



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIURETANO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS

Priscila Lopes dos Santos de Sena

São Cristóvão - SE

2019

ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIURETANO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS

Priscila Lopes dos Santos de Sena

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Linha de Pesquisa: Gestão e Meio ambiente

Orientadora: Prof^a. Dr^a Carla Fernanda Barbosa Teixeira

São Cristóvão - SE

2019

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PRISCILA LOPES DOS SANTOS DE SENA

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 17 DE DEZEMBRO DE 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Carla Fernanda Barbosa Teixeira
Orientadora

Prof.^a Dr.^a Ângela Teresa Costa Sales
1º Examinador
Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. George Santos Marinho
2º Examinador
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof.^a Dr.^a Lucila Chebel Labaki
3º Examinador
Universidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois seria impossível ter chegado até aqui sem sua permissão. Aos meus pais José Izidoro e Angelina pelo amor e pelos sacrifícios que sempre fizeram para que eu tivesse a melhor educação; ao meu esposo Josafá por todo amor, compreensão, paciência e incentivo; e aos meus irmãos Lane e Dayvid por todo apoio, carinho e amizade concedidos durante toda a minha vida.

Agradeço à minha orientadora professora Dra. Carla Teixeira pelos sábios conselhos durante toda essa jornada. Agradeço imensamente à UFS e à UFRN através dos professores Dra. Ângela Sales e Dr. George Marinho, respectivamente, por terem aberto as portas dos seus laboratórios e à Unicamp através da professora Dra. Lucila Labaki que muito prontamente emprestou os equipamentos de medição de temperatura para que eu pudesse realizar os ensaios necessários à pesquisa.

Agradeço a todos os professores e colegas do mestrado, em especial Andréa Carla, Francielle, Maria Paula e professora Dra. Débora Góis, sem vocês teria sido bem mais difícil concluir esta etapa.

Agradeço ao IFS por ter permitido que eu utilizasse o Laboratório de Edificações para realização de ensaios.

Agradeço também à “Pranchas TBC”, pelo material fornecido, imprescindível à realização desse trabalho, além de toda boa vontade e disposição do seu fundador e *shaper*, Thiago Bastos Cunha, que se mostrou muito preocupado com a questão ambiental e da disposição dos resíduos gerados em seu ramo industrial.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado.

RESUMO

O setor da Construção Civil tem grande relevância no contexto da crise ambiental e da geração de resíduos, pois, além de utilizar muita matéria-prima, também apresenta elevados índices de descartes. A incorporação de vários tipos de resíduos, principalmente nas argamassas e concretos, produtos com vasta aplicabilidade no setor, tem-se mostrado como uma solução viável para a economia de recursos naturais, bem como para a destinação correta desses resíduos. O resíduo de poliuretano, que é proveniente da fabricação de pranchas de surfe, tem potencial para aplicação na Construção Civil. Por isso, esta pesquisa teve como principal objetivo a análise da influência da adição desse resíduo nas propriedades mecânicas e térmicas de argamassas mistas (cimento, cal e areia) com diferentes teores de incorporação. As argamassas estudadas foram produzidas com incorporação de resíduo de poliuretano em substituição à areia natural, agregado que é normalmente utilizado. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados para a produção das argamassas, adotando-se os teores de substituição, em volume, de 50, 75 e 100% (AR50, AR75 e AR100, respectivamente) de areia por resíduo de poliuretano e uma argamassa de referência sem resíduos (AR00). As argamassas produzidas foram submetidas a ensaios visando à verificação e à análise das propriedades mecânicas e térmicas, bem como do desempenho térmico através das trocas de calor. Através dos ensaios realizados, foi possível verificar a influência do resíduo nas propriedades no estado fresco (quanto maior o teor de substituição, maior a quantidade de água necessária para a mesma consistência) e no estado endurecido (redução das resistências mecânicas e densidade de massa à medida que se aumentaram os percentuais de substituição). Foi possível verificar também a diminuição dos valores de condutividade térmica à medida que se aumentou o teor de substituição do resíduo pela areia, conferindo às argamassas estudadas um maior isolamento térmico em relação à argamassa de referência.

Palavras-chave: argamassa; resíduo de poliuretano; propriedades mecânicas; propriedades térmicas.

ABSTRACT

The civil construction sector has great relevance in the context of environmental crisis and waste generation, since, in addition to using a lot of raw material, it also presents high rates of discards. The incorporation of several types of residues, mainly in mortars and concretes, products with wide applicability in the sector, has been shown as a viable solution for the saving of natural resources, as well as for the correct destination of this waste. The polyurethane residue from the manufacture of surfboards has potential for application in civil construction. Therefore, this research had as main objective the analysis of the influence of the addition of this residue on the mechanical and thermal properties of mixed mortar (cement, lime and sand) with different contents of incorporation. The mortars studied were produced with the incorporation of polyurethane residue in substitution of natural sand, commonly used aggregate. Characterization tests of the materials used for the production of mortar were carried out, using 50, 75 and 100% (AR50, AR75 and AR100, respectively) substitution contents of sand for polyurethane residue and a mortar without residue (AR00). The mortars produced were submitted to tests aimed at the verification and analysis of the mechanical and thermal properties, as well as the thermal performance through the heat exchanges. It was possible to verify the influence of the residue on the properties of the fresh state (the higher the substitution content, the greater the amount of water needed for the same consistency) and the hardened state (reduction of mechanical resistance and mass density at percentage of replacement). It was also possible to verify the reduction of the thermal conductivity values as the sand substitution content increased, giving the mortars studied a greater thermal insulation compared to the reference mortar.

Keywords: mortar; polyurethane residue; mechanical properties; thermal properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	17
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
1.2 Organização do trabalho.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Sustentabilidade e construção civil	18
2.1.1 <i>Alternativas para uma parte do problema ambiental: a geração de resíduos sólidos</i>	18
2.1.2 <i>Estudos de materiais não-convencionais – propriedades mecânicas e térmicas</i>	19
2.1.3 <i>Argamassas</i>	25
2.1.4 <i>Argamassa para isolamento térmico</i>	29
2.1.5 <i>Polímeros</i>	30
2.1.6 <i>Produção de pranchas de surfe</i>	33
2.2 Desempenho térmico.....	36
2.2.1 <i>Trocas térmicas</i>	36
2.2.1.1 <i>Radiação</i>	36
2.2.1.2 <i>Convecção</i>	37
2.2.1.3 <i>Condução</i>	38
2.2.2 <i>Propriedades térmicas</i>	39
2.2.2.1 <i>Condutividade térmica</i>	39
2.2.2.2 <i>Resistência térmica</i>	40
2.2.2.3 <i>Capacidade térmica</i>	41
2.2.2.4 <i>Calor específico</i>	41
2.2.2.5 <i>Difusividade térmica</i>	42
2.2.2.6 <i>Inércia térmica</i>	Erro! Indicador não definido.
2.2.3 <i>Desempenho térmico dos fechamentos</i>	43
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	45
3.1 Caracterização dos materiais e produção das argamassas	45
3.1.1 <i>Caracterização dos materiais</i>	45
3.1.2 <i>Produção das misturas de argamassas</i>	47
3.2 Determinação das propriedades mecânicas.....	48
3.2.1 <i>Resistência à tração na flexão</i>	48
3.2.2 <i>Resistência à compressão</i>	49

3.2.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	50
3.2.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....	51
3.2.5 Densidade de massa no estado fresco.....	52
3.2.6 Resistência potencial de aderência à tração.....	54
3.3 Determinação das propriedades térmicas	57
3.4 Monitoramento de temperatura	60
3.4.1 Experimento – Parte 1.....	60
3.4.2 Experimento – Parte 2.....	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Caracterização dos materiais e análise da dosagem das argamassas.....	63
4.1.1 Caracterização dos materiais	63
4.1.2 Análise da dosagem das argamassas	66
4.2 Análise das propriedades mecânicas.....	67
4.2.1 Resistência à tração na flexão	67
4.2.2 Resistência à compressão.....	70
4.2.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	72
4.2.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade.....	74
4.2.5 Densidade de massa no estado fresco.....	75
4.2.6 Resistência potencial de aderência à tração.....	77
4.3 Análise das propriedades térmicas	80
4.3.1 Condutividade térmica	80
4.3.2 Resistência térmica	81
4.3.3 Capacidade térmica	83
4.3.4 Difusividade térmica	85
4.4 Análise das trocas térmicas	87
4.4.1 Monitoramento da temperatura – Parte 1	87
4.4.2 Monitoramento da temperatura – Parte 2	90
5 CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS.....	96
ANEXO A – Informações sobre o poliuretano utilizado na fabricação das pranchas de surfe.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Materiais constituintes das pranchas de surfe.....	34
Figura 2: Etapa de modelagem do bloco.....	34
Figura 3: Resíduo de poliuretano coletado na fábrica para ser utilizado nesta pesquisa.....	35
Figura 4: Etapa de laminação e acabamento da prancha.....	35
Figura 5: Trocas de calor por condução entre partes de um mesmo corpo.....	38
Figura 6: Esquema explicativo do fenômeno da inércia térmica de uma parede real (q_2) e de uma parede fictícia de peso nulo (q_1).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 7: Ensaio para determinação da massa específica do resíduo de poliuretano.....	47
Figura 8: Corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm.....	48
Figura 9: Metades dos corpos de prova prismáticos ensaiados à flexão.....	49
Figura 10: Corpos de prova durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.....	51
Figura 11: Recipiente utilizado para determinação da densidade de massa no estado fresco.....	53
Figura 12: Aplicação da primeira camada da argamassa no substrato para ensaio de aderência.....	55
Figura 13: Corte dos corpos de prova para ensaio de aderência.....	56
Figura 14: Pastilhas metálicas coladas nos corpos de prova para ensaio de aderência.....	56
Figura 15: Ruptura dos corpos de prova no ensaio de aderência.....	57
Figura 16: Aparelho KD2 Pro.....	58
Figura 17: Gabarito compatível com a sonda SH-1.....	59
Figura 18: Sonda SH-1 com agulhas revestidas por pasta térmica.....	59
Figura 19: Câmara de testes.....	59
Figura 20: Sistema de aquecimento e medição com lâmpadas e localização do sensor na placa.....	61
Figura 21: Fonte de calor artificial.....	61
Figura 22: Placa de argamassa com termopares em câmara de isolamento térmico.....	62
Figura 23: Resíduo de poliuretano peneirado.....	63
Figura 24: Curva granulométrica da areia utilizada.....	64
Figura 25: Curva granulométrica do resíduo de poliuretano utilizado.....	64
Figura 26: Curvas granulométricas da areia e do resíduo de poliuretano.....	65
Figura 27: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores de IC e relação a/c.....	66
Figura 28: Corpo de prova submetido à ensaio de resistência à tração na flexão.....	68
Figura 29: Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 e 28 dias.....	69
Figura 30: Corpo de prova submetido à ensaio de resistência à compressão.....	70
Figura 31: Resistência à compressão (MPa) aos 14 e 28 dias.....	71
Figura 32: Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias.....	73
Figura 33: Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	74
Figura 34: Densidade de massa no estado fresco.....	76
Figura 35: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da condutividade térmica.....	81
Figura 36: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da resistência térmica.....	82
Figura 37: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da capacidade térmica volumétrica.....	84
Figura 38: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da difusividade térmica.....	86
Figura 39: Diferenças entre temperaturas das faces das placas e temperatura ambiente – Parte 1.....	88
Figura 40: Temperaturas atingidas pelas faces de cada placa – Parte 1.....	89
Figura 41: Diferenças de temperaturas entre as faces de cada placa – Parte 1.....	89

Figura 42: Temperatura nas faces externas e internas das placas de argamassas – Parte 2	90
Figura 43: Diferenças de temperatura entre as faces de cada placa – Parte 2	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Síntese das características físicas e mecânicas do reboco isolante térmico	29
Quadro 2: Resistência térmica da argamassa	30
Quadro 3: Especificações da sonda SH-1.....	58
Quadro 4: Caracterização dos materiais.....	63
Quadro 5: Granulometria dos materiais	65
Quadro 6: Dosagem das argamassas	66
Quadro 7: Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 e 28 dias.....	68
Quadro 8: Classificação das argamassas quanto a resistência à tração na flexão	70
Quadro 9: Resistência à compressão (MPa) aos 14 e 28 dias	71
Quadro 10: Classificação das argamassas quanto a resistência à compressão	72
Quadro 11: Classificação das argamassas quanto à densidade	73
Quadro 12: Absorção de água e coeficiente de capilaridade.....	75
Quadro 13: Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade.....	75
Quadro 14: Densidade de massa no estado fresco	76
Quadro 15: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco	77
Quadro 16: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR00.....	77
Quadro 17: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR50.....	77
Quadro 18: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR75.....	78
Quadro 19: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR100.....	78
Quadro 20: Classificação das argamassas quanto à resistência potencial de aderência à tração	79
Quadro 21: Condutividade térmica das argamassas estudadas	80
Quadro 22: Resistência térmica das argamassas estudadas.....	82
Quadro 23: Capacidade térmica volumétrica das argamassas estudadas	84
Quadro 24: Difusividade térmica das argamassas estudadas	86
Quadro 25: Temperaturas máximas atingidas pelas placas – Comparativo Parte 1 e 2	91
Quadro 26: Diferenças de temperaturas máximas atingidas pelas placas – Comparativo Parte 1 e 2 ..	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características da areia e do resíduo de poliuretano	67
--	----

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Difusividade térmica do material [m^2/s]
a/c	Relação água/cimento
a/ms	Relação água/materiais secos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR00	Argamassa de referência, sem adição de resíduo - traço em volume 1:1:8:0 (cimento:cal:areia:resíduo)
AR100	Argamassa com 100% de substituição de areia por resíduo de poliuretano - traço em volume 1:1:0:8 (cimento:cal:areia:resíduo)
AR50	Argamassa com 50% de substituição de areia por resíduo de poliuretano - traço em volume 1:1:4:4 (cimento:cal:areia:resíduo)
AR75	Argamassa com 75% de substituição de areia por resíduo de poliuretano - traço em volume 1:1:2:6 (cimento:cal:areia:resíduo)
A_t	Absorção de água por capilaridade, para cada tempo [g/cm^2]
C	Capacidade térmica [J/K]
c	Calor específico [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
CFC	Clorofluorcarbono
c_p	Calor específico a pressão constante [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
e	Espessura do corpo [m]
EPS	Poliestireno Expandido
F_c	Carga máxima de compressão aplicada [N]
F_f	Carga aplicada verticalmente no centro do prisma [N]
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
\bar{h}_c	Coefficiente médio de transferência de calor por convecção [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
h_e	Coefficiente de condutância térmica superficial externa [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de consistência
I_g	Intensidade de radiação solar incidente global [W/m^2]
K	Coefficiente global de transmissão térmica [$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$]
L	Distância entre os suportes para ensaio de resistência a tração na flexão [mm]

m	Massa do corpo de prova [kg]
MIA	<i>Mortar Industry Association</i>
P _i	Carga de ruptura à tração [N]
PU	Poliuretano
Q	Variação de energia [J]
q _c	Taxa de transferência de calor por convecção [W]
q _{cd}	Intensidade do fluxo térmico por condução [W/m ²]
q _{opaca}	Intensidade do fluxo térmico que atravessa a parede opaca [W/m ²]
q _r	Intensidade do fluxo térmico radiante [W/m ²]
q _{transl.}	Intensidade do fluxo térmico que atravessa a parede translúcida [W/m ²]
R	Resistência térmica de um componente [(m ² .K)/W]
R _c	Resistência à compressão [MPa]
R _f	Resistência à tração na flexão [MPa]
R _i	Resistência potencial de aderência à tração [MPa]
RIM	Moldagem por injeção e reação
Rio-92	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
T	Temperatura da superfície [K]
T _e	Temperatura externa [K]
T _i	Temperatura interna [K]
T _r	Temperatura radiante [K]
VOC	Composto orgânico volátil
α	Coefficiente de absorção da radiação solar
ΔT	Diferença de temperatura [K]
ε	Emissividade térmica
λ	Coefficiente de condutividade térmica do material [W/(m.K)]
ρ	Densidade do material [kg/m ³]
τ	Coefficiente de transmissão ou transparência

1 INTRODUÇÃO

Apesar da crescente preocupação de todos os setores de produção com o meio ambiente, com as consequências do uso desordenado de matérias-primas não-renováveis e com seu posterior descarte, ainda há muito o que fazer para que, realmente, se alcance um desenvolvimento sustentável. Aliado a isso, mesmo com todo o avanço relativo às discussões sobre sustentabilidade, a cultura presente na maioria dos empresários e colaboradores de diversos setores continua sendo a do descaso e do desperdício.

Neste cenário, a indústria da Construção Civil, por ser responsável por grande parte do consumo de matéria-prima, de energia e dos resíduos gerados em todo o mundo, precisa mudar seus paradigmas e começar a absorver os materiais descartados tanto pelas obras quanto por outros setores. Dessa forma, o setor deve procurar atender às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº12.305 (BRASIL, 2010). Um dos principais conceitos presentes nessa lei é o da logística reversa, definido no capítulo II como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

Vários estudos buscam analisar a viabilidade construtiva dos mais diversos resíduos. Assim, ao invés de continuar poluindo o meio ambiente em aterros ou até mesmo lixões, esses resíduos terão uma nova destinação, o que trará inúmeros benefícios não só para a preservação da natureza, mas também para a redução dos custos finais de produção, o que certamente é fundamental para o setor, que atualmente está vivenciando uma retração considerável, devido ao momento econômico do país. Segundo o IBGE (2017), o desemprego atingiu o elevado índice de 13,6% no primeiro trimestre de 2017, fazendo com que a queda no poder aquisitivo da população impossibilite a compra de imóveis.

Outro fator importante para a incorporação de novos materiais alternativos que possam ocasionar tanto o equilíbrio ambiental, como a redução dos custos de construção, é o grande déficit habitacional que ainda existe no país. Segundo o estudo mais recente da Fundação João Pinheiro (2015), o déficit habitacional no Brasil corresponde a cerca de 6,2 milhões de domicílios e 85% dessas famílias ganham até 3 salários mínimos.

Dentre os resíduos produzidos pelas mais diversas indústrias que apresentam potencial para serem incorporados à Construção Civil, tem-se os resíduos provenientes da produção de pranchas de surfe – espuma de poliuretano, resinas, fibras de vidro, entre outros. Esta pesquisa utilizou apenas o resíduo gerado na primeira etapa da fabricação – a espuma de poliuretano. Até pouco tempo, esse resíduo era considerado um item descartável, mas pode ser uma solução viável para ser utilizado na produção de argamassas em substituição ao agregado natural.

De acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005f) a espuma de poliuretano apresenta densidade e condutividade térmica muito baixas, se comparadas com as da areia, por isso esse resíduo poderá conferir à argamassa pesquisada maior leveza e isolamento térmico.

Segundo Sorima Neto (2016), no Brasil, são produzidas 80 mil pranchas por ano, correspondendo a 20% da produção mundial. Conforme estudo de Mazzoco (2007 *apud* ZAMBON, LUNA e CAMPOS, 2016) cerca de 50% da matéria-prima utilizada na produção das pranchas de surfe é descartada como resíduo. Esse dado é semelhante com o fornecido por Grijó (2004) cujo percentual informado de descarte é de cerca de 50 a 70% da matéria-prima e que em média para cada prancha produzida são descartados cerca de 7 kg de resíduos no meio ambiente, o que significa cerca de 600 toneladas, apenas no Brasil. Pode-se concluir então que o volume de resíduo que é descartado anualmente no Brasil e no mundo é bastante relevante, já que a massa unitária desse resíduo é de 90 kg/m³, sendo, portanto, um material extremamente leve, onde pequenas massas representam grandes volumes.

Outro dado bastante relevante é a quantidade de microempresas fabricantes que, de acordo com Sorima Neto (2016), gira em torno de 85% do total das 1.500 fábricas existentes no Brasil, as quais produzem cerca de 20 pranchas por mês e, na sua maioria, não se preocupam com a destinação dos resíduos gerados, pois não compreendem a dimensão do dano ambiental causado, mesmo que a produção seja muito pequena.

Por conta de tudo isso é que se resolveu realizar esse trabalho, como uma forma de buscar alternativa de destinação para os resíduos gerados a partir da fabricação das pranchas de surfe. Entende-se que, além da contribuição ambiental, sua relevância reside na possibilidade de se ter uma argamassa que proporcione desempenho térmico satisfatório e com baixo custo para enchimentos, rebocos ou até mesmo para utilização como forros ou placas cimentícias para fechamentos não estruturais.

Com esta pesquisa, pretende-se verificar: é possível fabricar uma argamassa mista (cimento+areia+cal) substituindo parte da areia por resíduo de poliuretano, mantendo as propriedades de aderência e resistência e proporcionando uma resistência térmica superior, isto é, mais isolante, se comparado com uma argamassa sem substituição da areia?

Por se tratar de resíduos poliméricos, cuja capacidade de isolamento térmico é conhecida, supõe-se que serão encontrados resultados positivos, possibilitando a execução de uma argamassa que possa substituir a utilização de outros materiais isolantes cujos custos são bastante elevados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa consistiu em analisar a influência do teor de adição de resíduo nas propriedades mecânicas e térmicas de uma argamassa mista (cimento, cal e areia) com incorporação de resíduo de poliuretano proveniente da fabricação de pranchas de surfe comparando com os dados de uma argamassa de referência, isto é, sem adição de resíduo.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Caracterizar os materiais que serão utilizados para a produção das argamassas.
- Investigar as propriedades mecânicas e térmicas das argamassas estudadas.
- Analisar a variação de temperatura em placas de argamassas, com os diferentes teores de resíduo, ao serem submetidas a uma fonte de calor artificial.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho constitui-se de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução sobre o tema abordado, justificativa e objetivos da pesquisa.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica sobre problemática de geração de resíduo e sua destinação, argamassas, polímeros, pranchas de surfe, trocas térmicas, propriedades térmicas e desempenho térmico de fechamentos.
- Capítulo 3: Método utilizado para o estudo proposto.
- Capítulo 4: Resultados dos experimentos, as análises e discussões.
- Capítulo 5: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade e construção civil

Existe uma discussão e pontos de vista diferentes a respeito do tema crise ambiental mas, conforme afirma Veiga (2005), diversas atividades têm a capacidade de alteração expressiva do solo, da atmosfera, da água, da flora e da fauna, bem como da interação entre esses ecossistemas. Assim, não deve existir a possibilidade de se ignorar os impactos causados pelo avanço da ciência e da tecnologia e muito menos a ideia de que o desenvolvimento de hoje não deve impedir que as gerações futuras também o alcancem. Por isso, a ciência e a tecnologia devem estar alinhadas ao progresso na busca por alternativas que não causem tanta agressão ao meio ambiente. A partir daí surge a expressão utópica¹ “desenvolvimento sustentável”, que foi consagrada definitivamente na Rio-92.

Além disso, os avanços tecnológicos trazidos pelo advento do progresso juntamente com o sistema capitalista incentivam o consumismo exacerbado, dominante em todo o mundo atual, cujo modo de produção necessita de uma constante renovação das técnicas empregadas. A ideia central, para que funcione esse sistema, é sempre lançar produtos novos com um apelo de *marketing* maciço a fim de transformá-los em objetos de desejo, ao mesmo tempo em que os produtos lançados anteriormente tornam-se obsoletos muito rapidamente. Essa é a lógica da acumulação (DUPAS, 2006).

Segundo Sachs (2007), é um cenário muito perturbador que se forma ano após ano, com o aumento cada vez maior do consumismo e o descompasso entre fabricação e conservação das fontes de matéria-prima. Por outro lado, o aumento do consumismo tem por consequência a grande geração de resíduos, tanto durante a fabricação, quanto no descarte dos objetos inservíveis.

2.1.1 Alternativas para uma parte do problema ambiental: a geração de resíduos sólidos

Não é difícil perceber que, apesar da atual preocupação em relação ao futuro do meio ambiente e conseqüentemente da própria humanidade, ainda é uma utopia pensar que o homem se sentirá novamente parte da natureza. A partir de rápidas análises, pela maioria das

¹ O “desenvolvimento sustentável” é considerado por Veiga (2005) uma expressão utópica e não um conceito propriamente dito, pois apesar da grande dificuldade que rodeia a colisão entre políticas ambientais e econômicas, onde os grupos de elite ao se sentirem prejudicados fazem de tudo para evitar que medidas ambientalmente amigáveis possam prosperar, não há como sugerir o fim ou obsolescência do termo, já que a menos que o mundo se transforme em uma espécie de jardim do Éden (em um mundo ideal) a humanidade certamente continuará a almejar liberdade, igualdade, fraternidade e acima de tudo sua própria sobrevivência.

idades do mundo, é fácil encontrar, por exemplo, vários pontos de deposição irregular de resíduos, o que demonstra a completa falta de sensibilidade com relação à vida em sociedade e pouca preocupação com o meio ambiente.

Como exemplo, pode-se citar o mapeamento realizado por Oliveira *et al.* (2016) na cidade de Mossoró no Rio Grande do Norte, em relação ao descarte dos resíduos provenientes da Construção Civil. A pesquisa aponta dois problemas principais: o primeiro é que na época do estudo a área utilizada pela Prefeitura para a disposição desses resíduos era em um lixão, que certamente é um local inadequado, inclusive o mesmo foi desativado em 2008, para a disposição de resíduos domésticos; o segundo é que foram identificados 11 pontos de deposição irregular espalhados pela cidade. Foram encontrados pontos próximos a áreas residenciais, o que prejudica, não só o aspecto visual dos bairros, mas também a saúde da população por conta das condições favoráveis ao aparecimento de vetores de doenças. Além disso, ainda foram encontrados pontos próximos de cursos d'água, o que aumenta ainda mais os problemas ambientais.

Tendo em vista que a Construção Civil é grande geradora de resíduos sólidos e também grande consumidora de matéria-prima, atualmente vários estudos estão sendo desenvolvidos para tentar minimizar problemas como os citados anteriormente, a fim de dar uma destinação aos entulhos e resíduos, não só da Construção Civil, mas também de diversos setores produtivos, evitando assim, que sejam levados para lixões ou aterros ou, ainda, para pontos de deposição irregular.

2.1.2 Estudos de materiais não-convencionais – propriedades mecânicas e térmicas

A seguir, estão descritos alguns estudos que investigaram as propriedades mecânicas e térmicas de compósitos que utilizaram diversos tipos de resíduos, inclusive espuma de poliuretano, demonstrando que existem soluções possíveis, mas que falta iniciativa, tanto do poder público em regulamentar normas para a utilização dos mesmos, como também por parte do próprio setor da Construção Civil, que ainda vê, com certo preconceito, a utilização de materiais não-convencionais.

O estudo realizado por Gadea *et al.* (2010) apresentou resultados de uma pesquisa experimental sobre o uso de resíduos de espuma de poliuretano proveniente da destruição de painéis utilizados na indústria automotiva. Esse resíduo foi moído e utilizou-se o tamanho de partícula até 4 mm como um substituto do agregado miúdo para misturas à base de cimento, a fim de se produzir argamassa leve. Foi fabricada uma argamassa tradicional (mistura de

cimento, areia e água) para servir de referência e, em seguida, fabricaram-se argamassas com diferentes percentuais de substituição de areia pelo resíduo moído (25%, 50%, 75% e 100%).

Após a realização de ensaios de caracterização e de resistência mecânica, os autores chegaram aos seguintes resultados:

- A relação água/cimento (a/c) diminuiu de acordo com o aumento da quantidade de areia substituída pela espuma;
- No estado fresco, as densidades variaram entre aproximadamente 2.100 kg/m^3 nas argamassas de referência e 1.100 kg/m^3 para as argamassas com substituição total de areia pelo resíduo (100% de substituição);
- No estado endurecido, as densidades aparentes diminuíram em comparação ao estado fresco e aos 28 dias a redução foi de aproximadamente 200 kg/m^3 em todas as amostras.
- Com relação às propriedades mecânicas, os autores puderam observar a diminuição da resistência à flexão e à compressão à medida que se aumentou o teor de substituição da areia pelo resíduo. A perda de resistência foi de aproximadamente 55% nas amostras com substituição total do agregado natural pelo resíduo de poliuretano.
- Apesar da diminuição das resistências mecânicas, o resíduo de poliuretano possui uma certa flexibilidade que, segundo os autores, pode conferir à mistura boa resistência a fissuras, podendo absorver pequenos movimentos estruturais sem romper, mantendo sua adesão ao substrato.

Outro trabalho envolvendo o estudo de resíduos de espuma de poliuretano foi desenvolvido por Gutiérrez-González *et al.* (2012), o qual apresentou um estudo das propriedades e do comportamento térmico de gesso com resíduos de espuma de poliuretano. Foram utilizados dois resíduos de espuma de poliuretano: um subproduto da indústria automobilística (de cor cinza) e outro proveniente da fabricação de poliuretano para isolamento térmico na indústria da construção (branco). Os resíduos foram moídos e adicionados em diferentes proporções de volumes resíduo/gesso (0/1; 0,5/1; 1/1; 2/1; 3/1 e 4/1) sendo fabricadas amostras com cada tipo de espuma separadamente.

Foram realizados ensaios cujos resultados foram descritos e interpretados pelos autores:

- Primeiramente foram realizados ensaios de caracterização dos dois tipos de resíduos (cinza e branco). O branco apresentou granulometria mais fina que o cinza.
- A quantidade de água necessária para uma consistência aceitável aumentou à medida que se adicionou mais espuma à mistura, o que provavelmente se deve à alta porosidade do material.
- O aumento das proporções das espumas de poliuretano reduziu a densidade do material. Segundo os autores, essa redução pode ser devido a dois fatores fundamentais, o aumento da relação água/ materiais secos e o aumento da porosidade, devido à estrutura celular dos materiais.
- Pôde-se observar que, como esperado, a capacidade de absorção de água aumentou devido aos maiores teores de substituição de gesso pelos resíduos de poliuretano.
- Foram realizados ensaios para obtenção das resistências à flexão e compressão após 7 e 28 dias para os dois tipos de resíduos de espuma de poliuretano. Para os autores, a resistência mecânica depende da densidade do material e do tipo de partícula utilizada, por isso, em princípio esperava-se que a espuma branca pudesse obter resultados melhores que a cinza devido à sua granulometria mais fina. Porém, os gráficos não mostraram diferenças significativas entre os valores obtidos para os dois polímeros.
- Em ambos os casos observou-se uma queda nas resistências mecânicas à medida que foram utilizadas porcentagens maiores dos resíduos. A resistência à flexão que nas amostras de referência (0/1) foi de 6 MPa aos 28 dias caiu para menos de 1 MPa nas proporções 3/1 e 4/1. Já a resistência à compressão foi de aproximadamente 15 MPa aos 28 dias para as amostras de referência e menos de 2 MPa para as proporções 3/1 e 4/1.
- Observou-se ainda que a força de aderência diminuiu à medida que se aumentou a porcentagem de resíduo de poliuretano. Segundo os autores, essa diminuição pode ser explicada pelo acréscimo da relação água/ materiais secos, o que leva a maior porosidade e menor homogeneidade da mistura, diminuindo a coesão entre o gesso e o poliuretano.

- A condutividade térmica das amostras diminuiu à medida que o gesso foi substituído pela espuma de poliuretano, possivelmente devido às estruturas celulares fechadas que o resíduo cria no interior da matriz de gesso. Esses poros contêm ar, cuja condutividade térmica é menor que a dos outros constituintes. Segundo os autores, os valores encontrados são semelhantes a outros materiais de construção utilizados para isolamento térmico, o que sugere que o gesso com resíduo de poliuretano poderia ser uma alternativa a esses produtos.

Pode-se citar também o estudo apresentado por Junco *et al.* (2015), o qual apresentou uma análise experimental sobre o comportamento de fadiga de compósitos feitos com cimento, areia, água e resíduos de espuma de poliuretano. O resíduo de espuma de poliuretano, usado na substituição parcial de areia, veio da reciclagem de resíduos de dois tipos de espuma: uma foi recuperada da indústria de construção e refrigeração e a outra da indústria de componentes automotivos. Diferentes misturas foram primeiramente preparadas através da substituição de areia por volumes equivalentes de poliuretano (50 e 75% para cada tipo de resíduo).

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de compressão cíclica para estudar a deformabilidade de diferentes dosagens de argamassas sob fadiga. Os resultados experimentais indicaram:

- As propriedades elásticas das argamassas de poliuretano permaneceram praticamente constantes em comparação com a amostra de referência de argamassa.
- As propriedades mecânicas dessas argamassas foram verificadas antes e após cada teste de fadiga. Os autores puderam concluir que as argamassas produzidas apresentaram boa resistência à fadiga, pois a resistência à compressão final não mostrou redução em relação à resistência à compressão inicial das argamassas analisadas.

Um estudo recente realizado por Hua-Yueh, Han-Sheng e Chen-Pei (2020) verificou o comportamento das propriedades mecânicas e térmicas de compósitos cimentícios com adição de cascas de ostras e de resíduo agrícola da ilha Kinmen, o sorgo. O trabalho tem por objetivo principal alcançar a melhor proporção de mistura de cascas de ostras moídas e sorgo picado para substituir agregados finos na fabricação de tijolos leves. As proporções estudadas foram

as seguintes, sendo que a primeira letra do código de cada mistura representa o material que substitui o agregado fino (CT para controle, O para ostra, S para sorgo e SO para sorgo e ostra):

- Cascas de ostras moídas com O15%, O20% e O40% de substituição, em peso, dos agregados;
- Hastes de sorgo picadas e cascas de ostras moídas com S5%O5%, S10% e S5%O10% de substituição, em peso, dos agregados;
- Mistura de referência, sem substituição, CT-0%;
- Foi utilizada uma relação água/cimento fixa de 0,485 para todas as misturas.

Segundo os autores, os resultados obtidos experimentalmente são os apresentados abaixo:

- Os tijolos de teste com as proporções de substituição O15, O20, O40, S5O5, S5O10 e S10 atingiram resistência à compressão de 249 kgf/cm², 238 kgf/cm², 216 kgf/cm², 252 kgf/cm², 244 kgf/cm² e 270 kgf/cm², respectivamente, aos 28 dias. Nenhuma das amostras com algum percentual de mistura superou os 319 kgf/cm² do grupo de controle, sem substituição.
- Os ensaios de resistência à compressão foram realizados também aos 56 dias para verificação do comportamento das misturas ao longo do tempo. Percebeu-se que a adição de sorgo proporcionou um reforço físico nos estágios iniciais (aos 28 dias), mas no estágio posterior (56 dias) a resistência diminuiu, provavelmente devido à quebra das fibras dos caules do sorgo.
- Em contrapartida, a adição das conchas de ostras moídas apresentou um comportamento inverso, com aumento de resistência ao passar do tempo, inclusive ficando maior do que a resistência do grupo de controle aos 56 dias para a mistura O15. Esta melhora na propriedade pode ser explicada pela presença de óxido de cálcio nas conchas após a queima em altas temperaturas, o que proporciona atividades pozolânicas, produzindo grandes quantidades de colóides hidratados que preenchem os poros.
- Os tijolos leves explorados na pesquisa são utilizados na vedação de edificações, por isso as propriedades térmicas na aplicação como materiais de paredes externas também foram incluídas na discussão. A condutividade

térmica dos compósitos foi determinada através de um termovisor infravermelho.

- Os coeficientes de condutividade térmica (k) de todas as amostras com substituição, seja ela de componente único ou duplo, apresentaram valores inferiores ao do grupo de controle, que é de $0,265 \text{ W/m.K}$.
- No entanto, à medida que se aumentou o teor de substituição de casca de ostra de 15% para 40%, o valor k diminuiu mais ainda de $0,188$ para $0,083 \text{ W/n.K}$. Isso indica que a adição dessas partículas leva a um aumento da porosidade no interior dos tijolos.
- Com a adição de hastes de sorgo como componente único ou na mistura com conchas de ostras as condutividades térmicas também sofreram diminuição, mas ficou demonstrado que o aumento do teor de partículas da casca de ostra é o fator chave na queda do coeficiente de condutividade térmica. Segundo os autores, isso também indica que não apenas a alta porosidade afeta o valor k , como a adição de material com menor coeficiente de condutividade térmica também pode oferecer melhor isolamento térmico.
- Os resultados do estudo também descobriram que o uso de cascas de ostras moídas e caules de sorgo como substituto para agregados finos e tijolos leves de apenas 15% de casca de ostras moídas ou misturando casca de ostras moídas (10%) e hastes de sorgo (5%) sem outros aditivos exibem alta resistência à compressão em relação a outros grupos experimentais, atendem aos padrões nacionais chineses e também possuem comparativamente baixos coeficientes de condutividade térmica. Por buscar uma alternativa para redução dos dois tipos de resíduos, o compósito S5O10 foi nomeado como a melhor opção de mistura pelos pesquisadores.

Tendo em vista que a crise ambiental é uma realidade, medidas precisam ser tomadas para que o crescimento econômico não continue impactando tão negativamente o meio ambiente, colocando em risco o equilíbrio do mesmo. Por isso estudos como os apresentados anteriormente se tornam cada vez mais necessários.

2.1.3 Argamassas

A presente pesquisa teve como base a produção de argamassas. Para isso, fez-se necessário entender o conceito, composição e propriedades desse material que é amplamente utilizado no setor de construção civil.

As argamassas estão presentes em diversas fases de uma construção e se constituem num dos materiais mais empregados na construção civil, desempenhando diversas finalidades e aplicações, sendo seus principais usos no assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimento de paredes e tetos (CARASEK, 2010).

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) define argamassa como “mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento”. Também define as variadas tipologias das argamassas, sendo estas de assentamento de alvenaria (vedação e estrutural), encunhamento, argamassas de revestimento (interno e externo) de paredes e tetos, argamassa de uso geral e de reboco e argamassas decorativas de camada fina ou monocamada.

Para Caporrino (2015), as argamassas têm por finalidades unir as unidades de alvenaria, garantir a vedação, propiciar aderência com as armaduras nas juntas, compensar as variações dimensionais das elevações, entre outras. Algumas propriedades, tais como: retenção de água, adequada resistência à compressão e trabalhabilidade, devem ser controladas, a fim de se evitar patologias futuras.

De acordo com Fiorito (2009), as argamassas comumente utilizadas são compostas de areia natural (agregado miúdo) e aglomerantes, como cimento Portland e cal hidratada. A denominação das argamassas ocorre em função do aglomerante utilizado. Assim, pode-se ter argamassa de cal, de cimento ou mista de cal e cimento. O tipo de aglomerante, por sua vez, é determinado de acordo com a destinação pretendida.

As argamassas de cimento são mais resistentes, porém de mais difícil trabalhabilidade. Podem ser utilizadas em alvenarias de alicerce, chapiscos e revestimentos em que as condições de impermeabilidade são exigidas, tais como no interior de reservatórios de água e outras obras hidráulicas. Já as argamassas de cal, são utilizadas principalmente para emboço e reboco, pela sua plasticidade e facilidade no acabamento, pois propriedades como trabalhabilidade e capacidade de absorver deformações são influenciadas positivamente pela cal, enquanto características de resistência mecânica e aderência são prejudicadas. Assim, as argamassas mistas aliam a resistência mecânica com a melhoria da trabalhabilidade e podem

ser utilizadas para assentamentos de alvenarias (vedação ou estrutural), para contrapisos, para emboços de lajes e paredes, entre outros (FIORITO, 2009).

Segundo Petrucci (2003), uma argamassa de boa qualidade deve ser dosada adequadamente, garantindo envolvimento e aderência à pasta de todos os grãos de material inerte, bem como o preenchimento dos vazios pela pasta. Dessa forma, a argamassa atende a requisitos como resistência mecânica, compacidade, impermeabilidade, aderência, constância de volume (baixa retração na secagem) e durabilidade.

A norma NBR 13749 (ABNT, 2013b) aponta as condições que devem ser atendidas pelos revestimentos de argamassa. Além de ser compatível com o acabamento decorativo (pintura, revestimento cerâmico e outros), o revestimento de argamassa deve ser constituído por uma ou mais camadas superpostas e uniformes, sendo a resistência mecânica das camadas decrescente ou equivalente no sentido base-exterior. No caso dos revestimentos externos, a argamassa deve ser dimensionada de modo a resistir às variações normais de umidade e temperatura, bem como às ações das intempéries. Para tanto, além de resistência mecânica e aderência adequadas, devem apresentar propriedades hidrofugantes e, no caso de haver contato com o solo, propriedades impermeabilizantes.

As argamassas mistas, objeto de estudo desta pesquisa, são compostas por água, cimento, cal e agregados. Carasek (2010) afirma que, devido à ocorrência de patologias relacionadas à presença de sais solúveis ou matéria orgânica, deve-se utilizar sempre que possível, água potável da rede pública de abastecimento, sendo necessária a realização de testes para garantir a qualidade, quando for empregada água não tratada. Segundo a autora, as eflorescências são resultado da presença dos sais solúveis, que também podem vir a acelerar a pega da argamassa. A ocorrência de matéria orgânica na água de amassamento pode retardar a pega e o endurecimento. Por essa razão não se deve empregar águas com alto teor de sais solúveis e outras substâncias nocivas.

Segundo Ferreira (2010), os cimentos disponíveis no mercado brasileiro são classificados de acordo com as adições, em geral compostas de escória de alto forno, pozolana e *filler* calcário, introduzidas na moagem do clínquer. Bolorino e Cincotto (1997) analisaram a influência de alguns dos tipos de cimento sobre as características das argamassas, concluindo que há influência das adições do cimento na evolução das suas propriedades, como resistência à compressão, resistência à tração e absorção de água.

Carasek (2010) afirma que devido ao controle tecnológico da produção do cimento, as manifestações patológicas em argamassas em geral são ocasionadas pelo mau

proporcionamento dos materiais, como no caso de argamassas muito ricas, que podem ser excessivamente rígidas, apresentando retração, fissuração e descolamento, ou mesmo nas argamassas pobres, onde se observa a ocorrência de desagregação. A autora comenta que os cimentos mais finos e de maior classe de resistência têm alta velocidade de hidratação, principalmente o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e podem proporcionar maior retração na secagem, favorecendo a formação de fissuras que facilitam a entrada de água e comprometem a durabilidade.

A cal é obtida através da calcinação do calcário natural, onde o carbonato de cálcio (CaCO_3) é submetido à temperatura aproximada de 900°C , vindo a se decompor em óxidos de cálcio (CaO) e anidridos carbônicos (CO_2). As rochas calcárias naturais em geral são compostas também, em maior ou menor grau, por carbonato de magnésio, além de impurezas propriamente ditas, como sílica, óxidos de ferro e de alumínio. Do processo de calcinação é obtida a cal viva, constituída de estrutura porosa formada basicamente por óxidos de cálcio, que ao serem hidratados, dão origem ao aglomerante utilizado na construção civil, chamado de cal hidratada ou extinta. As características resultantes do produto final estão relacionadas à natureza e ao processamento da matéria-prima (BAUER, 1994).

A norma NBR 7175 (ABNT, 2003a) define cal hidratada como “pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio” e eventualmente misturado também ao óxido de magnésio, classificando-a nas categorias CH-I, CH-II e CH-III.

De acordo com Carasek (2010), as propriedades plastificantes e de retenção de água, devidas à finura da cal, proporcionam maior extensão de aderência ao facilitar o preenchimento de toda a superfície do substrato. No processo de endurecimento, a cal apresenta um aspecto importante conhecido como restabelecimento ou reconstituição autógena, que consiste na habilidade de evitar fissuras e preencher vazios por meio da carbonatação que ocorre ao longo do tempo, proporcionando maior durabilidade. Com relação à resistência da aderência, estudos indicam que a proporção de hidróxido de magnésio é determinante, de forma que uma argamassa preparada com cal dolomítica, onde ocorre maior retenção de água, apresenta aderência superior a uma argamassa de mesmo traço preparada com cal cálcica.

A norma NBR 13529 (ABNT, 2013a) define agregados miúdos como aqueles “[...] cujos grãos passam pela peneira de malha 4,75 mm”, desde que observados os limites definidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009a).

Para aplicação em revestimentos, em geral o agregado utilizado é a areia natural, constituída essencialmente de quartzo. Também têm sido empregadas areias artificiais, produzidas a partir da britagem de rochas calcárias compostas por carbonatos de cálcio e magnésio. A escolha do agregado utilizado deve ser criteriosa, visto que por representar de 60 a 80% do consumo total de materiais da argamassa, esse material exerce influência direta nas características do estado fresco e sobre o desempenho do revestimento no estado endurecido, além de sua relevância enquanto possível fonte de patologias (CARASEK, 2010).

Os problemas no revestimento relacionados à areia podem ser devidos à sua composição química e mineralógica, de forma que o material deve possuir teor insignificante, preferencialmente nulo, de torrões de argila, carvão, matéria orgânica, pirita, concreções ferruginosas, sais solúveis, mica e argilominerais. Deve-se também se atentar para a reatividade da areia selecionada, devido à deterioração ocasionada pela reação álcali-agregado. Outro fator determinante das patologias é a granulometria, que exerce influência na retração e conseqüente fissuração do revestimento, além do prejuízo para a adesão entre pasta aglomerante e areia quando há excesso de partículas finas. Essas podem vir a recobrir os grãos, reduzindo assim a coesão interna e tornando o revestimento pulverulento (CARASEK, 2010).

De acordo com Carasek (2010), dadas as funções exercidas pelas argamassas, pode-se afirmar que a capacidade de aderência, fortemente influenciada pelo teor e características dos agregados, é essencial ao desempenho e à durabilidade do sistema, especialmente nos revestimentos. Teores elevados de areia na mistura resultam em argamassas com menor resistência de aderência. Por outro lado, por conta de seu papel de esqueleto indeformável, a areia contribui para a redução da retração, elevando a durabilidade da aderência.

Com relação à granulometria, a aderência é prejudicada se o agregado for muito grosso, pois a trabalhabilidade obtida não é adequada para que a aplicação da argamassa ao substrato seja a ideal. Nos casos em que são adotadas areias com alto teor de finos, duas hipóteses procuram explicar a redução da capacidade de aderência. A primeira afirma que isso ocorre porque os finos são succionados pelos poros do substrato, ocupando o lugar de produtos da hidratação do cimento que formariam a interface adequada. A segunda hipótese, baseada na teoria dos poros ativos do substrato, afirma que o excesso de finos faz com que os poros da argamassa sejam menores que os poros do substrato, tornando-os ineficientes para a sucção da argamassa, visto que o fluxo hidráulico entre os poros se dá do maior para o menor (CARASEK, 2010).

2.1.4 Argamassa para isolamento térmico

Em Portugal, já é fabricada, comercialmente, uma argamassa destinada à execução de rebocos exteriores e interiores de isolamento térmico denominada Isodur Reboco Térmico Projetado, da marca Secil Argamassas. Ela é formulada a partir do ligante Cimento Portland, agregados especiais de baixa densidade (Poliestireno Expandido – EPS) e adições que conferem o controle de algumas propriedades fundamentais.

Segundo Frade *et al* (2010), foi realizada, em laboratório, uma bateria de ensaios que resultou nos dados apresentados no Quadro 1 e que, através da análise dos resultados obtidos, a argamassa formulada pertence à classe T1, definida na norma EN 998-1 (MIA, 2015) para os rebocos com características térmicas e, por isso, pode cumprir um papel decisivo num sistema de revestimento de fachada.

Quadro 1: Síntese das características físicas e mecânicas do reboco isolante térmico

Características		Unidades	Referência de ensaio	Valores de ensaio	Classes
Consistência		mm	EN1015-3	132	-
Densidade (produto endurecido)		kg/m ³	EN1015-10	340	-
Absorção de água por capilaridade	Coef. de capilaridade	kg/m ² min ^{0,5}	EN1015-18	0,38	W1
	Coef. de capilaridade (após 24h)	kg/m ²		10,44	-
	Penetração de água (após 24h)	mm		80	-
Permeabilidade ao vapor de água	Coefficiente de difusão ao vapor (μ)	-	EN1015-19	12,2	-
Condutibilidade térmica		W/m.K	EN1745 (EN12664)	0,09	T1
Aderência		N/mm ²	EN1015-12	0,3	Fratura coesiva
Resistência à compressão		N/mm ²	EN1015-11	0,7	CSI
Resistência à tração por flexão		N/mm ²	EN1015-11	0,6	-
Ductilidade		-	-	0,86	-
Reação ao fogo		Classes	EN13501 1	Bd0S0	Bd0S0
Expansão livre	Idades (dias): 1-7-15-90	mm/m	LNEC E 398	0,1-0,2-0,2-0,4	Sem fissuração aparente
Choque de corpo rígido		-	LNEC FE Pa25	Danos superficiais pouco significativos e de fácil reparação	

Fonte: Frade *et al* (2010)

O estudo apresentou, ainda, os valores de resistência térmica em razão de espessuras variadas, conforme o Quadro 2.

Quadro 2: Resistência térmica da argamassa

Espessura da camada de base (cm)	Resistência térmica (m ² .°C/W)
2	0,21
4	0,43
6	0,64
8	0,85
10	1,06

Fonte: Frade *et al* (2010)

Tendo em vista que os materiais utilizados para a confecção dessa argamassa com características de isolamento térmico, à exceção das adições que segundo o fabricante conferem o controle de algumas propriedades fundamentais, são similares aos que foram utilizados para o desenvolvimento do presente projeto, supôs-se que os resultados da argamassa com substituição de areia por resíduo de poliuretano poderiam ser da mesma ordem de grandeza que os apresentados pela argamassa Isodur. O que será verificado no capítulo sobre os resultados.

Por outro lado, a fabricação sem adições pode gerar alguns entraves em relação à possibilidade de utilização das argamassas. A inserção de aditivos, por exemplo, pode reduzir a relação água/materiais secos, o que impacta positivamente nas propriedades mecânicas, pois quanto maior essa relação, menos resistente e mais porosa será a argamassa por causa dos vazios causados pela evaporação do excesso de água da mistura.

2.1.5 Polímeros

Esse item destina-se ao conceito, composição e propriedades dos polímeros, em especial do poliuretano, uma vez que o resíduo utilizado era composto por esse tipo de material. Portanto, para as análises dos resultados encontrados é preciso entender tanto sobre as argamassas quanto sobre os polímeros.

Em Canevarolo Júnior (2002, p. 21), encontra-se a seguinte definição para os polímeros:

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo de monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: **Plásticos, Borrachas e Fibras.**

Os plásticos são materiais poliméricos de alta massa molar (grande número de unidades de repetição), são sólidos na forma de produto acabado e podem ser subdivididos em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos possuem a capacidade de amolecer e tornar-se fluidos, quando submetidos a um aumento de temperatura e pressão, e solidificam novamente quando esse aumento deixa de ser aplicado. Essa alteração é uma transformação física e reversível, eles são, portanto, fusíveis, solúveis e passíveis de processos de reciclagem. Já os termofixos amolecem apenas uma vez com o aquecimento, depois sofrem o processo de cura, no qual acontece uma transformação química irreversível, tornando-os rígidos e são, portanto, infusíveis e insolúveis (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

Os polímeros podem ser materiais orgânicos ou inorgânicos, sintéticos ou naturais. Os que ocorrem naturalmente, derivados de plantas e animais, tais como madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda, têm sido utilizados há muitos séculos. Outros polímeros naturais, tais como proteínas, enzimas, amidos e celulose, são importantes em processos biológicos e fisiológicos nas plantas e nos animais (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Com o advento da tecnologia, tornou-se possível o desenvolvimento de inúmeros polímeros, que são sintetizados a partir de pequenas moléculas orgânicas. Devido ao baixo custo de produção e melhora das propriedades, atualmente substituem amplamente os polímeros naturais. Em algumas aplicações, os plásticos podem substituir peças metálicas e de madeira (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

A utilização comercial de um novo produto depende de suas propriedades e principalmente do seu custo, que resulta basicamente do processo de polimerização e disponibilidade dos monômeros. Os principais fornecedores para a produção dos monômeros e, conseqüentemente, dos polímeros são: celulose, borracha natural, carvão mineral e petróleo (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

De todos os produtos naturais, o petróleo é a fonte mais importante. A destilação do óleo cru fornece várias frações de produtos (GLP, nafta, gasolina, querosene, óleo diesel, graxas parafínicas, óleos lubrificantes e, por fim, piche), sendo que a fração de interesse para os polímeros é a nafta. Essa, após sofrer pirólise a aproximadamente 800°C e catálise, gera várias frações gasosas contendo moléculas saturadas e insaturadas. As moléculas insaturadas (etileno, propileno, butadieno etc) são separadas e aproveitadas para a síntese de polímeros (CANEVAROLO JÚNIOR, 2002).

De acordo com Canevarolo Júnior (2002), os poliuretanos (PU's) pertencem a uma classe de polímeros razoavelmente versátil e são caracterizados pela ligação -NH-CO-O-. São versáteis, pois podem se apresentar de várias formas, tanto como termoplásticos, termofixos, elastômeros ou fibra, na forma expandida ou não. Essas características dependem da estrutura química e funcionalidade dos reagentes empregados na formulação dos mesmos.

Segundo Vilar (2004), os PU's foram desenvolvidos por Otto Bayer, em 1937, tornando-se um material de sucesso no mundo atual. Eles são produzidos pela reação de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um poliol e outros reagentes, tais como: agentes de cura ou extensores de cadeia, contendo dois ou mais grupos reativos; catalisadores; agentes de expansão; agentes antienvelhecimento; retardantes de chama etc. Os isocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos, já os compostos hidroxilados podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade e os poliois podem ser poliéteres, poliésteres ou possuir estrutura hidrocarbônica. A natureza química, bem como a funcionalidade dos reagentes, deve ser escolhida de acordo com as propriedades finais desejadas. É essa flexibilidade que possibilita a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas e faz com que os PU's ocupem posição importante no mercado mundial de polímeros sintéticos de alto desempenho.

O desenvolvimento comercial dos PU's começou na Alemanha, no final da década de 1930, inicialmente com a fabricação de espumas rígidas, adesivos e tintas. Em 1940, iniciou-se a criação dos elastômeros, na Alemanha e Inglaterra e, em 1950, registrou-se a origem das espumas flexíveis. Durante os anos de 1960, o uso dos clorofluorcarbonos (CFC's) como agente de expansão das espumas rígidas resultou no grande emprego desse material como isolante térmico.

Na década de 1970, as espumas semiflexíveis e semirrígidas revestidas com materiais termoplásticos foram largamente usadas na indústria automotiva. Já nos anos de 1980, houve o crescimento da moldagem por injeção e reação (RIM), aumentando a necessidade dos estudos das relações entre estrutura molecular e propriedades dos PU's. A partir da década de 1990, com o aumento da preocupação com o meio ambiente, começou-se uma busca de alternativas de sistemas que não possuam compostos orgânicos voláteis (VOC's) para a substituição dos CFC's, bem como de processos de reciclagem dos PU's.

Na tecnologia dos PU's, existem cinco reações principais dos isocianatos: com poliois (álcoois) formando poliuretano; com aminas formando poliureias; com água originando poliureia e liberando CO₂ que é o principal agente de expansão nas espumas de PU; com

grupos uretanos e com ureia resultando na formação de ligações cruzadas alofanato e biureto, respectivamente (VILAR, 2004).

A reação de polimerização entre um álcool e um isocianato formando o PU é exotérmica e libera cerca de 24 kcal/mol de uretano formado. Já a reação de expansão dos isocianatos com água resulta na formação de ureia e CO₂. Essa reação é de extrema importância na fabricação das espumas de PU, também é bastante exotérmica e desprende cerca de 47 kcal/mol de água (VILAR, 2004).

O resíduo de poliuretano utilizado nesta pesquisa, segundo o fabricante das pranchas, é composto pela mistura de um polioli com um pré-polímero, sendo este resultante da reação do TDI (Tolueno diisocianato) na proporção 80/20 e de poliois de poliéter à base de sacarose fenólicos com poliálcoois de polietileno. O ANEXO A apresenta as informações gerais fornecidas pelo fabricante.

2.1.6 Produção de pranchas de surfe

A indústria do surfe no Brasil está em crescente ascensão, principalmente após a inclusão do esporte como modalidade olímpica, a partir de Tóquio 2020. Segundo Sorima Neto (2016), o Instituto Brasileiro de Surfe (Ibrasurf) estima que, atualmente, existem 3 milhões de praticantes do esporte no país. Os números desse mercado são bastante relevantes, o que desperta grande preocupação principalmente em relação à geração e destinação dos resíduos gerados com a produção das milhares de pranchas por ano.

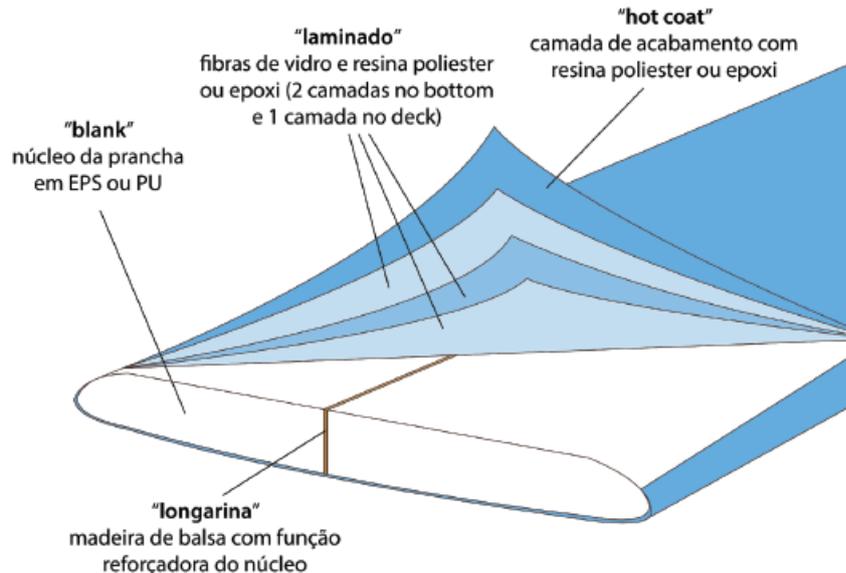
Existem alguns estudos que visam a minimizar o impacto ambiental gerado por essa indústria, como é o caso do trabalho realizado por Grijó (2004), no qual substituiu a areia por resíduos de Poliuretano (PU), para a produção de blocos de concreto para vedação, obtendo resistências satisfatórias, com valores superiores a 2,0 MPa, superando o mínimo exigido por norma para esse tipo de utilização, que é de 1,5 MPa para blocos de vedação utilizados com furos na horizontal.

A fabricação bem como os materiais utilizados na produção de pranchas de surfe sofreram grandes modificações ao longo do tempo. Inicialmente, as mesmas eram confeccionadas em madeira, sendo extremamente grandes e pesadas. Com o aumento da tecnologia e com novos materiais disponíveis, foi-se aprimorando esta produção, tendo a grande revolução com a introdução do poliuretano (JESUS *et al.*, 2013).

O tipo de prancha mais utilizado atualmente é aquele que utiliza o poliuretano (PU) como material do bloco (*blank*), revestido por uma matriz polimérica de resina de poliéster

insaturado (UPR) reforçada com fibra de vidro. Pranchas produzidas com bloco de espuma de poliestireno expandido (EPS) e revestidas por matriz polimérica tipo epóxi também têm sido produzidas, mas em volume muito menor. Outros materiais utilizados no processo são os solventes, aceleradores, catalisadores, entre outros. A Figura 1 mostra os materiais que compõem uma prancha de surfe (PIERINI, 2016).

Figura 1: Materiais constituintes das pranchas de surfe



Fonte: Pierini (2016)

De acordo com Grijó e Brügger (2011), a produção da prancha envolve diversos processos e em cada um deles uma gama de resíduos são gerados. Inicia-se com a modelagem, ou *shape*, como é comumente denominada a etapa onde o bloco de PU ou EPS é cortado e recebe o acabamento, onde as imperfeições são corrigidas com ferramentas apropriadas, conforme apresentado na Figura 2 (a-d). Fábricas modernas utilizam processos automatizados para a modelagem, mas, ainda assim, é necessário que o acabamento final seja executado manualmente (GRIJÓ, 2004); (BARCELOS, MAGNAGO e LERIPIO, 2017); (JESUS *et al.*, 2013); (PIERINI, 2016).

Figura 2: Etapa de modelagem do bloco



Fonte: Pierini (2016)

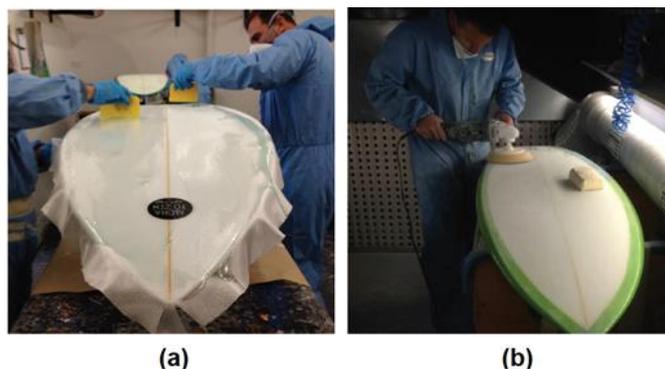
O resíduo nesta etapa é composto por PU ou EPS em forma de pó ou farpa, mas se pode encontrar também pós ou farpas de madeira proveniente da longarina. Foi nessa etapa que se recolheu o resíduo utilizado nessa pesquisa (Figura 3). O resíduo gerado na fábrica onde se deu o recolhimento é composto de poliuretano, pois não estavam sendo fabricadas pranchas com blocos em EPS. As demais etapas, tais como laminação e pintura são realizadas em outros ambientes e não representam risco de contaminação para o resíduo.

Figura 3: Resíduo de poliuretano coletado na fábrica para ser utilizado nesta pesquisa



Após o bloco receber sua forma final, é submetido à etapa de pintura, onde é utilizado compressor de ar com regulador de pressão, aerógrafo, pistola de tinta, fita crepe e tintas vinílicas. Após a secagem completa, pode-se iniciar a etapa de laminação, que consiste na colocação do tecido de fibras de vidro sem emendas sobre a superfície da prancha, seguida da aplicação da resina, como mostrado na Figura 4 (GRIJÓ, 2004); (BARCELOS, MAGNAGO e LERIPIO, 2017); (JESUS *et al.*, 2013); (PIERINI, 2016).

Figura 4: Etapa de laminação e acabamento da prancha



Fonte: Pierini (2016)

Em todas as etapas da fabricação, vários tipos de resíduos são gerados, por isso esse tipo de atividade precisa de uma maior atenção dos órgãos ambientais, principalmente em relação às pequenas fábricas artesanais que, geralmente, não têm a preocupação adequada com os descartes. Esses microempresários deveriam apresentar preocupação não só com a

gestão desses rejeitos, mas principalmente com a otimização dos seus processos, pois a redução da geração de resíduos ocasiona consequentemente a redução nos custos de produção, diminuindo os gastos com matérias-primas (JESUS *et al.*, 2013).

2.2 Desempenho térmico

O desempenho térmico, tanto dos materiais, quanto dos sistemas construtivos, está relacionado com as propriedades e características dos materiais constituintes. Outro fator que também influencia nesse comportamento térmico são as trocas de calor a que os materiais ou sistemas construtivos estão submetidos. Assim, este capítulo aborda os conceitos necessários para um completo entendimento sobre o desempenho térmico.

2.2.1 Trocas térmicas

Segundo Kreith, Manglik e Bohn (2014), o calor se move basicamente na ocorrência de um gradiente de temperatura, passando de uma região de alta temperatura para uma de baixa temperatura. Para se entender o comportamento térmico dos variados sistemas de fechamentos existentes é preciso primeiramente conhecer os processos de transferência de calor, pois esses determinam o balanço térmico e influenciam a variação de temperatura no interior das edificações (BATISTA, LAMBERTS e GÜTHS, 2011).

A literatura referente à transferência de calor geralmente reconhece três modalidades distintas de transmissão de calor: condução, radiação e convecção (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014). Para a análise dos experimentos realizados nessa pesquisa através do monitoramento de temperatura faz-se necessário o entendimento dos conceitos e equações básicas que regem cada um dos três modos de transferência de calor, que estão resumidos a seguir.

2.2.1.1 Radiação

A radiação ocorre entre as superfícies de dois corpos separados por um fluido ou pelo vácuo. A quantidade de energia, que deixa uma superfície como calor radiante, depende da temperatura absoluta e da natureza da superfície. Um radiador perfeito é chamado de corpo negro, já os corpos reais não satisfazem às especificações de um radiador ideal e emitem radiação em uma taxa mais baixa do que os corpos negros (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014).

Em muitos problemas de Engenharia, a radiação é combinada com outros modos de transferência de calor, por isso a solução de tais problemas pode ser simplificada usando-se o

coeficiente de transferência de calor de radiação (h_r) (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014). De acordo com Kreith, Manglik e Bohn (2014), o fluxo de calor envolvido nesse processo de transmissão pode ser representado pela equação (1):

$$q_r = h_r(T - T_r) \quad (1)$$

Onde:

q_r é a intensidade do fluxo térmico radiante [W/m^2];

h_r é o coeficiente de trocas térmicas por radiação [$W/(m^2.K)$];

T é a temperatura da superfície da parede considerada [K];

T_r é a temperatura radiante relativa às demais superfícies [K].

Sabe-se que a principal fonte de energia radiante é o Sol e em regiões de baixas latitudes, como é o caso do Nordeste brasileiro, a radiação solar é o fator primordial que faz com que as edificações tenham ganhos térmicos. Por isso, é necessária a análise do comportamento dos materiais utilizados nos fechamentos dos sistemas construtivos para que se determine a eficiência energética das edificações (BEZERRA, 2003).

2.2.1.2 Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície sólida e um fluido, que pode ser um líquido ou um gás. O fluido é composto por um grande número de moléculas que se movem em razão de uma força externa, que pode ser devida a um gradiente de densidade, como é o caso da convecção natural, devida a uma diferença de pressão gerada por bomba ou ventilador, ou ainda, devida a uma combinação dos dois (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014).

Para Bezerra (2003), quando um fluido é aquecido forma-se um gradiente de temperatura que está associado a um gradiente de densidade, provocando deslocamento da massa do fluido de forma cíclica, originando as chamadas correntes convectivas. Por outro lado, se o fluido escoar sobre uma superfície sólida, estando ambos a temperaturas distintas, haverá troca de calor entre a superfície e o fluido. Se a agitação ou escoamento do fluido for feito mecanicamente então tem-se a convecção forçada, já se a movimentação for originada apenas pela diferença de densidade, tem-se a convecção livre (ou natural).

Segundo Kreith, Manglik e Bohn (2014) pode-se calcular a taxa de transferência de calor por convecção entre uma superfície e um fluido, através da equação (2):

$$q_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde:

q_c é a taxa de transferência de calor por convecção [W];

A é a área de transferência de calor [m²];

\bar{h}_c é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção sobre a área A [W/(m².K)];

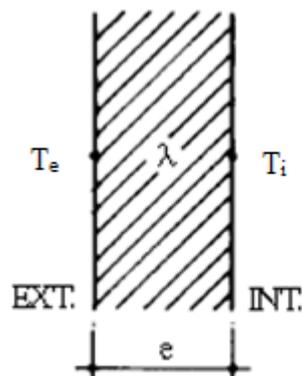
ΔT é a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido [K].

Segundo Kreith, Manglik e Bohn (2014), para a maioria das aplicações de engenharia interessam os valores médios em detrimento dos locais, pois o coeficiente de transferência de calor por convecção pode variar de ponto a ponto. Por isso adota-se o valor numérico do \bar{h}_c , que em um sistema depende da geometria da superfície, da velocidade, bem como das propriedades físicas do fluido e, muitas vezes, da diferença de temperatura ΔT .

2.2.1.3 Condução

Segundo Frota e Schiffer (2003), a troca térmica denominada condução ocorre entre dois corpos que se tocam e se encontram com temperaturas distintas ou ainda entre partes de um mesmo corpo que também apresentam temperaturas diferentes, como apresentado na Figura 5, onde $T_e \neq T_i$. Sempre que um gradiente de temperatura ocorre em meio sólido, o calor fluirá da região de temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa. A taxa na qual o calor é transferido por condução é proporcional ao gradiente de temperatura e à área por meio da qual o calor é transferido (KREITH, MANGLIK e BOHN, 2014).

Figura 5: Trocas de calor por condução entre partes de um mesmo corpo



Fonte: Frota e Schiffer (2003)

Segundo Frota e Schiffer (2003), pode-se calcular a intensidade do fluxo térmico devido à condução, através da equação (3):

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{e} (T_e - T_i) \quad (3)$$

Onde:

q_{cd} é a intensidade do fluxo térmico por condução [W/m²];

λ é o coeficiente de condutividade térmica do material [W/(m.K)];

e é a espessura do corpo [m];

T_e é temperatura da superfície externa [K];

T_i é temperatura da superfície interna [K].

A condutividade térmica é uma propriedade inerente de cada material e desempenha papel fundamental no processo de troca de calor por condução. O coeficiente de condutividade térmica indica a quantidade de calor que fluirá através de uma determinada área por unidade de tempo: quanto maior a condutividade térmica mais calor fluirá de uma superfície para a outra.

2.2.2 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas são respostas dos materiais à aplicação de calor. Por exemplo, à medida que um sólido absorve energia na forma de calor, aumenta sua temperatura e dimensões (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

Um edifício que se preocupa com as propriedades térmicas de seus materiais se torna mais sustentável, ambientalmente correto e tende a diminuir seu consumo de energia. Um material será um bom condutor ou um bom isolante térmico dependendo de algumas propriedades, tais como: condutividade térmica, resistência térmica, capacidade térmica, calor específico e difusividade térmica. A seguir, serão abordados os conceitos referentes a cada uma delas.

2.2.2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica, segundo a norma NBR 15220-1 (ABNT, 2005e), é a propriedade física de um material, na qual se verifica um fluxo de calor constante quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme. Quanto maior o valor da condutividade mais facilmente se dará a condução do fluxo de calor no material. Assim, isolantes térmicos possuem condutividades térmicas baixas, implicando na dificuldade do fluxo.

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a condutividade térmica do material (λ), depende da densidade do material, pois a matéria é mais condutora que o ar contido nos poros do mesmo. Por isso, materiais porosos tendem a ter melhores características isolantes. No estudo realizado por Hua-Yueh, Han-Sheng e Chen-Pei (2020), segundo os autores não apenas a alta porosidade do compósito estudado afetou o valor de λ , mas também a adição de material com menor coeficiente de condutividade térmica pode oferecer um melhor isolamento térmico.

De acordo com Santos (2003), a condutividade térmica possui um papel crítico no desempenho de vários materiais em processos que envolvem altas temperaturas. Quando se necessita minimizar as perdas de calor, são exigidos baixos valores de condutividade. Por outro lado, para algumas operações de aquecimento que necessitam da transferência de calor de uma parte para a outra, usam-se materiais de condutividade térmica mais alta. Assim, dados confiáveis de condutividade térmica são essenciais na seleção de um material, para que o mesmo possa ter o melhor desempenho possível em uma dada aplicação.

2.2.2.2 Resistência térmica

Outro fator relevante para o estudo do comportamento térmico das construções é a análise da chamada resistência térmica, que pode ser traduzida como a facilidade ou a resistência exercida por um determinado material em relação ao deslocamento do fluxo de calor em certa direção. A mesma é inversamente proporcional à condutividade térmica. Assim, materiais com baixas condutividades tendem a ter uma grande resistência à passagem do fluxo de calor de uma face para a outra. De acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005f), pode ser calculada através da equação (4):

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (4)$$

Onde:

R é a resistência térmica de um componente [(m².K)/W];

e é a espessura da camada [m];

λ é a condutividade térmica do material [W/m.K].

A resistência térmica é bastante influenciada pela espessura do material ou componente (no caso de um material heterogêneo). Assim, quanto maior a espessura utilizada,

maior será a resistência oferecida à passagem de calor (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

2.2.2.3 Capacidade térmica

A norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005f) traz a definição da capacidade térmica como sendo a quantidade de calor necessária para variar, em uma unidade, a temperatura de um sistema. Representa numericamente a razão entre a variação de energia Q (energia ganha ou cedida) e a variação de temperatura resultante (ΔT), isto é, a medida da capacidade de receber ou perder calor para uma dada variação de temperatura e é expressa em J/K (CALLISTER e RETHWISCH, 2013). Pode ser representada de acordo com a equação (5):

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (5)$$

Onde:

C é a capacidade térmica [J/K];

Q é a variação de energia [J];

ΔT é a variação de temperatura [K].

Segundo Ramalho Júnior, Ferraro e Soares (2007), um corpo de baixa capacidade térmica troca quantidades de calor relativamente pequenas para sofrer uma dada variação de temperatura. Por exemplo, as fagulhas de um esmeril, apesar de apresentarem altas temperaturas, não queimam a pele do operador, devido à baixa capacidade térmica que faz com que percam pouco calor até que o equilíbrio térmico se estabeleça.

Por outro lado, de acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), um componente de grande capacidade térmica precisa de grande quantidade de calor para variar a sua temperatura em 1°C. Essa propriedade térmica está intimamente ligada à inércia térmica, pois o material ao ser submetido a um aumento de temperatura retém uma parte do calor em seu interior, liberando-o mais tarde. Quanto maior a inércia térmica, maior o calor retido.

2.2.2.4 Calor específico

O calor específico é a capacidade térmica por unidade de massa do material. O mesmo é definido como a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa desse material em um grau. É uma propriedade decisiva de um material, quando usado em aplicações em altas temperaturas (SANTOS, 2003). Na norma NBR 15220-

1 (ABNT, 2005e), é descrito como o quociente da capacidade térmica pela massa e é dado em J/(kg.K).

Em Ramalho Júnior, Ferraro e Soares (2007), tem-se que a quantidade de calor (Q) recebida ou cedida por um corpo é diretamente proporcional à sua massa (m) e à variação de temperatura (ΔT) sofrida pelo corpo, o que pode ser representado pela chamada Equação Fundamental da Calorimetria (6):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (6)$$

Onde:

Q é a variação de energia [J];

m é a massa [kg];

c é o calor específico [J/(kg/K)];

ΔT é a variação de temperatura [K].

O coeficiente de proporcionalidade c é o calor específico, que é uma característica do material que constitui o corpo. Se esse coeficiente for isolado na fórmula, vê-se que a equação se transforma na razão entre a capacidade térmica descrita na equação (5) pela massa do corpo analisado, equação (7):

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (7)$$

Onde:

c é o calor específico [J/(kg/K)];

Q é a variação de energia [J];

m é a massa [kg];

ΔT é a variação de temperatura [K].

2.2.2.5 Difusividade térmica

Conforme Santos (2003), as três propriedades físicas de um material mais importantes do ponto de vista de cálculos térmicos são a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico. Essas três propriedades estão relacionadas entre si pela equação (8):

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (8)$$

Onde:

a é a difusividade térmica do material [m²/s];

λ é a condutividade térmica do material [W/m.K];

ρ é a densidade do material [kg/m³];

c_p é o calor específico a pressão constante [J/kg.K].

Segundo Flores-Alés *et al.* (2020), a difusividade térmica (a) é uma qualidade específica de cada material que determina a condução do calor através do mesmo quando suas condições mudam. O parâmetro a descreve a velocidade com que o material reage a uma mudança de temperatura. Em sua pesquisa, os autores obtiveram uma diminuição da condutividade térmica à medida que substituíram agregado natural por vidro moído, por conseguinte a difusividade térmica também foi reduzida, o que favoreceu um atraso na resposta da argamassa modificada à transmissão do calor e maior capacidade de isolamento térmico.

Essa propriedade tem considerável interesse em aplicações onde materiais são expostos a altas temperaturas por um intervalo de tempo tão curto que o equilíbrio térmico sequer é atingido, isto é, quando ocorrem choques térmicos (SANTOS, 2003).

2.2.3 Desempenho térmico dos fechamentos

De acordo com Borges (2009), o isolamento térmico é de extrema importância para que seja garantido um mínimo de conforto térmico aos usuários em ambientes e estruturas, sendo necessário, para isso, o isolamento de paredes e coberturas. Tendo em vista que cada ambiente possui necessidades particulares a depender do clima da região e materiais constituintes, esse isolamento deve ser adequado a cada caso. Por isso, há a necessidade da análise do desempenho térmico a partir de protótipos experimentais, auxiliados em alguns casos por simulações, o que possibilita a verificação da eficiência real do material isolante.

Segundo Bezerra (2003), a edificação absorve energia térmica do ambiente externo através dos mecanismos de radiação e convecção, provocando a elevação da temperatura na sua face externa. Em consequência, ocorrerá o fenômeno da condução com o fluxo de calor em direção à face interna, pois essa apresentará uma temperatura menor. Posteriormente, haverá radiação e convecção com o fluxo de calor oriundo da face interna da parede em

direção ao ambiente interno. A intensidade desses fluxos dependerá, dentre outros fatores, da espessura da parede, da capacidade calorífica do material, da sua densidade aparente e da sua condutividade térmica.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os procedimentos metodológicos necessários para a realização desta pesquisa consistem em:

- Caracterização dos materiais que serão utilizados para a produção das argamassas avaliadas;
- Análise das propriedades mecânicas das argamassas produzidas;
- Análise das propriedades térmicas das argamassas produzidas;
- Análise das trocas térmicas ocorridas em placas de argamassa submetidas a uma fonte de calor artificial.

A seguir, tem-se a descrição detalhada de cada procedimento.

3.1 Caracterização dos materiais e produção das argamassas

Para a produção das argamassas avaliadas nessa pesquisa, foram empregados os mesmos materiais já caracterizados no estudo realizado por Sena, Teixeira e Labaki (2018): cimento Portland CP V-ARI, cal hidratada CH-I, areia natural, água potável e resíduo de poliuretano.

O resíduo de poliuretano (PU) foi obtido na etapa inicial da fabricação da prancha de surfe, denominada shape ou modelagem, onde o bloco de espuma é cortado e recebe o acabamento para o formato desejado, gerando pós e farpas de poliuretano e, eventualmente, de madeira da longarina. As etapas seguintes, que utilizam resina e fibra de vidro, são realizadas em ambientes separados, por isso não representam risco de contaminação para o resíduo de PU.

O resíduo de PU, coletado na fábrica de pranchas de surfe, foi previamente peneirado na peneira 4,75 mm para que pudesse ser utilizado como um agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009a).

3.1.1 Caracterização dos materiais

Primeiramente se fez necessária a determinação do módulo de finura do cimento e das massas específica e unitária de cada componente da mistura, a fim de se determinar o consumo em massa dos materiais, de acordo com o traço em volume adotado. Fez-se necessária, também, a análise granulométrica, tanto da areia, quanto do resíduo utilizado.

Essa caracterização dos materiais foi realizada através das normas NBR 16605 (ABNT, 2017), que especifica como deve ser feita a determinação da massa específica do cimento; da NBR NM 45 (ABNT, 2006), que trata sobre a determinação da massa unitária e do volume de vazios dos agregados; da NBR 11579 (ABNT, 2012), que discorre sobre a determinação do índice de finura do cimento; da NBR 7175 (ABNT, 2003a), que apresenta os requisitos para a cal hidratada utilizadas em argamassas; da NBR NM 52 (ABNT, 2009b), que especifica como devem ser determinadas as massas específicas e aparentes de agregados miúdos e da NBR NM 248 (ABNT, 2003b), que trata sobre a determinação da composição granulométrica de agregados.

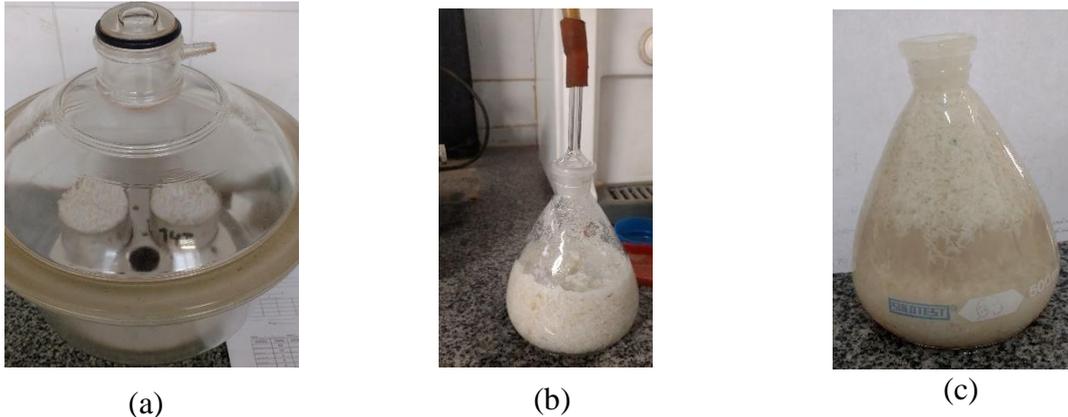
A determinação da massa unitária do resíduo foi realizada através do mesmo ensaio utilizado para a areia, através da norma NBR NM 45 (ABNT, 2006). Porém, a massa específica do resíduo, devido à sua baixa densidade, não foi possível ser determinada através do ensaio da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009b). Assim, a determinação da massa específica foi feita utilizando uma adaptação do método do picnômetro utilizado correntemente em laboratórios de solos de acordo com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

Primeiramente, o material foi submetido à secagem em estufa a 107°C por 24h. Após a retirada, as cápsulas contendo o material a ser ensaiado foram colocadas no dessecador para resfriamento, conforme a Figura 6 (a). Em seguida, o resíduo foi colocado em 2 picnômetros. Anotou-se o peso de cada picnômetro vazio e o peso do conjunto picnômetro + resíduo. Em cada picnômetro foi acrescentado 250 ml de água destilada e então colocou-se a mistura na bomba de vácuo para retirada completa do ar incorporado ao resíduo por 15 minutos, agitando a cada 5 minutos para ajudar na homogeneização da mistura, conforme a Figura 6 (b). Passados os 15 minutos, foram acrescentados mais 50 ml de água destilada e refeito o procedimento na bomba de vácuo.

Após a retirada dos picnômetros da bomba, os mesmos foram cheios completamente de água destilada e colocados em repouso por 1 hora a fim de que a temperatura fosse normalizada com a ambiente, pois devido à pressão negativa a que tinham sido expostos, a temperatura baixou e os picnômetros ficaram gelados. Nesse período de descanso também se esperou que o material sedimentasse no fundo do recipiente, já que grande parte estava flutuando na água como mostra a Figura 6 (c). Passado esse período, os picnômetros com água e resíduo foram pesados e posteriormente a mistura foi descartada e encheu-se os picnômetros com água destilada e procedeu-se à nova pesagem.

Houve a necessidade de adaptação do ensaio, pois não foi possível o fechamento correto da tampa do picnômetro de modo a vedá-lo adequadamente, pois nas paredes da boca do picnômetro tinha muito resíduo o que impediu esse procedimento. Assim, a tampa foi pesada externamente e não fechando o picnômetro, como é o comum no ensaio realizado com solos através da norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

Figura 6: Ensaio para determinação da massa específica do resíduo de poliuretano



3.1.2 Produção das misturas de argamassas

Segundo Carasek (2010), não existe método racional de dosagem para as argamassas totalmente consagrado no Brasil, logo, o método de dosagem utilizado é empírico. Assim, a determinação da proporção em volume foi baseada em traços tradicionalmente usuais de fabricação de argamassas, adotando-se o traço em volume 1:1:8 (cimento:cal:areia) para a mistura de referência. Em relação aos teores de substituição da areia pelo resíduo estudado, foram adotados os percentuais de 0%, 50%, 75% e 100%. As argamassas foram identificadas como AR00, AR50, AR75 e AR100, respectivamente. Sendo o AR00 a argamassa de referência, sem adição de resíduos.

Foram confeccionadas argamassas mistas (cimento e cal) através da utilização de um misturador mecânico (argamassadeira), seguindo-se o procedimento de preparo da mistura recomendado na norma NBR 16541 (ABNT, 2016b). Para a fabricação dessas argamassas, foram adotados os mesmos dados de dosagem apresentados no estudo de Sena, Teixeira e Labaki (2018). Para manter a proporção em volume adotada, o peso da areia, dos aglomerantes e do resíduo foram adaptados para cada mistura de argamassa com base nas densidades de massa.

As relações a/c (água/cimento) e a/ms (água/materiais secos) foram ajustadas, levando-se em consideração a consistência desejada para a mistura, avaliada através do ensaio

de determinação do índice de consistência (IC) apresentado na norma NBR 13276 (ABNT, 2016a).

3.2 Determinação das propriedades mecânicas

Para caracterização das argamassas estudadas e análise dos requisitos básicos especificados na norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) foram realizados os seguintes ensaios:

- Resistência à tração na flexão e à compressão de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b);
- Densidade de massa aparente no estado endurecido de acordo com a norma NBR 13280 (ABNT, 2005c);
- Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade de acordo com a norma NBR 15259 (ABNT, 2005h);
- Densidade de massa no estado fresco de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT, 2005a);
- Resistência potencial de aderência à tração de acordo com a norma NBR 15258 (ABNT, 2005g).

3.2.1 Resistência à tração na flexão

A norma NBR 13279 (ABNT, 2005b) foi utilizada como base para a realização dos ensaios de determinação da resistência à tração na flexão das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, para cada idade ensaiada devem ser fabricados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16cm (profundidade, largura e comprimento, respectivamente). Por isso, foram preparados seis corpos de prova para cada tipo de argamassa, sendo três para a idade de 14 dias e os outros três para a idade de 28 dias (Figura 7).

Figura 7: Corpos de prova prismáticos 4x4x16 cm



O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com a utilização da máquina universal de ensaios, marca EMIC[®], modelo DL 20000, do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Universidade Federal de Sergipe. Cada corpo de prova foi posicionado nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não ficasse em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga. Em seguida foi aplicada uma carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a equação (9) conforme recomenda a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b):

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (9)$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão [MPa];

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma [N];

L é a distância entre os suportes [mm].

3.2.2 Resistência à compressão

A norma NBR 13279 (ABNT, 2005b) foi utilizada como base para a realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, para cada idade ensaiada devem ser utilizadas as metades dos três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16cm (profundidade, largura e comprimento, respectivamente) do ensaio de flexão. Por isso, foram utilizados no total doze corpos de prova para cada tipo de argamassa, sendo seis para a idade de 14 dias e os outros seis para a idade de 28 dias (Figura 8).

Figura 8: Metades dos corpos de prova prismáticos ensaiados à flexão



O ensaio de resistência à compressão foi realizado com a utilização da máquina universal de ensaios, marca EMIC[®], modelo DL 20000, do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da Universidade Federal de Sergipe. Cada corpo de prova foi posicionado no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não ficasse em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga. Em seguida foi aplicada uma carga de 500 ± 50 N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão foi calculada segundo a equação (10):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (10)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão [MPa];

F_c é a carga máxima aplicada [N];

1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 mm x 40 mm [mm²].

3.2.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A norma NBR 13280 (ABNT, 2005c) foi utilizada como base para a realização do ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, devem ser fabricados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16cm (profundidade, largura e comprimento, respectivamente). Os corpos de prova devem ser moldados e curados até a idade de 28 dias, conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b).

Após o período de cura determinou-se, com auxílio de paquímetro, a altura, a largura e o comprimento de cada corpo de prova em duas posições, em centímetros, arredondando ao décimo mais próximo. Em seguida, determinou-se a massa do corpo de prova utilizando-se uma balança com precisão de 0,1 g. Registrou-se a massa em gramas, arredondando ao décimo mais próximo. A densidade de massa foi calculada através da equação (11):

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{l.h.c} 1000 \quad (11)$$

Onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$ é a densidade de massa [kg/m³];

m é a massa do corpo de prova [g];

l é a largura do corpo de prova [cm];

h é a altura do corpo de prova [cm];

c é o comprimento do corpo de prova [cm].

3.2.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

A norma NBR 15259 (ABNT, 2005h) foi utilizada como base para a realização do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, devem ser fabricados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16cm (profundidade, largura e comprimento, respectivamente). Os corpos de prova devem ser ensaiados aos 28 dias de idade.

Primeiramente, lixou-se a superfície do corpo de prova com lixa grossa, limpando ao final com pincel. Foi determinada a massa inicial, em gramas, de cada corpo de prova. Posteriormente, os corpos de prova foram posicionados com a face quadrada sobre os suportes no recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies. O nível da água foi mantido constante a 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água (Figura 9).

Figura 9: Corpos de prova durante o ensaio de absorção de água por capilaridade



A partir da colocação dos corpos de prova, em contato com a água, determinou-se a massa de cada corpo de prova, em gramas, aos 10 minutos e aos 90 minutos. Os corpos de prova foram previamente enxutos antes de cada pesagem. Completada a pesagem aos 10 minutos, os corpos de prova foram imediatamente posicionados no recipiente de ensaio. A absorção de água foi calculada para cada tempo, dividindo a variação de massa pela área da seção transversal do corpo de prova em contato com a água, de acordo com a equação:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (12)$$

Onde:

A_t é a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo [g/cm²];

m_t é a massa do corpo de prova em cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo [g];

m_0 é a massa inicial do corpo de prova [g];

t corresponde aos tempos de 10 min e 90 min [s];

16 é a área do corpo de prova em contato com a água [cm²].

Segundo a norma NBR 15259 (ABNT, 2005h), por definição, o coeficiente de capilaridade é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min e aos 90 min, considerando-se como abscissa a raiz do tempo e como ordenada a absorção de água por capilaridade. Pode-se considerar também que o coeficiente de capilaridade é aproximadamente igual ao valor das diferenças de massa aos 90 min e aos 10 min. Assim, foi calculado o resultado para cada corpo de prova de acordo com a equação (13):

$$C = m_{90} - m_{10} \quad (13)$$

Onde:

C é o coeficiente de capilaridade [g/dm².min^{1/2}];

m_{90} é a massa do corpo de prova aos 90 minutos [g];

m_{10} é a massa do corpo de prova aos 10 minutos [g].

3.2.5 Densidade de massa no estado fresco

A norma NBR 13278 (ABNT, 2005a) foi utilizada como base para a realização do ensaio de determinação da densidade de massa no estado fresco das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, deve ser utilizado um recipiente rígido, cilíndrico, de material não absorvente, com capacidade aproximada de 400 cm³, altura aproximada de 85 mm e diâmetro aproximado de 80 mm. O recipiente utilizado foi feito a partir de um tubo de PVC fechado em uma das extremidades conforme a Figura 10.

Figura 10: Recipiente utilizado para determinação da densidade de massa no estado fresco



Primeiramente, fez-se as pesagens recomendadas na norma:

- Pesou-se o recipiente vazio com uma placa de vidro e registrou-se a massa encontrada, denominada m_v ;
- Pesou-se o recipiente cheio com água destilada e com a placa de vidro depois de se ter rasado devidamente, garantido a não permanência de bolhas de ar sobre a placa. Essa massa foi registrada como m_a .

Com os dados de m_v e m_a , a norma NBR 13278 (ABNT, 2005a) apresenta o cálculo do volume (v_r) do recipiente de acordo com a equação (14). Esse cálculo só é possível, pois a densidade da água destilada à temperatura ambiente é de 1g/cm^3 .

$$v_r = m_a - m_v \quad (14)$$

Onde:

v_r é o volume do recipiente [cm^3];

m_a é a massa do recipiente com água destilada e com a placa de vidro [g];

m_v é a massa do recipiente vazio com a placa de vidro [g].

As argamassas utilizadas neste ensaio foram preparadas conforme a norma NBR 13276 (ABNT, 2016a). Imediatamente após a preparação da argamassa, introduziu-se suavemente, com auxílio de uma colher, porções de argamassa no recipiente cilíndrico, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais.

Em cada camada, foram aplicados 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa. Cada golpe correspondeu à entrada e à saída de uma espátula metálica na posição vertical. Teve-se o cuidado de na primeira camada, a espátula não bater fortemente contra o fundo do

recipiente e, nas demais camadas, a espátula foi aplicada somente com a força necessária para penetrar na superfície da camada imediatamente inferior.

Após a execução e golpeamento de cada camada, foram efetuadas três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm. Pois, ao final, não deveriam ficar vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Em seguida, o recipiente foi rasado com uma espátula, em duas passadas ortogonais entre si, em movimentos de vai-e-vem, com inclinação de 45° em relação à superfície da argamassa. Por fim, após a eliminação de qualquer partícula ou água aderida à parede externa do recipiente, procedeu-se à pesagem do molde com a argamassa e a placa de vidro (m_c).

A densidade de massa da argamassa no estado fresco foi determinada através da equação (15):

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000 \quad (15)$$

Onde:

d é a densidade de massa no estado fresco [kg/m³];

m_c é a massa do recipiente com argamassa e com a placa de vidro [g];

m_v é a massa do recipiente vazio com a placa de vidro [g];

v_r é o volume do recipiente [cm³].

3.2.6 Resistência potencial de aderência à tração

A norma NBR 15258 (ABNT, 2005g) foi utilizada como base para a realização do ensaio de determinação da resistência potencial de aderência à tração das argamassas estudadas nesta pesquisa. De acordo com tal norma, a resistência de aderência à tração é a tensão máxima aplicada por uma carga perpendicular à superfície da argamassa aplicada no substrato e o corpo de prova deve ser parte da argamassa, de seção circular, com diâmetro de 50 mm. Blocos de vedação cerâmicos foram utilizados como substrato para esse ensaio.

A preparação das amostras iniciou-se com a colocação do bloco cerâmico na posição horizontal sobre uma base plana e firme, depois houve a limpeza da superfície com pincel e a fixação de um gabarito para delimitação da espessura (20 mm) da área que seria revestida. Em seguida, foram produzidas argamassas de acordo com a norma NBR 13276 (ABNT, 2016a). As porções de argamassa foram aplicadas no bloco cerâmico com auxílio de uma colher de pedreiro em duas camadas. A primeira, de aproximadamente 5 mm, foi bem pressionada

sobre o substrato, de forma a eliminar os vazios e garantir que toda a superfície estivesse coberta com a argamassa (Figura 11). Imediatamente após a conclusão da primeira camada, foi aplicada a segunda, pressionando-se novamente e deixou-se um ligeiro excesso de material. A superfície foi rasada com uma régua metálica, o que proporcionou um acabamento uniforme, mas sem deixá-la lisa. Por fim, o gabarito foi removido cuidadosamente, não afetando a argamassa aplicada.

Figura 11: Aplicação da primeira camada da argamassa no substrato para ensaio de aderência



De acordo com a norma NBR 15258 (ABNT, 2005g) devem ser ensaiados dez corpos de prova, distribuídos no substrato, espaçados em no mínimo 40 mm das bordas e no mínimo em 20 mm entre si. Para essa pesquisa foram revestidos 6 blocos, o que resultou em 12 corpos de prova para cada tipo de argamassa. Sendo que dos 12 corpos de prova, apenas 10 deles foram ensaiados, conforme determina a referida norma.

Após a cura de 27 dias (1 dia antes do rompimento), os blocos revestidos foram cortados com serra-copo, delimitando os corpos de prova com diâmetro de 50 mm. A profundidade do corte foi de aproximadamente 1 mm para dentro do bloco cerâmico (Figura 12).

Figura 12: Corte dos corpos de prova para ensaio de aderência



Em seguida, as superfícies foram limpas com uma escova, pois as mesmas deveriam estar livres de qualquer resíduo. Posteriormente, foi realizada a colagem da pastilha metálica com cola epóxi, pressionando-se a pastilha de maneira que a cola ficasse totalmente espalhada entre a pastilha e a argamassa (Figura 13).

Figura 13: Pastilhas metálicas coladas nos corpos de prova para ensaio de aderência



Após a secagem da cola por 24 horas (28 dias depois do revestimento dos blocos com a argamassa), procedeu-se à ruptura dos corpos de prova. O ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizado com a utilização de um aderímetro (aparelho para arrancamento e medição de aderência), marca Contenco[®], do Laboratório de Edificações do Instituto Federal de Sergipe. O equipamento de tração foi acoplado à pastilha e aplicou-se um esforço de tração perpendicular ao corpo de prova com a taxa de carregamento constante de 250 ± 50 N/s, até a ruptura do corpo de prova (Figura 14).

Figura 14: Ruptura dos corpos de prova no ensaio de aderência



As cargas de rupturas foram anotadas, os corpos de prova foram medidos com paquímetro e foram calculadas as áreas superficiais. Foi examinada e registrada a forma de ruptura do corpo de prova, que deve ser expressa em porcentagem e apresentada junto com o valor da resistência de aderência (ruptura no substrato, na interface substrato/ argamassa, na argamassa ou falha na colagem da peça metálica).

Por fim, a resistência potencial de aderência à tração de cada corpo de prova foi calculada de acordo com a equação (16):

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad (16)$$

Onde:

R_i é a resistência potencial de aderência à tração [MPa];

P_i é a carga de ruptura [N];

A_i é a área do corpo de prova [mm²].

3.3 Determinação das propriedades térmicas

As propriedades térmicas das argamassas estudadas foram obtidas através da realização de medições no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com a utilização do equipamento Thermal Analyzer KD2 Pro, fabricado pela Decagon Devices (Figura 15). De acordo com Feijó (2013), esse aparelho é um dispositivo portátil que utiliza o método da sonda aquecida e que possibilita a determinação da capacidade calorífica volumétrica, condutividade, resistividade e difusividade térmica. De acordo com o fabricante, o equipamento opera em conformidade com as normas IEEE Standard 442-1981 e ASTM Standard D 5334-08.

Figura 15: Aparelho KD2 Pro



Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa estudada, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. O aparelho KD2 Pro possui alguns sensores e para a presente pesquisa foi escolhida a sonda SH-1 por permitir a aquisição de dados de um maior número de propriedades térmicas. No Quadro 3, são apresentadas as especificações dessa sonda.

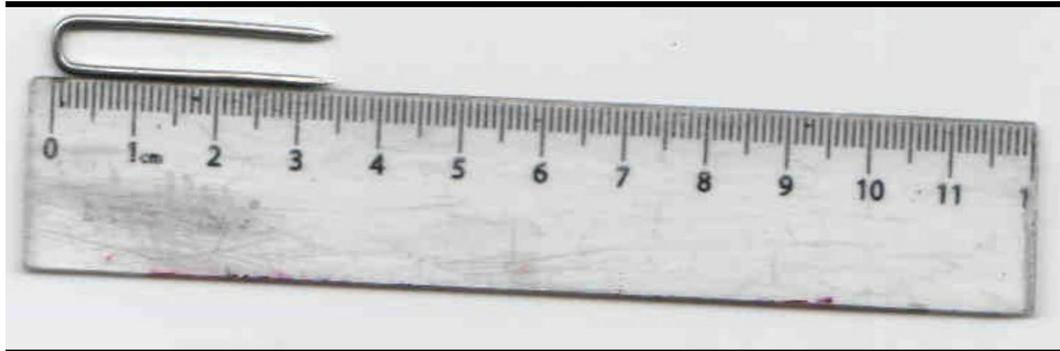
Quadro 3: Especificações da sonda SH-1

Item	Especificação
Quantidade de agulhas	<ul style="list-style-type: none"> • 2
Dimensões	<ul style="list-style-type: none"> • 1,3 mm de diâmetro; • 3 cm de comprimento; • 6 mm de espaçamento entre as agulhas.
Alcance	<ul style="list-style-type: none"> • condutividade térmica: 0,02 a 2 (W/m.K); • resistividade térmica: 50 a 5.000 (°C.cm/W); • difusividade: 0,1 a 1 (mm²/s); • capacidade calorífica volumétrica: 0,5 a 4 (MJ/m³.K).
Precisão	<ul style="list-style-type: none"> • condutividade térmica de 0,02 a 0,2 (W/m.K): ± 0,01 (W/m.K); • condutividade térmica de 0,2 a 2 (W/m.K): ± 10%; • difusividade: ± 10% para condutividades acima de 0,1 (W/m.K); • capacidade calorífica volumétrica: ± 10% para condutividades acima de 0,1 (W/m.K).

Fonte: Adaptado de Decagon Devices (2016)

Fez-se necessária a utilização de um gabarito (Figura 16) durante a moldagem das argamassas a fim de se fazer duas aberturas centrais nos corpos de prova, pois a sonda SH-1 possui 2 pinos que precisam ser inseridos nas amostras.

Figura 16: Gabarito compatível com a sonda SH-1



Após a cura das argamassas fabricadas (28 dias), foram realizadas as medições seguindo-se os procedimentos recomendados pelo manual do fabricante. Primeiramente passou-se pasta térmica na sonda antes da inserção no corpo de prova (Figura 17), preenchendo eventuais vazios entre a argamassa e a superfície da sonda e melhorando a condução de calor entre os dois corpos. Em seguida, o corpo de prova já com a sonda inserida nos orifícios existentes foi isolado termicamente em uma câmara (Figura 18).

Figura 17: Sonda SH-1 com agulhas revestidas por pasta térmica



Figura 18: Câmara de testes



Foram realizadas 5 medições de 10 minutos cada (tempo máximo permitido pelo aparelho) para cada corpo de prova, totalizando 15 medições para cada tipo de argamassa. Após cada medição, o aparelho informava os dados de todas as propriedades térmicas citadas no Quadro 3. Esses dados eram devidamente anotados e iniciava-se a próxima leitura.

3.4 Monitoramento de temperatura

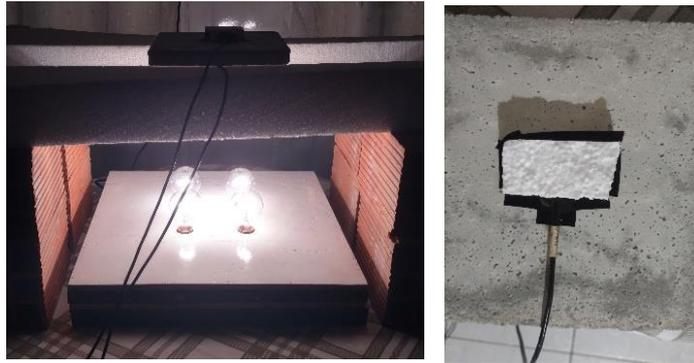
O experimento realizado tem como base os princípios dos processos de transferência de calor e foi dividido em duas etapas: primeiramente, o ensaio foi realizado sem isolamento em relação ao ambiente, contribuindo para dissipação do calor; posteriormente, foi desenvolvido um novo ensaio que pôde ser mais controlado que o primeiro.

3.4.1 Experimento – Parte 1

Para a primeira etapa do experimento, foram produzidas quatro fôrmas de madeira de 20cm de largura, 20cm de comprimento e 3cm de espessura e foram moldadas placas de argamassa, uma para cada teor de substituição. As placas permaneceram em sacos plásticos por 7 dias na cura úmida, posteriormente foram mantidas em temperatura ambiente. Passados 28 dias desde a moldagem das placas, deu-se início ao monitoramento das temperaturas nas faces das mesmas, sendo que uma face foi submetida a uma fonte de calor artificial composta por 4 lâmpadas incandescentes, de 100W cada, e a outra face não (SENA, TEIXEIRA e LABAKI, 2018).

O monitoramento de temperatura da Parte 1 do experimento (Figura 19) foi realizado em todas as placa de argamassa, AR00, AR50, AR75 e AR100, através de registradores de temperatura da marca Testo Modelo 175T2 e sensores de temperatura superficial da mesma marca e Modelo 06287507, o aparelho executou leituras a cada 30 segundos nas duas faces (exposta e não exposta à fonte de calor), bem como da temperatura ambiente, durante 1h e 30 minutos. Em seguida, a fonte de calor foi desligada e o aparelho continuou as medições no mesmo intervalo (a cada 30 segundos), durante 1h. Portanto, o gráfico gerado através dos resultados das leituras apresenta a curva de aquecimento e de resfriamento, o ensaio teve a duração total de 2h e 30 minutos para cada placa de argamassa (SENA, TEIXEIRA e LABAKI, 2018).

Figura 19: Sistema de aquecimento e medição com lâmpadas e localização do sensor na placa



3.4.2 Experimento – Parte 2

Com o objetivo de estimar o desempenho térmico, foram fabricadas quatro placas de 25x25 cm com as argamassas analisadas (uma placa para cada teor de substituição) e com espessura de 3 cm para que se pudesse estudar a influência do teor de resíduo em relação aos processos de transferência de calor.

Após a cura das argamassas fabricadas (28 dias), cada placa foi submetida a uma fonte de calor artificial composta por 16 lâmpadas incandescentes de 100W cada, em apenas uma das faces, ficando a outra face confinada em uma câmara isolada termicamente do ambiente externo (Figura 20).

Figura 20: Fonte de calor artificial



O monitoramento de temperatura foi realizado através de três termopares, sendo um na face superior da placa, um na face inferior da placa (internamente) e o outro na parte inferior da caixa (internamente). Os termopares foram fixados nas placas de argamassa com cola epóxi devido à grande resistência da mesma, já que seriam submetidas a um grande aumento de temperatura e a utilização de outro tipo de cola menos resistente poderia ocasionar o descolamento do termopar em relação à argamassa (Figura 21).

Figura 21: Placa de argamassa com termopares em câmara de isolamento térmico



O ensaio foi dividido em duas etapas: oito horas de aquecimento, onde a estrutura com a fonte de radiação luminosa era ligada e aquecia todo o sistema até que se obtivesse o regime permanente (estabilização térmica), em seguida as lâmpadas eram desligadas até o resfriamento das placas. Cada placa foi submetida a três ciclos de ensaio, isto é, três ciclos de aquecimento e resfriamento. Durante todo o período de ensaio a sala foi mantida fechada e com o ar-condicionado ligado a 24° C, a fim de se manter a temperatura do ambiente constante, já que ao contrário da Parte 1 do ensaio não foi possível a obtenção dos valores de temperatura ambiente. Os dados obtidos foram coletados por uma placa receptora com capacidade de receber a informação de até 16 termopares ao mesmo tempo. A placa era ligada a um computador com *software* próprio para leitura e armazenamento das temperaturas obtidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais e análise da dosagem das argamassas

4.1.1 Caracterização dos materiais

Primeiramente o resíduo de poliuretano coletado na fábrica de pranchas de surfe foi peneirado na peneira de abertura 4,75 mm e somente foi utilizado o material passante. Na Figura 22 tem-se (a) o resíduo que ficou retido na peneira e que foi descartado e (b) o resíduo que passou pela peneira e foi utilizado nesta pesquisa.

Figura 22: Resíduo de poliuretano peneirado



A determinação das massas específica e unitária de cada componente da mistura foi realizada, conforme mencionado no item 3 do presente trabalho, através das normas NBR 16605 (ABNT, 2017), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR 7175 (ABNT, 2003a) e NBR NM 52 (ABNT, 2009b) e os resultados estão apresentados no Quadro 4. Em relação ao módulo de finura do cimento, foi encontrado 0,62% através do ensaio especificado na norma NBR 11579 (ABNT, 2012).

Quadro 4: Caracterização dos materiais

Item	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)
Cimento Portland CP V-ARI	3,11	1,40
Cal Hidratada CH-I	2,31	0,60
Areia lavada	2,62	1,50
Resíduo de Poliuretano	1,22	0,09

A análise granulométrica da areia e do resíduo foi realizada através da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b). No gráfico da Figura 23 tem-se a curva granulométrica da areia e na

Figura 24 tem-se a do resíduo. As zonas ótimas e utilizáveis para a areia foram obtidas da norma NBR 7211 (ABNT, 2009a) e os limites inferiores e superiores para o resíduo foram obtidos da norma NBR 7213 (ABNT, 2013c), considerando os agregados leves do Grupo I.

Figura 23: Curva granulométrica da areia utilizada

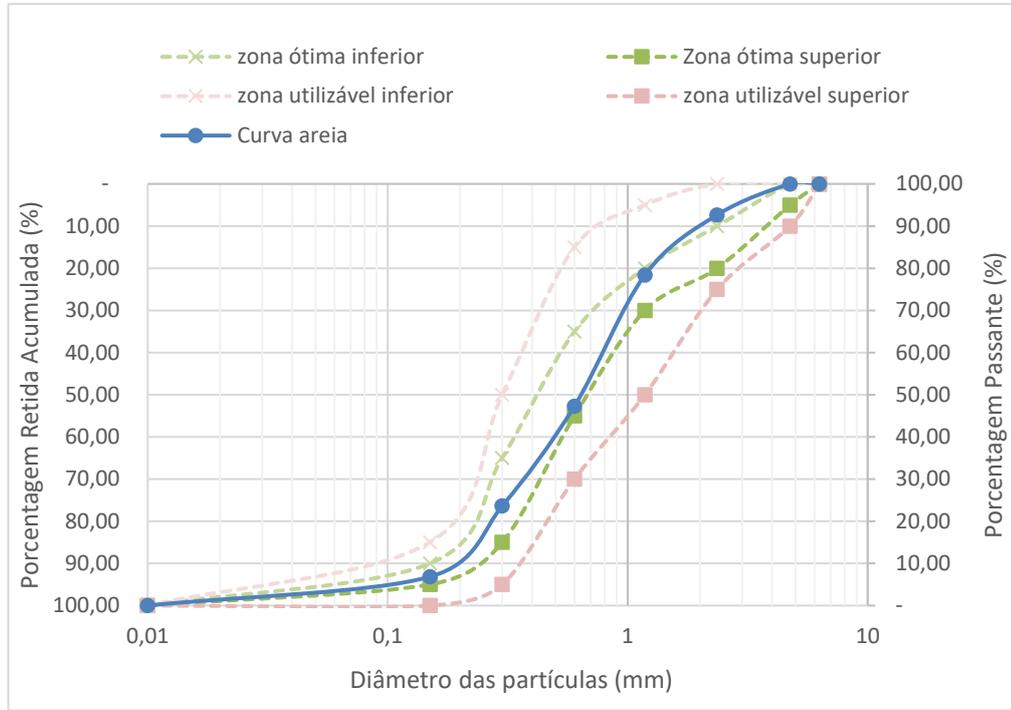
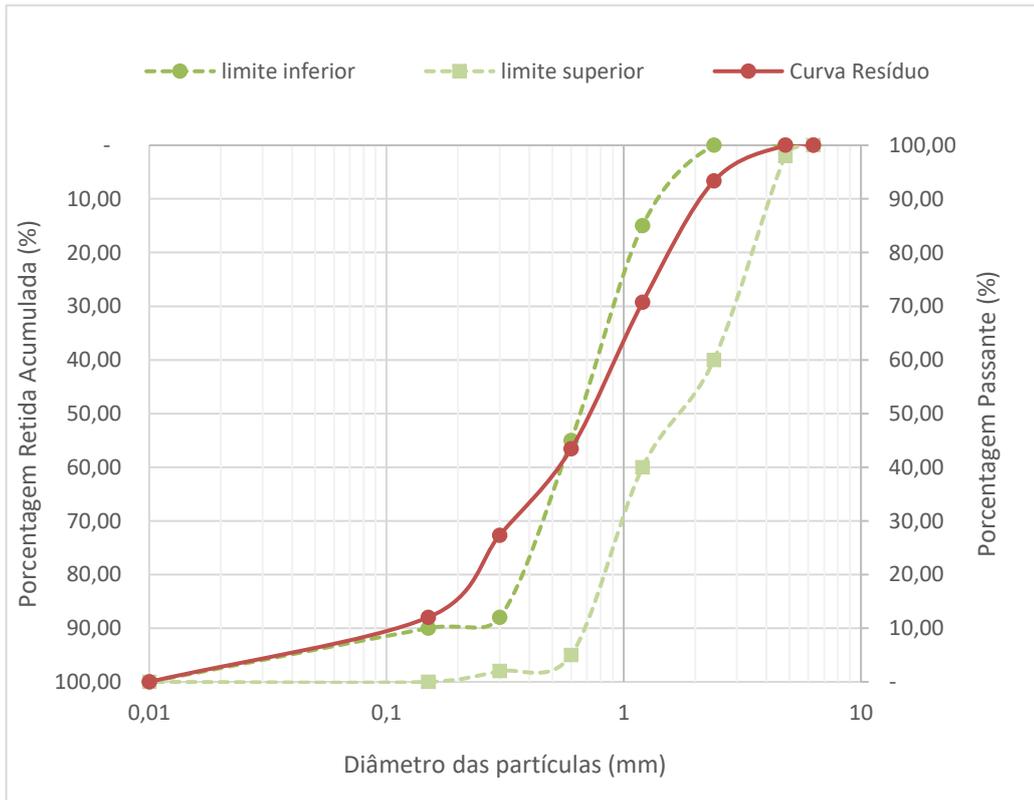
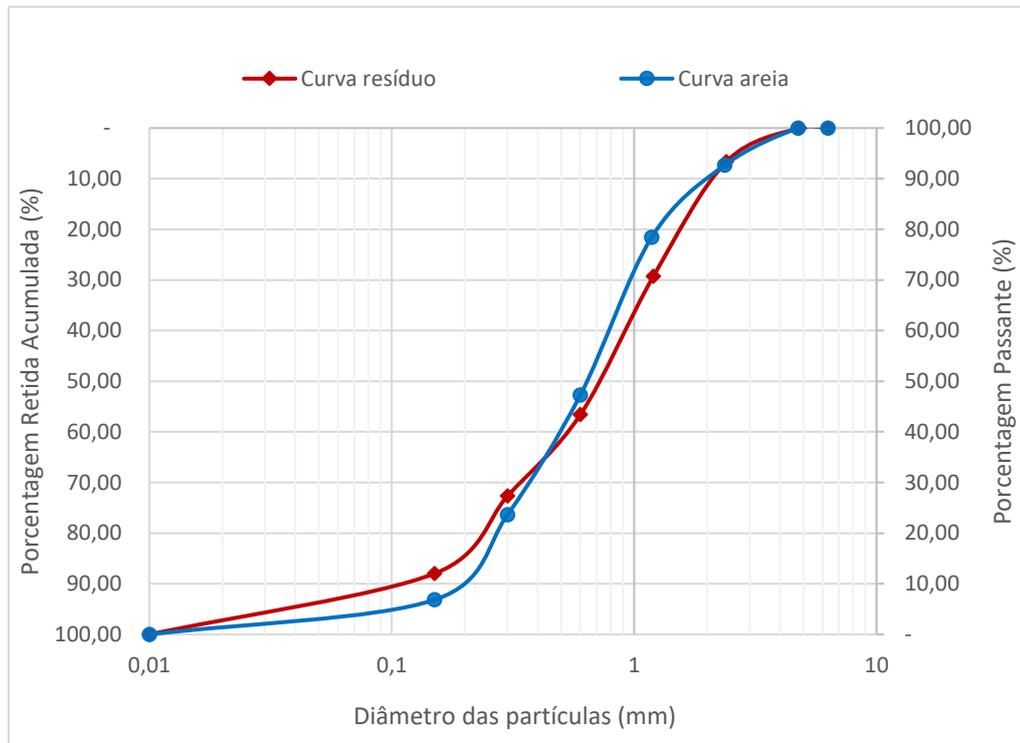


Figura 24: Curva granulométrica do resíduo de poliuretano utilizado



Na Figura 25, têm-se as curvas granulométricas sobrepostas da areia e do resíduo.

Figura 25: Curvas granulométricas da areia e do resíduo de poliuretano



Pode-se observar através da Figura 25, que em relação à granulometria, os dois materiais são muito parecidos.

No Quadro 5, apresenta-se a granulometria detalhada dos dois materiais. De acordo com as definições da norma NBR NM 248 (ABNT, 2003b), a areia apresentou um módulo de finura de 2,51 e dimensão máxima característica de 2,36 mm e o resíduo apresentou módulo de finura de 2,53 e dimensão máxima característica de 2,36 mm.

Quadro 5: Granulometria dos materiais

Peneira (mm)	AREIA			RESÍDUO DE POLIURETANO		
	Massa retida (g)	%		Massa retida (g)	%	
		Retido	Acumulado		Retido	Acumulado
4,75	-	-	-	-	-	-
2,36	22,00	7,34	7,34	3,35	6,66	6,66
1,18	45,70	14,25	21,60	11,38	22,62	29,28
0,6	93,20	31,11	52,70	13,74	27,31	56,59
0,3	70,90	23,66	76,37	8,09	16,08	72,67
0,15	50,30	16,79	93,16	7,70	15,31	87,97
Fundo	20,50	6,84	100,00	6,05	12,03	100,00
Total	299,60	100,00		50,31	100,00	

4.1.2 Análise da dosagem das argamassas

Após a caracterização dos materiais, foram calculados os consumos para cada componente da mistura e as argamassas foram produzidas. No Quadro 6, são apresentados todos os dados relativos à dosagem. As relações a/c (água/cimento) e a/ms (água/materiais secos) foram ajustadas, levando-se em consideração a consistência desejada para a mistura, avaliada através do ensaio de determinação do índice de consistência (IC) apresentado na norma NBR 13276 (ABNT, 2016a). Foi adotado como consistência desejada, o espalhamento de $230\text{mm} \pm 20\text{mm}$ (SENA, TEIXEIRA e LABAKI, 2018).

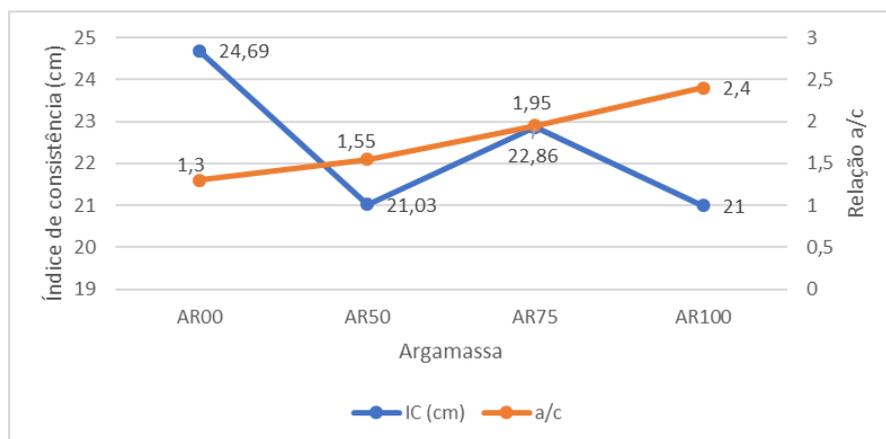
Quadro 6: Dosagem das argamassas

ARGAM.	IC (cm)	a/c	a/ms	TRAÇO (cim./cal/areia/res.)		CONSUMO (kg/m ³)			
				Volume	Massa	cimento	cal	areia	resíduo
AR00	24,69	1,30	0,13	1:1:8:0	1:0,43:8,57:0	196,91	84,39	1.687,75	-
AR50	21,03	1,55	0,26	1:1:4:4	1:0,43:4,29:0,26	273,70	117,30	1.173,01	70,38
AR75	22,86	1,95	0,49	1:1:2:6	1:0,43:2,14:0,39	328,82	140,93	704,62	126,84
AR100	21,00	2,40	1,24	1:1:0:8	1:0,43:0:0,51	429,44	184,05	-	220,85

Para cada tipo de ensaio se fez necessário um tipo de corpo de prova, entretanto todas as argamassas produzidas seguiram a dosagem apresentada no Quadro 6. Alterou-se, portanto, apenas as fôrmas utilizadas.

A Figura 26 apresenta o gráfico da influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores do IC e da relação a/c das argamassas produzidas.

Figura 26: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores de IC e relação a/c



Observa-se na Figura 26 que para o IC permanecer na faixa pré-definida ($230\text{mm} \pm 20\text{mm}$), houve o aumento na relação a/c das misturas de acordo com o crescimento do teor de substituição da areia pelo resíduo. De acordo com Carasek et al (2016) e Carasek et al (2018), o empacotamento das partículas tem grande influência na fluidez das argamassas, pois quanto maior o fator de empacotamento menor será o índice de vazios e a porosidade, o que ocasiona

maior envolvimento das partículas pela pasta (maior lubrificação), já que existem menos vazios a serem preenchidos.

Assim, os agregados com maior fator de empacotamento resultam nas misturas com maior índice de espalhamento. Para evidenciar essa influência, calculou-se o fator de empacotamento da areia natural e do resíduo de poliuretano utilizados na presente pesquisa. De fato, a areia natural utilizada apresentou fator de empacotamento de 57,14% e o resíduo de poliuretano apenas 7,27%, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Características da areia e do resíduo de poliuretano

Agregado	DMC (mm)	MF	ME (g/cm ³)	MU (g/cm ³)	e	η (%)	E ₀ (%)
Areia natural	2,36	2,51	2,62	1,50	0,75	42,86	57,14
Resíduo de poliuretano	2,36	2,53	1,22	0,09	12,56	92,73	7,27

Notas: DMC – dimensão máxima característica; MF – módulo de finura; ME – massa específica real dos grãos; MU – massa unitária; e – índice de vazios não compactado ($=ME/MU-1$); η – porosidade [$=e/(1+e).100$]; E₀ – fator de empacotamento ($=100- \eta$)

O trabalho de Carasek et al (2016), traz ainda uma importante análise sobre a relação da massa unitária (MU) e o comportamento da consistência das argamassas, na qual o aumento da MU implica um aumento proporcional da fluidez (IC) das misturas. Assim, a argamassa de referência (AR00), por ter na sua composição apenas a areia natural, cuja MU é maior que a MU do resíduo de poliuretano, apresentou coerentemente a necessidade de menos água para alcançar a faixa de consistência fixada. Por outro lado, a argamassa com 100% de substituição de areia pelo resíduo (AR100) foi a que necessitou de mais adição de água para atingir o IC fixado, justamente pelo baixo valor da MU do resíduo.

4.2 Análise das propriedades mecânicas

Foram analisadas as propriedades constantes na norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) conforme exposto no item 3.2 deste trabalho. A seguir serão descritos os resultados de cada propriedade estudada.

4.2.1 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b), que prescreve que sejam moldados três corpos de prova prismáticos, por idade, com argamassa recém-preparada. Para tal ensaio foram preparados seis corpos de prova, sendo três para a idade de 14 dias e os outros três para a idade de 28 dias. Os corpos de prova eram prismáticos com dimensões de 4x4x16cm (profundidade, largura e comprimento, respectivamente). Na Figura 27, tem-se o corpo de prova no momento do ensaio de resistência à tração na flexão.

Figura 27: Corpo de prova submetido à ensaio de resistência à tração na flexão



No Quadro 7, apresentam-se os valores da média da resistência e o desvio absoluto máximo, em cada idade ensaiada para cada um dos tipos de argamassa. A norma NBR 13279 (ABNT, 2005b) denomina desvio absoluto máximo da série de corpos de prova a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste dessa média para mais ou para menos. Além disso, o valor obtido para esse desvio deve ser arredondado ao décimo mais próximo. Quando o desvio absoluto máximo for superior a 0,3 MPa, é necessário se calcular uma nova média, desconsiderando o valor discrepante. Segundo a referida norma, o ensaio é considerado válido quando o resultado for constituído da média de no mínimo dois corpos de prova, caso contrário o ensaio deve ser refeito.

Quadro 7: Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 e 28 dias

Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 dias		
ARGAMASSA	Resistência Média (MPa)	Desvio absoluto máximo (MPa)
AR00	1,8	0,0
AR50	1,5	0,0
AR75	0,9	0,1
AR100	0,6	0,1
Resistência à tração na flexão (MPa) aos 28 dias		
ARGAMASSA	Resistência Média (MPa)	Desvio absoluto máximo (MPa)
AR00	1,9	0,1
AR50	1,7	0,1
AR75	1,1	0,2
AR100	0,8	0,2

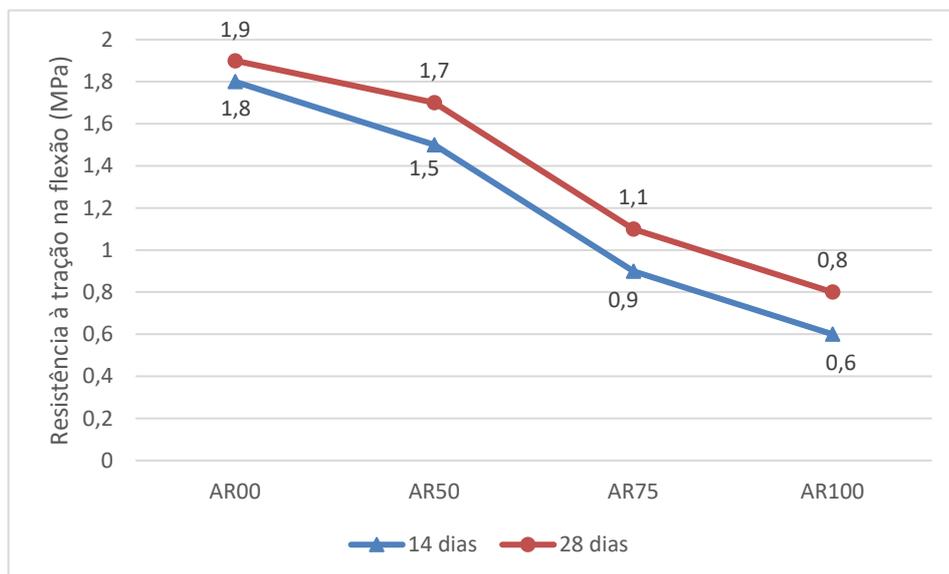
De acordo com esses resultados, pode-se perceber a influência do teor de adição de resíduo de PU, pois houve uma diminuição da resistência analisada das argamassas com o aumento do percentual de resíduo na mistura, tanto aos 14 como aos 28 dias. Aos 28 dias, os corpos de prova com 50% de substituição reduziram 11% em relação à argamassa de referência. Para o teor de 75%, a redução foi de 42%. Com 100% de resíduo, a redução

chegou a 58%. De forma geral, quanto maior o teor de substituição, menor foi a resistência à tração na flexão obtida.

Essa diminuição de resistência pode ter ocorrido por alguns fatores, dentre eles o aumento da relação água-materiais secos das argamassas com teores de substituição em relação à argamassa de referência, para obter o índice de consistência desejado. Essa hipótese também foi adotada no estudo de Casali et al. (2018), que apresentou a influência da substituição da areia natural por areia de fundição fenólica.

A Figura 28 expõe o gráfico da influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores de resistência à tração na flexão, nas idades ensaiadas, das argamassas produzidas.

Figura 28: Resistência à tração na flexão (MPa) aos 14 e 28 dias.



Analisando a Figura 28, constata-se que há um ganho de resistência das argamassas com o passar do tempo. Esse fenômeno ocorre em função das reações de hidratação do cimento Portland. O ganho de resistência entre os 14 e 28 dias para a AR00, AR50, AR75 e AR100 foi de 6%, 13%, 22% e 33%, respectivamente.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimento em função da resistência à tração na flexão, de acordo com o Quadro 8. Caso o valor fique no meio de duas faixas, a norma recomenda adotar a maior como classificação. De acordo com essa classificação e observando a Figura 28, pode-se afirmar que aos 28 dias, as argamassas AR00 e AR50 são da classe R3, a AR75 é classe R2 e a AR100 é classe R1.

Quadro 8: Classificação das argamassas quanto a resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão (MPa)	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
R1	$\leq 1,5$				0,8	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0			1,1		
R3	1,5 a 2,7	1,9	1,7			
R4	2,0 a 3,5					
R5	2,7 a 4,5					
R6	$> 3,5$					

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

4.2.2 Resistência à compressão

Logo após a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, as metades dos três corpos de prova de cada idade (14 e 28 dias) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b). Por isso, para cada idade foram ensaiados seis corpos de prova. Foram utilizados pratos de aço, como descritos na referida norma, com comprimento de $(40,0 \pm 0,1)$ mm e com lado de $(40,0 \pm 0,1)$ mm e no mínimo 10 mm de espessura, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29: Corpo de prova submetido à ensaio de resistência à compressão



No Quadro 9, mostram-se os valores da média da resistência e o desvio absoluto máximo, em cada idade ensaiada, para cada um dos tipos de argamassa. O desvio absoluto máximo deve ser calculado de maneira similar ao exposto no item 4.2.1, sendo a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afaste desta média para mais ou para menos. O valor obtido para esse desvio deve ser arredondado ao décimo mais próximo. Quando o desvio absoluto máximo for superior a 0,5 MPa, é necessário se calcular uma nova média, desconsiderando o valor discrepante. Segundo a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b), o ensaio é considerado válido quando o resultado for constituído da média de no mínimo quatro corpos de prova, caso contrário o ensaio deve ser refeito.

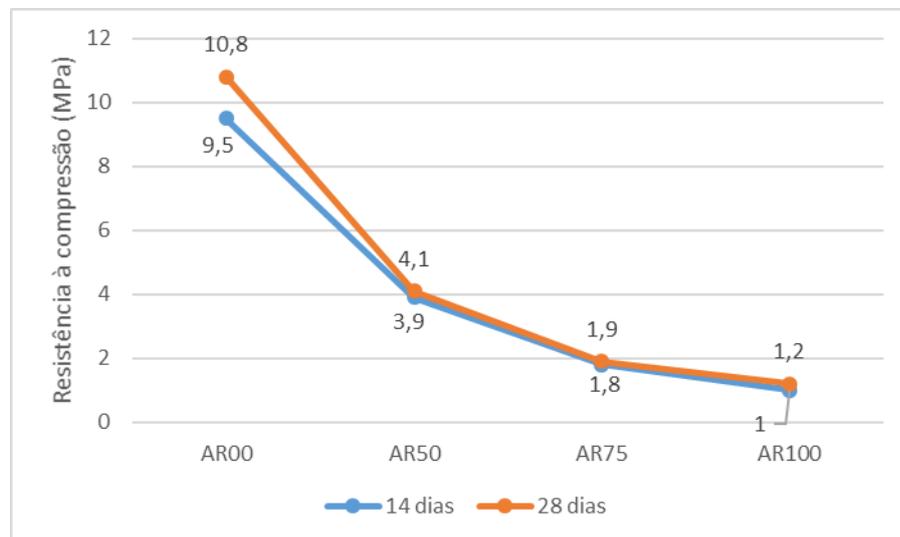
Quadro 9: Resistência à compressão (MPa) aos 14 e 28 dias

Resistência à compressão (MPa) aos 14 dias		
ARGAMASSA	Resistência Média (MPa)	Desvio absoluto máximo (MPa)
AR00	9,5	0,5
AR50	3,9	0,4
AR75	1,8	0,1
AR100	1,0	0,2
Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias		
ARGAMASSA	Resistência Média (MPa)	Desvio absoluto máximo (MPa)
AR00	10,8	0,5
AR50	4,1	0,3
AR75	1,9	0,2
AR100	1,2	0,1

De acordo com esses resultados, nota-se a influência do teor de substituição da areia natural por resíduo de PU, com diminuição da resistência analisada à medida que se aumentou o percentual de resíduo na mistura, tanto aos 14 como aos 28 dias. Aos 28 dias, os corpos de prova com 50% de substituição reduziram 62% em relação à argamassa de referência. Para o teor de 75%, a redução foi de 82%. Com 100% de resíduo, a redução chegou a 89%.

A Figura 30 retrata o gráfico da influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores de resistência à compressão, nas idades ensaiadas, das argamassas produzidas.

Figura 30: Resistência à compressão (MPa) aos 14 e 28 dias



Analisando-se a Figura 30, constata-se também o ganho de resistência ao longo do tempo, a exemplo do que ocorreu com o ensaio de resistência à tração na flexão, ocasionado pelos processos de hidratação do cimento. O ganho de resistência entre os 14 e 28 dias para a AR00, AR50, AR75 e AR100 foi de 14%, 5%, 6% e 20%, respectivamente.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimentos em função da resistência à compressão de acordo com o Quadro 10. Caso o valor fique no meio de duas faixas, a norma recomenda adotar a maior como classificação. De acordo com essa

classificação e observando a Figura 30, pode-se afirmar que a argamassa AR00 é da classe P6, a AR50 é classe P4, a AR75 é classe P2 e a AR100 é classe P1.

Quadro 10: Classificação das argamassas quanto a resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão (MPa)	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
P1	≤ 2,0				1,2	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0			1,9		
P3	2,5 a 4,5					
P4	4,0 a 6,5		4,1			
P5	5,5 a 9,0					
P6	> 8,0	10,8				

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

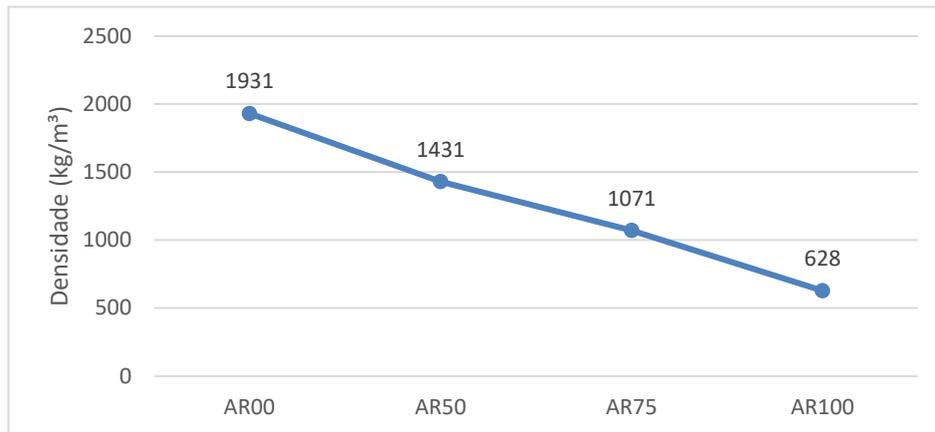
Apesar de classificar as argamassas, a norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) não apresenta os limites mínimos para os diferentes tipos de exposição da parede, de condições atmosféricas e de utilização do revestimento, como ocorre em alguns países europeus. Por isso, torna-se uma tarefa difícil analisar se a AR100, por exemplo, que apresentou uma resistência à compressão de 1,2 MPa aos 28 dias pode ser utilizada e qual seria o tipo de utilização adequada. Contudo, o estudo de Junco *et al.* (2015) apresentou resultados de resistência à compressão de 1,31 MPa para a argamassa com teor de substituição de 75% de areia pelo resíduo de poliuretano proveniente da indústria de componentes automotivos e afirmou que essa resistência é adequada para utilização em revestimentos e assentamentos de alvenaria, segundo a norma europeia EN 998-1 (MIA, 2015).

4.2.3 Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado de acordo com a norma NBR 13280 (ABNT, 2005c), que estabelece a utilização de três corpos de prova moldados de acordo com o recomendado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005b). Por ser a mesma recomendação do ensaio de resistência à tração na flexão, foram utilizados os prismas moldados para o ensaio de flexão na idade de 28 dias. Por ser um ensaio não destrutivo, após a realização do mesmo, os corpos de prova permaneceram íntegros e aptos para a realização dos ensaios de flexão e compressão, conforme citado anteriormente.

Na Figura 31, apresentam-se os valores das densidades de massa aparente médias para cada argamassa estudada aos 28 dias.

Figura 31: Densidade de massa aparente das argamassas aos 28 dias



De acordo com esses resultados, nota-se a diminuição da densidade da argamassa à medida que se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo de PU. A argamassa AR50 teve uma redução de 25,9% em relação à argamassa de referência (AR00), enquanto para a AR75 a redução foi de 44,5% e para a AR100 foi de 67,5%.

Segundo Carasek (2010), as argamassas podem ser classificadas quanto à densidade de massa em: leves, normais e pesadas. As leves (densidade $< 1,40 \text{ g/cm}^3$) têm usos indicados para isolamento térmico e acústico, as normais (densidade entre $1,40$ e $2,30 \text{ g/cm}^3$) são indicadas para usos convencionais e as pesadas (densidade $> 2,30 \text{ g/cm}^3$) podem ser utilizadas para blindagem de radiação.

Conforme já apresentado na revisão bibliográfica, a densidade dos materiais influencia bastante nas suas propriedades, principalmente as térmicas. A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimento em função da densidade de massa aparente no estado endurecido, de acordo com o Quadro 11. Caso o valor fique no meio de duas faixas, a norma recomenda adotar a maior classificação. De acordo com essa classificação e observando a Figura 31, pode-se afirmar que a argamassa AR00 é da classe M6, a AR50 é classe M4, a AR75 é classe M2 e a AR100 é classe M1.

Quadro 11: Classificação das argamassas quanto à densidade

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m^3)	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
M1	≤ 1200				628	ABNT NBR 13280
M2	1000 a 1400			1071		
M3	1200 a 1600					
M4	1400 a 1800		1431			
M5	1600 a 2000					
M6	> 1800	1931				

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

4.2.4 Absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade

O ensaio para a determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade das argamassas estudadas foi realizado de acordo com a norma NBR 15259 (ABNT, 2005h). Foram moldados três corpos de prova conforme a norma NBR 13279 (ABNT, 2005b) para cada tipo de argamassa, os quais foram submetidos ao ensaio aos 28 dias. Na Figura 32, tem-se a evolução do ensaio da argamassa AR 100 ao longo dos 90 minutos. Os outros tipos de argamassa também apresentaram comportamento semelhante, com a absorção crescente ao longo do tempo (ordem cronológica do 1 ao 4).

Figura 32: Ensaio de absorção de água por capilaridade



(1)



(2)



(3)



(4)

No Quadro 12, pode-se observar os resultados médios encontrados para a absorção de água aos 10 minutos e aos 90 minutos, bem como os coeficientes de capilaridade e o desvio relativo máximo de cada argamassa. Segundo a norma NBR 15259 (ABNT, 2005h), o desvio relativo máximo da série de corpos de prova é calculado dividindo-se o valor absoluto que mais se afaste da média pela média das determinações e multiplicando-se por 100. É expresso em porcentagem e quando for superior a 20%, deve-se calcular uma nova média, desconsiderando o valor discrepante, sendo que o ensaio só será considerado válido quando o resultado for constituído da média de no mínimo dois corpos de prova.

Quadro 12: Absorção de água e coeficiente de capilaridade

Argamassa	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Desvio relativo (%)
AR00	0,19	0,63	7,80	1,3
AR50	0,55	1,47	16,7	4,2
AR75	0,97	2,64	30,2	1,7
AR100	1,35	3,86	43,7	4,6

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 12, pode-se verificar que, à medida que se aumentou o teor de substituição da areia pelo resíduo de PU, houve um aumento significativo dos valores de absorção e de coeficiente de capilaridade. Isso pode ter ocorrido devido ao fato de as argamassas terem se tornado mais leves (as densidades reduziram) e mais porosas. A AR50 teve um aumento de 114% em relação ao coeficiente de capilaridade da AR00, enquanto a AR75 apresentou um aumento de 287% e a AR100 de 460%.

Conforme Alderete, Villagrán-Zaccardi e De Belie (2019), a absorção de água pelas forças capilares é uma propriedade que influencia diretamente na resistência à entrada de agentes agressivos que são transportados pela água. Por isso, quanto maior o coeficiente de capilaridade, mais rapidamente se dá a entrada de água na argamassa, o que pode causar diminuição na durabilidade das mesmas, já que agentes agressivos poderão estar sendo transportados para o interior do material.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimento em função do coeficiente de capilaridade de acordo com o Quadro 13. Caso o valor fique no meio de duas faixas, a norma recomenda adotar a maior como classificação. De acordo com essa classificação e observando o Quadro 12, pode-se afirmar que a argamassa AR00 é da classe C5, já a AR50, a AR75 e a AR100 são da classe C6.

Quadro 13: Classificação das argamassas quanto ao coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
C1	≤ 1,5					ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5					
C3	2,0 a 4,0					
C4	3,0 a 7,0					
C5	5,0 a 12,0	7,8				
C6	> 10		16,7	30,2	43,7	

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

4.2.5 Densidade de massa no estado fresco

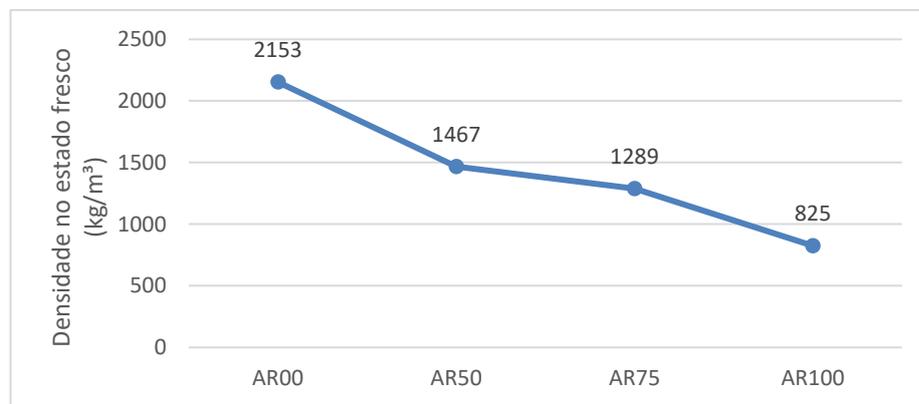
O ensaio para determinação da densidade de massa no estado fresco foi realizado de acordo com a norma NBR 13278 (ABNT, 2005a). Após todas as pesagens foram realizados

os cálculos descritos na referida norma, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 14 e graficamente na Figura 33.

Quadro 14: Densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Massa do recipiente com argamassa (g)	Massa do recipiente vazio (g)	Volume do recipiente (cm ³)	Densidade (kg/m ³)
AR00	1151,7	311,8	390,1	2153
AR50	884,0	311,8	390,1	1467
AR75	814,5	311,8	390,1	1289
AR100	633,5	311,8	390,1	825

Figura 33: Densidade de massa no estado fresco



Assim como aconteceu com a densidade no estado endurecido, o comportamento decrescente em virtude do aumento da incorporação de resíduo em detrimento da areia se manteve no estado fresco. Essa redução, segundo Carasek et al (2018), é devido à maior porosidade do resíduo (menor massa específica dos grãos), mas, principalmente, ao aumento no consumo de água (visto que a densidade da água é inferior à dos sólidos que compõem a argamassa).

Os valores encontrados no estado fresco foram maiores em relação ao estado endurecido devido a presença de água, que após o período de cura de 28 dias tende a evaporar deixando as argamassas mais porosas e com densidades menores. A argamassa AR50 teve uma redução de 31,9% em relação à argamassa de referência, já a AR75 apresentou redução de 40,1% e a AR100 de 61,7%.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimento em função da densidade de massa no estado fresco de acordo com o Quadro 15. Caso o valor fique no meio de duas faixas, a norma recomenda adotar a maior como classificação. De acordo com esta classificação e observando a Figura 33, pode-se afirmar que a argamassa AR00 é classe D6, a AR50 é classe D3, a AR75 é classe D2 e a AR100 é classe D1.

Quadro 15: Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Classe	Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
D1	≤ 1400				825	ABNT NBR 13278
D2	1200 a 1600			1289		
D3	1400 a 1800		1467			
D4	1600 a 2000					
D5	1800 a 2200					
D6	> 2000	2153				

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

4.2.6 Resistência potencial de aderência à tração

O ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizado de acordo com a norma NBR 15258 (ABNT, 2005g), com confecção das argamassas, colocação das mesmas nos blocos cerâmicos que serviram como substrato, corte do revestimento e colagem da pastilha. A ruptura dos corpos de prova se deu aos 28 dias e os resultados da resistência potencial média de aderência à tração foram encontrados, descartando-se os valores que se afastaram $\pm 30\%$ da média (o ensaio deve ser refeito caso não haja o mínimo de cinco valores válidos) e estão apresentados nos Quadros 16, 17, 18 e 19 (argamassa AR00, AR50, AR75 e AR100, respectivamente).

Quadro 16: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR00

Corpo de prova n°	Carga (N)	Seção (mm ²)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)			
				S	S/A	A	F
1	481	1590	0,3		100%		
2	Descartado						
3	569	1590	0,36		100%		
4	Descartado						
5	765	1590	0,48		95%	5%	
6	Descartado						
7	Descartado						
8	559	1590	0,35		95%	5%	
9	579	1590	0,36		100%		
10	618	1590	0,39		100%		
Resistência Média (MPa)			0,37		98%	2%	
Tolerância ($\pm 30\%$ da média) (MPa)			0,11	Valores de 0,26 a 0,48			
Onde: S é a ruptura no substrato; S/A é a ruptura na interface substrato/argamassa; A é a ruptura na argamassa; F é a falha na colagem da peça metálica.							

Quadro 17: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR50

Corpo de prova n°	Carga (N)	Seção (mm ²)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)			
				S	S/A	A	F
1	Descartado						
2	Descartado						
3	549	1590	0,35		90%	10%	
4	402	1590	0,25		20%	80%	
5	608	1590	0,38		10%	90%	
6	441	1590	0,28		10%	90%	

Quadro 17: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR50 (conclusão)

Corpo de prova n°	Carga (N)	Seção (mm ²)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)			
				S	S/A	A	F
7	363	1590	0,23			100%	
8	422	1590	0,27		5%	95%	
9	520	1590	0,33		80%	20%	
10	402	1590	0,25	90%	10%		
Resistência Média (MPa)			0,29	11%	28%	61%	
Tolerância ($\pm 30\%$ da média) (MPa)			0,09	Valores de 0,20 a 0,38			
Onde: S é a ruptura no substrato; S/A é a ruptura na interface substrato/argamassa; A é a ruptura na argamassa; F é a falha na colagem da peça metálica.							

Quadro 18: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR75

Corpo de prova n°	Carga (N)	Seção (mm ²)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)			
				S	S/A	A	F
1	382	1590	0,24			100%	
2	382	1590	0,24			100%	
3	314	1590	0,20			100%	
4	314	1590	0,20			100%	
5	Descartado						
6	275	1590	0,17			100%	
7	373	1590	0,23			100%	
8	363	1590	0,23			100%	
9	284	1590	0,18			100%	
10	Descartado						
Resistência Média (MPa)			0,21			100%	
Tolerância ($\pm 30\%$ da média) (MPa)			0,06	Valores de 0,15 a 0,27			
Onde: S é a ruptura no substrato; S/A é a ruptura na interface substrato/argamassa; A é a ruptura na argamassa; F é a falha na colagem da peça metálica.							

Quadro 19: Ensaio de resistência potencial de aderência à tração AR100

Corpo de prova n°	Carga (N)	Seção (mm ²)	Tensão (MPa)	Forma de ruptura (%)			
				S	S/A	A	F
1	284	1590	0,18			100%	
2	304	1590	0,19			100%	
3	206	1590	0,13			100%	
4	206	1590	0,13			100%	
5	206	1590	0,13			100%	
6	206	1590	0,13			100%	
7	226	1590	0,14			100%	
8	284	1590	0,18			100%	
9	284	1590	0,18			100%	
10	284	1590	0,18			100%	
Resistência Média (MPa)			0,16			100%	
Tolerância ($\pm 30\%$ da média) (MPa)			0,05	Valores de 0,11 a 0,21			
Onde: S é a ruptura no substrato; S/A é a ruptura na interface substrato/argamassa; A é a ruptura na argamassa; F é a falha na colagem da peça metálica.							

Analisando os resultados dos Quadros 16, 17, 18 e 19, pode-se perceber que a ruptura nem sempre ocorre na interface entre o revestimento e o substrato, por isso nem sempre é possível determinar o valor da resistência potencial de aderência à tração. De acordo com a

norma NBR 13528 (ABNT, 2010), quando a ruptura ocorre na interface argamassa/substrato, o valor da resistência é igual ao valor encontrado no ensaio, mas nos demais casos (ruptura no substrato ou na argamassa) a resistência não é determinada e é maior do que o valor obtido no ensaio, devendo ser apresentado precedido pelo sinal maior que (>). No caso de ruptura na interface cola/pastilha, o resultado deve ser desprezado, pois indica falha na colagem.

Trabalhos como os de Gupta e Vyas (2018) e Oliveira, Brito e Veiga (2013) também analisaram a resistência à aderência de argamassas e apresentaram rupturas tanto nas interfaces argamassa/substrato quanto nas argamassas. Os autores apontaram em seus textos que essa falha coesiva quando acontece na argamassa significa que a resistência de aderência é maior do que o valor experimental encontrado.

Assim, para as argamassas AR50, AR75 e AR100, os valores da resistência potencial de aderência à tração serão maiores que 0,29 MPa; 0,21 MPa e 0,16 MPa, respectivamente. Tendo em vista que 98% das rupturas da AR00 ocorreram na interface argamassa/substrato, pode-se adotar o valor de 0,37 MPa como a resistência potencial de aderência à tração para esta argamassa.

A norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) classifica as argamassas de revestimento em função da resistência potencial de aderência à tração de acordo com o Quadro 20. De acordo com essa classificação e adotando os resultados apresentados anteriormente, pode-se afirmar que a argamassa AR00 é da classe A3, mas devido à não possibilidade de obtenção do valor real das resistências das argamassas AR50, AR75 e AR100, serão consideradas as classes mínimas em que cada tipo de argamassa está inserida, podendo ser de uma classe superior, já que os valores das resistências são maiores que os encontrados no ensaio. Portanto, as argamassas AR50 e AR75 são no mínimo classe A2 e a AR100 é no mínimo classe A1.

Quadro 20: Classificação das argamassas quanto à resistência potencial de aderência à tração

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	Argamassas estudadas				Método de ensaio
		AR00	AR50	AR75	AR100	
A1	< 0,20				> 0,16	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20		> 0,29	> 0,21		
A3	≥ 0,30	0,37				

Fonte: Adaptado de NBR 13281 (ABNT, 2005d)

A propriedade de aderência é muito importante para a utilização da argamassa como revestimento (emboço ou reboco). As argamassas com aderências baixas deixam de cumprir as suas funções, tais como estanqueidade, acabamento, proteção do substrato etc. Entretanto, por não possuir limites mínimos para cada tipo de utilização, a norma NBR 13281 (ABNT, 2005d) não permite a análise sobre a viabilidade ou não das argamassas estudadas.

4.3 Análise das propriedades térmicas

Foram analisadas as propriedades térmicas das argamassas fabricadas, através de medições do aparelho KD2 Pro, conforme apresentado no capítulo 3 deste trabalho. A seguir serão descritos os resultados de cada propriedade estudada (condutividade térmica, resistência térmica, capacidade térmica e difusividade térmica).

4.3.1 Condutividade térmica

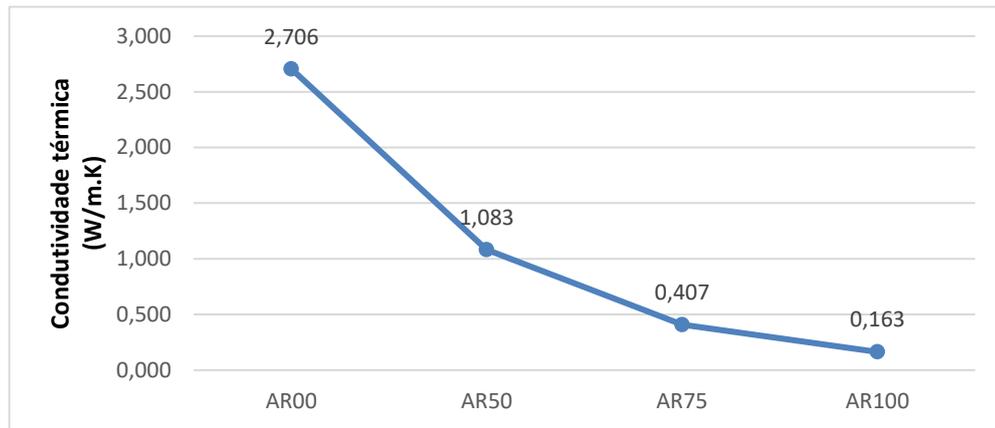
O ensaio para determinação da condutividade térmica foi realizado de acordo com as recomendações do manual do equipamento utilizado (DECAGON DEVICES, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa estudada, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. As leituras através do equipamento se deram aos 28 dias (5 leituras para cada corpo de prova) e os resultados estão apresentados no Quadro 21.

Quadro 21: Condutividade térmica das argamassas estudadas

CP	Leitura	condutividade térmica (W/m.K)			
		AR00	AR 50	AR 75	AR 100
01	1	2,683	1,112	0,385	0,160
	2	2,668	1,141	0,390	0,163
	3	2,757	1,140	0,390	0,164
	4	2,710	1,151	0,388	0,164
	5	2,631	1,156	0,390	0,164
02	1	2,541	1,008	0,422	0,166
	2	2,753	1,010	0,422	0,168
	3	2,798	1,024	0,423	0,169
	4	2,687	1,022	0,423	0,170
	5	2,675	1,025	0,421	0,170
03	1	2,666	1,070	0,394	0,158
	2	2,808	1,086	0,418	0,160
	3	2,726	1,080	0,415	0,159
	4	2,741	1,077	0,414	0,159
	5	2,746	1,142	0,416	0,158
MÉDIA (W/m.K)		2,706	1,083	0,407	0,163
Desvio Padrão (W/m.K)		0,068	0,055	0,015	0,004
% Desvio Padrão em relação à média		2,51%	5,10%	3,80%	2,68%

O gráfico apresentado na Figura 34 expressa a influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da condutividade térmica média das argamassas pesquisadas.

Figura 34: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da condutividade térmica



Analisando-se o Quadro 21 e a Figura 34, pode-se perceber que quanto maior a adição de resíduo de PU na argamassa, menor foi o valor da condutividade térmica. Este resultado era esperado, pois a condutividade térmica depende da densidade do material. Ao se substituir a areia pelo resíduo de PU, aumentou-se a quantidade de ar incorporado na mistura, pois de acordo com a Tabela 1, constante no item 4.1.2 deste trabalho, o resíduo de PU tem uma porosidade de 92,73%, ao passo que a areia possui porosidade de 42,86%. Assim, como a matéria é mais condutora que o ar contido nos poros do material, quanto mais poroso, maior a tendência ao isolamento térmico, isto é, o material tende a possuir baixas condutividades térmicas.

Conforme apresentado no item 4.2.3 deste trabalho, as argamassas estudadas apresentaram densidades menores à medida que se aumentou o teor de substituição da areia natural pelo resíduo de PU. Sendo a AR00 a argamassa com densidade mais elevada e a AR100 a que apresentou o menor valor, sendo, portanto, a argamassa mais leve. Pode-se concluir que a AR100 foi a mais porosa conseqüentemente.

Portanto, a AR00 terá uma maior facilidade de condução do fluxo de calor no material, quando seus extremos forem submetidos a variações de temperatura, em relação a todas as argamassas com teores de substituição. Já a AR100 é a que possui características mais isolantes, pois os isolantes térmicos possuem condutividades térmicas baixas e, por isso, oferecem uma resistência maior à condução do fluxo de calor de um extremo a outro do material.

4.3.2 Resistência térmica

O ensaio para determinação da resistência térmica ou resistividade térmica foi realizado de acordo com as recomendações do manual do equipamento utilizado (DECAGON

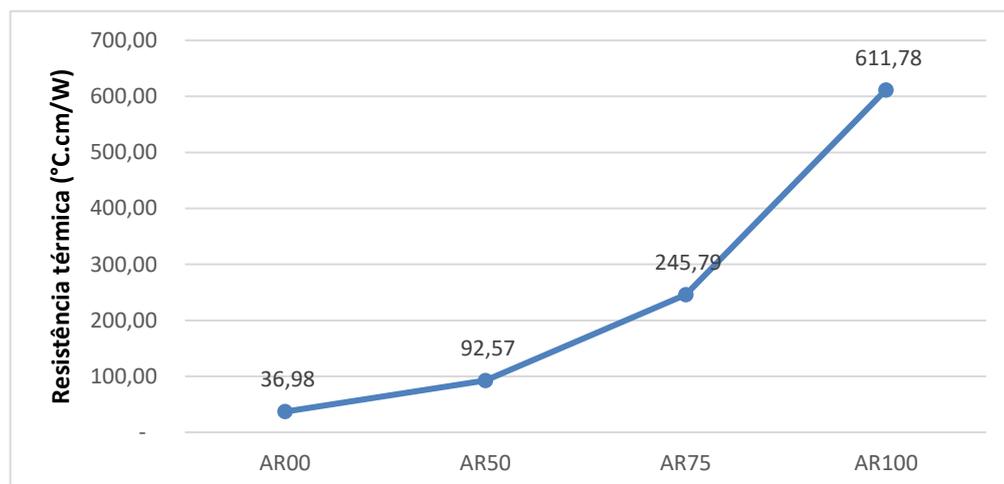
DEVICES, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa estudada, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5cm e altura de 10cm. As leituras através do equipamento se deram aos 28 dias (5 leituras para cada corpo de prova) e os resultados estão apresentados no Quadro 22.

Quadro 22: Resistência térmica das argamassas estudadas

CP	Leitura	resistividade térmica (°C.cm/W)			
		AR 00	AR 50	AR 75	AR 100
01	1	37,27	89,96	259,60	623,40
	2	37,49	87,66	256,40	614,70
	3	36,27	87,76	256,50	609,20
	4	36,89	86,89	257,40	608,60
	5	38,00	86,50	256,70	611,20
02	1	39,36	99,22	237,20	600,90
	2	36,32	99,01	236,90	594,90
	3	35,73	97,66	236,60	590,50
	4	37,21	97,86	236,40	587,40
	5	37,38	97,54	237,40	586,90
03	1	37,50	93,42	253,50	633,90
	2	35,62	92,12	239,30	623,20
	3	36,69	92,58	241,20	627,90
	4	36,49	92,83	241,40	630,60
	5	36,42	87,59	240,30	633,40
MÉDIA (°C.cm/W)		36,98	92,57	245,79	611,78
Desvio Padrão (°C.cm/W)		0,95	4,73	9,41	16,76
% Desvio Padrão em relação à média		2,56%	5,11%	3,83%	2,74%

O gráfico apresentado na Figura 35 expressa a influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da resistência térmica média das argamassas pesquisadas.

Figura 35: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da resistência térmica



Analisando-se o Quadro 22 e a Figura 35, pode-se perceber que quanto maior a adição de resíduo de PU na argamassa, maior foi o valor da resistividade térmica. Esse resultado era esperado, pois a resistência térmica, que pode ser traduzida como a facilidade ou a resistência exercida por um determinado material em relação ao deslocamento do fluxo de calor em certa

direção, é inversamente proporcional à condutividade térmica. Assim, materiais com baixas condutividades tendem a ter uma grande resistência à passagem do fluxo de calor de uma face para a outra.

O aparelho KD2 Pro forneceu os valores de resistência térmica para os corpos de prova levando-se em consideração suas características dimensionais e as características da sonda utilizada. Contudo, de acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005f) a resistência térmica pode ser calculada através da equação (4) apresentada no item 2.2.2.2 desse trabalho, pois diferentemente da condutividade térmica, essa propriedade não é uma característica do material, já que dependerá da espessura do mesmo.

Assim, pode-se determinar a resistência térmica de qualquer sistema construtivo que se pretenda analisar utilizando-se as argamassas propostas nesta pesquisa. Dessa forma, pode-se projetar fechamentos opacos com uma elevada resistência térmica, desde que construídos com materiais de baixa condutividade térmica, apresentando, assim, uma redução na taxa de transferência de calor entre o ambiente externo e o interno.

4.3.3 Capacidade térmica

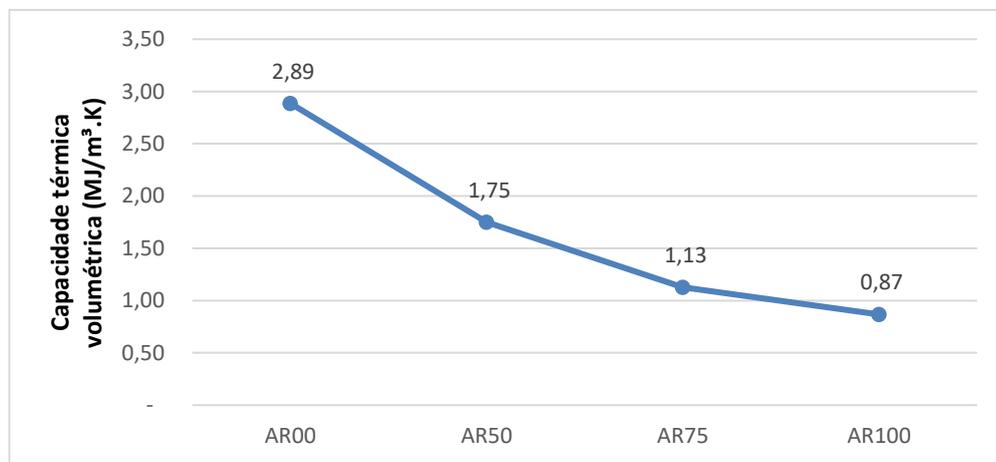
O ensaio para determinação da capacidade térmica, mais especificamente a capacidade térmica volumétrica discutida no item 2.2.2.3, foi realizado de acordo com as recomendações do manual do equipamento utilizado (DECAGON DEVICES, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa estudada, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. As leituras através do equipamento se deram aos 28 dias (5 leituras para cada corpo de prova) e os resultados estão apresentados no Quadro 23.

Quadro 23: Capacidade térmica volumétrica das argamassas estudadas

CP	Leitura	capacidade térmica volumétrica (MJ/m ³ .K)			
		AR 00	AR 50	AR 75	AR 100
01	1	2,62	1,58	1,21	0,83
	2	2,68	1,71	1,23	0,88
	3	2,71	1,72	1,21	0,90
	4	2,71	1,73	1,24	0,91
	5	2,77	1,73	1,24	0,89
02	1	3,05	1,44	1,17	0,86
	2	3,17	1,50	1,18	0,91
	3	3,23	1,53	1,18	0,93
	4	3,31	1,54	1,18	0,94
	5	3,33	1,55	1,17	0,94
03	1	2,69	1,99	0,94	0,76
	2	2,74	2,09	0,98	0,81
	3	2,76	2,10	1,00	0,82
	4	2,76	2,11	1,00	0,82
	5	2,76	1,92	1,00	0,82
MÉDIA (MJ/m³.K)		2,89	1,75	1,13	0,87
Desvio Padrão (MJ/m ³ .K)		0,25	0,24	0,11	0,05
% Desvio Padrão em relação à média		8,78%	13,50%	9,63%	6,34%

O gráfico apresentado na Figura 36 expressa a influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da capacidade térmica volumétrica média das argamassas pesquisadas.

Figura 36: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da capacidade térmica volumétrica



Analisando-se o Quadro 23 e a Figura 36, pode-se perceber que quanto maior a adição de resíduo de PU na argamassa, menor foi o valor da capacidade térmica volumétrica. Esse resultado era esperado, pois segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a capacidade térmica de um material é diretamente proporcional à densidade do mesmo. Assim, a AR00 por possuir a maior densidade dentre as argamassas estudadas, possui a maior capacidade térmica. Por outro lado, a AR100, que é a argamassa mais leve (de menor densidade), apresentou a menor capacidade térmica dentre as argamassas pesquisadas.

Quanto maior a capacidade térmica, mais o corpo necessita de calor para variar a sua temperatura. O ensaio para determinação do desempenho térmico através do monitoramento de temperatura das argamassas apresentado no item 3.4 serve para exemplificar essa propriedade. Para a execução desse ensaio, todas as argamassas foram submetidas à mesma fonte de calor. Dessa forma, a que possui a maior capacidade térmica deve ter uma variação de temperatura menor do que a argamassa que possui capacidade térmica inferior. Esse fato foi confirmado e será apresentado nos resultados do item 4.4.

Ocorreu que após 10 minutos de exposição à fonte de calor, a AR00 (maior capacidade térmica) sofreu uma variação de cerca de 11°C na sua face externa, enquanto a AR100 (menor capacidade térmica) sofreu uma variação de temperatura de cerca de 25°C também na face externa. Do mesmo modo, a propriedade da capacidade térmica também pode ser utilizada para explicar o resfriamento mais brusco da AR100 em detrimento da AR00 quando se retirou a exposição ao calor, já que a capacidade térmica é a medida da aptidão tanto de receber como de perder calor para uma dada variação de temperatura.

4.3.4 Difusividade térmica

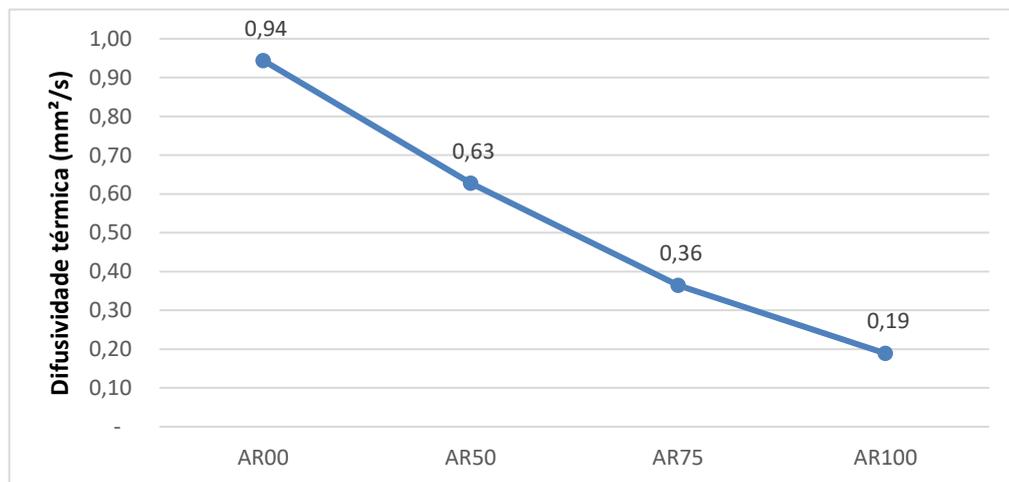
O ensaio para determinação da difusividade térmica foi realizado de acordo com as recomendações do manual do equipamento utilizado (DECAGON DEVICES, 2016). Foram moldados 3 corpos de prova para cada tipo de argamassa estudada, totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 5cm e altura de 10cm. As leituras através do equipamento se deram aos 28 dias (5 leituras para cada corpo de prova) e os resultados estão apresentados no Quadro 24.

Quadro 24: Difusividade térmica das argamassas estudadas

CP	Leitura	Difusividade térmica (mm ² /s)			
		AR 00	AR 50	AR 75	AR 100
01	1	1,02	0,70	0,32	0,19
	2	1,00	0,67	0,32	0,19
	3	1,02	0,66	0,32	0,18
	4	1,00	0,67	0,31	0,18
	5	0,95	0,67	0,31	0,18
02	1	0,83	0,70	0,36	0,19
	2	0,87	0,67	0,36	0,19
	3	0,87	0,67	0,36	0,18
	4	0,81	0,66	0,36	0,18
	5	0,80	0,66	0,36	0,18
03	1	0,99	0,54	0,42	0,21
	2	1,03	0,52	0,43	0,20
	3	0,99	0,51	0,42	0,19
	4	0,99	0,51	0,41	0,19
	5	0,99	0,60	0,41	0,19
MÉDIA (mm²/s)		0,94	0,63	0,36	0,19
Desvio Padrão (mm ² /s)		0,08	0,07	0,04	0,01
% Desvio Padrão em relação à média		8,72%	11,31%	11,76%	4,05%

O gráfico apresentado na Figura 37 expressa a influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da difusividade térmica média das argamassas pesquisadas.

Figura 37: Influência da incorporação do resíduo de PU sobre os valores da difusividade térmica



Analisando-se o Quadro 24 e a Figura 37, pode-se perceber que quanto maior a adição de resíduo de PU na argamassa, menor foi o valor da difusividade térmica. Esse resultado era esperado, pois a difusividade térmica de um material é a medida da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material e está intimamente ligada com a condutividade térmica. Assim, um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência do calor dentro do material.

A difusividade térmica pode ser considerada uma variável mais importante para o controle térmico das construções do que a condutividade térmica, pois expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura do seu entorno. Assim, materiais de baixa condutividade, como é o caso da AR100 (menor condutividade das argamassas estudadas), retardam a transferência de variações externas de temperatura para o interior das construções, isto é, são mais isolantes termicamente.

4.4 Análise das trocas térmicas

O experimento realizado nesta etapa da pesquisa utilizou-se dos conceitos envolvendo os processos de transferência de calor. Buscou-se obter o ganho térmico de cada tipo de argamassa ao ser submetida a uma fonte de calor artificial (fonte de energia radiante).

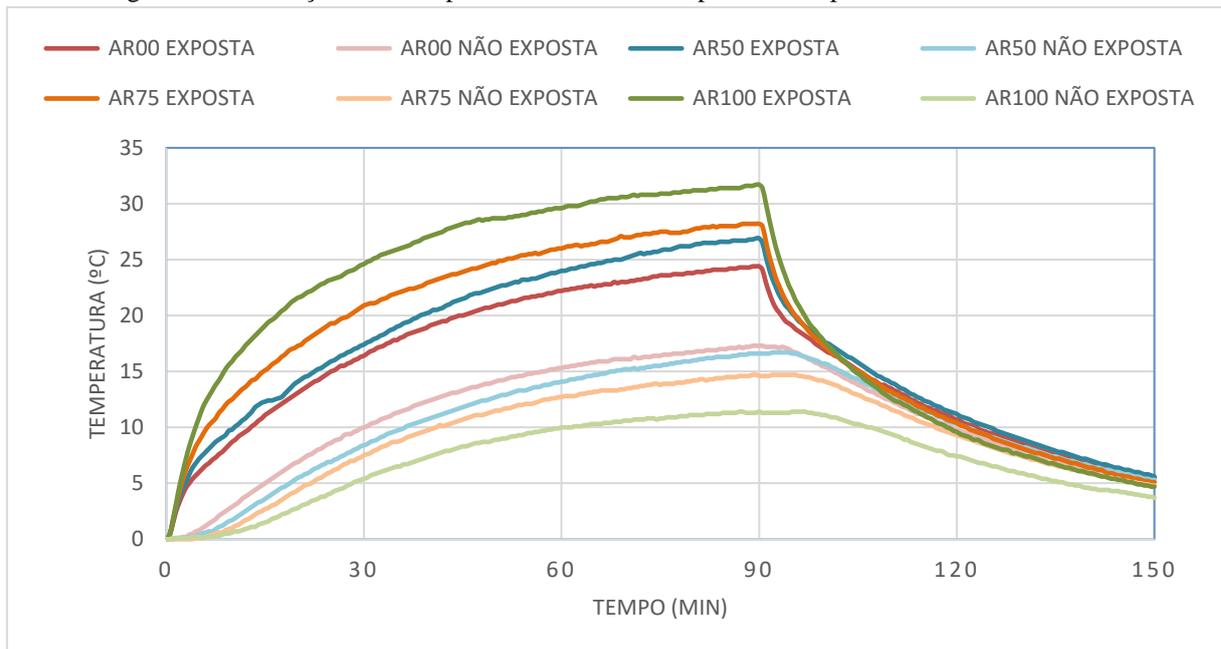
De acordo com o exposto no item 2.2.1.1 deste trabalho, geralmente a radiação é combinada com outros tipos de transferência de calor, exatamente o que se pode observar neste experimento. Pode-se afirmar que a radiação emitida aqueceu o fluido (no caso, o ar) originando uma corrente convectiva que possibilitou a troca de calor entre o fluido e a superfície da argamassa exposta à fonte luminosa. Após o ganho de temperatura da face exposta da argamassa ocorreu naturalmente o processo de condução, onde o calor foi transferido da face com temperatura mais alta para a de temperatura mais baixa.

A facilidade e rapidez com que ocorreram as transferências de calor por condução em cada tipo de argamassa serão discutidas nos resultados a seguir, pois dependem, dentre outros fatores, do tipo de material, da espessura da placa e das propriedades térmicas (condutividade térmica, resistência térmica, capacidade térmica, calor específico e difusividade térmica) de cada amostra estudada.

4.4.1 Monitoramento da temperatura – Parte 1

A partir da leitura das temperaturas, os dados obtidos são apresentados na Figura 38, que representa as diferenças entre a temperatura das faces da argamassa (expostas e não expostas à fonte de calor) e a temperatura ambiente, representando o aumento absoluto de temperatura sofrido em cada face. Nessa etapa do experimento, foi realizada apenas 1 medição para cada tipo de argamassa.

Figura 38: Diferenças entre temperaturas das faces das placas e temperatura ambiente – Parte 1



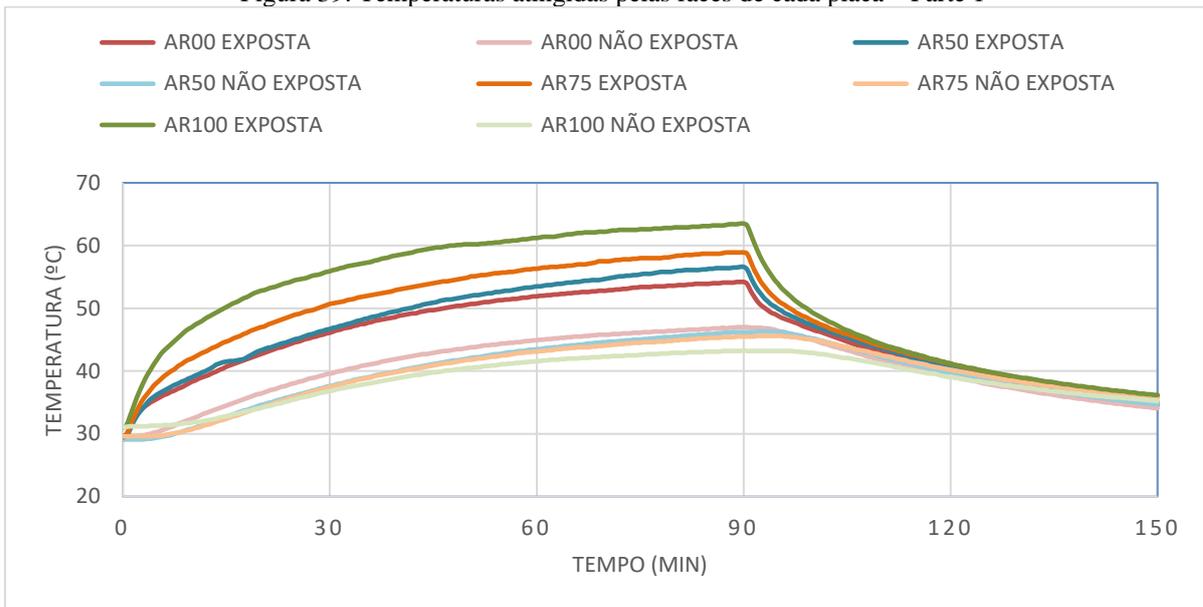
Fonte: Sena, Teixeira e Labaki (2018)

Observam-se que as placas com maiores teores de substituição de resíduo por areia apresentaram uma variação maior entre as faces provocando grande aumento de temperatura na face exposta em detrimento à face não-exposta, demonstrando que a condutividade térmica das argamassas diminuiu à medida que se aumentou a quantidade de resíduo, tornando as argamassas mais isolantes.

Assim, ao se expor uma das faces da AR100 à fonte de calor, esta apresentou um grande aumento de temperatura (em torno de 30°C em relação à temperatura ambiente), considerando a dificuldade da transferência de calor de uma face para a outra (SENA, TEIXEIRA e LABAKI, 2018).

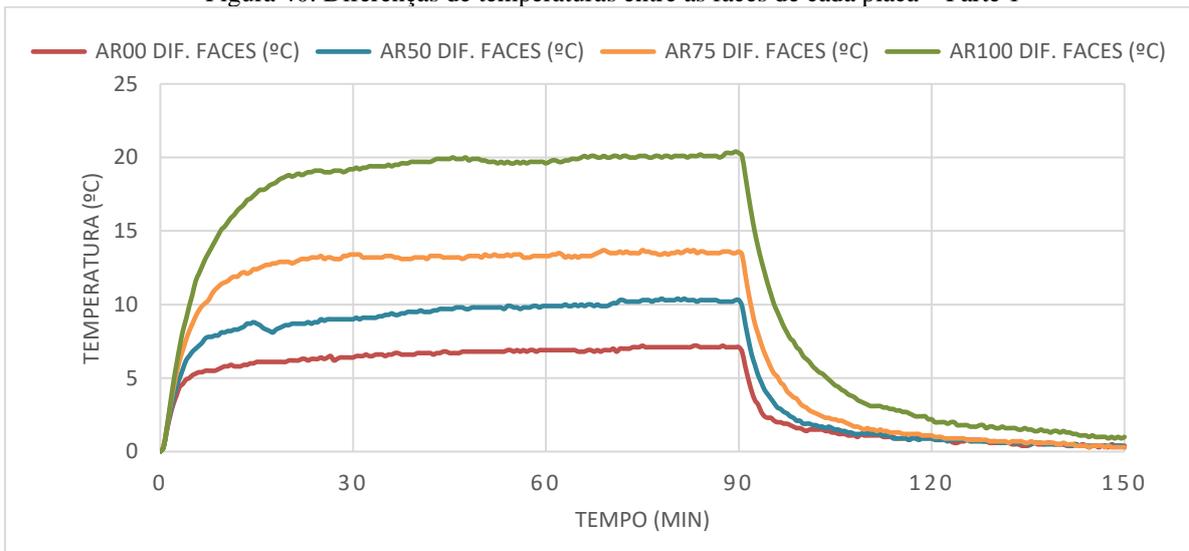
A Figura 39 por sua vez apresenta as temperaturas nas faces de cada placa (expostas e não-expostas à fonte de calor) sem levar em consideração a diferença em relação à temperatura ambiente, demonstrando a elevação mais acentuada de temperatura da face exposta em detrimento à não-exposta para as argamassas com maiores teores de resíduo.

Figura 39: Temperaturas atingidas pelas faces de cada placa – Parte 1



A Figura 40 apresenta as diferenças de temperaturas entre as faces de cada argamassa.

Figura 40: Diferenças de temperaturas entre as faces de cada placa – Parte 1



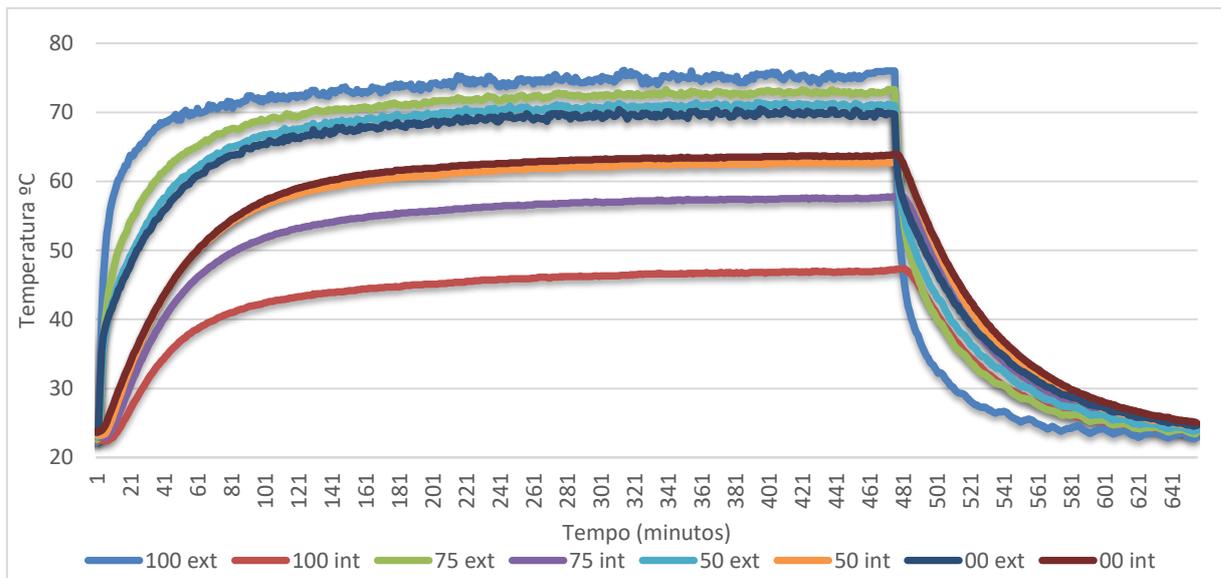
Fonte: Sena, Teixeira e Labaki (2018)

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura 40 pode-se verificar que a argamassa AR100 obteve uma diferença máxima de temperatura entre as faces de 20,4°C enquanto que a AR75 obteve 13,7°C, a AR50, 10,4°C e a AR00, 7,2°C. Esses dados confirmam que quanto menor a densidade do material exposto à variação de temperatura, maior será sua resistência térmica, isto é, menor será a propagação de calor por condução entre as superfícies do material (SENA, TEIXEIRA e LABAKI, 2018).

4.4.2 Monitoramento da temperatura – Parte 2

Na segunda etapa do experimento de monitoramento de temperatura, foram realizadas três medições para cada tipo de argamassa, conforme apresentado no item 3.4.2. A partir do monitoramento das temperaturas foi calculada a média dos dados obtidos que estão apresentados na Figura 41 e representam as temperaturas nas faces externas (expostas à fonte de calor) e internas (não expostas à fonte de calor) de cada placa.

Figura 41: Temperatura nas faces externas e internas das placas de argamassas – Parte 2



Analisando-se o gráfico da Figura 41, pode-se observar que, semelhantemente ao experimento realizado na Parte 1 deste tópico, as placas com maiores teores de resíduo apresentaram grande aumento de temperatura na face exposta em detrimento à face não-exposta. Isso demonstra que a condutividade térmica e a difusividade térmica das argamassas diminuíram à medida em que se aumentou a quantidade de resíduo.

O Quadro 25 traz um resumo sobre as temperaturas máximas atingidas durante o ensaio para todas as faces das placas de argamassa.

Quadro 25: Temperaturas máximas atingidas pelas placas – Comparativo Parte 1 e 2

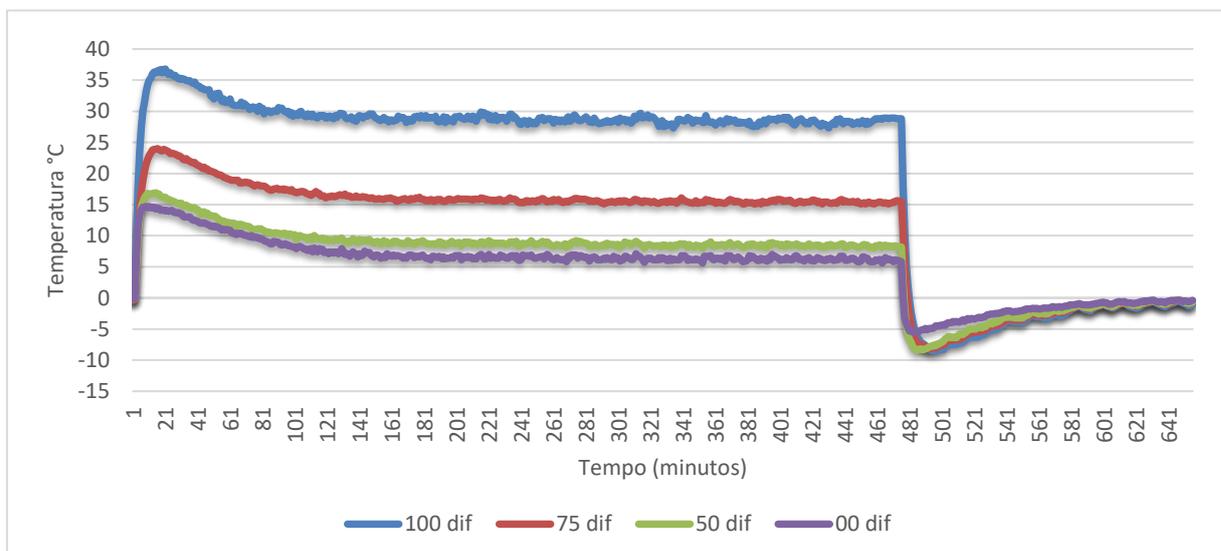
Argamassa	Face	Temperatura Máxima – Parte 1 (°C)	Temperatura Máxima – Parte 2 (°C)
AR00	Face externa (exposta)	54,2	70,5
	Face interna (não exposta)	47,0	63,9
AR 50	Face externa (exposta)	56,6	71,4
	Face interna (não exposta)	46,3	62,8
AR 75	Face externa (exposta)	58,9	73,3
	Face interna (não exposta)	45,6	57,9
AR 100	Face externa (exposta)	63,5	76,1
	Face interna (não exposta)	43,3	47,4

Assim, ao se expor uma das faces da AR100 à fonte de calor, essa apresentou um grande aumento de temperatura atingindo 63,5°C na Parte 1 do experimento e 76,1°C na Parte 2, enquanto a face não exposta à fonte de calor atingiu 43,3°C e 47,4°C nas etapas 1 e 2 do ensaio, respectivamente. Já a AR00 atingiu as temperaturas de 54,2°C e 70,5°C na face externa (exposta) nas Partes 1 e 2 do experimento, respectivamente, mas atingiu altas temperaturas também internamente (47,0°C e 63,9°C nas etapas 1 e 2 do ensaio, respectivamente).

A temperatura da face exposta à fonte de calor da AR100 provavelmente permaneceu apenas na superfície, por isso que a diminuição da temperatura, assim que a fonte de calor foi desligada, aconteceu de maneira bastante brusca inicialmente. Esse fenômeno pode ser explicado devido à dificuldade de transferência de calor de uma face para a outra, que é maior na AR100 do que na AR00, como já explicado anteriormente.

A Figura 42 apresenta as diferenças de temperatura entre as faces de cada argamassa ao longo do tempo.

Figura 42: Diferenças de temperatura entre as faces de cada placa – Parte 2



Analisando-se o gráfico da Figura 42, pode-se observar que as diferenças de temperaturas entre as faces aumentaram à medida que se elevou o teor de substituição do resíduo de PU pela areia. Portanto, as argamassas com as menores densidades apresentaram maior resistência térmica, isto é, menor foi a propagação de calor por condução entre as superfícies do material.

O Quadro 26 traz um resumo sobre as diferenças de temperaturas máximas atingidas durante os ensaios tanto na parte 1 quanto na parte 2 para todas as faces das placas de argamassa.

Quadro 26: Diferenças de temperaturas máximas atingidas pelas placas – Comparativo Parte 1 e 2

Argamassa	Diferenças de Temperaturas (máximas) - Parte 1 (°C)	Diferenças de Temperaturas (máximas) - Parte 2 (°C)
AR00	7,2	14,7
AR 50	10,4	16,9
AR 75	13,7	24,0
AR 100	20,4	36,8

De acordo com os valores apresentados no Quadro 26, pode-se inferir que todas as proporções de substituição estudadas são mais isolantes termicamente do que a AR00, que é a argamassa sem mistura. A AR100, principalmente, apresentou valores bastante relevantes, com a possibilidade de emprego em climas extremos, já que obteve diferenças de temperaturas próximas de 20° e 37°C entre as faces nas etapas 1 e 2 do ensaio, respectivamente.

Assim, se essas placas fossem utilizadas em tetos ou paredes, internamente o ambiente estaria mais isolado em relação à temperatura externa. Porém, essa análise precisa ser minuciosa, pois outros fatores interferem no comportamento térmico dos fechamentos, tais como o clima da região, cargas térmicas internas, uso e ocupação, taxa de renovação de ar, bem como o conjunto arquitetônico da edificação, dentre outros.

5 CONCLUSÃO

Conseguiu-se, nesse trabalho, realizar as pesquisas experimentais inicialmente propostas, sendo possível caracterizar as argamassas estudadas. Os ensaios realizados permitiram a obtenção dos dados relativos às propriedades mecânicas e térmicas de todas as argamassas, bem como as variações térmicas das mesmas quando submetidas a uma fonte de calor artificial.

As características dos materiais utilizados como agregados exerceram forte influência sobre algumas propriedades da argamassa de revestimento no estado fresco, tais como: densidade de massa e consistência; e no estado endurecido, tais como: resistência à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração.

Através dos agregados estudados, pôde-se evidenciar que quanto maior o fator de empacotamento, ou seja, menor porosidade, maior será a fluidez e densidade de massa da mistura, pois quanto menos vazios, maior será a “lubrificação” das partículas fornecida pela pasta, o que irá afastar os grãos e reduzir o atrito interno.

Outra característica importante na análise da influência do agregado miúdo nas propriedades do estado fresco é a massa unitária (MU), sendo que a diminuição da MU (agregados mais leves) implica menores índices de fluidez (índice de consistência) da mistura. Assim, faz-se necessário maior consumo de água afetando outras propriedades, principalmente no estado endurecido.

Em relação às propriedades no estado endurecido, a substituição de areia natural por resíduo de PU proveniente da produção de pranchas de surfe influenciou negativamente nas resistências, que sofreram redução nos seus valores à medida que se aumentou o percentual de resíduo presente na mistura.

As densidades, tanto no estado fresco como no endurecido, também foram influenciadas pela substituição da areia natural pelo resíduo de PU. Quanto maior foi o percentual de resíduo, menor se apresentou a densidade da argamassa, isto é, as argamassas foram mais leves. Assim, as argamassas com alto teor de resíduo podem proporcionar um alívio considerável de carga nas estruturas de edificações que utilizam essa argamassa não-convencional em comparação com as que utilizam a argamassa convencional (com areia natural).

Evidenciou-se ainda que ao se tornar mais leves e porosas, as argamassas tiveram um aumento significativo dos valores de absorção e de coeficiente de capilaridade. A absorção de água pelas forças capilares é uma propriedade que influencia o surgimento de patologias, pois quanto maior esse coeficiente, mais rapidamente se dará a entrada de água na argamassa, o que pode causar diminuição na durabilidade das mesmas, já que agentes agressivos poderão estar sendo transportados para o interior do material.

Foi possível analisar a influência do teor de substituição de areia pelo resíduo de PU e classificar as argamassas produzidas em relação às propriedades mecânicas. Contudo o presente trabalho, por ser baseado nas normas brasileiras, não pode sugerir utilizações para cada tipo de argamassa, tendo em vista que as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não apresentam os limites mínimos para os diferentes tipos de aplicação.

Ao analisar os comportamentos térmicos das argamassas, constatou-se que os resultados de desempenhos térmicos encontrados tiveram diferenças significativas. Vale ressaltar que todas as proporções de substituição estudadas apresentaram maior isolamento térmico em relação à argamassa AR00, que é a sem substituição. Acredita-se que esses resultados se devem, principalmente, às diferenças de densidade, já que as argamassas leves têm usos indicados para isolamento térmico e acústico.

Os resultados obtidos evidenciam o comportamento isolante das argamassas com maiores teores de resíduo, pois a difusividade térmica é a medida da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material e está intimamente ligada com a condutividade térmica. Assim, um elevado valor daquela significa uma rápida transferência do calor dentro do material.

A difusividade térmica é uma variável importante para o controle térmico das construções, pois expressa quão rapidamente um corpo se ajusta por inteiro à temperatura do seu entorno. Assim, materiais de baixa condutividade, como é o caso da AR100 (menor condutividade das argamassas estudadas), retardam a transferência de variações externas de temperatura para o interior das construções, isto é, são mais isolantes termicamente.

Foram obtidas as propriedades de isolamento térmico das argamassas com substituição de areia por resíduo de PU em comparação com a argamassa de referência. Porém, faz-se necessária inicialmente uma análise das necessidades das edificações ou sistemas construtivos de acordo com o clima da região que se pretenda utilizá-las. Alguns climas, por exemplo,

precisam mais de ventilação (trocas de ar) do que de elevado isolamento térmico para permitir o conforto térmico dos usuários, sem o uso de condicionadores de ar.

Uma ferramenta muito importante para auxiliar nas especificações é a simulação computacional, que leva em consideração não apenas as características dos materiais, mas também engloba a influência que todo o conjunto arquitetônico proporciona e utiliza os dados climáticos locais disponíveis que interferem diretamente nos resultados.

Portanto, essa dissertação acrescenta informações, experiências e valores que podem servir como fonte de pesquisa sobre o assunto abordado para outros trabalhos. Outrossim, pode criar expectativas e projeções para novas pesquisas, como o desenvolvimento de um estudo sobre a durabilidade das argamassas com incorporação de resíduo de PU através de ensaios de envelhecimento acelerado, bem como a utilização de aditivos que melhorem as propriedades mecânicas, diminuindo a relação água/cimento, por exemplo. Esse fato pode favorecer não só aos usuários e as empresas locais, mas também a sustentabilidade local fornecendo mais informações sobre todo o potencial desse material.

REFERÊNCIAS

ALDERETE, N.; VILLAGRÁN-ZACCARDI, Y. A.; DE BELIE, N. Physical evidence of swelling as the cause of anomalous capillary water uptake by cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 256-266, Jun 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira 4,8 mm: Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2003a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro. 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro. 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro. 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro. 2005e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro. 2005f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos: Determinação da resistência potencial de aderência à tração**. Rio de Janeiro. 2005g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade**. Rio de Janeiro. 2005h.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto: Especificação**. Rio de Janeiro. 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro. 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: Cimento Portland: Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: Terminologia.** Rio de Janeiro. 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: Especificação.** Rio de Janeiro. 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7213: Agregados leves para concreto isolante térmico: Requisitos.** Rio de Janeiro. 2013c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro. 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro. 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó: Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro. 2017.

BARCELOS, R. L.; MAGNAGO, R. F.; LERIPIO, A. A. Análise do impacto tecnológico para indústria e seus efeitos na produção e destinação de seus resíduos: estudo de caso da indústria de pranchas de surfe. **6º International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, 24 - 26 Maio 2017.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influência dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulação do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 79-97, out/dez 2011.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**, 5ª. ed. revisada (2013). São Paulo: [s.n], 1994. 488p.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do Desempenho Térmico de Sistema Construtivo de Concreto com EPS como agregado graúdo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFRN. Natal, p. 64. 2003.

BOLORINO, H.; CINCOTTO, M. A. **A influência dos tipos de cimento nas argamassas.**, In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Salvador, 1997. 15-25. Disponível em: <https://goo.gl/AQbBF6>. Acesso em: 15 de março de 2019.

BORGES, J. C. D. S. **Compósito de poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFRN. Natal, p. 80. 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, ago 2010.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CAPORRINO, C. F. **Patologia das anomalias em alvenarias e revestimentos argamassados**. 1ª. ed. São Paulo: Pini, 2015.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, v. 2, 2010. Cap. 28, p. 885-936.

CARASEK, H. et al. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 714-732, Jul./Set. 2016.

CARASEK, H. et al. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, São Paulo, v. 64, n. 370, p. 288-300, abr./ jun. 2018.

CASALI, J. M. et al. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 261-279, jan./ mar. 2018.

DECAGON DEVICES. **KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. Operations manual**. Pullman, p. 71. 2016.

DUPAS, G. **O mito do progresso ou progresso como ideologia**. São Paulo: UNESP, 2006.

FEIJÓ, T. T. **Análise do desempenho térmico de painéis de vedação produzidos com fibrocimento aplicáveis à habitação de interesse social em Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - UFAL. Maceió, p. 115. 2013.

FERREIRA, B. B. D. **Tipificação de patologias em revestimentos argamassados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFMG. Belo Horizonte, p. 192. 2010.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2ª. ed. São Paulo: Pini, 2009.

FLORES-ALÉS, VICENTE et al. Physical-mechanical behaviour and transformations at high temperature in a cement mortar with waste glass as aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 29, May. 2020.

FRADE, D. F. et al. Argamassa de Reboco com características térmicas. **APFAC - 3º Congresso Português de Argamassas**, 2010. Disponível em: www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2070_2010.pdf. Acesso em: 12 Setembro 2017.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 8ª. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.

FUNDAÇÃO JOAO PINHEIRO. **Déficit habitacional no Brasil 2015: resultados preliminares**. Belo Horizonte. 2015.

- GADEA, J. et al. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 672-677, Oct. 2010. ISSN 0958-9465.
- GRIJÓ, P. E. A. **Alternativas de Recuperação dos Resíduos Sólidos gerados na produção de pranchas de surfe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - UFSC. Florianópolis, p. 138. 2004.
- GRIJÓ, P. E. A.; BRÜGGER, P. Estudo Preliminar para Gestão Ambiental na Produção de Pranchas de Surfe. **3º International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, 18 - 20 Maio 2011.
- GUPTA, L. K.; VYAS, A. K. Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 155-164, Dec. 2018.
- GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S. et al. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 653-658, Mar. 2012. ISSN 0950-0618.
- HUA-YUEH, L.; HAN-SHENG, W.; CHEN-PEI, C. Study on engineering and thermal properties of environment-friendly lightweight brick made from Kinmen oyster shells & sorghum waste. **Construction and Building Materials**, v. 246, June 2020. ISSN 0950-0618.
- IBGE. **SIDRA - Banco de Tabelas Estatísticas**. Rio de Janeiro. 2017.
- JESUS, A. R. D. et al. **Fabricação de Pranchas de Surfe**. Instituto Euvaldo Lodi - IEL/BA. Salvador, p. 30. 2013.
- JUNCO, C. et al. Deformability of mortars incorporating polyurethane foam waste under cyclic compression fatigue tests. **Advanced Materials Research**, v. 1129, p. 477-483, Nov. 2015. ISSN 1662-8985.
- KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios de transferência de calor**. Tradução de Noveritis do Brasil. 7ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras/ Procel, 2014.
- MORTAR INDUSTRY ASSOCIATION. **A guide to BS EN 998-1 and BS EN 998-2. Data sheet 19. Issue 3. July**. [S.l.], p. 6. 2015.
- OLIVEIRA, G. B. S. et al. Mapeamento da deposição irregular dos resíduos provenientes da construção civil na cidade de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 11, n. 3, p. 86-90, Jul-Set 2016. ISSN 1981-8203. Disponível em: <<http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS>>. Acesso em: 09 Novembro 2017.
- OLIVEIRA, R.; BRITO, J. D.; VEIGA, R. Incorporation of fine glass aggregates in renderings. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 329-341, July 2013.
- PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 12ª. ed. São Paulo: Globo, 2003.
- PIERINI, M. **NALU: Pranchas eco-sustentáveis**. Dissertação (Mestrado em Design de Produto) - Instituto Politécnico de Leiria. Caldas da Rainha, Leiria, Portugal. 2016.

RAMALHO JÚNIOR, F.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. D. T. **Os Fundamentos da Física**. 9ª ed. São Paulo: Moderna, v. 2, 2007.

SACHS, I.; VIEIRA, P. F. **Rumo à ecossocioeconomia**: teoria e prática do desenvolvimento. São Paulo: Cortez, 2007.

SANTOS, W. N. D. Condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico. In: CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2003. p. 285-298.

SENA, P. L. S.; TEIXEIRA, C. F. B.; LABAKI, L. C. **Estudo do desempenho térmico de argamassa com adição de resíduo de poliuretano**. Foz do iguaçu. 2018.

SORIMA NETO, J. Surfe movimentou R\$ 7 bi ao ano em roupas, pranchas e acessórios. **O Globo**, 27 Novembro 2016. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/surfe-movimentou-7-bi-ao-ano-em-roupas-pranchas-acessorios-20547660>>. Acesso em: 31 Agosto 2017.

VEIGA, J. E. D. **Do global ao local**. Campinas, SP: Armazém do Ipê (Autores Associados), 2005.

VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004. Disponível em: <<https://www.poliuretanos.com.br>>. Acesso em: 24 Outubro 2018.

ZAMBON, M. M.; LUNA, M. M. M.; CAMPOS, L. M. D. S. Pranchas de surfe de diferentes materiais: Uma análise da logística reversa. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 6, n. 1, p. 17, 2016. ISSN: 2318-3233. Disponível em: <<http://www.revistaseletronicas.fmu.br/>>. Acesso em: 01 Setembro 2017.

ANEXO A – Informações sobre o poliuretano utilizado na fabricação das pranchas de surfe

PARTE 1:

Surfblanks Australia. 13 West St, Brookvale, NSW, 2100, Australia

Phone: 61(0)2 9938 3300, Fax: 61(0)2 9905 4650,

Email: sales@surfblanksaustralia.com

Date of Issue: September, 2005

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Non Hazardous according to criteria of Worksafe Australia

Product Name : Surfblanks Phenolic Polyol

Manufactured by : Surfblanks Australia Pty Ltd

CHEMICAL/TECHNICAL DESCRIPTION

Liquid foam polyol suitable for use in 'pour in place' rigid polyurethane foam for surfboards.

U.N. Number : None allocated.

Dangerous Goods Class : Not regulated.

Secondary Risk : Not regulated.

Hazchem Code : Not regulated.

Pack Group : Not regulated.

Spec. EPG : Not regulated.

Cas No : Not regulated.

Poison Schedule : Not regulated.

*PHYSICAL DESCRIPTION / PROPERTIES**Appearance: Clear/bluish liquid with slightly characteristic odour.**Boiling point: Decomposes at elevated temps.**Vapour pressure: N/A.**Flash Point: > 125 ASTM D-93, PMCC.**Solubility in water: Slightly soluble.**Melting point: N/A.**Specific Gravity: 1.12 (water=1).**Viscosity: 850 cps at 20c.**Flammability Limits: Not determined.**Lower explosion limit: N/A.**Upper explosion limit: N/A.**OTHER PROPERTIES**Boiling point: Decomposes below boiling point at ambient pressure.**Pour point: -35deg c.**INGREDIENTS*

<i>Chemical Entity</i>	<i>CAS Number</i>	<i>Proportion</i>
<i>Polyethylene Triol</i>	<i>9082-00-2</i>	<i>65%</i>
<i>Polyoxypropylene Tetrol</i>	<i>9082-00-2</i>	<i>25%</i>
<i>Water (H2O)</i>		<i>9.5%</i>
<i>Phenolic Curing System</i>	<i>Proprietary product</i>	<i>.5%</i>

HEALTH HAZARD INFORMATION

Health Effects

Acute - Ingestion: Single dose oral toxicity is low . Irritant to digestive mucosas, mouth and throat.

Acute - Eye: May cause slight transient (temporary) eye irritation. Corneal injury is unlikely.

Acute - Skin: Prolonged or repeated contact can cause dryness of the skin, chapping, skin irritation

Acute - Inhaled: Can cause dizziness in conditions of poor ventilation.

Chronic Effects: No specific data available.

FIRST AID MEASURES

Swallowed: Induce vomiting if large amounts are ingested. Consult medical personnel immediately.

Eye: Irrigate with copious flowing water immediately, and continuously for 15 minutes.

Skin: Wash off in flowing water or shower. Remove contaminated clothing, and wash before reuse.

Inhaled: Remove subject to fresh air.

First Aid Facilities: It is good practice to have an eye washing facility adjacent to the work place location.

Advice to Doctor: No specific antidote. Supportive care. Treatment based on judgement of the doctor in response to the reactions of the patient.

PRECAUTIONS FOR USE

Exposure Standards: None established.

Engineering Controls: Good general ventilation is required.

Personal Protection: No respirator protection should be needed to handle Polyol component.

Glove Type: Impervious PVC gloves.

Eye Protection: Safety goggles.

Clothing: Coveralls

Respirator Type: Not required under proper industrial hygienic practice.

Flammability: Combustible vapour of product is not anticipated to form flammable mixtures with the air at ambient temperatures.

SAFE HANDLING INFORMATION

Storage Transport: This product is not classified in the Australian Dangerous Goods Code either by reference to a specific substance name or a generic substance name or group. Store in a cool dry area away from any source of ignition, strong acids and oxidising agents.

Storage life: Six months in a cool dry area in fully sealed containers.

Spills and disposal: Clean Up Spills/Leaks: Absorb spilled material with inert absorbent (sand, vermiculite etc) and put in closed containers for disposal to approved site. Do not permit to contaminate waterways, sewers or drains.

Precautions for Clean Up Crew: Avoid skin and eye contact, wear gloves, glasses and coveralls. Avoid breathing vapours directly.

Disposal Method: Burn in an approved incinerator or remove to authorized disposal area, in accordance with applicable state and /or Local Government regulations.

Hazards of Use/Storage: Will support combustion. No explosive hazard. Do not breath smoke from burning product.

List of Dangerous Decomposition or Combustion Products: May decompose in heat/fire releasing products of greater hazard.

Fire Fighting Recommendations:

Types of Extinguisher/fire- Fighting Agents: Foam, alcohol resistant foam, CO, and dry chemical.

Protective Clothing: Wear positive pressure self-contained breathing apparatus, safety glasses, boots, gloves and coveralls.

Reactivity: Stable under normal handling and storage conditions. Incompatible with oxidising materials and strong acids.

The above information is given in good faith. No guarantee is implied or given since processors of the Foam System use a variety of methods unknown to Surfblanks Australia P/L.

Surfblanks Phenolic Foam Polyol has been specifically designed for the surfboard industry for the manufacture of foam cores suitable for hand and machine shaping. Surfblanks Australia manufactures the Polyol to a proprietary formulation and process from base petroleum chemicals and some processed polyalcohols. The Polyol complies with specifications set only by Surfblanks Australia P/L.

PARTE 2:

Surfblanks Australia. 11 West St, Brookvale, NSW, 2100, Australia

Phone: 61(0)2 9938 3300, Fax: 61(0)2 9905 4650,

Email: surfblanks@iprimus.com.au

Date of Issue: September, 2005

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Hazardous according to the criteria of Worksafe Australia

Product Name : Surfblanks Phenolic Prepolymer

Manufactured by : Surfblanks Australia Pty Ltd

CHEMICAL/TECHNICAL DESCRIPTION

Liquid foam prepolymer suitable for use in 'pour in place' rigid polyurethane foam for surfboards

Classification : Haz 6.1

UN No : 2078

IMDG : 6230

Hazchem Code : 2XE

Poisons Schedule Number : 6

Package Group : II

Flashpoint : >125

Hazard Classification : Lung toxin, skin and eye hazard, sensitiser, irritant, water reactive.

INGREDIENTS

The Prepolymer is the product of a reaction of 80/20 toluene di isocyanate and a phenolic sensitive sucrose based polyether polyols with polyethylene polyalcohols. The isocyanate is in excess by approximately 33% (plus or minus 1%)

PHYSICAL SPECIFICATIONS

Colour: Clear as a fluid, then fully white when foamed.

Average viscosity: 800 cps at 20 degrees Celsius.

Specific gravity: 1.24

Flash point: Above 108 degrees Celsius

HEALTH HAZARD INFORMATION

Health Effects

Acute - Ingestion: *Toxic. Ingestion may cause gastrointestinal irritation. Ingestion may cause burns to mouth and throat.*

Acute - Eye: *Irritating to eyes. Effects include lacrimation, burning and considerable irritation of the outer eye. High vapour concentration can severely irritate the eyes.*

Acute - Skin: *Irritating to skin. Prolonged or repeated exposure may cause skin irritation. May stain the skin. Skin contact may result in allergic skin reactions or respiratory sensitisation but is not expected to result in absorption of amounts sufficient to cause other adverse effects. The LD50 for skin absorption in rabbits is greater than 4000 mg/Kg.*

Acute - Inhaled: *Very toxic inhalation. May cause sensitisation by inhalation. Irritating to respiratory system. Symptoms may include coughing, difficult breathing and a feeling of tightness in the chest. Effects may be delayed. Impaired lung function (decreased ventilatory capacity) has been associated with overexposure to isocyanates.*

Chronic Effects: **SYSTEMIC (OTHER TARGET ORGAN) EFFECTS:** *Tissue injury in the upper respiratory tract and lungs has been observed in laboratory animals after repeated excessive exposures to TDI.*

FIRST AID MEASURES

Inhaled: *Remove patient to fresh air, if not breathing apply artificial respiration. Exposure to Prepolymer may cause delayed respiratory reaction.*

Skin: *Immediately remove all contaminated clothing including footwear. Wash thoroughly all affected areas with soap and water for at least 15 minutes.*

Eyes: *Immediately hold eyes open and wash with large amounts of water for at least 15 minutes.*

Swallowed: *If conscious give water or milk. Induce vomiting by giving patient Ipecac Syrup APF or by finger down throat. Do not attempt to give liquids by mouth if patient is unconscious.*

Advice to Doctor: *Corrosive. May cause stricture. If lavage is performed, suggest endotracheal and/or esophagoscopy control. No specific antidote. Supportive care. Treatment based on doctor in response to reactions of the patient. The manifestations of symptoms, including pulmonary oedema, resulting from acute exposure may be delayed. May cause respiratory sensitisation.*

PRECAUTIONS FOR USE

Exposure Standards: *The Prepolymer contains toluene diisocyanate (TDI), whose vapour pressure at room temperature is 3×10^{-2} mbar. The industrial hygiene exposure limit for toluene diisocyanate varies from country to country at approximately .01 to .05 parts per million in the air.*

Australia: *Workplace Exposure Standard for free isocyanates =*

a - 0.02 mg/m³ = Time weighted average exposure.

b - 0.07 mg/m³ = Short term exposure limit.

Engineering Controls: *Work with the Prepolymer should only be carried out in a well ventilated area with adequate exhaust ventilation at each workplace, otherwise the exposure limit will be exceeded even at room temperature. Air should be drawn away from personnel handling the product. Exhaust equipment should be checked periodically. When processing at elevated temperatures, more stringent safety precautions should be observed.*

Personal Protection: *Contact of the reacting material with skin or eyes may cause severe burns and may be difficult to remove from the affected areas. Immediately wash affected areas with plenty of water (warm, soapy water is preferable) and seek medical attention. In addition, such contact increases the risk of exposure to isocyanate vapours. Use only approved protective clothing and equipment when handling this material (refer to Australian Standards below).*

Respirator Protection: *Atmospheric levels should be maintained below the exposure standard. When respiratory protection is required for certain operations, use an approved positive pressure supplied-air respirator. For emergency and other other conditions where the exposure limit may be greatly exceeded, use an approved positive pressure self-contained breathing apparatus or positive pressure airline with auxiliary self contained air supply.*

Skin Protection: *Use protective clothing impervious to this material. Selection of specific items such as face shield, gloves, boots, apron, or full body suit will depend on operation. Remove contaminated clothing immediately, wash skin area with warm soapy water and launder clothing before reuse.*

Glove Type: *AS 2161: Industrial Safety gloves (butyl rubber or viton, excluding electrical or*

medical gloves).

Eye/Face Protection: Used approved safety glasses. If vapour exposure causes eye discomfort, use a full face respirator. Selection and use of personal protection equipment should be in accordance with the recommendations in one more of the relevant Australian Standards, including: AS 1336: Recommended practices for eye protection in the industrial environment. AS/NZS: Eye protectors for industrial application. AS/NZS: Selection, use and maintenance of respiratory protective devices.

Clothing: AS/NZS 2210: Occupational protective footwear. AS 2919: Industrial clothing.

SAFE HANDLING INFORMATION

Protective clothing and breathing respirators must be worn when handling opened containers or processing the System to foam.

The Prepolymer should be stored in a well ventilated area at temperatures between 10 and 40 degrees C.

All containers must be stored securely sealed. No moisture must make contact with the Prepolymer otherwise involuntary foaming will occur.

Fire

Hot Prepolymer reacts vigorously with small amounts of water. Where water is used it should be used in very large quantities. If involved in a fire it will give off large amounts of hydrogen cyanide and other toxic fumes.

Alert fire brigade. Tell them location of material and quantity. Evacuate area.

Spills and Leaks

Environmental hazard - Contain spillage. Evacuate all personnel from downwind area. Avoid breathing vapour. Wear air supplied breathing apparatus and full protective rubber clothing including boots. Do not allow spillage to enter drains. Stop leak where possible. Contain and absorb spills with sawdust, earth or sand, transfer to open top container, remove to well ventilated area, add decontaminant and allow to neutralise for 24 - 48 hours.

Decontaminant = Water 90% + Concentrated ammonia = 8% + Liquid detergent = 2%

FIRE/EXPLOSION HAZARD

Fire Hazards: Combustible. May evolve toxic gases (carbon oxides, hydrocarbons) when heated to decomposition.

Sources of Ignition: Incompatible with oxidising agents, acids, alkalies, alcohols, water.

Keep away from all heat and ignition sources.

Hazardous Combustion Products: *Isocyanate vapour and mist, carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides and hydrogen cyanide.*

Fire Fighting Equipment: *People who are fighting isocyanate fires must be protected against isocyanate vapours and hazardous combustion products by wearing positive air pressure self-contained breathing apparatus and full protective clothing.*

Extinguishing Media: *Carbon dioxide, dry chemical foam. For large fires, alcohol resistant foams are preferred if available. general purpose synthetic foams or protein foams may function but much less effectively. Water may be used as a blanket for fire extinguishment. If it is used, it should be used in very large quantities. The reaction between water and isocyanate may be vigorous. If possible contain fire run off water.*

Fire Fighting Instructions: *Downwind personnel must be evacuated. Do not reseal contaminated containers. A chemical reaction generating carbon dioxide may occur resulting in rupture of the container. Dense smoke will be emitted when burned without sufficient oxygen. When using water spray, boil-over may occur when the product reaches the boiling point of water, then the reaction forming carbon dioxide will accelerate (tank type scenarios, not spills).*

Chemical Stability Conditions to Avoid: *Avoid prolonged heating over 40c. Stable when stored under normal conditions. Thermal decomposition begins at temperatures above 180c. High concentrations of toxic TDI vapours may be evolved at temperatures above 40c.*

Incompatibility with other materials: *Water, acid, bases, alcohols and metal compounds. Avoid water as it reacts to form heat and carbon dioxide. Enough heat and pressure can be produced to rupture a container. The reaction with water is slow at temperatures less than 40c, but accelerated at higher temperatures and in the presence of the above mentioned materials. Some reactions are violent.*

Hazardous Decomposition Products: *Excessive heating can produce isocyanate vapour, mist and other hazardous organic compounds.*

Hazardous Polymerisation: *May occur with incompatible reactants, especially strong bases, water, or temperatures over 180c.*

The above information is given in good faith. No guarantee is implied or given since processors of the Foam System use a variety of methods unknown to Surfblanks Australia P/L.

Surfblanks Phenolic Foam Prepolymer has been specifically designed for the surfboard industry for the manufacture of foam cores suitable for hand and machine shaping. Surfblanks Australia manufactures the Prepolymer to a proprietary formulation and process from base petroleum chemicals and some processed polyalcohols. The Prepolymer complies with specifications set only by Surfblanks Australia P/L.