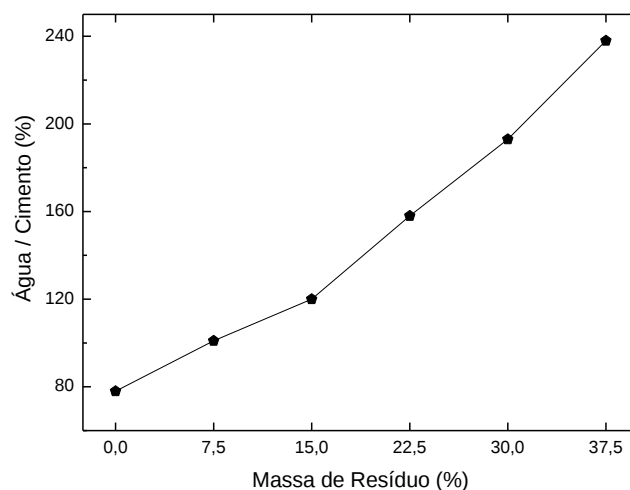


Figura 25 – Relação água/cimento para cada tipo de substituição da pelo resíduo em pó.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.3.1 Determinação da densidade da massa aparente no estado endurecido (NBR 13280)

A Figura 26 mostra o resultado da análise de densidade aparente no estado endurecido dos os corpos de prova aos 7, 14 e 28 dias de cura. Foi observada a redução média da densidade aparente de 5% , quando comparado os corpos com 7 e 28 dias, indicando a hidratação do cimento, conforme descrito por NEVILLE (2013), para todas as substituições (0 a 37,5%).

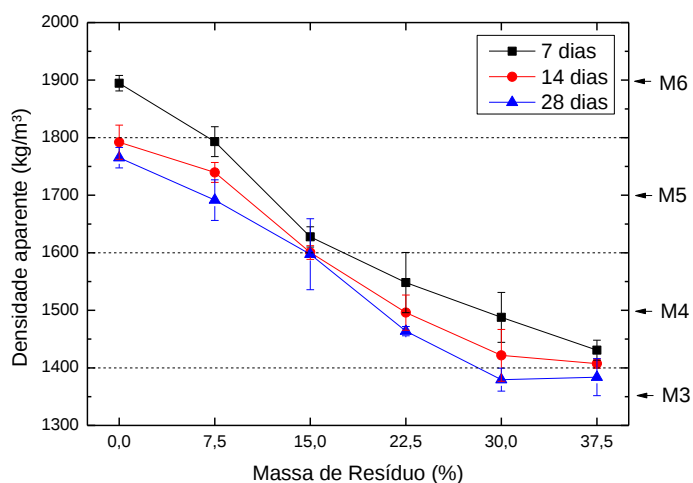


Figura 26 – Resultado da análise da argamassa no estado endurecido

Também foi constatado que os corpos com 0%, 7,5% e 15% de substituição estão dentro da mesma categoria (M5), pois apresentaram densidade aparente na faixa de 1600 a 1800 kg/m³, já a amostra com 22,5% de substituição foi classificada na categoria M4 (1400 a 1600 kg/m³) e os corpos com substituição de 30% e 37,5% foram classificados como M3 (1300 a 1400 kg/m³). Logo, se pode afirmar, que quanto mais resíduo foi adicionado à mistura da argamassa, menor é a densidade aparente, isto está diretamente relacionado ao aumento do consumo de água na preparação das argamassas, exposto na Figura 25, ou seja, é um indicativo do acréscimo de poros internos nas amostras de maior substituição.

A Tabela 12 apresenta os resultados das análises de densidade aparente no estado endurecido, aos 28 dias de cura, sendo estes os mesmos plotados na Figura 26.

Tabela 12 – Densidade aparente no estado endurecido aos 28 dias

Massa de resíduo (%)	0	7,50	15,00	22,50	30,00	37,50
Densidade aparente no estado endurecido (kg/m ³)	1777,60	1685,81	1539,51	1463,20	1381,29	1335,69
	1779,55	1644,19	1690,42	1452,49	1349,53	1415,72
	1738,50	1744,56	1562,50	1475,93	1407,66	1400,13
Somatória	5295,65	5074,57	4792,44	4391,63	4138,47	4151,55
Média	1765,22	1691,52	1597,48	1463,88	1379,49	1383,85
Desvio	17,81	35,36	61,96	8,04	19,98	32,11
Variância	536,16	2543,19	6611,11	137,70	847,19	1800,25

A análise de variância dos testes de densidade aparente no estado endurecido, apresentada na Tabela 13, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que têm diferença representativa nas amostras analisadas.

Tabela 13 – Análise de Variância (ANOVA) – Densidade aparente no estado endurecido

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico
Entre grupos	397920,89	5	79584,18	38,28	3,11
Dentro dos grupos	24951,19	12	2079,27		
Total	422872,08	17			

A Tabela 14 apresenta os resultados do teste de Tukey, para densidade aparente no estado endurecido, indicando que para substituições acima de 7,5% existe representatividade na redução de densidade, analisada na Figura 26, ou seja, existe redução de massa por volume de forma expressiva estatisticamente. Sendo assim, validando a obtenção de uma massa mais leve, que os corpos isentos de resíduo, para substituições de 15 a 37,5%. Também foi observado, que estatisticamente, substituições de 22,5 a 37,5 podem ser consideradas iguais, pois não apresentam diferença representativa válida em suas médias.

Tabela 14 – Teste de Tukey – Densidade aparente no estado endurecido – 28 dias de cura

Comparação		$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	dms	Conclusão
0,0	7,5	73,7	125,1	NÃO REPRESENTATIVO
0,0	15,0	167,7		REPRESENTATIVO
0,0	22,5	301,3		REPRESENTATIVO
0,0	30,0	385,7		REPRESENTATIVO
0,0	37,5	381,4		REPRESENTATIVO
7,5	15,0	94,0		NÃO REPRESENTATIVO
7,5	22,5	227,6		REPRESENTATIVO
7,5	30,0	312,0		REPRESENTATIVO
7,5	37,5	307,7		REPRESENTATIVO
15,0	22,5	133,6		REPRESENTATIVO
15,0	30,0	218,0		REPRESENTATIVO
15,0	37,5	213,6		REPRESENTATIVO
22,5	30,0	84,4		NÃO REPRESENTATIVO
22,5	37,5	80,0		NÃO REPRESENTATIVO
30,0	37,5	4,4		NÃO REPRESENTATIVO

4.3.2 Ensaio de Tração na Flexão (NBR 13279-2005)

Os resultados da análise de tração na flexão são apresentados na Figura 27, contendo a resistência média e desvio padrão para corpos de prova com todas as proporções de substituição, nas datas de cura de 7, 14 e 28 dias.

Todos os corpos de prova apresentaram aumento da resistência à tração na flexão, conforme ocorreu o envelhecimento, isto está diretamente ligado à hidratação do cimento (NEVILLE, 2013). As classificações indicam que neste quesito, todas as argamassas, aos 28

dias de cura, apresentaram resultados de máxima resistência (acima de 4,5 MPa), com exceção para substituições de 37,5%, que foi classificada como R5 (faixa de 3,5 até 4,5 MPa).

A redução de resistência pode ser explicada pela presença do resíduo polimérico, que apresenta baixa interação com a matriz cimentícia (MODRO et al., 2009), porem, a resistência apresentada, acima de 4,5 MPa, pode explicada pela ligação que a fibra de vidro realiza ao longo de toda a mistura com os demais compostos da argamassa, dando assim flexibilidade ao corpo de prova (PACHECO et al., 2016; BAGHERZADEH et al., 2012; WEI e MEYER, 2014).

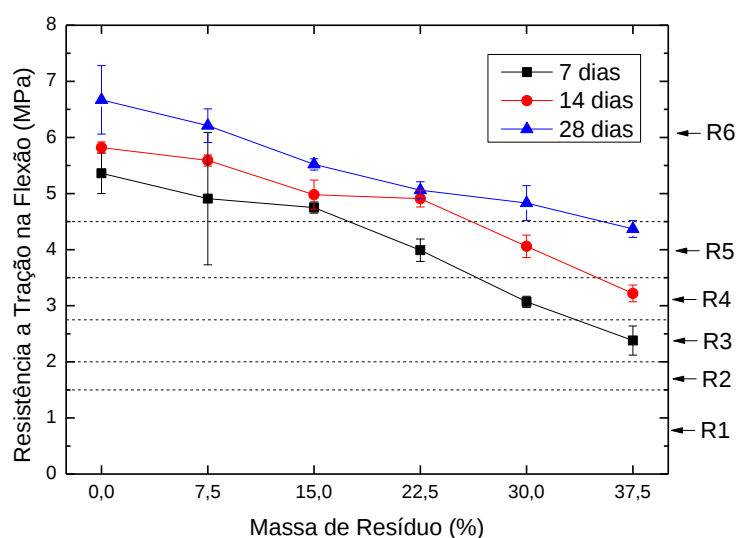


Figura 27 – Resistência à tração na flexão

A Tabela 15 apresenta os resultados das análises de resistência à tração na flexão, aos 28 dias de cura, sendo estes os mesmos apresentados na Figura 27.

Tabela 15 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura

Massa de resíduo (%)	0	7,50	15,00	22,50	30,00	37,50
Resistência a tração na flexão (MPa)	7,36	6,67	5,52	4,94	4,37	4,37
	6,90	6,21	5,52	4,94	4,83	4,14
	5,75	5,75	5,52	5,29	5,29	4,60
Somatória	20,00	18,62	16,55	15,17	14,49	13,11
Média	6,67	6,21	5,52	5,06	4,83	4,37
Desvio	0,61	0,31	0,00	0,15	0,31	0,15
Variância	0,69	0,21	0,00	0,04	0,21	0,05

A análise de variância dos testes de tração na flexão, apresentada na Tabela 16, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que têm diferença representativa nas amostras analisadas, resultado esperado, devido à redução de resistência.

Tabela 16 – Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à tração na flexão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico
Entre grupos	11,31	5	2,26	11,29	3,11
Dentro dos grupos	2,41	12	0,20		
Total	13,72	17			

A Tabela 17 mostra os resultados do teste de Tukey, para a resistência a tração na compressão, para os corpos de prova aos 28 dias de cura, onde foi observado que substituições de até 15%, não são representativas, ou seja, apresentam resultados similares aos corpos isentos de resíduos, validando a aplicação por este quesito. Para substituições acima de 15% existe significância nos resultados, indicando que a presença do resíduo acima de 22,5% reduz a resistência das argamassas, quando comparados aos corpos sem resíduo.

Tabela 17 – Teste de Tukey – Resistência à tração na flexão – 28 dias de cura

Comparação		$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	dms	Conclusão
0,0	7,5	0,5	1,22	NÃO REPRESENTATIVO
0,0	15,0	1,1		NÃO REPRESENTATIVO
0,0	22,5	1,6		REPRESENTATIVO
0,0	30,0	1,8		REPRESENTATIVO
0,0	37,5	2,3		REPRESENTATIVO
7,5	15,0	0,7		NÃO REPRESENTATIVO
7,5	22,5	1,1		NÃO REPRESENTATIVO
7,5	30,0	1,4		REPRESENTATIVO
7,5	37,5	1,8		REPRESENTATIVO
15,0	22,5	0,5		NÃO REPRESENTATIVO
15,0	30,0	0,7		NÃO REPRESENTATIVO
15,0	37,5	1,1		NÃO REPRESENTATIVO
22,5	30,0	0,2		NÃO REPRESENTATIVO
22,5	37,5	0,7		NÃO REPRESENTATIVO
30,0	37,5	0,5		NÃO REPRESENTATIVO

4.3.3 Ensaio de Compressão (NBR 13279-2005)

Os resultados dos testes de resistência à compressão são apresentados na Figura 28, expondo a resistência média e desvio padrão para corpos de prova com todas as proporções de substituição, nas datas de cura de 7, 14 e 28 dias.

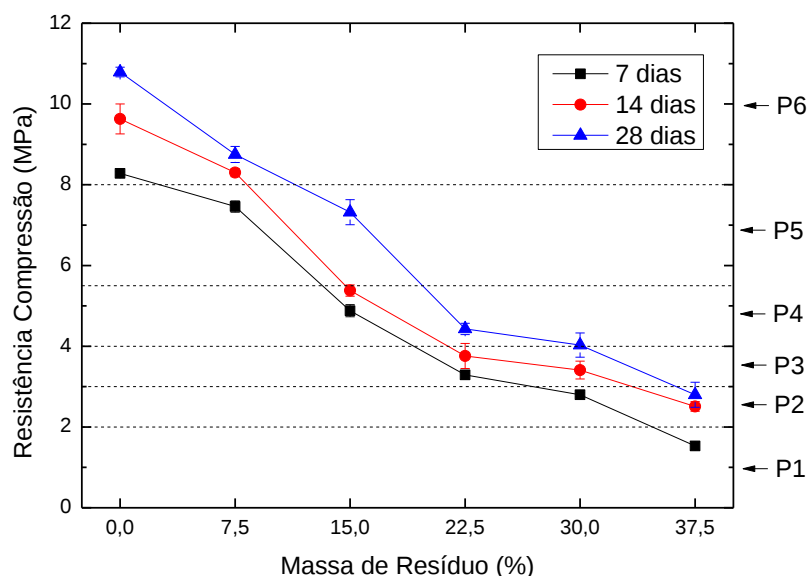


Figura 28 – Resistência à compressão dos corpos de prova.

A resistência à compressão aumentou gradualmente para cada data analisada no envelhecimento, indicando a hidratação do cimento para todas as substituições (NEVILLE, 2013). Também foi constatado, que com o aumento da proporção de resíduo em pó presente na argamassa, ocorreu a redução na resistência à compressão. Os corpos com 28 dias de cura que têm 0% e 7,5% de resíduo são classificados como P6, ou seja, acima de 8 MPa, sendo aceitos para todas as aplicações da argamassa no setor de construção civil, ou seja, finalidades estruturais e estéticas. O corpo com 15% apresentou classe de resistência P5, tendo aproximadamente 7,5 MPa de resistência à compressão, porém ainda pode ser aplicado para fins estruturais. As demais substituições, 22,5%, 30% e 37,5% foram classificadas como P4, P4 e P2 respectivamente, sendo possível a aplicação para fins não estruturais, pois estão

próximos do mínimo aceitável pela normativa (NBR 13281-2005). A redução de resistência para os corpos com substituição é devida ao aumento do consumo de água no processo de confecção das argamassas, relacionado à presença do resíduo, que apresenta pouca afinidade com a água e área superficial elevada, quando comparada a areia substituída, que consequentemente indica que o índice de vazios foi aumentado (D'AGOSTINO et al., 2003), gerando a perda de resistência (CARASEK et al., 2016).

A Tabela 18 apresenta os resultados das análises de resistência à compressão, aos 28 dias de cura, sendo estes os mesmos apresentados na Figura 28.

Tabela 18 – Resistência à compressão aos 28 dias de cura

Massa de resíduo (%)	0	7,50	15,00	22,50	30,00	37,50
Resistência a Compressão (MPa)	10,67	8,46	7,23	4,48	4,48	2,82
	10,73	8,89	7,79	4,23	3,86	3,25
	10,97	8,89	6,93	4,60	3,74	2,33
Somatória	32,37	26,24	21,95	13,30	12,08	8,40
Média	10,79	8,75	7,32	4,43	4,03	2,80
Desvio	0,12	0,19	0,31	0,14	0,30	0,31
Variância	0,03	0,06	0,19	0,04	0,16	0,21

A análise de variância dos testes de resistência à compressão, apresentada na Tabela 19, mostra que o valor de F é superior ao $F_{\text{crítico}}$, indicando que existe ao menos um valor que têm diferença representativa nas amostras analisadas, resultado esperado, devido à redução de resistência.

Tabela 19 – Análise de Variância (ANOVA) – Resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	F crítico
Entre grupos	144,22	5	28,84	254,82	3,11
Dentro dos grupos	1,36	12	0,11		
Total	145,58	17			

A Tabela 20 mostra os resultados do teste de Tukey para a resistência a compressão, para os corpos de prova aos 28 dias de cura, onde foi observado, para todas as substituições,

quando comparadas aos corpos isento de resíduo, que existe representatividade na redução de resistência a compressão, ou seja, estatisticamente, o resíduo influencia na redução de resistência. Entretanto, conforme ilustrado na Figura 28, corpos de até 15% se apresentam próximos da referência máxima da normativa (MPa), validando a aplicação.

Tabela 20 – Teste de Tukey – Resistência à compressão – 28 dias de cura

Comparação		$ \bar{X}_a - \bar{X}_b $	dms	Conclusão
0,0	7,5	2,0	0,93	REPRESENTATIVO
0,0	15,0	3,5		REPRESENTATIVO
0,0	22,5	6,4		REPRESENTATIVO
0,0	30,0	6,8		REPRESENTATIVO
0,0	37,5	8,0		REPRESENTATIVO
7,5	15,0	1,4		REPRESENTATIVO
7,5	22,5	4,3		REPRESENTATIVO
7,5	30,0	4,7		REPRESENTATIVO
7,5	37,5	5,9		REPRESENTATIVO
15,0	22,5	2,9		REPRESENTATIVO
15,0	30,0	3,3		REPRESENTATIVO
15,0	37,5	4,5		REPRESENTATIVO
22,5	30,0	0,4		NÃO REPRESENTATIVO
22,5	37,5	1,6		REPRESENTATIVO
30,0	37,5	1,2		REPRESENTATIVO

A Figura 29 ilustra a fratura por compressão dos corpos com cura de 28 dias para todas as proporções de substituição. Baseado nisto, concluiu-se, que com o aumento da proporção de resíduos, os corpos de prova são menos quebradiços, ou seja, a compressão não fragmenta o corpo, ocorrido nos corpos com 0% e 7,5% de substituição, mas sim gera uma fratura na forma de amassamento, similar a deformação plástica em um corpo metálico, visualizado nos corpos com substituições de 15 a 37,5%. Tal fato pode ser explicado devido à presença da fibra, que atua como agente conector das regiões fraturadas, que também foi observado por BAGHERZADEH et al. (2012) e WEI e MEYER (2014). Isso corroborou para manter resistência à tração na flexão na faixa de máxima resistência, descrita na seção 4.3.2.

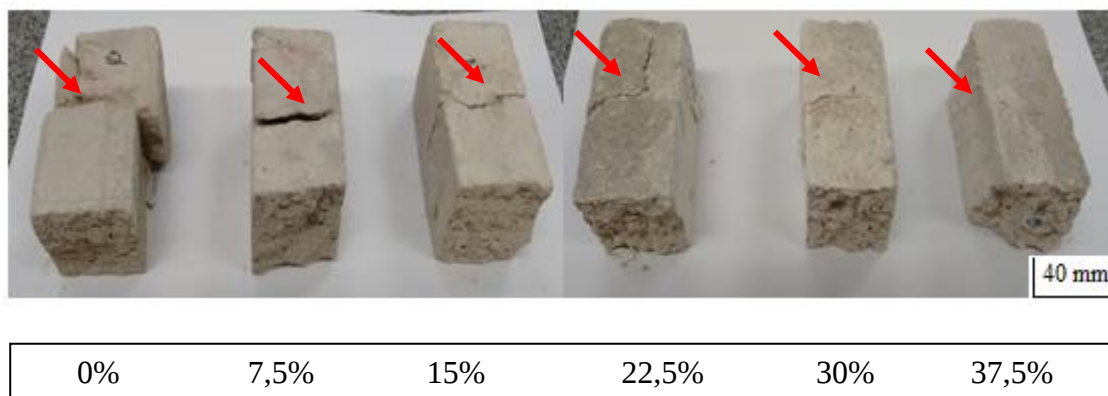


Figura 29 – Característica visual dos corpos de prova com cada porcentagem por massa de substituição após ensaio de compressão.

4.3.4 Ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778 – 2005)

A Figura 30 e Figura 31 ilustram, respectivamente, o índice de vazios e o índice de absorção de água, dos corpos de prova restantes do ensaio de tração na flexão nas idades de 7, 14 e 28 dias, nas substituições da areia pelo resíduo de 0% a 37,5%. Nota-se que o índice de vazios cresce linearmente, com o aumento da quantidade de resíduo presente na argamassa, isso pode ser explicado pelo fato do resíduo apresentar pouca afinidade com a água (seção 4.1.1), e devido ao aumento de área superficial, comparando resíduo com a areia, que dificultou a incorporação da água durante a mistura, gerando um consumo excessivo (Figura 25), que corroborou para a formação de bolhas internas, ocasionando a elevação do índice de vazios nos corpos com resíduo. A amostra isenta de resíduos (0%) apresentou aproximadamente 25% de vazios internos, que cresceu linearmente para 27%, 35%, 37%, 42% e 47% de vazios, para as substituições de areia nas porcentagens de 7,5%, 15%, 22,5%, 30% e 37,5% respectivamente.

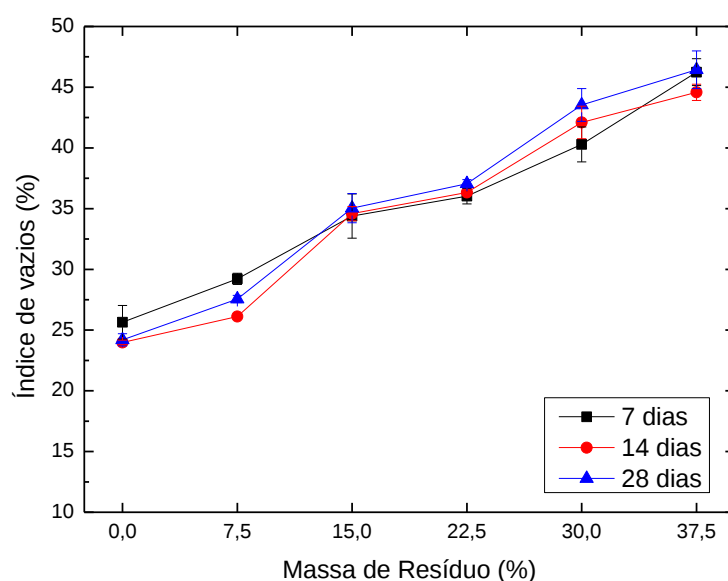


Figura 30 – Índice de vazios nos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos.

Analogamente, também ocorreu aumento no índice de absorção de água, apresentado na Figura 31, com o aumento do resíduo utilizado, validando, desta forma a análise de índice de vazios.

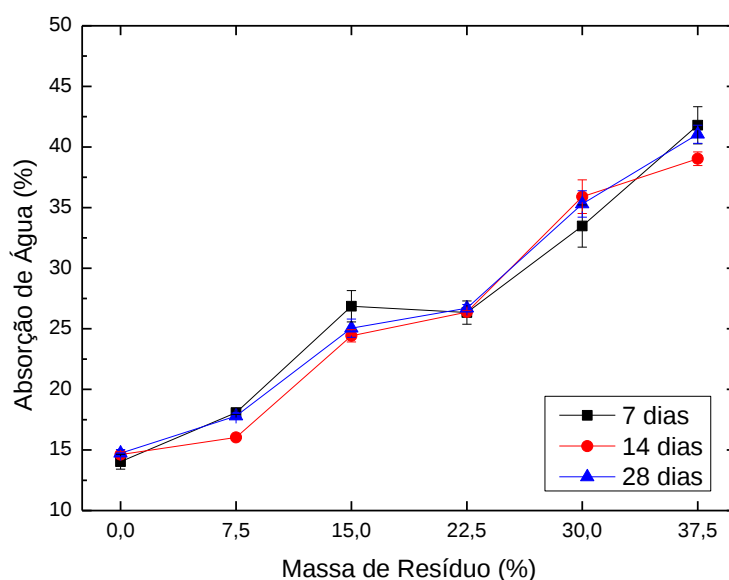


Figura 31 – Absorção de água dos corpos de prova em relação à porcentagem de resíduos.

A Figura 32 expõe a massa específica dos corpos de prova saturados (a) e secos em estufa (b) nas datas de cura de 7, 14 e 28 dias em relação a todas as porcentagens de

substituição abordadas neste trabalho. Após análise, concluiu-se que a argamassa isenta de resíduos apresenta maior densidade seca e saturada, e que conforme a proporção de resíduo aumenta, a densidade sofre redução, sendo que a massa específica seca dos CP's com 0% apresenta 1,83 g/cm³, decaindo linearmente até 1,11 g/cm³ para os corpos com 37,5% de resíduo; o mesmo fato pode ser constatado na massa específica saturada, que tem 2,1 g/cm³ com 0% e decai até 1,55 g/cm³ para os CP's com 37,5%. Isso pode ser explicado pelo índice de vazios (Figura 31), que cresceu com o aumento da proporção de resíduo presente na argamassa, ocasionando uma redução de massa dos corpos abordado na seção 4.3.1.

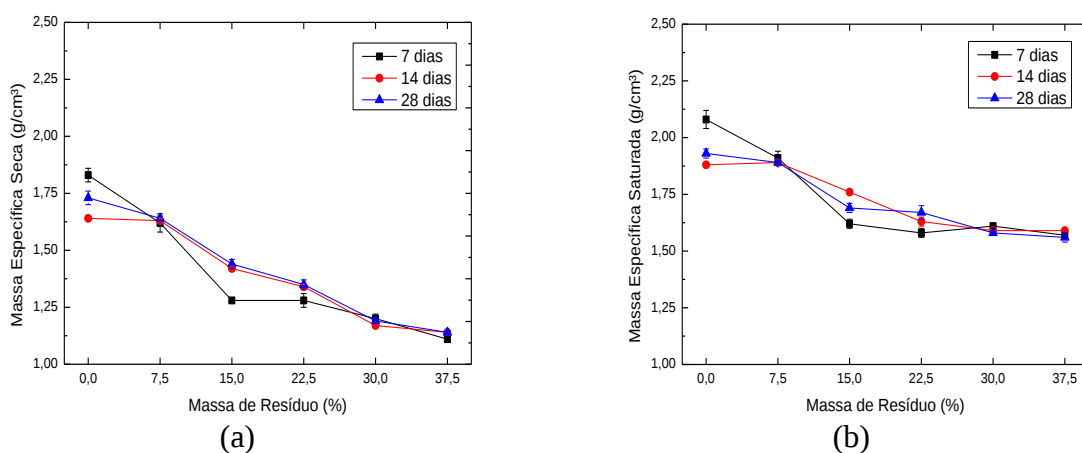


Figura 32 – (a) Massa Específica do corpo de prova seco em estufa; (b) Massa Específica do corpo de prova saturado em água.

4.3.5 FTIR dos corpos de prova

A Figura 33 expõe os espectros provenientes das análises realizadas no FTIR dos corpos de prova com todas as porcentagens de substituição aos 28 dias de cura. Analisando os espectros, fica evidente a similaridade, fato já esperado, pois são compostos dos mesmos materiais (Areia, cimento, água e resíduo eólico). Em 525 cm⁻¹ foi constatada a presença da ligação Si-O (CARNIN, 2008), próximo à região de 3700 cm⁻¹ constata-se a presença de hidróxido de cálcio (portlandita), que pode comprovar a hidratação do cimento na presença da resina, conforme descrito por PANZERA et al. (2010). Também foi possível observar as

bandas próximas a 1158 cm^{-1} , relacionadas a vibrações de Si-O e vibrações de Al-O, que estão definidas nas matérias-primas utilizadas como precursores da matriz de cimento, evidenciadas na Figura 20(b) e Figura 21(b) e por VARGAS et al. (2015). As bandas 2514 cm^{-1} são decorrentes da ligação O-H (KAUPPINEN et al., 1992), 1427 cm^{-1} é relacionada ao ânion carbonato (SILVERSTEIN e WEBSTER, 2006), e as demais bandas de absorção, em 2868 cm^{-1} e 2958 cm^{-1} são características do estiramento da ligação C-H alifático, que é de um composto epoxídico (PANZERA et al., 2010).

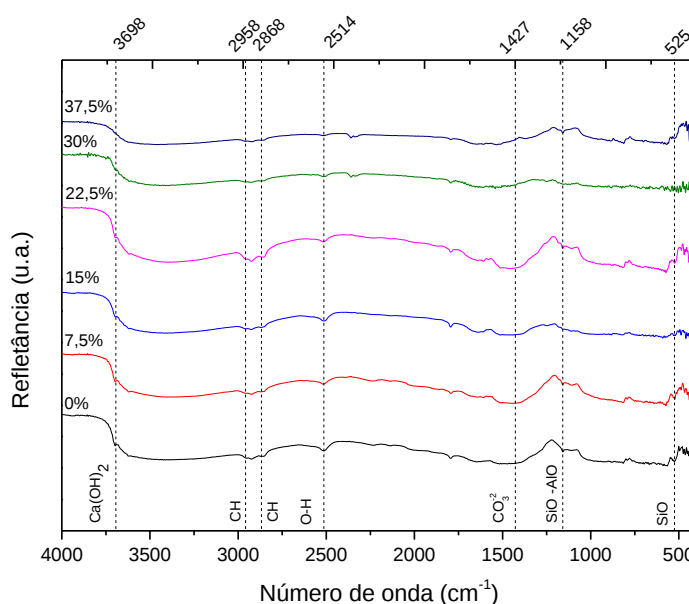


Figura 33 – Espectros de infravermelho dos corpos cimentícios com as substituições de 0% a 37,5% da areia pelo resíduo em pó.

4.3.6 Microscopia Ótica dos corpos de prova de argamassa

Conforme observado nas imagens das morfologias das Figura 34, substituições de 0 a 15%, existe redução gradual da dimensão dos poros e aumento da quantidade, quando se adiciona resíduo a mistura cimentícia. Isso fica evidente quando comparamos os corpos isentos de resíduo – 0% (a) aos corpos com 15% (c) de substituição, onde a área analisada na amostra com 0% apresenta pouco poros, porem com dimensões de $400\text{ }\mu\text{m}$; já as amostras

com 15% de resíduo, apresentaram redução de diâmetro dos poros, tendo aproximadamente 200 μm e maior incidência.

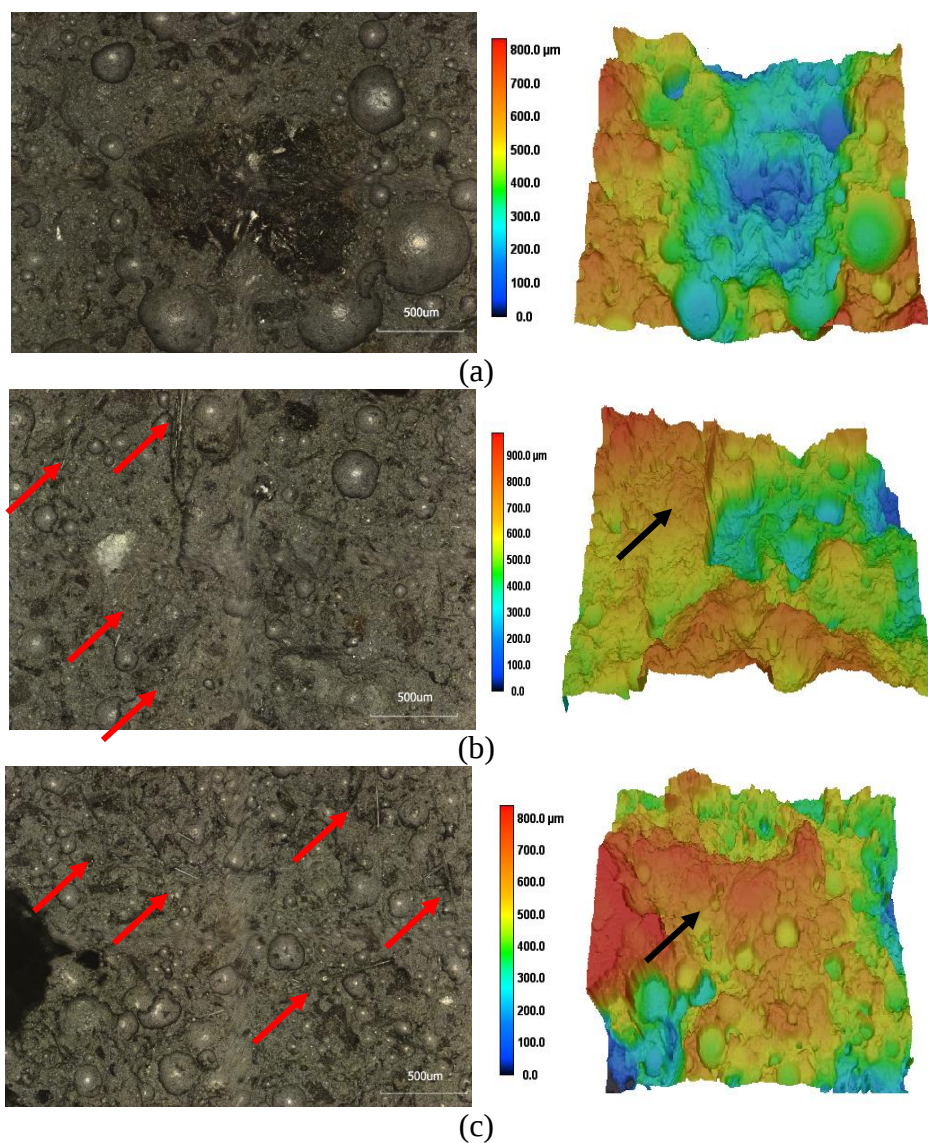


Figura 34 – Micrografia ótica da morfologia (esquerda) e topografia (direita) dos corpos de prova com as substituições de: (a) 0%, (b) 7,5%, (c) 15%.

Nas amostras com maior substituição, 22,5 a 37,5%, ilustradas na Figura 35, também se constata a redução da quantidade de poros visíveis para esta magnitude; ou seja, são poucos os macros poros visíveis na área de fratura, indicando que o resíduo corrobora para uma mistura mais homogênea e isenta de macro poros, porém conforme investigado no ensaio de índice de vazios (Figura 30), a amostra com 37,5% foi a que apresentou maior índice de

vazios, ou seja, tem maior incidência de porosidade interna, isso supõe que a presença do resíduo promove a formação de micro poros na matriz de cimento.

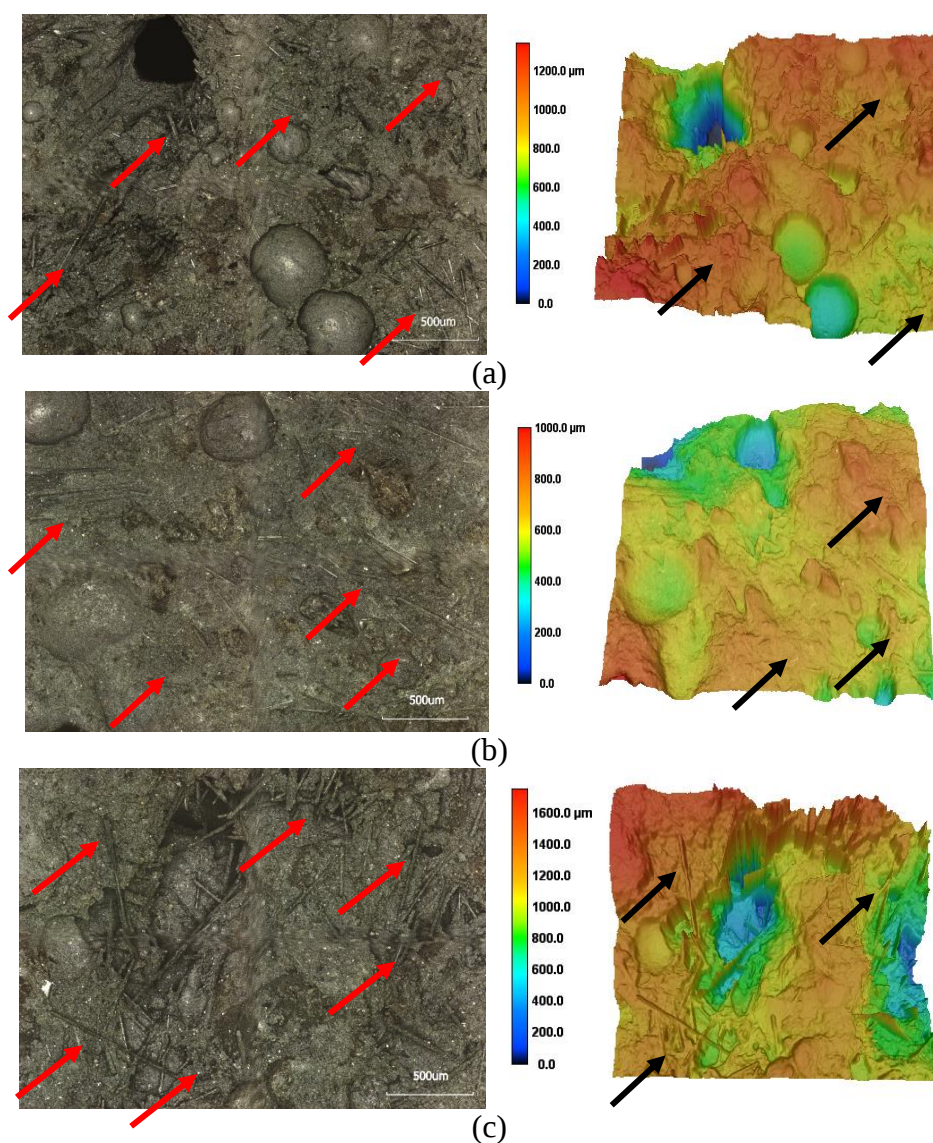


Figura 35 – Micrografia ótica da morfologia (esquerda) e topografia (direita) dos corpos de prova com as substituições de: (a) 22,5%,(b) 30%,(c) 37,5%.

A zona de interface entre a fibra do resíduo, indicada pelas setas vermelhas, é caracterizada pela ausência de vazios ou falhas, indicando que a presença da fibra é a causa da redução das macro-porosidades, isso foi constatado por PACHECO et al. (2016) e BAGHERZADEH et al., 2012, que também incorporaram materiais fibrosos em matriz cimentícia.

Na análise topográfica das áreas de fratura, ilustradas pelas imagens em 3D, corroboram com o indicativo da ação da fibra, pois foi evidenciada uma regularidade maior nas regiões onde a fibra está presente, indicado pelas setas pretas nas imagens em 3D da Figura 34 e Figura 35.

4.3.7 Ângulo de contato dos corpos de prova

Nesta caracterização, independente do líquido, ocorreu total absorção. Isto pode ser explicado devido à presença de poros evidenciados na análise morfológica com o microscópio ótico (seção 4.3.6) e índice de vazios (Figura 30).

5 CONCLUSÕES

A caracterização do resíduo em pó mostrou que o mesmo é um composto que têm baixa afinidade com a água e área superficial de $2206 \text{ cm}^2/\text{g}$, formado basicamente por óxido de silício e fragmentos de resina epóxi em pó, confirmada pelos ensaios de FTIR, EDS, DRX. O resíduo também apresenta massa específica de $3,55 \text{ g/cm}^3$, com aproximadamente 76% de inorgânicos, além de dimensão das partículas similar a areia média encontrada em lojas de construção civil (NBR 7214-2015), quando torneado com passes diametrais de 0,5 a 3 mm, comprovada pelas análises granulométricas e MEV.

A análise da areia identificou picos de quartzo no DRX, a presença de silício, alumínio e oxigênio por EDS e dimensão das partículas na ordem de $600 \text{ }\mu\text{m}$ no MEV, comprovada pela análise granulométrica, caracterizando a mesma como areia média. Já para o cimento, os resultados analíticos apresentaram calcita, dolomita e hatruita no DRX, carbono, magnésio, alumínio, silício, enxofre, potássio, cálcio e oxigênio na análise via EDS e que se trata de um pó fino, conforme atestado pela análise morfológica realizada no MEV, apresentando partículas na ordem de $15 \text{ }\mu\text{m}$. Em ambas as análises, areia e cimento, o resultado já era esperado, por se tratarem de produtos comercializados e normalizados.

Através dos ensaios de resistência a tração na flexão, observou-se que as médias de resistência sofrem redução conforme foi aumentada a proporção de resíduos na composição da argamassa, porém com substituições da areia pelo resíduo de até 30%, os valores de resistência testados apresentaram-se acima do valor máximo estabelecido pela NBR 13281-2005, que é de 4,5 MPa, e para a substituição de 37,5% o valor ficou próximo a 4,5 MPa. Isto pode ser relacionado à presença da fibra de vidro no resíduo, que auxilia no alongamento do corpo de prova antes da ruptura, ou seja, perante este quesito, e pela análise variância, os corpos com substituição de até 15% podem ser aplicados em argamassas de revestimento e paredes, sem nenhum risco estrutural, pois se apresentam iguais aos corpos isentos de resíduos.

Os ensaios de resistência à compressão também apresentaram redução na resistência com o aumento da proporção de resíduo na mistura, porém de forma mais expressiva que nos ensaios de tração, pois estatisticamente, são diferentes dos corpos isentos de resíduos. Entretanto os corpos de 0%, 7,5 e 15% de substituição apresentaram resultados superiores ou próximos ao valor máximo estabelecido pela norma NBR 13281-2005, que é de 8 MPa para compressão. Nos demais corpos, 22,5%, 30% e 37,5% de substituição, os valores de resistência estão abaixo de 4 MPa, ou seja, metade do constatado em substituições de até 15%, logo existe risco estrutural para aplicação destas argamassas.

Nas análises de densidade aparente e massas específicas, foi evidenciada a redução linear de massa por volume, comprovado pela análise estatística, que indicou que a redução é significativa a partir da incorporação acima de 7,5%. Isso está relacionado ao aumento do índice de vazios internos, comprovado pelas micrografias, que ocorreu com o acréscimo da proporção de resíduos, que apresenta baixa afinidade com a água e maior área superficial, quando comparada à areia substituída, que conseqüentemente ocasionou o incremento de consumo de água durante a confecção das argamassas, e corroborou para redução da massa específica/densidade após a cura.

Desta forma foi possível concluir que a incorporação dos resíduos eólicos com até 15% de substituição da areia em argamassa de cimento pode ser vantajosa, por diminuir o consumo da areia, além de apresentar resistências mecânicas acima dos valores máximos normalizados, massas específicas menores, reduzindo 20% em massa quando comparado os corpos sem substituição (0%), além de contribuir para a redução na formação de fissuras e do descarte destes resíduos eólicos em aterros sanitários, que possibilita o surgimento de um novo material, com valores ambientais agregados.

6 TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a possibilidade de reação álcali-agregado, pelas técnicas descritas nas normas NBR 15557-1 a 15577-6.

Avaliar a possibilidade de incorporação do resíduo eólico no processo de fabricação do clínquer, que é matéria prima do cimento após moagem, através de análises das propriedades físicas e químicas do cimento, descritas nas normativas brasileiras.

7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. N. et al. **Estudo das propriedades mecânicas de um sistema constituído de três componentes resina epóxi comercial, éster de silsesquioxano e etilenodiamina.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre - RS, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3171 – 2008 - **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.**

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Manual de Revestimentos de Argamassa.** Sao Paulo, SP, 2011.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

____NBR 7211 – 2009 - **Agregados para concreto.**

____NBR 7214 – 2012 - **Areia normal para ensaio de cimento.**

____NBR 7215 – 1996 – **Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.**

____NBR 9778 – 2005 – **Argamassa e Concreto - Ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.**

____NBR 13276 – 2016 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.**

____NBR 13277 – 2005 - **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água.**

____NBR 13278 - 2005 - **Argamassa para Assentamento de Paredes e Revestimento de Paredes e Tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.**

____NBR 13279 - 2005 - **Argamassa para Assentamento de Paredes e Revestimento de Paredes e Tetos – Determinação da Resistência a tração na Flexão e a Compressão.**

____NBR 13280 – 2005 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.**

____NBR 13281 - 2005 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.**

____NBR 16281 - 2016 – **Agregados para concreto – Especificação.**

____NBR 16372 – 2015 - **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).**

____NBR 16541 – 2016. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização de ensaios.**

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS/NORMA MERCOSUL. NBR NM 248 – 2003 – **Agregados – Determinação da composição granulométrica.**

BAGHERZADEH, R.; SADEGHI, A. H.; LATIFI, M.. **Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete**. Textile Research Journal, v. 82, n. 1, p. 88-96, 2012.

BARROS, A. S. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas**. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos – SP, 2010.

BATTAGIN, A. F. et al. **Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte – MG, 2002.

BINI, M. P. M.; ANTUNES, M. L. P.; SOTTOVIA, L. **Estudo da Incorporação de Resíduo de Fabricação de Pás Eólicas para Aerogeradores em Cimento Portland**. In.: 3rd International Workshop, Advances in Cleaner Production, São Paulo – SP, 2011.

BURKARTER, E.; SCHREINER, W. H. **Construção de Imagens por Padrões Hidrofóbico /Hidrofílico**. In.: XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada, São Lourenço – MG, 2006.

CAMPBELL, D.; WHITIN, J. R. **Polymer Characterization – Physical Techniques**. Chapman and Hall, 1991.

CANEVAROLO JR, S. V.; MACHADO, L. D.; MATOS, J. R. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. Editora Artliber, 2003.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G. A. **A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. Acta Scientiarum. Technology, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CARASEK, H. et al. **Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento**. Matéria (UFRJ), v. 21, p. 714-732, 2016.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do Resíduo de areia verde de fundição como Agregado de misturas asfálticas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2008.

CHOI, Y.W. et al. **Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete**. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 4, p. 776-781, 2005.

CINCOTTO, M. A. ; SILVA, M. A. C. ; CARASEK, H. **Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Metodos de ensaio**. IPT, 1995.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. Editora Edgard Blucher Ltda., 2002.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L. **O uso de finos de pedreira de rocha graníticognáissica em substituição às areias naturais na elaboração de argamassa**. Revista Geociências, v. 22, n. 1, p. 65-73, 2003.

DYER, T. D.; RAVINDRA K. D. **Chemical reactions of glass cullet used as cement component**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 13, n. 6, p. 412-417, 2001.

FOX, T. R. **Recycling wind turbine blade composite material as aggregate in concrete**. Doctoral Thesis, Iowa State University, 2016.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaios dos Materiais**. LTC, 2012.

GIVI, A. N. et al. **Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 11, p. 2145-2150, 2010.

GOIS, L. C. **Estudo da Incorporação da Cal em Composições Binárias de Solocimento para Produção de Tijolos Maciços**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2012.

GOMES, L. V. R.; TRISTÃO, F. A. **Análise da normatização de argamassas para rejuntamento de revestimentos cerâmicos**. In.: XXII Encontro de Tecnologia do Ambiente Construído, Fortaleza – CE, 2008.

GONÇALVES, V. O. et al. **Iosipesco shear resistance in composites of carbon and glass fiber with epoxi resin**. Journal of Aerospace Technology and Management, v. 1, n. 1, p. 49-53, 2011.

GUERRERO, P.; MANCINI, S. D.; TOUBIA, C. M. **Caracterização e reciclagem química via pirólise de resíduos da fabricação de pás eólicas**. Holos Environment, v. 11, n. 2, p. 147-157, 2011.

HAU, E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics**. Springer. Science & Business Media, 2013.

KAUPPINEN, J.; JOLMA, K.; HORNEMAN, V.-M. **New wave-number calibration tables for H₂O, CO₂, and OCS lines between 500 and 900 cm⁻¹**. Applied Optics, v. 21, n. 18, p. 3332-3336, 1982.

LOPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; NETO, E. B. **Evaluation of physical and mechanical properties of concretes produced with ground waste glass as fine aggregate**. Cerâmica, v. 51, p. 318-324, 2005.

MACÊDO, A. N. et al. **Análise estatística do comportamento mecânico à compressão do compósito cimento-madeira**. Revista Matéria, v. 16, n. 2, 2011.

MATTOS, L. R. S.; MOLIN, D.; CARNEIRO, A. M. **Caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas em Belém/PA (Brasil): estudo do comportamento no estado fresco**. Engenharia Civil UM (Braga), n. 15, p. 63-74, 2002.

MAY, C. A. **Epoxy resins**. Marcel Dekker, Inc., 1988.

MEYER, C.; XI, Y. **Use of recycled glass and fly ash for precast concrete**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 11, n. 2, p. 89-90, 1999.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS (MME). **Energia eólica no Brasil e mundo**. Disponível em: < [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389582cd4f00ea2)>. Acesso em 12 de dezembro de 2016.

MODRO, N. L. R. et al. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET**. Revista Matéria, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

OKADA, E. M. et al. **Produção de argamassa aditivada com resíduo de fibra de vidro pós-processada**. In.: X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Fortaleza – CE, 2013.

PACHECO, F. et al. **SEM and 3D microtomography application to investigate the distribution of fibers in advanced cementitious composites**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9, n. 6, p. 824-841, 2016.

PANZERA, T. H. et al. **Mechanical properties of composite materials based on Portland cement and epoxy resin**. Cerâmica, v. 56, p. 77-82, 2010.

PIRES, G. et al. **Caracterização físico-química e mecânica do sistema éster de Silsexquioxano/Resina Epóxi Dgeba/Dietilenotriamina**. Revista Matéria, v. 10, n. 2, p. 317-330, 2005.

ROMÃO, B. M. V. et al. **Characterization of the curing agents used in epoxy resins with TG/FT-IR technique**. Polimeros, v. 16, n. 2, p. 94-98, 2006.

SAAE – Sorocaba. **Qualidade da Água**. Disponível em: <<http://www.saaesorocaba.com.br/arquivos/modelos/janeiro17.pdf>>. Acesso em 20 de janeiro 2017.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F.X. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. LTC, 2006.

TOLEDO, R. **Técnicas fototérmicas e de raios-x para o monitoramento de sólidos e gases em materiais cerâmicos**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, Rio de Janeiro, 2003.

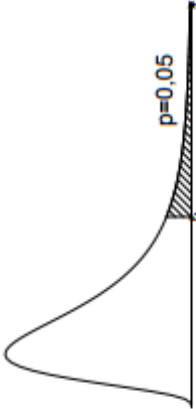
VARGAS, A. S. et al. **Geopolymeric mortars based on alkali-activated fly ash containing sand casting**. Cerâmica, v. 61, n. 359, p. 317-322, 2015.

WEI, J.; MEYER, C. **Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay**. Journal of Materials Science, v. 49, n. 21, p. 7604-7619, 2014.

8 ANEXOS

8.1 ANEXO 1

Distribuição F de Snedecor a 5% ($p=0,05$)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	30	40	60	120
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	19,41	19,42	19,43	19,43	19,44	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,71	8,70	8,69	8,67	8,66	8,62	8,59	8,57	8,55
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,87	5,86	5,84	5,82	5,80	5,75	5,72	5,69	5,66
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,64	4,62	4,60	4,58	4,56	4,50	4,46	4,43	4,40
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,96	3,94	3,92	3,90	3,87	3,81	3,77	3,74	3,70
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,53	3,51	3,49	3,47	3,44	3,38	3,34	3,30	3,27
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,24	3,22	3,20	3,17	3,15	3,08	3,04	3,01	2,97
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,03	3,01	2,99	2,96	2,94	2,86	2,83	2,79	2,75
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,86	2,85	2,83	2,80	2,77	2,70	2,66	2,62	2,58
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,74	2,72	2,70	2,67	2,65	2,57	2,53	2,49	2,45
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	2,69	2,64	2,62	2,60	2,57	2,54	2,47	2,43	2,38	2,34
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,55	2,53	2,51	2,48	2,46	2,38	2,34	2,30	2,25
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	2,53	2,48	2,46	2,44	2,41	2,39	2,31	2,27	2,22	2,18
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,42	2,40	2,38	2,35	2,33	2,25	2,20	2,16	2,11
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,37	2,35	2,33	2,30	2,28	2,19	2,15	2,11	2,06
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,33	2,31	2,29	2,26	2,23	2,15	2,10	2,06	2,01
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,29	2,27	2,25	2,22	2,19	2,11	2,06	2,02	1,97
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,26	2,23	2,21	2,18	2,16	2,07	2,03	1,98	1,93
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,22	2,20	2,18	2,15	2,12	2,04	1,99	1,95	1,90
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,20	2,18	2,16	2,12	2,10	2,01	1,96	1,92	1,87
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,17	2,15	2,13	2,10	2,07	1,98	1,94	1,89	1,84
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,15	2,13	2,11	2,08	2,05	1,96	1,91	1,86	1,81
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,13	2,11	2,09	2,05	2,03	1,94	1,89	1,84	1,79
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,11	2,09	2,07	2,04	2,01	1,92	1,87	1,82	1,77
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,09	2,07	2,05	2,02	1,99	1,90	1,85	1,80	1,75
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	2,13	2,08	2,06	2,04	2,00	1,97	1,88	1,84	1,79	1,73
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,06	2,04	2,02	1,99	1,96	1,87	1,82	1,77	1,71
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,05	2,03	2,01	1,97	1,94	1,85	1,81	1,75	1,70
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,84	1,79	1,74	1,68
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,95	1,92	1,90	1,87	1,84	1,74	1,69	1,64	1,58
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,86	1,84	1,82	1,78	1,75	1,65	1,59	1,53	1,47
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,78	1,75	1,73	1,69	1,66	1,55	1,50	1,43	1,35

Tabela 5: Quantis da Distribuição F para probabilidade $p = P[F \geq F_i] = 0,05$. Graus de liberdade do numerador dado no topo e do denominador na margem esquerda.

8.1 ANEXO 2

Tabela de comparações múltiplas de TUKEY

GL ($N - k$)	α	k níveis								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0,05	3,64	4,6	5,22	5,67	6,03	6,33	6,58	6,8	6,99
	0,01	5,7	6,98	7,8	8,42	8,91	9,32	9,67	9,97	10,24
6	0,05	3,46	4,34	4,9	5,3	5,63	5,9	6,12	6,32	6,49
	0,01	5,24	6,33	7,03	7,56	7,97	8,32	8,61	8,87	9,1
7	0,05	3,34	4,16	4,68	5,06	5,36	5,61	5,82	6	6,16
	0,01	4,95	5,92	6,54	7,01	7,37	7,68	7,94	8,17	8,37
8	0,05	3,26	4,04	4,53	4,89	5,17	5,4	5,6	5,77	5,92
	0,01	4,75	5,64	6,2	6,62	6,96	7,24	7,47	7,68	7,86
9	0,05	3,2	3,95	4,41	4,76	5,02	5,24	5,43	5,59	5,74
	0,01	4,6	5,43	5,96	6,35	6,66	6,91	7,13	7,33	7,49
10	0,05	3,15	3,88	4,33	4,65	4,91	5,12	5,3	5,46	5,6
	0,01	4,48	5,27	5,77	6,14	6,43	6,67	6,87	7,05	7,21
11	0,05	3,11	3,82	4,26	4,57	4,82	5,03	5,2	5,35	5,49
	0,01	4,39	5,15	5,62	5,97	6,25	6,48	6,67	6,84	6,99
12	0,05	3,08	3,77	4,2	4,51	4,75	4,95	5,12	5,27	5,39
	0,01	4,32	5,05	5,5	5,84	6,1	6,32	6,51	6,67	6,81
13	0,05	3,06	3,73	4,15	4,45	4,69	4,88	5,05	5,19	5,32
	0,01	4,26	4,96	5,4	5,73	5,98	6,19	6,37	6,53	6,67
14	0,05	3,03	3,7	4,11	4,41	4,64	4,83	4,99	5,13	5,25
	0,01	4,21	4,89	5,32	5,63	5,88	6,08	6,26	6,41	6,54
15	0,05	3,01	3,67	4,08	4,37	4,59	4,78	4,94	5,08	5,2
	0,01	4,17	4,84	5,25	5,56	5,8	5,99	6,16	6,31	6,44
16	0,05	3	3,65	4,05	4,33	4,56	4,74	4,9	5,03	5,15
	0,01	4,13	4,79	5,19	5,49	5,72	5,92	6,08	6,22	6,35
17	0,05	2,98	3,63	4,02	4,3	4,52	4,7	4,86	4,99	5,11
	0,01	4,1	4,74	5,14	5,43	5,66	5,85	6,01	6,15	6,27
18	0,05	2,97	3,61	4	4,28	4,49	4,67	4,82	4,96	5,07
	0,01	4,07	4,7	5,09	5,38	5,6	5,79	5,94	6,08	6,2
19	0,05	2,96	3,59	3,98	4,25	4,47	4,65	4,79	4,92	5,04
	0,01	4,05	4,67	5,05	5,33	5,55	5,73	5,89	6,02	6,14
20	0,05	2,95	3,58	3,96	4,23	4,45	4,62	4,77	4,9	5,01
	0,01	4,02	4,64	5,02	5,29	5,51	5,69	5,84	5,97	6,09
24	0,05	2,92	3,53	3,9	4,17	4,37	4,54	4,68	4,81	4,92
	0,01	3,96	4,55	4,91	5,17	5,37	5,54	5,69	5,81	5,92
30	0,05	2,89	3,49	3,85	4,1	4,3	4,46	4,6	4,72	4,82
	0,01	3,89	4,45	4,8	5,05	5,24	5,4	5,54	5,65	5,76
40	0,05	2,86	3,44	3,79	4,04	4,23	4,39	4,52	4,63	4,73
	0,01	3,82	4,37	4,7	4,93	5,11	5,26	5,39	5,5	5,6
60	0,05	2,83	3,4	3,74	3,98	4,16	4,31	4,44	4,55	4,65
	0,01	3,76	4,28	4,59	4,82	4,99	5,13	5,25	5,36	5,45
120	0,05	2,8	3,36	3,68	3,92	4,1	4,24	4,36	4,47	4,56
	0,01	3,7	4,2	4,5	4,71	4,87	5,01	5,12	5,21	5,3
∞	0,05	2,77	3,31	3,63	3,86	4,03	4,17	4,29	4,39	4,47
	0,01	3,64	4,12	4,4	4,6	4,76	4,88	4,99	5,08	5,16

9 APÊNDICE

9.1 TRABALHOS PUBLICADOS EM ANAIS DE CONGRESSO



61º Congresso Brasileiro de Cerâmica
04 a 07 de junho de 2017 - Gramado - RS

OLIVEIRA, P. S.; ANTUNES, M. L. P. ; MARQUES, M. A. ; PETRINI, P. A. ; CRUZ, N. C. ; RANGEL, E. C. ; DURRANT, S. F. . CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUO PROVENIENTE DA FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS E A DISCUSSÃO SOBRE A INCORPORAÇÃO EM CIMENTO PORTLAND. In: 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017, Gramado - RS. 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017. p. 2001-2009.

ANTUNES, M. L. P. ; MARQUES, M. A. ; ALMEIDA, F. F. ; **OLIVEIRA, P. S.** ; SCHATZ, B. C. ; RODRIGUES, G. I. ; LEITE, F. R. . ESTUDO DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS POLIMERICOS EM CIMENTO PORTLAND. In: 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017, Gramado - RS. 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017. p. 2051-2058.

MARQUES, M. A. ; ANTUNES, M. L. P. ; MANCINI, S. D. ; **OLIVEIRA, P. S.** . INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DE RAIOS X PARA INVESTIGAR A VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE EVA (POLI[(ETILENO)-CO-(ACETATO DE VINILA)] EM CIMENTO PORTLAND. In: 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017, Gramado - RS. 61º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2017. p. 2069-2069.

9.2 TRABALHOS SUBMETIDOS EM REVISTA



OLIVEIRA P.S., ANTUNES, M.L.P., CRUZ, N.C., RANGEL, E.C., DURRANT S. F.. “EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE PÁS EÓLICAS EM ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND”. Rev. Cerâmica, ISSN 1678-4553, 2017.

ALMEIDA, F.F. , **OLIVEIRA P.S.**, RANGEL E.C., MANCINI S.D., DURRANT S. F., ANTUNES M.L.P.. “ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE POLÍMEROS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE) AO CONCRETO EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO GRAÚDO”. Rev. Cerâmica, ISSN 1678-4553, 2017.