

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E AMBIENTAL

**DESEMPENHO TERMO FISICO E MECÂNICO
DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
PRODUZIDAS COM RESÍDUOS SÓLIDOS
POLIMÉRICOS, MINERAIS E VEGETAIS**

ALCEU APARECIDO CARDOSO

CUIABÁ - MT
MAIO - 2017

ALCEU APARECIDO CARDOSO

**DESEMPENHO TERMO FISICO E MECÂNICO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
PRODUZIDAS COM RESÍDUOS SÓLIDOS
POLIMÉRICOS, MINERAIS E VEGETAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Faculdade de Arquitetura e Engenharia da Universidade Federal de Mato Grosso como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração:
Construção Civil

Orientador:
Prof. Dr. Ivan Julio Apolonio Callejas

CUIABÁ - MT

MAIO de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Orlando Nigro – Campus Cuiabá

C268d Cardoso, Alceu Aparecido.

Desempenho termo físico e mecânico de argamassas de revestimento produzidas com resíduos sólidos poliméricos, minerais e vegetais / Alceu Aparecido Cardoso . – Cuiabá: UFMT, 2017.
173 f., il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Júlio Apolônio Callejas (Orientador) .

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Mato Grosso , Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Faculdade de Arquitetura e Engenharia.
Inclui referência.

1. Argamassa de Revestimento . 2. Resíduos sólidos – Desempenho Físico e Mecânico . I. Callejas, Ivan Júlio Apolônio . (Orientador). II. Título.

CDD – 691
CDU - 691.53



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e
Ambiental
Cuiabá, Mato Grosso

Alceu Aparecido Cardoso

**DESEMPENHO TERMO FISICO E MECÂNICO DE
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM
RESÍDUOS SÓLIDOS POLIMÉRICOS, MINERAIS E
VEGETAIS**

Esta dissertação foi avaliada e julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E AMBIENTAL. Esta versão final foi aprovada pelo orientador e pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental.

Cuiabá, 04 de Julho de 2017.

Prof. Dr. Bismarck Castillo Carvalho
Coordenador do PPGEEA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Julio Apolonio Callejas
(Orientador)

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Arquitetura, Engenharia
e Tecnologia
Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da
Gama

Departamento de Estruturas e Edificações
Centro Tecnológico
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Angela Santana de Oliveira

Departamento de Construção Civil
Campus Cuiabá Octayde Jorge da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Mato Grosso

Prof. Dr. Luciane Cleonice Durante

Departamento de Arquitetura
Faculdade de Arquitetura, Engenharia
e Tecnologia
Universidade Federal de Mato Grosso

DEDICATÓRIA

*Às minhas filhas Mariana e Manuela que me dão
paciência e alegria para continuar a trabalhar e
evoluir, me dando carinho, atenção e muita energia
em cada beijo, sorriso e abraços a todo momento.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Osvaldo Cardoso (in memorian) e Maria Aparecida Dias Cardoso, que dignamente me apresentaram à importância da família e ao caminho da honestidade e persistência, com muito amor e paciência.

À mulher da minha vida Albéria Cavalcanti de Albuquerque pelo apoio incondicional em todos os momentos, colocada na minha vida por Deus há 26 (vinte e seis) anos, me proporcionando felicidade, perseverança e energia para enfrentar todas as adversidades.

Ao meu orientador **Professor Dr. Ivan Júlio Apolônio Callejas** por acreditar no meu potencial, dando apoio e liberdade de trabalho em todos os momentos, proporcionando conhecimento e alternativas a seguir com a liberdade de pensar e discutir, sem a imposição de um inquisidor, mas a de um **ORIENTADOR**.

Ao Tecnólogo em Controle de Obras **Éder Souza de Almeida**, pelo apoio e tempo disponibilizado a mim e aos alunos que me ajudaram nesta pesquisa.

Aos meus Alunos e Orientandos de Conclusão de Curso, que trabalharam arduamente nesta pesquisa, Luiz Vicente Ledur, Guilherme Fernandes Butinhoni, Diogo Yasuo Takakura, Ana Cristina Vilas Boas Rezende Godinho, Gilson Marinho do Santos, Ivan de Souza e Silva, William Felipe Pinto Nascente, Daniela Carvalho da Silva e Suélen Patrocínio Dias.

Aos técnicos e estagiários do Laboratório do DACC/IFMT pelo apoio durante os ensaios.

Ao IFMT, Campus Cuiabá, por me proporcionar a oportunidade de Concluir este Mestrado, disponibilizando tempo para estudar, estrutura física para minhas pesquisas e incentivo profissional.

Ao Departamento de Área de Construção Civil (DACC) do Instituto Federal de Mato Grosso – Campus Cuiabá, pela disponibilização dos Laboratórios, Equipamentos, Técnicos e Estagiários para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

À Universidade Federal do Mato Grosso – UFMT por ter criado este Programa de Mestrado, que proporcionou a mim e muitos outros profissionais se qualificarem, disponibilizando estrutura física, recursos financeiros e recursos humanos qualificados para nos atender.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental da Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal do Mato Grosso e aos Professores e Técnicos Administrativos que sempre me auxiliaram e orientaram da melhor forma possível, contribuindo para o meu sucesso e conclusão deste Mestrado.

À Professora Dra. Albéria Cavalcanti de Albuquerque, que me auxiliou durante todo este trabalho de pesquisa, compartilhando seu conhecimento na área de materiais e, trabalhando ao meu lado no Laboratório, contribuindo com o meu sucesso neste trabalho.

RESUMO

CARDOSO, Alceu Aparecido. Desempenho termo físico e mecânico de argamassas de revestimento produzidas com resíduos sólidos poliméricos, minerais e vegetais. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) i Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017. 152p.

Com a recente publicação da norma NBR 15.575, os requisitos das características dos materiais empregados nas edificações tornaram-se mais exigentes a fim de que as mesmas proporcionem adequada habitabilidade aos usuários. Assim, entre os sistemas que necessitam ser aperfeiçoados estão os painéis de vedação que podem ter suas características aprimoradas, principalmente quanto ao nível do comportamento térmico. Uma forma de modificar o desempenho deste sistema pode se dar por meio do aperfeiçoamento dos seus componentes, como por exemplo, pela modificação da composição das argamassas de revestimento, tanto em termos dos materiais que são utilizados em sua produção como na proporção entre os mesmos. Vindo ao encontro dessa demanda técnica, há uma forte questão ambiental relacionada à mitigação dos impactos ambientais causados pela crescente geração de resíduos sólidos urbanos e industriais. A Lei 12305, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, inclui como um de seus princípios "o reconhecimento dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis como um bem econômico e de valor social, que gera trabalho e renda e promove a cidadania" e a "Ecoeficiência Pela compatibilidade entre a oferta de bens qualificados e serviços que atendam às necessidades humanas ", como promotores de qualidade de vida e de redução do impacto ambiental e de consumo de recursos naturais. Com base nesses preceitos, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho termo físico e mecânico de argamassas de revestimento que produzidas com resíduos sólidos poliméricos, minerais e vegetais em substituição parcial da areia natural. Dentre os resíduos sólidos urbanos e industriais disponíveis na região de Cuiabá, optou-se por dosar as argamassas com resíduos sólidos de origem vegetal (palha de arroz e pó de serra), de origem polimérica (EPS, PET e borracha de pneu) e de origem mineral (cerâmica vermelha, RCD e pó de vidro). Os resíduos poliméricos e minerais foram usados em teores de 10%, 20%, 30% e 40% em substituição do volume de areia natural e os resíduos vegetais nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%. Foram estudadas características térmicas, físicas e mecânicas de argamassas e a avaliação do desempenho das mesmas foi realizada com base nos requisitos estabelecidos pela NBR 13281. A partir dos resultados obtidos foi possível identificar teores de resíduos sólidos vegetais, poliméricos e minerais que podem ser incorporados nas argamassas de revestimento e resultar em argamassas com desempenho equivalente ao das argamassas confeccionadas com materiais convencionais. Ressalta-se, entretanto, que uma mesma argamassa pode apresentar desempenho alto em um requisito da norma e desempenho baixo em outro requisito. Assim sendo, as argamassas estudadas foram classificadas quanto ao uso, considerando-se os requisitos específicos para cada aplicação. É necessário, portanto, identificar qual requisito será mais importante na aplicação ou uso do revestimento e, só assim, escolher a argamassa mais adequada.

Palavras-chave: Argamassa de revestimento. Resíduos sólidos. Desempenho termo físico e mecânico.

ABSTRACT

CARDOSO, Alceu Aparecido. Thermal, physical and mechanical performance of coating mortars produced with polymeric, mineral and vegetable solid wastes. Dissertation (Masters in Environmental Engineering and Buildings), Faculty of Architecture, Engineering and Technology. Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2017.152p.

With the recent publication of standard NBR 15575, the requirements of the characteristics of the materials used in the buildings have become more demanding so that they provide adequate habitability to the users. Thus, among the systems that need to be improved are the sealing panels, which may have their improved characteristics, especially regarding the level of thermal behavior. One way of modifying the performance of this system can be by improving its components, for example by modifying the composition of coating mortars, both in terms of the materials used in their production and the proportion between them. In addition to this technical demand, there is a strong environmental issue related to the mitigation of the environmental impacts caused by the growing generation of urban and industrial solid waste. Law 12305, which establishes the National Solid Waste Policy, includes as one of its principles "the recognition of reusable and recyclable solid waste as an economic good and of social value, which generates work and income and promotes citizenship" and the "Eco-efficiency by the compatibility between the provision of qualified goods and services that meet human needs", as promoters of quality of life and of reduction of environmental impact and of consumption natural resources. Based on these precepts, the objective of this work was to evaluate the physical and mechanical performance of coating mortars produced with polymeric, mineral and vegetal solid residues in partial substitution of natural sand. Among the solid urban and industrial wastes available in the Cuiabá region, it was decided to mix the mortars with solid residues of vegetable origin (rice straw and sawdust), of polymer origin (EPS, PET and rubber tires) and mineral origin (red ceramics, CDW and glass powder). Polymeric and mineral residues were used in contents of 10%, 20%, 30% and 40% replacing the volume of natural sand and the vegetal residues in the contents of 5%, 10%, 15% and 20%. The thermal, physical and mechanical characteristics of the mortars were studied and the evaluation of their performance was performed based on the requirements established by NBR 13281. From the results obtained, it was possible to identify the contents of solid vegetal, polymeric and mineral residues that can replace the sand and result in mortars with equivalent performance to those produced with conventional materials. It should be noted, however, that the same mortar may exhibit high performance in one standard requirement and low performance in another requirement. Therefore, the mortars studied were classified according to the use, considering the specific requirements for each application. It is therefore necessary to identify which requirement will be most important in the application or use of the coating and only then to choose the most suitable mortar.

Key words: Coating mortars. Solid wastes. Thermal, physical and mechanical performance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1.OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2. Objetivos específicos.....	17
1.2. JUSTIFICATIVA	18
1.2.1. Justificativa técnica	18
1.2.2. Justificativa ambiental	19
2. REVISÃO BILIOGRÁFICA	20
2.1 FUNDAMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS	20
2.1.1 Requisitos ambientais.....	20
2.1.2 Requisitos técnicos.....	21
2.2 PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	22
2.2.1 A condução de calor em sistemas isolantes.....	23
2.2.2 Propriedades térmicas dos materiais.....	24
2.3 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIE.....	26
2.3.1 Índice de refletância e de absorvância solar.....	26
2.3.2 Termografia de infravermelhos (TIV)	31
2.4 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	32
2.4.1 Propriedades das argamassas	34
2.4.2 Métodos para estimativa das propriedades das argamassas	37
2.5 ARGAMASSAS PARA FINS DE ISOLAMENTO TÉRMICO	39
2.5.1 Argamassas com adição de agregados de origem vegetal.....	40
2.5.2 Argamassas com adição de polímeros	44
2.5.3 Argamassas com Agregados Minerais.....	49
2.5.4 Argamassas modificadas com aditivos	52
2.5.5 Argamassas com Nanomateriais	53
2.5.6 Relação entre Massa Específica, Condutividade Térmica e Resistência mecânica	54
3. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 MATERIAIS	59
3.1.1 Materiais convencionais constituintes das argamassas.....	59
3.1.2 Materiais provenientes de resíduos sólidos	60
3.1.3 Preparação dos materiais provenientes de resíduos sólidos	61
3.2 MÉTODO.....	64
3.2.1Caracterização dos materiais constituintes das argamassas	64
3.2.2 Definição dos traços de argamassa.....	66
3.2.3 Produção das argamassas.....	70
3.2.4 Ensaios de caracterização das argamassas	71
3.2.5 Metodologia de análise dos resultados	80

4 RESULTADOS	81
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA.....	81
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS	83
4.2.1 Água de consistência	85
4.2.2 Massa específica da argamassa fresca	87
4.2.3 Massa específica da argamassa endurecida.....	90
4.2.4 Velocidade do pulso de onda ultrassônica	92
4.2.5 Índice de vazios da argamassa endurecida.....	94
4.2.6 Absorção da argamassa endurecida por imersão em água	95
4.2.7 Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilar.....	97
4.2.8 Resistência à tração na flexão	99
4.2.9 Resistência à compressão (amostras prismáticas)	101
4.2.10 Resistência à compressão axial (amostras cilíndricas).....	103
4.2.11 Resistência de aderência à tração	104
4.2.12 Determinação da variação dimensional (Retração)	106
4.2.13 Determinação da absorvância solar	108
4.2.14 Determinação da temperatura superficial.....	110
4.3 CLASSIFICAÇÃO E USO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS.....	112
4.4 CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS	115
5. CONCLUSÕES	121
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
Apêndice A - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de origem vegetal	136
Apêndice B - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de resíduos de poliméricos	138
Apêndice C - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de resíduos minerais	139
Apêndice D - Ensaios com a argamassa fresca	141
Apêndice E - Curvas de regressão não linear	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 ĩ Requisitos exigidos para classificação das argamassas.....	36
Tabela 2 ĩ Massa específica, condutividade térmica e calor específico das argamassas.	36
Tabela 3 ĩ Classificação das argamassas segundo <i>Cahier 2669-2</i>	37
Tabela 4 ĩ Características de materiais isolantes térmicos que podem ser usados como agregados leves.	40
Tabela 5 - Síntese comparativa dos efeitos da incorporação de variados nanomateriais em argamassas...54	
Tabela 6 ĩ Percentual de substituição da areia por resíduos sólidos poliméricos e minerais	68
Tabela 7 ĩ Percentual de substituição da areia por resíduos sólidos vegetais	68
Tabela 8 ĩ Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos poliméricos.....	69
Tabela 9 ĩ Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos minerais.....	69
Tabela 10 ĩ Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos vegetais.	70
Tabela 11 ĩ Programa experimental da caracterização das argamassas.....	72
Tabela 12 ĩ Comprimentos de onda do equipamento ALTA II.....	78
Tabela 13 ĩ Refletâncias de referência obtidas em um espectrofotômetro da marca Varian modelo CARY 5G para uma folha de papel branco comum 75g/m ²	78
Tabela 14 ĩ Características do cimento CII F 32	81
Tabela 15 ĩ Características do cimento CII F 32	81
Tabela 16 ĩ Características do cimento CII F 32	83
Tabela 17 ĩ Resultados médios das características determinadas para as argamassas.	84
Tabela 18 ĩ Classificação das argamassas em função dos critérios estabelecidos pela NBR 13281 para a massa específica fresca	90
Tabela 19 ĩ Uso das argamassas de revestimento em função da classificação pela massa específica seca.	92
Tabela 20 ĩ Uso e classificação das argamassas de revestimento em função do coeficiente de capilaridade.....	99
Tabela 21 ĩ Uso e classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à tração.	101
Tabela 22 ĩ Classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à compressão em amostra prismática.....	103
Tabela 23 ĩ Classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à compressão axial ĩ amostra cilíndrica.	104
Tabela 24 ĩ Uso das argamassas de revestimento para emboço e camada única segundo NBR 13749 (ABNT, 2013).....	106
Tabela 25 ĩ Suscetibilidade à fissuração das argamassas de revestimento segundo CSTB, 1982 <i>apud</i> Rodrigues Filho, 2013	108
Tabela 26 ĩ Classificação das argamassas segundo NBR 13281 (ABNT, 2005a).....	113
Tabela 27 ĩ Classificação das argamassas estudadas quanto ao uso.....	114
Tabela 28 ĩ Coeficientes de determinação entre as características das argamassas (Apêndice E)	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Irradiação solar espectral.	27
Figura 2 - Temperaturas superficiais obtidas pelo termômetro pontual de infravermelhos (TIV) e pelos termopares.....	31
Figura 3 - Diferentes alternativas de revestimento de parede: (a) chapisco + emboço + reboco + pintura (sistema mais antigo, atualmente pouco utilizado); (b) chapisco + camada única + pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).....	33
Figura 4 - Agregado leve vegetal: Palha de arroz.	41
Figura 5 - Agregado leve vegetal: (a) Pó-de-serra granular; (b) Pó-de-serra fibroso.	41
Figura 6 - Agregado leve vegetal: Fibra de sisal.....	43
Figura 7 - Agregado leve vegetal: Morfologia do pó de cortiça - ampliado 50 vezes.	43
Figura 8 - Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas vegetais em função da massa específica.....	44
Figura 9 - Esferas de EPS.....	45
Figura 10 - Microestrutura do EPS.	45
Figura 11 - Resíduos de embalagens PET na forma de flocos.....	47
Figura 12 - Resíduos de EVA da indústria calçadista.	47
Figura 13 - Trituração de pneus inservíveis.....	47
Figura 14 - Raspas e pó de pneu após peneiramento e classificação.....	47
Figura 15 - Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos poliméricos em função da massa específica.....	49
Figura 16 - Resíduo do processamento do caulim (birra).....	50
Figura 17 - Vermiculita expandida.	50
Figura 18 - Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos minerais em função da massa específica.....	51
Figura 19 - Aerogel de sílica híbrido moído e peneirado, com diferentes granulometrias.	54
Figura 20 - Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.	55
Figura 21 - Comportamento da resistência à compressão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.....	56
Figura 22 - Comportamento da resistência à tração na flexão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.	57
Figura 23 - Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à compressão.	58
Figura 24 - Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à tração na flexão.....	58
Figura 25 - Areia natural: a) material passante na #2,36mm; b) material retido na # 2,36mm.	60
Figura 26 - Trituração da palha de arroz em liquidificador de três hélices.....	61
Figura 27 - Peneiramento da palha de arroz em malha 2,36mm.....	61
Figura 28 - Resíduos de madeira (pó-de-serra).....	61
Figura 29 - Peneiramento do pó-de-serra em malha 2,36mm.	61
Figura 30 - Peneiramento do PET em malha 2,36mm.....	62

Figura 31	Aspecto do resíduo de PET após peneiramento.	62
Figura 32	Trituração do EPS em ralador doméstico.	62
Figura 33	Trituração do EPS em moinho manual.	62
Figura 34	Peneiramento do EPS em malha 4,8mm.	62
Figura 35	Aspecto do resíduo de EPS após peneiramento.	62
Figura 36	Peneiramento das raspas de pneu em malha 2,36mm.	63
Figura 37	Aspecto do resíduo de pneu após peneiramento.	63
Figura 38	Resíduo de Construção e Demolição.	63
Figura 39	Equipamento usado para a britagem do RCD e da cerâmica vermelha.	63
Figura 40	RCD após britagem e peneiramento.	63
Figura 41	Cerâmica vermelha após britagem e peneiramento.	63
Figura 42	Resíduos de vidro na indústria.	64
Figura 43	Cominuição do resíduo de vidro em moinho de bolas.	64
Figura 44	Resíduo de vidro: a) após britagem; b) após moagem e peneiramento na malha 1,2mm.	64
Figura 45	Aspecto final do resíduo de vidro.	64
Figura 46	Roteiro de caracterização dos materiais constituintes da argamassa.	65
Figura 47	Determinação da massa específica da palha de arroz (em água).	65
Figura 48	Determinação da massa específica do pó de serra (em água).	65
Figura 49	Determinação da massa específica do EPS (em água).	66
Figura 50	Determinação da massa específica das raspas de pneu (em álcool).	66
Figura 51	Determinação da massa específica do PET (em água).	66
Figura 52	Determinação da massa específica da cerâmica vermelha (em água).	66
Figura 53	Determinação da massa específica do RCD (em água).	66
Figura 54	Determinação da massa específica do pó de vidro (em água).	66
Figura 55	Traços separados para os testes de consistência.	68
Figura 56	Mistura dos materiais na argamassadeira.	68
Figura 57	Moldagem da argamassa na mesa de consistência.	69
Figura 58	Verificação da consistência da argamassa.	69
Figura 59	Secagem da areia em estufa.	70
Figura 60	Preparação da argamassa em betoneira estacionária.	70
Figura 61	Amostras de argamassa moldadas.	71
Figura 62	Cura ao ar das amostras de argamassa.	71
Figura 63	Execução do ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos.	73
Figura 64	Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade em corpos de prova cilíndricos.	73
Figura 65	Ensaio de Absorção, massa específica e índice de vazios: Amostras imersas em água para saturação.	73
Figura 66	Ensaio de Absorção, massa específica e índice de vazios: verificação da massa do corpo de prova imerso em água.	73
Figura 67	Ensaio de Absorção, massa específica e índice de vazios: verificação da massa do corpo de prova saturado com a superfície seca (SSS).	73

Figura 68 - Ensaio de Absorção, massa específica e índice de vazios: secagem dos corpos de prova em estufa para verificação da massa seca.	73
Figura 69 - Calibração do equipamento para realização do ensaio de ultrassom.	74
Figura 70 - Execução do ensaio de ultrassom em corpos de prova prismáticos.	74
Figura 71 - Placas inferior e superior para realização do ensaio de tração por flexão.	74
Figura 72 - Execução do ensaio de tração por flexão, após a realização do ensaio de ultrassom.	74
Figura 73 - Corpos de prova prismáticos antes do ensaio de tração por flexão.	74
Figura 74 - Corpos de prova prismáticos após o ensaio de tração por flexão.	74
Figura 75 - Placas e inferior e superior para realização do ensaio de compressão nas amostras de argamassa após a ruptura por flexão.	74
Figura 76 - Execução do ensaio de compressão nas amostras de argamassa após a ruptura por flexão.	74
Figura 77 - Amostras de retração sob cura ao ar, dispostas sobre fios a fim de garantir as faces livres.	75
Figura 78 - Leitura do comprimento das barras de retração.	75
Figura 79 i Lubrificação da forma de madeira.	76
Figura 80 i Espalhamento da argamassa de revestimento da face inferior do prisma.	76
Figura 81 i Disposição dos blocos cerâmicos sobre a argamassa.	76
Figura 82 i Preenchimento dos espaços entre os blocos.	76
Figura 83 i Deposição da camada superior da argamassa de revestimento.	76
Figura 84 i Prismas após a desmoldagem.	76
Figura 85 i Perfuração dos prismas com serra-copo.	77
Figura 86 i Colagem das pastilhas metálicas para o ensaio de aderência.	77
Figura 87 i Equipamento utilizado para o arrancamento da argamassa e verificação da carga de ruptura.	77
Figura 88 i Avaliação do tipo de fratura após o arrancamento da argamassa.	77
Figura 89 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco.	77
Figura 90 i Medição da irradiação refletida pela amostra por meio do equipamento ALTA II.	79
Figura 91 i Medição da irradiação refletida pela referência (papel branco 75 g/m ²)	79
Figura 92 i Verificação da temperatura superficial por meio do termograma.	79
Figura 93 i Posicionamento para verificação da temperatura superficial.	79
Figura 94 i Distribuição granulométrica da areia natural e dos resíduos sólidos.	82
Figura 95 i Água de consistência em função do teor e do tipo de resíduo utilizado na argamassa.	85
Figura 96 i Massa específica da argamassa fresca em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).	87
Figura 97 i Massa específica da argamassa fresca em função do teor e do tipo de resíduo (vegetais).	87
Figura 98 i Massa específica da argamassa fresca em função da água de consistência e do tipo de resíduo.	89
Figura 99 i Massa específica da argamassa fresca em função da massa específica ponderada do agregado miúdo.	89
Figura 100 i Massa específica da argamassa endurecida, na condição seca, em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).	90
Figura 101 i Massa específica da argamassa endurecida, na condição seca, em função do teor e do tipo de resíduo (vegetais).	91

Figura 102 ĩ Velocidade de propagação da onda ultrassônica através da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	92
Figura 103 ĩ Velocidade de propagação da onda ultrassônica através da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	93
Figura 104 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado natural.....	93
Figura 105 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado reciclado.....	93
Figura 106 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e raspa de pneu.....	94
Figura 107 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o pó de serra (eucalipto).....	94
Figura 108 ĩ Índice de vazios da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).....	94
Figura 109 ĩ Índice de vazios da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	95
Figura 110 ĩ Absorção de água da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).....	96
Figura 111 ĩ Absorção de água da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	96
Figura 112 ĩ Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilar em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	97
Figura 113 ĩ Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilarem função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	98
Figura 114 ĩ Resistência à tração na flexão em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	100
Figura 115 ĩ Resistência à tração na flexão em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	100
Figura 116 ĩ Resistência à compressão (amostra prismática) em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	102
Figura 117 ĩ Resistência à compressão (amostra prismática) em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	102
Figura 118 ĩ Resistência à compressão axial (amostra cilíndrica) em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	103
Figura 119 ĩ Resistência à compressão axial (amostra cilíndrica) em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	104
Figura 120 ĩ Resistência de aderência à tração em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	105
Figura 121 ĩ Resistência de aderência à tração em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	105
Figura 122 ĩ Retração da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	107
Figura 123 ĩ Retração da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	107
Figura 124 ĩ Absortância solar em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).....	109
Figura 125 ĩ Absortância solar em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).....	109
Figura 126 - Temperaturas superficiais das argamassas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural.....	111
Figura 127 ĩ Temperatura interna e diferença de temperatura para a superfície externa nos prismas revestidos com argamassa.....	111
Figura 128 ĩ Diferença de temperatura entre as faces externa e interna dos prismas revestidos com argamassa.....	111
Figura 129 ĩ Temperatura da face externa das argamassas em função da diferença de temperatura com a face interna.....	112

Figura 130	Correlação entre a absorção de água por imersão e o índice de vazios.....	116
Figura 131	Correlação entre a massa específica seca no estado endurecido e a massa específica fresca.	116
Figura 132	Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de onda ultrassônica.	116
Figura 133	Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a velocidade de onda ultrassônica.	116
Figura 134	Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a velocidade de onda ultrassônica.	117
Figura 135	Correlação entre a resistência de aderência à tração e a velocidade de onda ultrassônica.	117
Figura 136	Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à tração na flexão.....	117
Figura 137	Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à compressão (prisma).	117
Figura 138	Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à compressão (cilindro).	117
Figura 139	Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a resistência à tração na flexão. ...	117
Figura 140	Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a resistência à tração na flexão...	118
Figura 141	Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a resistência à compressão (prisma).	118
Figura 142	Correlação entre a absorção de água por imersão e o aumento da água de consistência. ...	118
Figura 143	Correlação entre o índice de vazios e o aumento da água de consistência.....	118
Figura 144	Correlação entre a velocidade de onda ultrassônica e a massa específica seca.	119
Figura 145	Correlação entre a resistência à tração.....	119
Figura 146	Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a massa específica seca.	119
Figura 147	Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a massa específica seca.....	119
Figura 148	Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a massa específica seca.....	119
Figura 149	Correlação entre a diferença de temperatura nas faces interna e externa dos prismas e a massa específica fresca.	120
Figura 150	Correlação entre a diferença de temperatura nas faces interna e externa dos prismas e a massa específica seca.....	120

1. INTRODUÇÃO

Em algumas tipologias construtivas, os revestimentos argamassados representam o primeiro componente de proteção da envoltória das edificações. Desta forma, o estudo das características termo físicas das argamassas de revestimento surge como uma necessidade de proporcionar o adequado isolamento térmico das edificações, com vistas a minimizar o consumo energético do setor, mas também com intuito de proporcionar o adequado conforto térmico aos usuários, corroborando com a habitabilidade das edificações.

Com a publicação da norma brasileira de Desempenho de Edificações Habitacionais, a NBR 15.575 (ABNT, 2013), torna-se imprescindível encontrar modelos construtivos que introduzam segurança, qualidade e conforto nas habitações. Os estudos frente ao desempenho térmico das argamassas no Brasil estão ainda em fase de desenvolvimento, quando comparados aos realizados em outros países. A formulação de uma argamassa de revestimento com características térmicas implica não só em conhecimento profundo das suas matérias primas, mas também na avaliação das diferentes combinações dos componentes utilizados, de modo a otimizar propriedades pré-definidas em normas, cumprindo todas as funções exigidas ao revestimento e que transmitam características térmicas melhoradas a esta. Nesse sentido, o desenvolvimento de novas formulações de argamassas que se preocupem em não onerar economicamente o produto final, mas que também foquem nos aspectos ambientais, especialmente por meio da utilização de materiais recicláveis na sua composição são de fundamental importância quando se pensa no quesito de sustentabilidade ambiental.

A consciência ambiental e a necessidade de buscar materiais e processos que foquem na economia de recursos naturais e financeiros demanda da sociedade atual pesquisas voltadas não somente para aprimorar o desempenho dos materiais de uso corrente, mas também a necessidade de desenvolvimento de novas combinações e novos materiais, em especial por aqueles que utilizem em sua composição resíduos provenientes dos processos industriais.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2014) realizou uma recente pesquisa relativa à quantificação da geração, coleta e destinação final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Os dados foram coletados em 400 municípios no Brasil e os resultados identificaram que a geração total de RSU no Brasil em 2014 foi de aproximadamente 78,6 milhões de toneladas, o que representa um aumento de 2,9% em relação à 2013, índice superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 0,9%. O índice de destinação final adequada em 2014 foi de 58,4%, apesar de parecer

significativo, indica que a quantidade de RSU destinada a locais inadequados totaliza 29.659.170 toneladas no ano, que seguiram para lixões ou aterros controlados, os quais do ponto de vista ambiental pouco se diferenciam dos lixões, pois não possuem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Quanto aos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) a pesquisa da ABRELPE (2014) descreve que os municípios coletaram cerca de 45 milhões de toneladas de RCD em 2014, o que implica no aumento de 4,1% em relação a 2013. Esta situação, também observada em anos anteriores, exige atenção especial quanto ao destino final dado aos RCD, visto que a quantidade total desses resíduos é ainda maior, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados nos logradouros públicos.

No Estado Mato Grosso, o levantamento realizado pela Coordenadoria de Gestão de Resíduos Sólidos da Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA) demonstra que somente quatro municípios detêm licença de operação de Aterros Sanitários, onze municípios com licença de instalação e treze municípios com licença prévia. O Aterro Sanitário é considerado a forma adequada de disposição final dos resíduos que não encontram forma econômica ou tecnicamente viável de reaproveitamento ou reciclagem. Entretanto, muitos materiais acabam no aterro sanitário pela falta de mecanismos legais e operacionais suficientes para tal. Observa-se um quadro preocupante em relação à destinação dos resíduos sólidos no Estado, com apenas 28 municípios efetivamente tomando providências técnicas para destinação adequada dos seus resíduos (Mato Grosso, 2012). Desde então a SEMA definiu diversas ações a fim de melhorar o cenário da Gestão dos Resíduos sólidos no Estado, entre elas o Inventário Estadual dos Resíduos Sólidos Urbanos, a partir da devolução de questionário enviado para todas as prefeituras municipais, que deveriam alimentar o banco de dados sobre a situação da coleta, tratamento e destinação dos resíduos sólidos. Essa ação, entretanto, que serviria como subsídio para as pesquisas relativas ao tema não foi implementada.

Ainda nesse contexto, conforme o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil e Volumosos do Município de Cuiabá, deveriam ser construídos na área urbana do município 24 Pontos de Entrega Voluntária (Ecopontos), para onde seriam destinados resíduos volumosos e secos domiciliares com volume inferior a 1 m³ (Cuiabá, 2012). Esses pontos deveriam ser construídos e gerenciados pelo município, em parceria com as cooperativas de catadores, a fim de que apenas os rejeitos fossem coletados pela municipalidade e destinados aos aterros sanitários. Entretanto, em visitas de campo realizadas na cidade, somente dois Ecopontos foram implementados e se encontram em funcionamento.

Embora em outubro de 2012 tenham sido registrados volumes da ordem de 4000 a 5000m³ de destinação adequada de RCD (Resíduo da Construção e Demolição) na Área de Transbordo e Triagem de Cuiabá, entende-se que este volume ainda é pequeno, diante da estimativa de 14.000m³/mês, o equivalente a 20.000 toneladas/mês de RCD. Outro importante resíduo industrial reciclável na região são os pneus inservíveis, cuja coleta e transporte chegaram a aproximadamente 2.074 toneladas, destinadas à geração de energia (ANIP, 2012). Quanto aos resíduos sólidos urbanos, são processadas (triados, prensados e comercializados) 1.102,45 toneladas/mês de materiais recicláveis pelas cooperativas, o que representa 1,50% do total gerado no município (Cuiabá, 2012).

Atualmente os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados pela população da Baixada Cuiabana são destinados a uma área no município de Várzea Grande. Em recente pesquisa Ferreira (2015) realizou a caracterização física e gravimétrica dos RSU destinados a essa área, sem qualquer seleção prévia. Considerando especificamente os resíduos de PET, a pesquisa identificou que a região produz diariamente uma média 190 toneladas de resíduos, dos quais somente 5,7 toneladas são destinadas ao lixão de Várzea Grande e 8,3 toneladas chegam às indústrias recicladoras (a partir do lixão e de catadores). Os catadores conseguem uma renda média mensal de R\$ 400,00 somente com os resíduos de PET, mesmo sem a coleta seletiva, o que é um indicador de que a logística da seleção e coleta dos resíduos pode trazer significativos ganhos socioeconômicos, além de ambientais.

Na conjuntura apresentada, observa-se uma demanda técnica e econômica no que se refere ao conforto das edificações, e outra ambiental, referente à destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos e industriais.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho termo físico e mecânico de argamassas de revestimento que apresentem em sua composição resíduos sólidos poliméricos, minerais e vegetais em substituição parcial da areia.

1.1.2. Objetivos específicos

- Identificar os resíduos sólidos urbanos e/ou industriais passíveis de serem incorporados nas argamassas de revestimento e que propiciem adequado desempenho físico, térmico e mecânico às argamassas dosadas com traço contendo cimento, cal e areia;

- Classificar o desempenho de argamassas confeccionadas com resíduos sólidos urbanos e/ou industriais de acordo com às classes definidas na NBR 13281 (ABNT, 2005a) e de acordo com a *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre* **n**° 2669-2 (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013);

- Correlacionar as propriedades térmicas, físicas e mecânicas das argamassas com intuito de determinar relações que expliquem as variações nas propriedades estudadas;

- Identificar quais alternativas de incorporação de resíduos são mais adequadas em termos de desempenho com intuito de sugerir a sua utilização, minimizando desta forma o lançamento destes em áreas ilegais ou nos aterros sanitários, contribuindo assim para a redução do passivo ambiental.

1.2. JUSTIFICATIVA

A argamassa de revestimento pode ser comparada à pele de uma edificação, protegendo a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo, no caso dos revestimentos externos. Integram o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como: isolamento térmico, isolamento acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais (Carasek, 2010). Nesse sentido, o estudo de suas propriedades se torna de fundamental importância com vistas a poder atender os requisitos anteriormente apresentados.

1.2.1. Justificativa técnica

A norma NBR 7200 (ABNT, 1998) define argamassa inorgânica (argamassa comum) como a mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento. Com a recente publicação da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), as características exigidas dos materiais empregados às edificações tornaram-se cada vez mais exigentes pois elas precisam proporcionar adequada habitabilidade aos usuários das edificações. Assim, entre os sistemas que necessitam ser aperfeiçoados estão os painéis de vedação que podem ter suas características aprimoradas, principalmente quanto ao nível do comportamento térmico. Uma forma de modificar o desempenho deste sistema pode se dar por meio do aperfeiçoamento dos seus componentes, como por exemplo, pela modificação da composição das argamassas de revestimento, tanto em termos dos materiais que são utilizados em sua produção como na proporção entre os mesmos.

1.2.2. Justificativa ambiental

Vindo ao encontro dessa demanda técnica, há uma forte questão ambiental relacionada à mitigação dos impactos ambientais causados pela crescente geração de resíduos sólidos. A Lei 12.305 (Brasil, 2010) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, traz como alguns dos seus princípios o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania e a ecoeficiência mediante a compatibilização entre o fornecimento de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais. Em relação ao contexto das edificações sustentáveis, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) destaca que vários aspectos em relação à sustentabilidade precisam ser contemplados, entre os quais se destacam dois que vão ao encontro com a temática que se objetiva pesquisar neste trabalho: (i) uso de matérias-primas que contribuam com a ecoeficiência dos processos e (ii) redução, reutilização, reciclagem e disposição correta dos resíduos sólidos.

Sendo assim, este trabalho busca pesquisar novas composições de argamassa de revestimento, com características de isolamento térmico, utilizando resíduos sólidos em substituição parcial à areia visto que alguns estudos têm verificado que a substituição dos agregados naturais graúdos e miúdos por agregados reciclados em níveis de 25% e 50% tem pouco efeito sobre a resistência à compressão, viabilizando o seu uso (Soutsos *et al.*, 2011; Leiva, *et al.*, 2013). Desta forma, pode-se reduzir o impacto ambiental durante a produção de argamassas, por meio de uma destinação adequada ao resíduo, com a vantagem de além de diminuir o consumo de areia natural, os gastos energéticos com a sua produção e lançamentos de gases e partículas na atmosfera, evita-se que estes materiais sejam destinados aos aterros sanitários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O sistema de vedação de uma edificação é uma solução que visa otimizar o conforto, a segurança e a estética, de uma forma sustentável e acessível. São requisitos principais de um sistema de vedação eficiente: os funcionais (separação, planimetria, facilidade de execução, resistência superficial, baixa tendência à fissuração); técnicos (segurança estrutural proteção térmica, proteção acústica, proteção à água e proteção ao fogo); e ambientais (contribuir para a eficiência energética, contribuir para a sustentabilidade na construção).

A necessidade de isolar termicamente em um projeto tem sua forma variada e depende da região do planeta onde se encontra, uma vez que está relacionada com o clima local. Enquanto na Europa, para obter conforto térmico, há necessidade de preservar o calor interno, evitando que o calor se propague para o meio exterior devido ao frio, no Brasil, na maior parte das suas regiões bioclimáticas, a necessidade é barrar a entrada excessiva de calor (Thomaz e Ishioka, 2011).

No sistema de vedação composto por revestimentos, o desempenho do sistema é resultado da interação de quatro agentes: base, argamassa, revestimento final e processo de aplicação da argamassa, sendo que o projetista deve avaliar as características da interação de cada um destes agentes para a indicação dos produtos que melhor atendam às especificações (Ceotto *apud* Sousa, 2012).

Com foco nesses requisitos, diversas pesquisas e normas têm sido desenvolvidas a fim de obter revestimentos que tragam conforto térmico e acústico com maior eficiência energética e de forma sustentável. O isolamento térmico, uma vez que implica em menor demanda de energia seja para o aquecimento ou para o arrefecimento, contribui para a eficiência energética e, conseqüentemente, para a sustentabilidade. Entretanto, a eficiência e a sustentabilidade podem ser otimizadas pelo uso de materiais alternativos de mais baixo custo, materiais reciclados, ou de fontes renováveis.

2.1 FUNDAMENTOS LEGAIS E NORMATIVOS

2.1.1 Requisitos ambientais

As soluções utilizadas para atender aos requisitos de desempenho das edificações requerem inovações tecnológicas, seja por meio de sistemas construtivos inovadores ou pelo desenvolvimento de novos componentes ou materiais modificados, com maior eficiência energética e de forma sustentável. A resolução CONAMA nº 307 (Brasil, 2002), que estabelece

as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, determina:

Art. 4º Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final. (BRASIL, 2002).

A resolução CONAMA nº 307 classifica como Classe A os resíduos gerados pela construção civil e que podem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados (ABNT, 2002). São eles: resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; resíduos da produção ou uso de componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa ou concreto; resíduos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.).

Conforme estabelecido na lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, entende-se por geradores de resíduos sólidos as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluindo o consumo (Brasil, 2010). Desse modo, sendo a indústria da construção civil a geradora dos resíduos, e os usuários finais os consumidores dessa indústria, resulta que somos todos responsáveis nos termos da Lei 12.305, em seu art. 3º, inciso XVII:

responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos. (BRASIL, 2010)

A lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos prevê ainda, como instrumentos de ação, a pesquisa científica e tecnológica e a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização e tratamento de resíduos. Nesse sentido, as instituições de ensino e pesquisa detêm importante papel, tanto na educação ambiental, quanto no desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas que contribuam para a redução da geração de resíduos e do conseqüente impacto ambiental.

2.1.2 Requisitos técnicos

O uso eficiente de energia apresenta importante marco no Brasil e no exterior, os quais serão revistos e comentados posteriormente. Entre as principais iniciativas tomadas pelo Brasil

para a promoção do uso eficiente da energia destaca-se a criação do Programa Selo PROCEL de Economia de Energia em 1993, cujo objetivo é informar os consumidores dos produtos de maior eficiência energética no mercado, promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício.

Nesse âmbito, o Procel-EDIFICA promove a avaliação da eficiência energética de edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas, em parceria com o Inmetro, que confere a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) para as edificações. A certificação exige uso racional da energia elétrica em edificações desde sua fundação e incentiva a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente (Eletrobrás, 2015).

Destacam-se, também, a criação da Lei nº 10.295/2001 (Brasil, 2001) que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e visa a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente (Lei de Eficiência Energética) e da Lei 9.991/2000 (Brasil, 2000), que determina a aplicação de 0,5% do faturamento das concessionárias de energia elétrica em Pesquisa e Desenvolvimento – P&D e eficiência energética.

Aliada à Lei de Eficiência Energética, entraram em vigor a NBR-15575 (ABNT, 2013), com diretrizes sobre itens relativos a segurança, sustentabilidade e conforto das construções habitacionais e a NBR 15220-2 (ABNT, 2008), que determina o método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Além das características térmicas, na avaliação do desempenho das argamassas são considerados diversos parâmetros físicos e mecânicos especificados pela NBR 13281 (ABNT, 2005a).

O isolamento térmico faz parte do conjunto de soluções exigidas por essas leis e assegura o conforto ao ambiente construído, que é um importante fator no projeto arquitetônico. Além do maior conforto, o isolamento térmico propicia a economia de energia elétrica seja pelo menor uso de ar condicionado, em regiões de clima quente, seja pelo menor uso de aquecedores, em regiões de clima frio.

2.2 PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo Incropera e DeWitt (1992) *transferência de calor (ou calor) é o trânsito de energia provocado por uma diferença de temperatura*.

A direção do fluxo de calor é sempre da região de maior temperatura para a região de menor temperatura. São reconhecidos três mecanismos de transmissão de calor: *condução*, quando a transferência de calor ocorre em um meio sólido ou líquido estacionário; *convecção*, quando a transferência de calor acontece entre uma superfície e um fluido (gás ou líquido) em movimento; e *radiação*, quando a energia é emitida por uma matéria que se encontra em determinada temperatura e transportada por ondas eletromagnéticas (fótons). Na maioria dos casos a transferência de calor ocorre por meio de dois ou mais modos simultaneamente, sendo a condução mais eficiente no meio sólido e a convecção nos fluidos em movimento, principalmente devido às diferenças de espaçamento molecular em cada situação. A radiação, por sua vez é mais eficiente no vácuo (Kreith e Bohn, 2003; Incropera e DeWitt, 1992).

2.2.1 A condução de calor em sistemas isolantes

O transporte de energia por condução em materiais sólidos ocorre de duas formas: através dos elétrons livres e das ondas de vibração do retículo cristalino. Os elétrons livres que estão em uma região mais quente ganham energia cinética e se deslocam para as áreas mais frias onde parte dessa energia é transferida para os átomos na forma de energia vibracional. Esse tipo de condução é comum nos materiais metálicos, nos quais as ligações atômicas deixam os elétrons livres para se deslocar entre os átomos. Os átomos, por sua vez, encontram-se em constante vibração e, por estarem coordenados entre si por meio das ligações atômicas, produzem ondas que se propagam através dos cristais na velocidade do som. Essas podem ser consideradas ondas elásticas ou sonoras de alta frequência e curto comprimento. Quando um material recebe energia na forma de calor, essa energia aumenta a vibração dos átomos (energia vibracional), a qual é transferida entre os mesmos por meio das estruturas atômicas ou *rede atômica*. O valor de um *quantum* de energia vibracional é chamado *fônon*, semelhante a um *quantum* de energia eletromagnética, o *fóton*. No caso dos materiais cristalinos, que a distância interatômica é curta e a rede é bem organizada, a transferência de energia é rápida. Quando a distância interatômica é longa ou há desordem na estrutura da rede, a energia se dissipa e a transferência é lenta, como é o caso dos materiais amorfos e porosos (Ceruti, 2008; Kreith e Bohn, 2003; Callister Jr, 2002).

Nos materiais cerâmicos (entre eles as argamassas, blocos cerâmicos e agregados), devido à carência de elétrons livres, os fônons são os principais responsáveis pela condutividade térmica. Entretanto, os fônons não são tão eficientes quanto os elétrons no transporte da energia calorífica devido ao espalhamento das vibrações pelas imperfeições do retículo cristalino. Esse comportamento é mais pronunciado nos vidros e em outras cerâmicas amorfas (sem

organização cristalina) nos quais a estrutura atômica é altamente desordenada e irregular. Adicionalmente, os materiais cerâmicos utilizados com fins de isolamento térmico possuem elevada porosidade, uma vez que a transferência de calor nos poros é lenta, tanto devido à convecção gasosa ineficiente, quanto à baixa condutividade do ar estagnado (da ordem de 0,02 W/m.K) (Callister Jr., 2002).

Os sistemas isolantes são constituídos de materiais de baixa condutividade térmica combinados entre si a fim de obter um sistema com menor condutividade térmica do que seus componentes, o qual é função da condutividade térmica e propriedades radiativas do material sólido e também da natureza e da fração volumar dos vazios, além da massa específica do sistema (Incropera e DeWitt, 1992). Nesses sistemas, a transferência de calor envolve a condução através dos materiais sólidos, a convecção através do ar nos espaços vazios e a troca radiativa entre as superfícies da matriz sólida.

2.2.2 Propriedades térmicas dos materiais

A *condutividade térmica* (λ) é uma propriedade de transporte intrínseca a cada material e depende do estado físico da matéria, da sua composição química e do arranjo molecular (Kreith e Bohn, 2003). A partir da Lei de Fourier (Equação 1) é possível determinar a condutividade térmica (Equação 2):

$$Q = -\lambda.A.\frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\lambda = -\frac{Q/A}{dT/dx} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: Q é a taxa de transferência de calor por condução (W);

λ é a condutividade térmica intrínseca do meio (W/m.K);

A é a área através da qual o calor é transferido (m²);

dT é o gradiente de temperatura (K); e,

dx é a distância na direção do fluxo de calor (m).

A quantidade de energia necessária para elevar em 1°C a temperatura de uma unidade de massa de um sistema é denominada *calor específico* (c_p) (Equação 3). Ou seja, quanto maior o calor específico de um corpo mais difícil é elevar sua temperatura (Wilén e Sonntag, 1993; Costa, 1991). Analogamente, quanto maior a massa de um corpo maior será sua capacidade de absorver energia, ao que se chama *capacidade calorífica* ou *capacidade térmica* (C) (Equação 4).

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (\text{Equação 3})$$

$$C = c \cdot m = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde c é o calor específico à pressão constante (J/kg.K);

C é a capacidade térmica do corpo ou sistema (J/K);

ΔQ é a quantidade de calor absorvida pelo corpo ou sistema (J);

ΔT é a variação de Temperatura provocada pelo calor absorvido (K); e,

m é a massa do corpo ou sistema (kg).

A razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica é denominada *difusividade térmica* (α) (Equação 5). Materiais com alta difusividade respondem rapidamente às variações térmicas do ambiente, enquanto materiais com baixa difusividade respondem mais lentamente e demoram mais para atingir o equilíbrio (Incropera e DeWitt, 1992).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: α é a difusividade térmica (m²/s);

ρ é a densidade de massa aparente do material (kg/m³);

c é o calor específico do material (J/kg.K); e,

λ é a condutividade térmica intrínseca do meio (W/m.K).

Os materiais sólidos e líquidos oferecem certa resistência à transferência de calor através de seu interior que é denominada *resistência térmica* (R) e pode ser calculada por meio da Equação 6, utilizando o valor da *densidade de fluxo de calor* (q), expressa pela Equação 7.

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (\text{Equação 6})$$

$$q = \frac{Q}{A} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: R é a resistência térmica do material (m².K/W);

ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo (K);

q é a densidade de fluxo de calor (W/m²);

Q é o fluxo de calor que atravessa uma superfície (W); e

A é a área dessa superfície (m²).

Considerando que uma das funções da argamassa é o isolamento térmico da edificação, há de se ponderar que sua contribuição na resistência térmica do componente construtivo dependerá tanto da espessura da camada de revestimento quanto das características dos materiais que o constituem.

2.3 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIE

Uma forma de reduzir o efeito da ilha de calor que atinge muitas cidades brasileiras é a diminuição da temperatura superficial dos materiais. Neste âmbito, duas técnicas têm sido utilizadas na pesquisa do desempenho térmico da envoltória das edificações: a determinação do índice de refletância solar e a termografia de infra-vermelhos. Espera-se que, quanto maior for a refletância da irradiação solar incidida na superfície de um material, menor será sua absorptância e, conseqüentemente, menor a energia absorvida e menor a temperatura superficial.

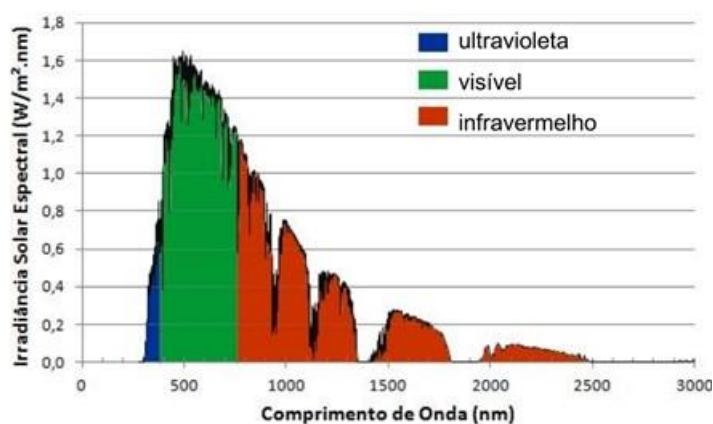
2.3.1 Índice de refletância e de absorptância solar

A refletância à radiação solar é definida como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície. Da mesma forma, a absorptância à radiação solar corresponde ao quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície (ABNT, 2005a). Os valores de refletância e absorptância variam de zero a um (ou de 0 a 100%).

Segundo o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E, 2015), as propriedades radiantes superficiais dependem da distribuição espectral da radiação. Nos estudos a respeito da envoltória das edificações, considera-se como mais relevante a parcela de energia radiante emitida pelo Sol, chamada de radiação solar. A radiação solar, como toda radiação térmica, se propaga como radiação eletromagnética na forma de ondas.

É comum a adoção de valores de absorptância e refletância solar com base nas cores dos materiais, seguindo tabelas tais como as apresentadas pela norma brasileira NBR 15220-2 (ABNT, 2008). Porém, apenas uma parcela da radiação solar é emitida como luz visível, que é a única capaz de sensibilizar o olho humano e é responsável pela definição das cores. O restante é emitido como radiação infravermelha e ultravioleta, e não se relaciona com a cor do material (Figura 1).

Figura 1 - Irradiação solar espectral.



Fonte: Pereira, 2014, p.15

Os métodos normalizados para medição de refletância indicam o uso de equipamentos que costumam ter preço elevado e exigem certa especialidade para seu manuseio. Uma alternativa utilizada por alguns pesquisadores brasileiros é o espectrômetro Alta II, que realiza medições correspondentes a radiações em onze diferentes comprimentos de onda, sendo sete na região visível (entre 470 e 700 nm) e quatro na região do infravermelho-próximo (entre 735 e 940 nm).

Na análise das medições realizadas com o ALTA II, a determinação da refletância solar deve considerar uma faixa mais ampla de medição, pois o espectro solar é mais abrangente do que o intervalo coberto pelo instrumento. Nesse sentido, os resultados obtidos devem ser ajustados ao espectro solar padrão definido pela norma ASTM G173 (ASTM, 2012a).

Quando se compara os resultados obtidos com o Alta II à refletância solar obtida com espectrofotômetro (de 300 a 2500 nm), as diferenças alcançam até $\pm 10\%$ (ou $\pm 0,10$ absoluto). Essas diferenças são resultado, principalmente, da variação da refletância nos comprimentos de onda do infravermelho. Os testes com equipamentos Alta II também apontaram para a importância de evitar a interferência da iluminação do ambiente na medição. Para medições realizadas durante o dia, especialmente aquelas expostas à radiação solar direta, deve-se tomar o cuidado de proteger as laterais do equipamento, evitando a infiltração de luz do ambiente entre a amostra e o aparelho (CB3E, 2015).

Diversos pesquisadores brasileiros têm adotado o procedimento do CB3E (2015) para a determinação da refletância e da absortância de materiais de construção utilizando o equipamento ALTA II (Ikematsu, 2007; Dornelles, 2008; Santos, 2013; Poloni e Pezzuto, 2015; Louzich et al., 2016).

O Alta II fornece valores de tensão (em milivolts) que são convertidos para valores de refletância (em porcentagem) a partir de cálculos matemáticos. Para isso é necessário também utilizar uma amostra de referência, com refletância espectral já conhecida para os comprimentos de onda utilizados pelo equipamento. A amostra de referência deve ter os valores de refletância espectral previamente conhecidos através de medição em um espectrofotômetro conforme o método da norma ASTM E903 (ASTM, 2012b *apud* CB3E, 2015).

Segundo o CB3E (2015), o procedimento básico para utilização do Alta II deve seguir as seguintes etapas:

- 1) Primeiramente, o Alta II é posicionado sobre a amostra de referência (que pode ser uma folha de papel branco (75g/m²) e o equipamento é ligado. O valor inicial que aparece no visor do equipamento é chamado voltagem de fundo ($V_{f \text{ ref}}$) e é um dos dados necessários para o cálculo.
- 2) Em seguida, são medidas as voltagens, ainda com a amostra de referência papel branco (75g/m²), para todos os comprimentos de onda do equipamento ($V_{\lambda \text{ ref}}$), pressionando as teclas correspondentes;
- 3) Após a medição da amostra de referência são realizadas as medições nas amostras sob avaliação. O equipamento é posicionado sobre a superfície da amostra e mede-se a voltagem de fundo ($V_{f \text{ amostra}}$);
- 4) Em seguida, medem-se as voltagens da amostra para cada comprimento de onda ($V_{\lambda \text{ amostra}}$). Recomenda-se a realização de pelo menos três medições sequenciais para cada amostra.

As refletâncias espectrais da amostra são calculadas para cada comprimento de onda pela Equação 8:

$$\rho_{\lambda \text{ amostra}} = \frac{V_{\lambda \text{ ref}} \cdot V_{f \text{ amostra}}}{V_{\lambda \text{ amostra}} \cdot V_{f \text{ ref}}} * \rho_{\lambda \text{ ref}} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: $\rho_{\lambda \text{ amostra}}$ é a refletância espectral da amostra para o comprimento de onda λ (%);

$V_{\lambda \text{ amostra}}$ é a voltagem da amostra medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f \text{ amostra}}$ é a voltagem de fundo da amostra (mV);

$V_{\lambda \text{ ref}}$ é a voltagem da amostra de referência medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f \text{ ref}}$ é a voltagem de fundo da amostra de referência (mV);

$\rho_{\lambda \text{ ref}}$ é refletância da amostra de referência(já conhecida),no comprimento de onda (%).

Os valores de refletância espectral obtidos devem ser corrigidos de acordo com a intensidade da radiação solar para cada comprimento de onda e integrados no intervalo medido, como segue:

- 5) A refletância espectral da amostra (ρ_λ), obtida na medição em porcentagem (%), é dividida por 100, resultando em um valor adimensional;
- 6) Para cada comprimento de onda, a refletância espectral (ρ_λ) é multiplicada pela irradiação solar global espectral (G_λ) obtida na ASTM G173 (ASTM, 2012), obtendo-se a irradiação do espectro solar padrão que seria refletida pela amostra ($G_{\lambda\text{refletida}}$), por comprimento de onda (Equação 9).

$$G_{\lambda\text{refletida}} = \rho_\lambda * G_\lambda \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: $G_{\lambda\text{refletida}}$ é a Irradiação solar global espectral refletida pela amostra ($\text{W}/\text{m}^2.\text{nm}$);

ρ_λ é a Refletância espectral da amostra (adimensional);

G_λ é a Irradiação solar global espectral ($\text{W}/\text{m}^2.\text{nm}$).

- 7) A irradiação refletida pela amostra é integrada para um intervalo de comprimento de onda desejado (intervalo entre os dados medidos) por meio da Equação 10.

$$I_{(\lambda_{x-y})\text{refletida}} = (G_{(\lambda_y)\text{refletida}} + G_{(\lambda_x)\text{refletida}}) * (\lambda_y - \lambda_x) \div 2 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: $I_{(\lambda_{x-y})\text{refletida}}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo λ_{x-y} (W/m^2);

$G_{(\lambda_x)\text{refletida}}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda x, ($\text{W}/\text{m}^2.\text{nm}$);

$G_{(\lambda_y)\text{refletida}}$ é a Irradiação solar global refletida pela amostra no comprimento de onda y, ($\text{W}/\text{m}^2.\text{nm}$);

λ_x é o Comprimento de onda x (nm);

λ_y é o Comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

- 8) A irradiação solar global é integrada para um intervalo de comprimento de onda desejado, tomado dos dados fornecidos pela ASTM G173, através da Equação 11;

$$I_{(\lambda_{x-y})} = (G_{(\lambda_y)} + G_{(\lambda_x)}) * (\lambda_y - \lambda_x) \div 2 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: $I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo λ_{x-y} (W/m²);

$G_{(\lambda_x)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda x, (W/m².nm);

$G_{(\lambda_y)}$ é a Irradiação solar global no comprimento de onda y, (W/m².nm);

λ_x é o Comprimento de onda x (nm);

λ_y é o Comprimento de onda y, sendo $y > x$ (nm).

- 9) Calcula-se a Intensidade total de irradiação solar global refletida pela amostra (Equação 12) e a Intensidade total de irradiação solar global (Equação 13);

$$I_{Total (\lambda_{x-y})refletida} = \sum_{\lambda_{x-y}} I_{(\lambda_{x-y})refletida} \quad \text{(Equação 12)}$$

$$I_{Total (\lambda_{x-y})} = \sum_{\lambda_{x-y}} I_{(\lambda_{x-y})} \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde: $I_{Total (\lambda_{x-y})refletida}$ é a Intensidade total de irradiação solar global refletida pela amostra (W/m²)

$I_{(\lambda_{x-y})refletida}$ é a Intensidade de irradiação solar global refletida pela amostra no intervalo λ_{x-y} (W/m²);

$I_{Total (\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade total de irradiação solar global (W/m²)

$I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade de irradiação solar global no intervalo λ_{x-y} (W/m²)

- 10) A refletância solar ajustada ao espectro solar padrão é obtida calculando-se o quociente da Intensidade total de irradiação solar global refletida pela amostra pela Intensidade total de irradiação solar global (Equação 14).

$$\rho_{solar} = \frac{I_{Total (\lambda_{x-y})refletida}}{I_{Total (\lambda_{x-y})}} \times 100 \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde: ρ_{solar} é a Refletância solar ajustada (%);

$I_{(\lambda_{x-y})refletida}$ é a Intensidade total de irradiação solar global refletida pela amostra (W/m²);

$I_{(\lambda_{x-y})}$ é a Intensidade total de irradiação solar global (W/m²).

- 11) a absortância solar é calculada a partir da refletância solar, por meio da Equação 15:

$$\check{U} = 1 - \rho \quad \text{(Equação 15)}$$

Onde: $\check{U}$ é a absortância solar (adimensional);

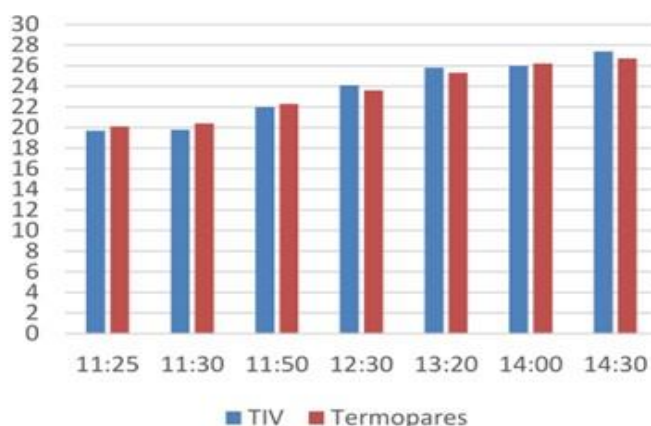
ρ é a refletância solar (adimensional).

2.3.2 Termografia de infravermelhos (TIV)

A termografia de infravermelhos (TIV) é uma técnica não destrutiva que pode ser usada para avaliar a performance térmica de edifícios. Apesar de ser um método simples, a correta interpretação dos termogramas é uma tarefa delicada devido à complexidade dos fenômenos físicos de transferência de calor nos edifícios, da interferência das condições climáticas e do correto procedimento na operação do equipamento.

Diversos estudos têm utilizado a termografia como uma ferramenta para a investigação do desempenho térmico de edificações e de materiais de construção (Silva, 2007; Sousa, 2010a; Barreira *et al.* 2012; Marques, 2014; Ferreira *et al.*, 2016). Dentre essas pesquisas destaca-se a de Garcia (2014), que estudou a aplicação da técnica da termografia em comparação à medição da temperatura local realizada com termopares afixados numa parede de 0,70m x 0,55m. O aquecimento foi realizado por meio de um aquecedor por ondas de infravermelho a uma distância de 2 m e as temperaturas superficiais foram medidas ao longo do tempo, tanto pela TIV como pelos termopares (TP). O autor observou que as temperaturas superficiais obtidas nas diferentes zonas de medição pelo termômetro pontual de infravermelhos (TIV) e pelos termopares (TP) são idênticas em ambos os equipamentos (Figura 2). Além disso, os resultados obtidos pelos termopares e pelo termograma ao longo da superfície da parede apontam para variações pouco significativas da temperatura superficial.

Figura 2 - Temperaturas superficiais obtidas pelo termômetro pontual de infravermelhos (TIV) e pelos termopares.



Fonte: Garcia, 2014, p.43

2.4 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais (Carasek, 2010). O Grupo de Trabalho sobre Argamassas (GT Argamassa) traz a uma definição adaptada da NBR13529: argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) e água de amassamento e, eventualmente, aditivo(s) ou adição(ões) para otimizar suas propriedades no estado fresco ou no estado endurecido (ANTAC, 2009).

Quanto à função a ser desempenhada na construção, as argamassas podem ser classificadas em (Carasek, 2010; ANTAC, 2009):

- Argamassas para construção de alvenarias: Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria) e Argamassa de fixação (ou encunhamento) ã alvenaria de vedação;
- Para revestimento de paredes e tetos: chapisco, emboço, reboco, camada única, revestimento decorativo monocamada;
- Para revestimento de pisos: argamassa de contrapiso e argamassa de alta resistência para piso;
- Para revestimentos cerâmicos (paredes/ pisos): argamassa de assentamento de peças cerâmicas (colante) e argamassa de rejuntamento; e,
- Para recuperação de estruturas: argamassa de reparo.

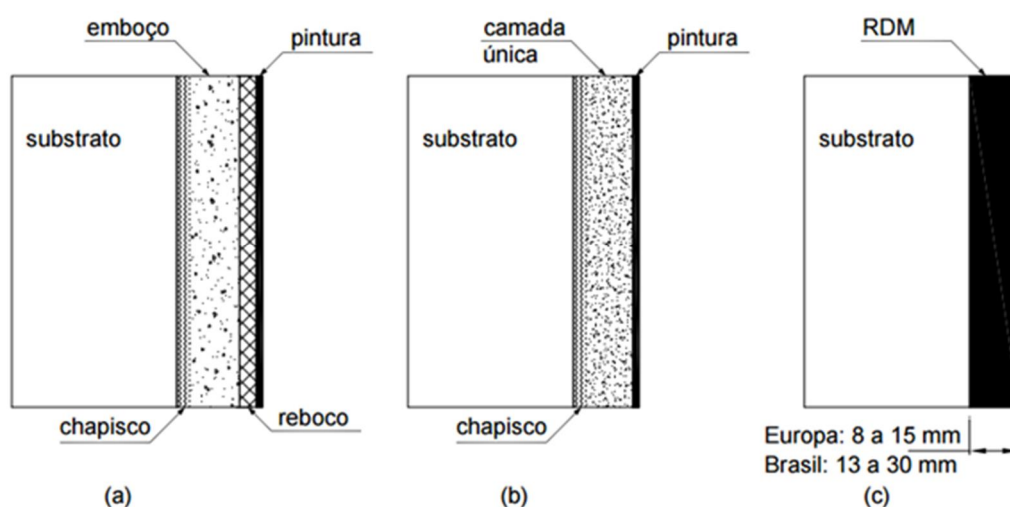
As argamassas também podem receber outros tipos de classificação, conforme o critério a ser adotado:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e argamassa hidráulica;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, argamassa de cimento, argamassa de cimento e cal, argamassa de gesso, argamassa de cal e gesso;
- Quanto ao número de aglomerantes: simples e mista;
- Quanto à consistência da argamassa: seca, plástica e fluida;
- Quanto à plasticidade da argamassa: pobre ou magra, média ou cheia, rica ou gorda;
- Quanto à densidade de massa da argamassa: leve, normal e pesada; e,
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa preparada em obra; mistura semipronta para argamassa; argamassa industrializada; argamassa dosada em central.

Segundo Carasek (2010), as argamassas podem ser classificadas como leves quando apresentam massa específica inferior a 1400 kg/m^3 , normais quando o valor da massa específica está entre 1400 e 2300 kg/m^3 , e pesadas quando a massa específica é superior a 2300 kg/m^3 .

As argamassas de revestimento são utilizadas como proteção dos elementos de vedação (alvenarias) das edificações da ação direta dos agentes agressivos, auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções, regularizar a superfície dos elementos de vedação, servir de base para aplicação de outros revestimentos ou constituir-se no acabamento final. Na Figura 3 são apresentados alguns esquemas de revestimento de paredes utilizando argamassa.

Figura 3 i Diferentes alternativas de revestimento de parede: (a) chapisco + emboço + reboco + pintura (sistema mais antigo, atualmente pouco utilizado); (b) chapisco + camada única + pintura; (c) revestimento decorativo monocamada (RDM).



Fonte: Carasek, 2010

De uma maneira geral, as camadas que formam o revestimento argamassados são:

a) Chapisco: Camada de argamassa fina (3mm a 5mm) que deixa a base áspera e aderente para receber o emboço. É utilizado um traço 1:3 (cimento:areia em volume), geralmente com areia de granulometria média à grossa;

b) Emboço: Camada de argamassa mais espessa, entre 15mm e 20mm (interno) e de 30 a 40mm (fachada), executada para cobrir e regularizar a base, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo (por exemplo, cerâmica), é responsável pela estanqueidade e pela integridade mecânica do revestimento. É produzido com argamassa mista (à base de areia, cal e cimento) e geralmente utiliza-se areia fina;

c) Reboco: Camada de argamassa fina (aproximadamente 5mm), sendo a camada final que torna a textura da parede mais fina para receber pintura ou se constitui no acabamento final. Usa argamassa de cal e areia com granulometria bem mais fina que a do emboço. Pode ser substituída pela aplicação de massa corrida; e,

d) Camada única: Revestimento de um único tipo de argamassa aplicado à base, sobre o qual é aplicada uma camada decorativa, como, por exemplo, a pintura. Também chamado popularmente de *“massa única”* ou *“reboco paulista”* é atualmente uma alternativa mais empregada no Brasil. Trata-se de uma camada do revestimento aplicada sobre a base, responsável simultaneamente pelas funções das camadas de emboço e de reboco.

Além do cimento, da cal e da areia, podem ser adicionados aditivos químicos na produção das argamassas de revestimento para melhoria da plasticidade e da aderência. Também podem ser utilizados outros materiais particulados em substituição parcial da areia a fim de conferir características físicas e mecânicas diferenciadas, em função dos requisitos finais esperados.

2.4.1 Propriedades das argamassas

As propriedades essenciais ao bom desempenho das argamassas de revestimento são a trabalhabilidade (na qual estão envolvidas a consistência, a plasticidade e a adesão inicial), a retração, a aderência, a permeabilidade à água, a resistência mecânica, a capacidade de absorver deformações e densidade de massa aparente.

Apesar do termo *trabalhabilidade* ser largamente empregado na tecnologia de argamassas, esta não pode ser considerada uma propriedade, mas sim uma característica das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea. A trabalhabilidade está relacionada com propriedades das argamassas no estado fresco como a consistência, a coesão e a plasticidade. A consistência é uma propriedade que descreve a capacidade da argamassa fluir e preencher o volume onde é contida, enquanto a coesão descreve sua capacidade de manter a homogeneidade, resistindo à segregação (concentração heterogênea dos materiais constituintes da argamassa misturada) e à exsudação (afloramento da água de amassamento da argamassa). A plasticidade, por sua vez, determina a capacidade da argamassa resistir à deformação e sua facilidade de moldagem (Carasek, 2010; ANTAC, 2009).

A retenção de água é uma também uma propriedade da argamassa no estado fresco que determina sua capacidade de manter em seu interior uma parcela da água de amassamento necessária ao processo de endurecimento do(s) aglomerante(s) e para o controle da cura da argamassa após a sua aplicação. Quanto maior a capacidade de retenção de água, menor o risco de fissuração do revestimento devido à retração por plástica (contração volumétrica que ocorre na argamassa decorrente da perda de água de amassamento da argamassa ainda no estado fresco) (ANTAC, 2009).

No estado endurecido, as principais propriedades das argamassas são relativas ao desempenho mecânico e à porosidade. A resistência à compressão é a carga máxima que a argamassa pode resistir quando submetida a um carregamento que provoca tensões axiais de compressão. A resistência à tração, por sua vez, é determinada a partir da carga máxima a argamassa pode resistir quando submetida a um carregamento que provoca tensões axiais de tração, seja por meio de compressão diametral por meio de flexão. A resistência de aderência determina a carga máxima suportada pela interface entre uma camada de argamassa e uma base sobre a qual ela foi aplicada, quando esta está sujeita a um carregamento que provoca tensões axiais de tração ou transversais de cisalhamento (ANTAC, 2009).

Durante o processo de mistura, lançamento e adensamento da argamassa é normal o aprisionamento de ar na forma de pequenas bolhas, ou a formação de vazios devido a falhas de adensamento. Esses vazios dão origem à porosidade da argamassa após endurecida, a qual é determinada pela relação entre o volume de vazios no interior da argamassa e o volume total da argamassa, incluindo o volume de vazios. A porosidade interfere diretamente na densidade de massa aparente da argamassa, medida pela relação entre a massa e o volume da argamassa no estado endurecido, incluindo o volume dos vazios em seu interior. A porosidade da argamassa também tem influência sobre o coeficiente de capilaridade, que descreve sua capacidade de absorver e transportar a água no estado líquido em função da hidrofília das superfícies de vazios contínuos existentes na sua microestrutura, mesmo sem a existência de um gradiente hidráulico. Uma outra propriedade que depende da porosidade é permeabilidade à água, que mede o fluxo laminar de água através da argamassa no estado endurecido, em condições de equilíbrio, submetida a um gradiente hidráulico (ANTAC, 2009).

A NBR 13281 (ABNT, 2005a) especifica os requisitos exigíveis para a argamassa utilizada em assentamento e revestimento de paredes e tetos, os métodos de ensaio normalizados a serem utilizados para caracterização das argamassas, bem como a classificação das mesmas em função dos resultados obtidos (Tabela 1).

Quanto à condutividade térmica, a NBR 15220-2 (ABNT, 2008) sugere valores indicativos, mas não exigíveis, para a massa específica, a condutividade térmica e o calor específico de alguns tipos de argamassa (Tabela 2).

Entretanto, a norma preconiza que se deve dar preferência aos valores obtidos em testes de laboratório por meio de procedimentos normalizados. Para tanto, a referida norma indica procedimentos para avaliação do desempenho térmico por meio de verificações experimentais da condutividade térmica conforme as rotinas descritas na NBR 15.220-4 (ABNT, 2005) e de

transmitância conforme técnica de medição de fluxo de calor estabelecida pela ISO 9869 (ISO, 2014) e pela NBR 15.220-2 (ABNT, 2008).

Tabela 1 – Requisitos exigidos para classificação das argamassas.

Ensaio	Método de ensaio	Classe	Limites
Consistência (mm)	NBR 13276 (ABNT, 2005b)	-	-
Teor de ar incorporado (%)	NBR 13278 (ABNT, 2005c)	-	-
Densidade de massa estado fresco (kg/m³)	NBR 13278 (ABNT, 2005c)	D1	≤ 1400
		D2	1200 a 1600
		D3	1400 a 1800
		D4	1600 a 2000
		D5	1800 a 2200
		D6	> 2000
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005d)	R1	≤ 1,5
		R2	1,0 a 2,0
		R3	1,5 a 2,7
		R4	2,0 a 3,5
		R5	2,7 a 4,5
		R6	> 3,5
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279 (ABNT, 2005d)	P1	≤ 2,0
		P2	1,5 a 3,0
		P3	2,5 a 4,5
		P4	4,0 a 6,5
		P5	5,5 a 9,0
		P6	> 8,0
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)	NBR 13280 (ABNT, 2005e)	M1	≤ 1200
		M2	1000 a 1400
		M3	1200 a 1600
		M4	1400 a 1800
		M5	1600 a 2000
		M6	> 1800
Coeficiente de capilaridade (g/dm².min ^{1/2})	NBR 15259 (ABNT, 2005f)	C1	≤ 1,5
		C2	1,0 a 2,5
		C3	2,0 a 4,0
		C4	3,0 a 7,0
		C5	5,0 a 12,0
		C6	> 10,0
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258 (ABNT, 2010)	A1	< 0,20
		A2	0,20
		A3	0,30

Fonte: Adaptado da ABNT, 2005a

Tabela 2 – Massa específica, condutividade térmica e calor específico das argamassas.

Tipo de argamassa	ρ (kg/m³)	λ (W/m.K)	c (kJ/kg.K)
Comum	1800 a 2100	1,15	1,00
De gesso (ou gesso e cal)	1200	0,70	0,84
Celular	600 a 1000	0,40	1,00

Fonte: Adaptado da ABNT, 2008

A norma brasileira, entretanto, não indica o uso adequado para cada classe de argamassa. Porém, as propriedades das argamassas possuem critérios de desempenho prescritas pelo *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre* (Cahier 2669-2 (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013) que se baseia em cinco propriedades e são divididos em seis classes, com faixas de classificação idênticas às classes da NBR 13281 (ABNT, 2005a) (Tabela 3). A diferença entre as normas francesa e brasileira é que na primeira há a classificação da argamassa também pelo módulo de deformação, enquanto na brasileira há a classificação das argamassas pela resistência à compressão.

Tabela 3 – Classificação das argamassas segundo *Cahier* 2669-2.

Classes	M kg/m ³	E MPa	R MPa	U %	C g/dm ² /min ^{1/2}
1	< 1.200	< 5.000	< 1,5	< 78	< 1,5
2	1.000 a 1.400	3.500 a 7.000	1,0 a 2,0	72 a 85	1,0 a 2,5
3	1.200 a 1.600	5.000 a 10.000	1,5 a 2,7	80 a 90	2,0 a 4,0
4	1.400 a 1.800	7.500 a 14.000	2,0 a 3,5	86 a 94	3,0 a 7,0
5	1.600 a 2.000	12.000 a 20.000	2,7 a 4,5	91 a 97	5,0 a 12,0
6	> 1.800	> 16.000	> 3,5	95 a 100	> 10,0

Fonte: CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013, p.32

As condicionantes e os requisitos para tal classificação são:

a) tipo de exposição da parede;

- forte exposição à chuva: C1 ou C2;
- exposição a choques e deterioração: E Ó3 e R Ó3;
- parede enterrada: M Ó4, R Ó3 e C Ò2;

b) condições atmosféricas:

- clima quente ou vento: U5 ou U6
- clima frio: M5 ou M6

c) utilização do revestimento:

- cerâmica: E Ó4 e R Ó4

2.4.2 Métodos para estimativa das propriedades das argamassas

Pela sua constituição, a argamassa pode ser considerada um material compósito constituído de duas fases: uma fase contínua (pasta de cimento e água) que é a matriz e uma fase dispersa de partículas de areia. Em função da composição química desses materiais, ricos em silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e outros óxidos metálicos, ambas as fases são consideradas materiais cerâmicos (Van Vlack, 1970).

Em geral a dispersão de partículas em um material compósito tem o objetivo de melhorar o desempenho mecânico da matriz, a qual transfere parte da tensão aplicada para as partículas (Callister Jr, 2002). Nas argamassas, a fase particulada (areia) restringe o movimento da matriz (pasta de cimento), conferindo-lhe maior rigidez e menor risco de fissuração.

Por sua característica cerâmica, as argamassas podem ser consideradas materiais de baixa condutividade. No caso de argamassas para fins de isolamento térmico, a dispersão de partículas de materiais de baixa condutividade, de baixa densidade ou de materiais porosos, tem o objetivo de reduzir ainda mais a condutividade térmica do sistema.

As propriedades finais dos materiais compósitos dependem das propriedades das fases constituintes, da fração volumétrica de cada fase e da qualidade da interface partícula-matriz. Assim, por meio da Equação 16 (modelo de Voigt) e da Equação 17 (modelo de Reuss), conhecidas como *regra das misturas*, é possível estimar o limite superior e o limite inferior do módulo de elasticidade do material compósito, respectivamente (Callister Jr, 2002). Entretanto, a regra das misturas não leva em conta a presença de vazios nem os efeitos da interface.

$$Ec(s) = Em.Vm + Ep.Vp \quad (\text{Equação 16})$$

$$Ec(i) = \frac{Em.Ep}{Ep.Vm + Em.Vp} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde: $Ec(s)$ é o módulo de elasticidade superior do compósito;

$Ec(i)$ é o módulo de elasticidade inferior do compósito;

Em é o módulo de elasticidade da fase matriz;

Ep é o módulo de elasticidade da partícula (fase dispersa);

Vm é a fração volumétrica da matriz; e,

Vp é a fração volumétrica das partículas.

A *regra das misturas* também pode ser usada para estimar a resistência, a massa específica e a capacidade térmica volumétrica de compósitos particulados. Para a condutividade térmica, apesar dela conduzir a erros substanciais, sendo mais indicado o modelo desenvolvido por Springer e Tsai (1967) *apud* Almeida (2006) (Equação 18).

$$\frac{\lambda_c}{\lambda_m} = (1 - \phi_p) + \frac{\phi_p \cdot \lambda_p}{\lambda_m} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde: λ_c é a condutividade térmica do compósito;

λ_m é a condutividade térmica da fase matriz;

λ_p é condutividade térmica das partículas; e,

ϕ_p é a fração volumétrica das partículas em relação ao volume total do compósito

2.5 ARGAMASSAS PARA FINS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Foram foco da revisão bibliográfica desta pesquisa os estudos que tratavam diretamente da interferência dos diferentes materiais no comportamento térmico das argamassas. Entretanto, sabendo-se que os materiais que são bons isolantes acústicos, também são bons isolantes térmicos, os estudos que tratavam de argamassas para isolamento acústico também foram incluídos na pesquisa. Do mesmo modo, também foram avaliados os trabalhos concernentes às argamassas leves, uma vez que a massa específica é inversamente proporcional às características isolantes dos materiais, ou seja, quanto menor a massa específica, maior é a capacidade de isolamento térmico e acústico.

As propriedades mais importantes para aplicação de argamassas em alvenarias são a trabalhabilidade, a capacidade de retenção de água e a aderência. A resistência à compressão não é uma propriedade tão condicionante como geralmente se supõe (Sousa, 2010). As argamassas leves são fabricadas por meio da redução da densidade do material introduzindo ar no seu interior através do uso de aditivos ou de materiais leves, com massa específica inferior a 1000 kg/m³.

Entre os materiais leves reconhecidos como isolantes térmicos, estão a fibra de vidro, poliestireno expandido, madeira, cortiça, vermiculita, lã mineral, etc. que usualmente (tradicionalmente) não são utilizados na produção de argamassas. Na realidade, as argamassas confeccionadas com adição de materiais leves são realizadas com a finalidade de se modificar alguma das propriedades das argamassas, como por exemplo, na tentativa de se obter maior isolamento térmico ou acústico ou reduzir as cargas atuantes na edificação. Na Tabela 4 estão apresentadas a massa específica e a condutividade térmica de alguns dos materiais leves usualmente incorporados na argamassa com vistas a modificar as propriedades das mesmas.

Além dos materiais reconhecidamente utilizados como isolantes térmicos, a pesquisa bibliográfica trouxe materiais alternativos para produção de argamassa em substituição ao agregado miúdo: raspa de pneu, cortiça, madeira, sisal, casca de arroz, aditivos incorporadores de ar e nanomateriais.

Tabela 4 i Características de materiais isolantes térmicos que podem ser usados como agregados leves.

Material	Lã de rocha/ Lã de vidro	Poliestireno Expandido (EPS) Espuma de Poliuretano	Argila expandida	Vermiculita/ Perlita expandida	Pedra Pome	Cinza volante/ Escória de alto forno
Massa específica aparente (kg/m ³)	100 a 150	12 a 14	966 a 1118	80 a 120	500 a 900	800 a 1000
Condutividade térmica (W/m°C)	0,04	0,03	0,81	0,05	0,15	0,13

Fonte: Adaptado de SOUSA (2010)

2.5.1 Argamassas com adição de agregados de origem vegetal

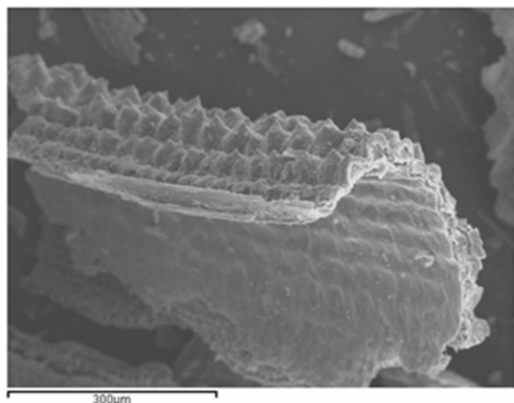
Na confecção de argamassas com cimento Portland e agregados de origem vegetal, esses últimos respondem pela leveza e pelas características de isolamento termoacústico do compósito. Os agregados vegetais são materiais resultantes de processos agroindustriais e que oferecem maior resistência à condução de calor e, quando incorporados à matriz cimentícia, transmitem de modo direto essas mesmas características ao compósito formado. Ao cimento Portland cabe à tarefa de envelopar as partículas ou fibras vegetais (Beraldo, 1997 *apud* Rossi, 2005; Stancato, 2011).

Rossi *et al* (2005) estudaram uma alternativa para o sistema de aquecimento de piso por resistência elétrica em granjas de aves e suínos, confeccionado a partir de placas de argamassa com casca de arroz (Figura 4). Para o dimensionamento da resistência elétrica das placas, foi utilizada a metodologia descrita por Incropera & DeWitt (1992), baseada na Lei de Conservação de Energia. A argamassa de cimento, areia e casca de arroz mostrou-se um bom isolante térmico, sendo seu uso indicado para revestir a parte inferior das placas. Nos testes realizados, a camada de argamassa mista conseguiu manter gradientes de temperatura de até 5°C com a face superior (aquecida) e com o ambiente (frio).

Stancato (2000) analisou a condutividade térmica e a resistência mecânica em argamassa leve, evidenciando as características termoisolantes e os principais aspectos do compósito cimento-agregado vegetal, em relação às suas propriedades mecânicas. A argamassa com pó-de-serra se caracterizou como um material isolante térmico, sendo, aproximadamente, cinco vezes mais isolante em comparação a argamassa convencional de cimento e areia, além de possuir menor efeito de penetração de água por capilaridade, representando uma vantagem quando aplicada em ambientes sujeitos a umidade (Figura 5). Para a sua utilização como argamassa de revestimento, haveria necessidade de um estudo elaborado para a melhora de sua trabalhabilidade, aderência e durabilidade. Entretanto, a aplicação da argamassa com agregado

vegetal, na produção de blocos de vedação e argamassa de revestimento, utilizados em conjunto ou separadamente, possibilitariam um efeito capaz de otimizar as variações térmicas ambientais em edificações.

Figura 4 ĩ Agregado leve vegetal: Palha de arroz.



Fonte: Tashima, 2006, p.57

Figura 5 ĩ Agregado leve vegetal: (a) Pó-de-serra granular; (b) Pó-de-serra fibroso.



(a)

(b)

Fonte: Teixeira e César, 2004, p.8

Taoukil *et al* (2011) observaram o efeito da inclusão de até 10% de pó-de-serra (menor que 0,8mm) e de aparas de madeira (entre 8 e 20mm) na condutividade térmica de compósitos de matriz cimentícia. Os resultados indicaram que a condutividade térmica se mostrou diretamente proporcional à massa específica do compósito, entretanto, a despeito das argamassas com pó-de-serra terem apresentado menor massa específica e maior porosidade do que aquelas com aparas de madeira, foram essas últimas que apresentaram os menores valores de condutividade térmica, da ordem de 0,25 W/m.K.

O estudo realizado por Corinaldesi e Moriconi (2012) demonstrou que se usando uma dosagem máxima de 5% de resíduo de madeira a fim de evitar vazios excessivos e conseqüente perda de resistência mecânica, é possível obter argamassas com condutividade térmica de 0,625W/m.K, 25% inferior à condutividade da referência, 0,815W/m.K.

Esses estudos denotam que, além do tipo de material e da fração volumétrica da fase dispersa, deve-se considerar a forma e o tamanho das partículas, uma vez que essas características podem interferir na resistência térmica oferecida pelo sistema ao longo do fluxo de calor.

Na pesquisa realizada por Beraldo e Vieira (2003a) foi avaliado o efeito de três teores de adições de fibras de sisal (1,80%, 3,60% e 10,80%) na resistência à compressão simples e na velocidade de propagação de onda ultra-sônica de argamassas de cimento e areia. As fibras de sisal de comprimento inferior a 1,5 cm, foram submetidas a diversos tratamentos visando

melhorar sua compatibilidade química com o cimento Portland (CP II-E-32) (Figura 6). Sabe-se que a velocidade de propagação da onda ultrassônica é inversamente proporcional à porosidade do material. Nesses estudos, a velocidade de propagação da onda no compósito contendo 10,80% de fibra foi quatro vezes inferior aos demais compósitos, indicando elevada formação de vazios no material, o que foi ratificado por proporcional redução da resistência à compressão.

Resultados semelhantes foram verificados por Stancato (2006), que também incorporou aditivos poliméricos em compósitos com fibra de sisal, palha de arroz e raspas de madeira a fim de melhorar a compatibilidade das fibras com a matriz cimentícia. Os resultados indicaram que os aditivos incorporam ar no sistema, ajudando na redução da condutividade térmica, entretanto, após determinado teor, os aditivos passam a colmatar os poros provocando um efeito reverso. Ainda assim, o autor obteve argamassas com pó de serra e palha de arroz com condutividade térmica entre 0,4 e 0,7 W/m.K, enquanto para as argamassas produzidas com sisal a menor condutividade observada foi de 0,97 W/m.K.

Algumas pesquisas têm estudado a incorporação de resíduos de cortiça na produção de argamassas com vistas à melhoria do desempenho térmico e acústico, as quais serão comentadas a seguir. A cortiça é a casca do sobreiro (*Quercus Suber L.*), um tecido vegetal 100% natural, formada por uma colmeia de células microscópicas preenchidas com um gás semelhante ao ar, muito utilizada para isolamento e para a fabricação de rolhas de garrafas. A cortiça utilizada nas argamassas pode ser procedente de resíduos da indústria corticeira, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (Figura 7).

Estudos realizados por Martins (2010) constataram que os valores da condutibilidade térmica das argamassas produzidas com pó de cortiça, em três diferentes granulometrias, são intermediários entre valores de referência das argamassas de reboco comuns e o aglomerado de cortiça expandida. Como exemplo, com a substituição total da areia por pó de cortiça, a massa específica da argamassa foi reduzida para aproximadamente 1/3 da argamassa comum (de 1600 para 581 kg/m³) e a condutibilidade térmica baixa para cerca de 1/8 da argamassa comum (de 0,80 para 0,10 W/m.K). Comparativamente, uma camada de reboco dessa argamassa com espessura inferior a 2,5 cm produz o mesmo efeito térmico do que seria atingido com uma placa de 1 cm de aglomerado de cortiça expandida, ou numa camada de argamassa de reboco comum com espessura superior a 17 cm.

Em estudo desenvolvido por Frade et al. (2012), duas composições de argamassas com cortiça em substituição parcial da areia, designadamente uma argamassa de reboco para projeção mecânica e uma argamassa de alvenaria leve para aplicação manual ou mecânica,

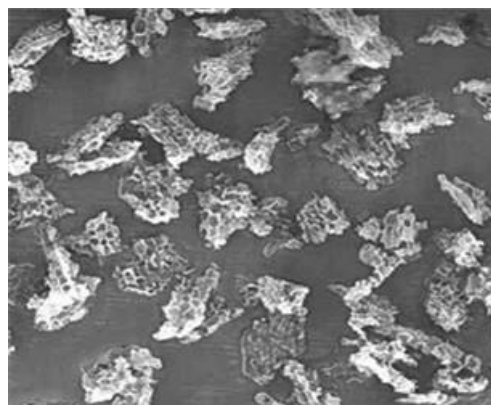
foram avaliadas quanto ao comportamento mecânico, térmico e acústico. Os valores obtidos (0,12 a 0,16 W/m.K) permitiram classificar estas argamassas como leves e de baixa condutibilidade térmica, além de bom desempenho do ponto de vista da retração, da exposição à água e a ciclos de gelo-degelo.

Figura 6 i Agregado leve vegetal: Fibra de sisal.



Fonte: BERALDO e VIEIRA, 2003b, p.2

Figura 7 i Agregado leve vegetal: Morfologia do pó de cortiça i ampliado 50 vezes.



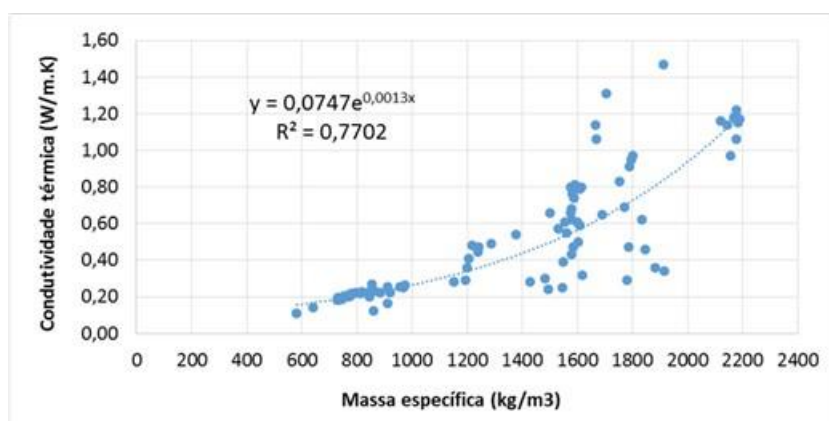
Fonte: MAIO, 2010, p.55

Leal (2012) investigou a massa específica e a condutividade térmica de argamassas contendo até 80% de cortiça em volume. Foram realizados ensaios de modo a caracterizar as argamassas quanto ao seu comportamento no estado fresco, microestrutura, comportamento mecânico e térmico, garantindo a trabalhabilidade por meio da introdução de aditivos superplastificantes. Obtiveram-se argamassas com granulado de cortiça com condutibilidade térmica na ordem de 0,40 W/m.K garantindo um comportamento mecânico aceitável.

Não obstante o isolamento acústico não seja o foco da presente pesquisa, cabe aqui ressaltar algumas pesquisas realizadas com tal intuito, uma vez que os materiais utilizados como isolantes acústicos, também são bons isolantes térmicos. Branco *et al* (2008) avaliaram a melhoria proporcionada por argamassas de enchimento leves no isolamento a sons de percussão, utilizando granulado de cortiça em substituição total da areia. As argamassas que integram grânulos de cortiça apresentam um desempenho claramente superior, melhor que o desempenho de argamassas com Poliestireno expandido e com argila expandida testados no mesmo estudo, em particular nas frequências altas (acima dos 315Hz), onde se registam melhoria de quase 60 dB nos 3150Hz. Resultados semelhantes foram encontrados por Branco *et al* (2010) em testes de Argamassas Leves na minimização da transmissão de ruídos de impacto em pavimentos.

Os dados de massas específicas e condutividades térmicas das argamassas desenvolvidas com adição de agregados de origem vegetal pelos autores citados neste item do trabalho foram catalogadas e se encontram no Apêndice A. Estas variáveis foram relacionadas por meio de regressão e verificou-se que há dependência entre estas propriedades, expressa pela tendência da diminuição da condutividade térmica à medida que diminui a massa específica aparente nos traços das argamassas, com coeficiente de determinação de 0,77 (R^2), indicando que 77% dos dados explicam o modelo determinado pela equação apresentada da Figura 8.

Figura 8 ï Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas vegetais em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da substituição de agregado natural por vegetal, o qual possui porosidades internas em sua microestrutura, onde o ar aprisionado aumenta a resistência térmica do material. Nota-se também que há uma menor dispersão dos pontos para os valores de massa específica inferior a 1400 kg/m³, o que pode indicar um comportamento mais uniforme das argamassas leves entre as variáveis estudadas.

2.5.2 Argamassas com adição de polímeros

Além dos polímeros naturais, tais como celulose e látex, os polímeros sintéticos encontram amplo emprego como materiais de engenharia. Os polímeros são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores, denominadas monômeros, os quais se repetem ao longo de toda a cadeia polimérica. Os monômeros, por sua vez, são hidrocarbonetos resultantes de craqueamento durante o processo de refinamento do petróleo e do gás natural (Mano e Mendes, 1999).

Devido a sua baixa massa específica, diversos materiais poliméricos têm sido objeto de estudo na produção de argamassas leves com fim de obter melhor isolamento termoacústico, os quais serão comentados a seguir. Fibras poliméricas oriundas de resíduos sólidos urbanos também tem sido o foco desses estudos, com a vantagem de aliar o ganho técnico ao ambiental.

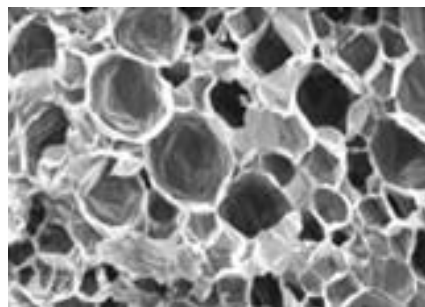
Um polímero largamente utilizado como isolante térmico é o Poliestireno Expandido, popularmente chamado de EPS (Figura 9). Além de uma baixíssima massa específica (da ordem de 20kg/m^3), esse material se caracteriza por apresentar uma condutibilidade térmica muito baixa decorrente de uma estrutura celular fechada, com ar ocluído, que dificulta a transferência de calor (Figura 10). Por outro lado, quando utilizado como agregado em argamassas, apresenta baixa absorção de água e importante compatibilidade com os diferentes tipos de ligantes utilizados na construção civil (Gonçalves *et al.*, 2012).

Figura 9 ĩ Esferas de EPS.



Fonte: Gonçalves *et al.*, 2012, p.3

Figura 10 ĩ Microestrutura do EPS.



Fonte: Poletto, 2009, p.6

Diversas pesquisas investigaram o uso do EPS em substituição ao agregado miúdo para produção de argamassas com características de isolamento térmico chegando a formulações que resultaram em condutividades térmicas que variam de 0,07 a 0,09 W/m.K (Frade, 2010; Gonçalves, 2012) e outras também bastante promissoras com condutividade da ordem de 0,60W/m.K (Alves, 2009; Leal, 2012). Todas elas atestam a eficiência dessas argamassas para isolamento térmico e acústico de edificações, embora se verifique também redução da ordem de 50% da resistência mecânica.

Estudos realizados com agregados de polímeros reciclados, oriundos de embalagens de alimentos, tais como polietileno (PE), polipropileno (PP) e polietileno tereftalato (PET), foram realizados a fim de verificar o efeito desses materiais nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas. Os resíduos foram utilizados em variadas frações em substituição à areia natural para produção de argamassas. Entre esses, um resíduo polimérico de elevado impacto ambiental provém de recipientes de poliestireno tereftalato (PET), uma vez que o

consumo de alimentos e bebidas embalados com esses materiais tem aumentado significativamente (Figura 11).

Iucolano *et al.* (2013) constataram um aumento da macroporosidade com o aumento do teor de resíduos PET, embora esse fato não tenha afetado significativamente a permeabilidade ao vapor de água, o que está diretamente ligado à durabilidade do material. Entretanto, a elevada porosidade e a fraca adesão entre a superfície das partículas plásticas e a matriz cimentícia afetam negativamente as propriedades mecânicas, em particular a resistência à compressão da argamassa. Em contrapartida, uma substituição de apenas 20% da areia por resíduos plásticos é capaz de provocar redução de quase 50% na condutividade térmica, passando de 0,38 W/mK a cerca de 0,19 W/mK, com um ganho significativo em termos de isolamento térmico.

Ingrao *et al.* (2014) analisaram o impacto ambiental e o potencial para uma produção mais verde a partir de painéis à base de fibra de PET reciclado para isolamento térmico. O estudo evidenciou que ser natural não significa ser 100% ambientalmente sustentável e que os materiais reciclados podem ser preferidos a materiais naturais de igual qualidade e desempenho de isolamento. Cada parte do envelope (paredes laterais, teto e piso térreo), pode resultar na identificação de uma solução com os mais elevados níveis de resistência térmica e de sustentabilidade ambiental. Testes de resistência química realizados por Benosman *et al* (2013) mostraram que argamassas modificadas com resíduos de PET apresentam melhor resistência química do que as argamassas de referencia, sem PET. Sendo assim, a utilização de resíduos de PET na fabricação de argamassas é uma alternativa de material de construção sustentável, ajuda na preservação dos recursos naturais, reduz o impacto ambiental e ainda pode prevenir a deterioração das estruturas de concreto.

Zuchetto *et al.* (2015) utilizaram agregado miúdo polimérico de EVA, obtido a partir de resíduos da indústria calçadista (Figura 12), em substituição da areia em proporções de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os autores observaram que o aumento na proporção do EVA, além reduzir significativamente o peso na estrutura, melhora o isolamento acústico ao ruído de impacto e não compromete a resistência à tração e à compressão requerida para o uso em contrapisos, sendo o teor ótimo na faixa de 60 a 80% de EVA.

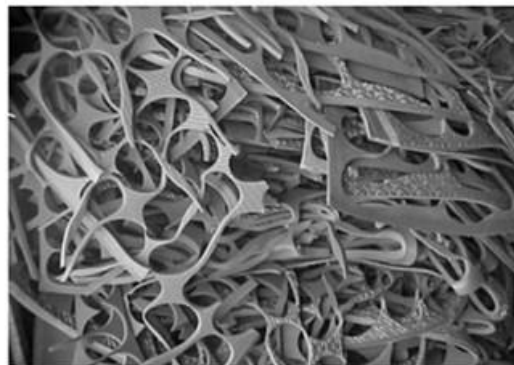
Testes semelhantes realizados com resíduos de poliuretano resultaram em argamassas com condutividade térmica entre 0,60 e 0,65 W/m.K. Entretanto, o uso simultâneo de filler calcáreo aumenta a condutividade para valores acima de 0,7 W/m.K, que é o valor limite para que seja considerada argamassa térmica (Corinaldesi, 2011).

Figura 11 ĩ Resíduos de embalagens PET na forma de flocos.



Fonte: MODRO *et al*, 2009, p.729

Figura 12 ĩ Resíduos de EVA da indústria calçadista.



Fonte: ZATTERA *et al* 2005, p.74

Outro resíduo de forte impacto ambiental são os pneus inservíveis (Figuras 13 e 14). A borracha do pneu é um polímero termorrígido, cujo processo de reciclagem é oneroso por exigir o uso de muitos produtos químicos e energia.

Resíduos de borracha de pneu podem ser obtidos pela raspagem das bandas de rodagem durante o processo de recauchutagem. Aqueles pneus que não servem mais à recauchutagem são triturados e todos os seus componentes do pneu podem ser reciclados para a construção civil: as fibras metálicas preparadas para incorporar ao concreto como armadura e a borracha pode ser preparada para componentes da construção, tais como placas impermeabilizantes de contrapiso, enchimento de fundações e composição de painéis de paredes de concreto (Alves *et al.*, 2010; Albuquerque, 2009). As raspas finas do pneu podem ser incorporadas nas argamassas de revestimentos, facilitando sua aplicabilidade e contribuindo para melhorar o isolamento térmico das fachadas externas das habitações.

Figura 13 ĩ Trituração de pneus inservíveis.



Fonte: Rodrigues e Ferreira, 2010, p.3

Figura 14 ĩ Raspas e pó de pneu após peneiramento e classificação.



Fonte: Rodrigues e Ferreira, 2010, p.3

Alves *et al.* (2010) testaram argamassas de cimento e cal e argamassas de cimento e filito com e sem adição de raspas de pneu, no teor de 12% em volume. As argamassas com raspas resultaram em resistência similar às referências. O comportamento pós-ruptura da matriz cimentícia com borracha de pneu foi estudado por Rodrigues e Ferreira (2010). Nesse caso, observou-se que as placas com borracha de pneu sofrem um incremento no valor da carga de ruptura da matriz, de 300% a 400 %, com significativas deformações, denotando uma grande ductilidade desse material.

Furlanato Neto e Castro (2012) analisaram a acústica de contrapisos de argamassa com adição de resíduos de pneus na atenuação do ruído de impacto entre pavimentos. Os resultados indicaram que o melhor desempenho foi da amostra com 50% de adição de resíduos de pneus que foi superior a usual em 2,2 dB, a que possuía uma fração 30% de resíduos de pneus com um ganho de 0,7 dB em relação a amostra usual, e por último ficando a de 10% de resíduos de pneus que não obteve desempenho satisfatório.

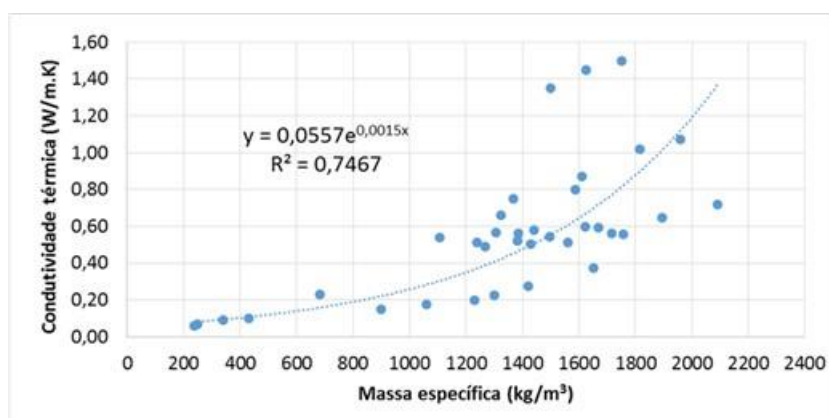
Ferreira (2010) verificou que a inclusão de 10, 20, 30, 40 e 67,5% de resíduos de pneu nas argamassas estudadas levou à redução de 0,66; 4,26; 9,77; 24,52 e 45% da condutividade térmica, respectivamente, em relação à amostra de referência (1,53W/mK). O autor atribuiu esse comportamento ao efeito isolante das partículas de borracha associado ao aumento do ar aprisionado promovido pela inclusão das referidas partículas. Fadiel *et al* (2014) chegaram a resultados semelhantes por meio da inclusão de partículas de pneu de diferentes granulometrias (0,4 a 0,8mm e 0,8 a 1,2mm). Os autores verificaram também que as partículas de maior granulometria são mais eficientes, resultando em valores de condutividade térmica da ordem de 0,55 W/m.K.

As pesquisas com raspas de pneu já permitem concluir pela viabilidade de algumas aplicações em elementos e componentes para a construção civil, com desempenho adequado e custo bastante competitivo quando comparado a materiais e produtos convencionais.

Os dados de massas específicas e condutividades térmicas das argamassas desenvolvidas com adição de polímeros pelos autores citados anteriormente foram catalogadas e se encontram no Apêndice B. Assim como no caso anterior, verificou-se que há dependência entre as variáveis (Figura 15), expressa pela tendência da diminuição da condutividade térmica à medida que a adição de polímeros tende a diminuir a massa específica aparente nos traços das argamassas, com coeficiente de determinação de 0,74 (R^2), ligeiramente menor do que o observado com as argamassas com a adição de agregado vegetal (Figura 8). Assim como no caso anterior, a curva exponencial foi a que melhor representou a correlação entre as propriedades pesquisadas. Mais uma vez a dependência da condutividade térmica em relação à

massa específica pode estar associada ao aumento da porosidade quando se aumenta a quantidade de resíduo incorporado, seja devido à própria microestrutura do resíduo, como é o caso do EVA e do EPS, ou devido à incorporação de ar provocada pelo resíduo durante o processo de mistura, como é o caso das raspas de pneu e do PET. Como já foi discutido, o ar estagnado não é bom condutor de calor e, assim contribui para a redução da condutividade do material. Deve-se atentar também que os polímeros possuem uma microestrutura na qual os átomos estão ligados por meio de ligações covalentes e, desse modo, os elétrons não ficam livres para a condução de calor.

Figura 15 ĩ Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos poliméricos em função da massa específica.



Fonte: o autor.

2.5.3 Argamassas com Agregados Minerais

Muitos estudos de argamassas leves envolvem o uso de agregados provenientes de argilas ou resíduos industriais tais como cinzas e escórias. Várias argamassas desenvolvidas usando agregados leves como substituição da fração de areia usada na argamassa tradicional resultaram em densidades entre 1.100 kg/m³ e 1.400 kg/m³ (Tinker e O'Rourke, 1995). Os agregados leves utilizados pelos autores foram os resíduos de carvão; cinzas de combustível pulverizado e pasta de carvão (PFA); escória de alto-forno expandida; e pedra-pome. Antes do uso, os mesmos foram esmagados e reclassificados de modo que eles tivessem um tamanho similar ao da areia. A densidade e a condutividade térmica de cada argamassa foram, em média, 32% e 51% menores do que o padrão, respectivamente. Os valores de condutividade térmica encontrados ficaram na faixa de 0,25 a 0,42W/m.K.

A argila expandida é obtida por calcinação a alta temperatura (cerca de 1000 a 1250 °C) de grânulos de argila previamente formados por moldagem ou fragmentação. Durante a elevação da temperatura, dá-se uma libertação de gases, variável segundo as argilas utilizadas,

que causa o aparecimento de poros diminutos no interior do material pirolástico. Diversos autores têm avaliado o uso da vermiculita expandida na produção de argamassas leves e observaram que o nível de isolamento é inversamente proporcional ao tamanho (Alves, 2009; Branco, 2008; Branco, 2010) e diretamente proporcional à massa específica das partículas de argila (Ferreira *et al.*, 2007), tendo sido registrados valores de condutividade térmica de 0,16 a 0,34 W/m.K.

Nascimento (2008) estudou a viabilidade do uso de resíduos do beneficiamento do caulim (Figura 16), associado à vermiculita expandida (Figura 17), visando à confecção de argamassas com características isolantes termoacústico com redução do consumo de cimento. O autor testou traços de argamassa com substituição da areia por resíduos de caulim e por vermiculita expandida com teores que variaram de 5% a 45%. Os resultados mostraram que todos os traços apresentaram resistência à compressão e aderência superior aos referenciais mínimos que eram de 2MPa e 0,2MPa, respectivamente, além de excelentes características de isolamento térmico, mantendo diferenças de até 18°C entre as faces interna e externa da placa.

Figura 16 i Resíduo do processamento do caulim (birra).



Fonte: Nóbrega, 2007, p.49

Figura 17 i Vermiculita expandida.

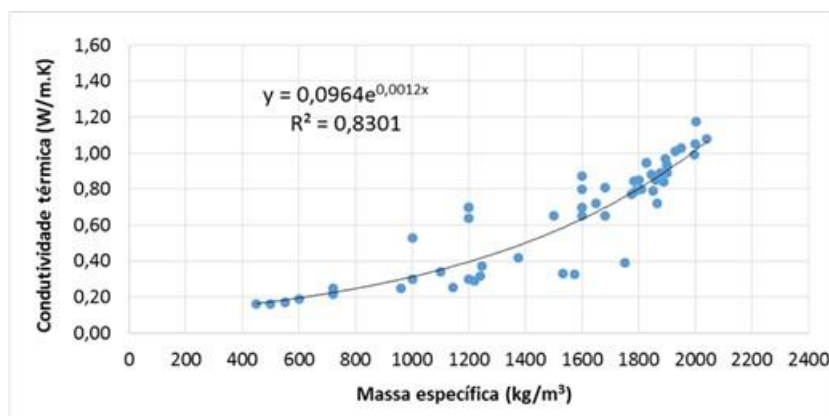


Fonte: Ugarte *et al.* 2008, p.878

A Figura 18 ilustra a análise de regressão não linear realizada com os dados de massa específica e condutividade térmica (Apêndice C) dos trabalhos citados anteriormente. O melhor ajuste dos dados se deu por meio de uma relação não linear exponencial, com coeficiente de determinação de 0,83 (R^2), indicando que 83% dos dados explicam o modelo determinado. Entre os modelos determinados, este foi o que apresentou menor dispersão dos dados em relação a curva ajustada.

Este fato pode estar associado a característica do material de substituição que possui elevada porosidade interna dos materiais, o que contribui para o aumento da porosidade total do compósito e, conseqüentemente, para o aumento da resistência térmica da argamassa.

Figura 18 ĩ Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos minerais em função da massa específica.



Fonte: o autor.

2.5.3.1 Argamassas com resíduos da construção civil

No caso dos resíduos de cerâmica vermelha (CV), resíduo de construção e demolição (RCD) e pó de vidro (PV) não foram encontradas referências de pesquisas que tenham utilizado esses materiais com vistas à redução da condutividade térmica de argamassas.

Resíduos de cerâmica vermelha e resíduos de construção e demolição têm sido pesquisados como forte opção de substituição de agregados graúdos e miúdos em concretos e argamassas, sendo utilizados em teores de até 100% de substituição dos agregados naturais (Gonçalves, 2007; Cabral et al, 2009; Zampiron et al 2010; Costa et al, 2011). Optou-se, portanto, por avaliar o desempenho desses resíduos em relação aos agregados leves na produção de argamassas de revestimento.

Os resíduos de vidro, por sua vez, têm encontrado maior aplicabilidade como material pozolânico em substituição parcial ao cimento com vistas a melhoria do desempenho mecânico, uma vez que é composto predominantemente por sílica amorfa. Nesse caso os resíduos de vidro são reduzidos à finura do cimento e utilizados em teores de 5 a 30% em substituição ao mesmo (Oliveira, 2012; Oliveira *et al.*, 2013; Sauer *et al.*, 2013; Calmon *et al.*, 2014, Santos *et al.*, 2015). Os materiais pozolânicos, na presença de água, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia, formando silicatos de cálcio hidratado, os quais são responsáveis pela resistência mecânica de concretos e argamassas. Do ponto de vista da condutividade térmica, o alto grau de amorfismo do vidro e sua composição microestrutural, de natureza cerâmica, podem ser interessantes para o desempenho térmico das argamassas de revestimento. Nos materiais cerâmicos, as ligações atômicas são de natureza iônica e, portanto, não há muitos elétrons disponíveis para condução de calor, a qual ocorre basicamente por meio das vibrações atômicas. No vidro não há uma rede cristalina organizada para transmissão das

vibrações, e o alto grau de desordem da estrutura dificulta essa transmissão. Sendo assim, nesta pesquisa foram estudadas também argamassas com resíduos de vidro em substituição parcial à areia natural.

2.5.4 Argamassas modificadas com aditivos

A obtenção de argamassas leves para o uso na construção civil através da adição de aditivos formadores de microporosidade vem sendo recentemente apontada como uma promissora alternativa para a construção de estruturas leves, onde o compromisso da resistência mecânica aliada às ações ambientais, tais como degradações físico-químicas provocadas por intemperismo, não representam pré-requisitos básicos da construção civil, que possam impedir a utilização de argamassas de baixa densidade, com micro porosidade controlada (Coimbra e Morelli, 1999).

Os aditivos incorporadores de ar são, predominantemente, polímeros tensoativos aniônicos, os quais quando adicionados às pastas de cimentos, tendem a se adsorver nas partículas sólidas da pasta, através da sua parte polar (cabeça), com a parte apolar (cauda) voltada para a fase aquosa. Uma das funções dos aditivos incorporadores de ar nos concretos e argamassas é melhorar a trabalhabilidade sem aumentar a quantidade de água na mistura e, assim, minimizar o impacto da porosidade na redução da resistência mecânica desses materiais (Mansur *et al* 2007; Silva *et al* 2009).

Estudos desenvolvidos por Coimbra e Morelli (1999) investigaram o comportamento mecânico de uma argamassa leve, através da ação combinada de aditivos orgânicos formadores de microporosidade e aditivos inorgânicos capazes de influenciar nas reações de cura a fim de compensar a perda de resistência mecânica devido à presença excessiva de poros (composições extremamente leves). As porosidades aparentes obtidas foram 19,90% para a composição sem adição (padrão) e 25,37%; 30,15% e 38,85% para as composições contendo 0,25%; 0,5% e 5,0% de aditivo orgânico respectivamente. A obtenção de uma grande variação de resultados, considerando a adição de diferentes quantidades de aditivos, mostra a sua ampla utilização para diferentes situações, de acordo com a aplicação do material (isolamento térmico e acústico, elementos estruturais, etc.).

Granja (2014) estudou 60 misturas de argamassas nas quais o agente indutor de porosidade foi utilizado nas percentagens de 0,8%; 1%; 1,2% e 1,5% do peso total das misturas. Constatou-se que o melhor desempenho nestas foi de 0,12 W/m.°C obtido com uma razão ativador ligante de 0,6 e 0,8% de pó de alumínio. Relativamente às argamassas geopoliméricas

monofásicas, o melhor desempenho foi de 0,13 W/m.°C obtido com 1,2% de pó de alumínio estando em linha com o melhor desempenho das argamassas geopoliméricas correntes.

Poucos trabalhos, entretanto, têm sido desenvolvidos com a utilização de aditivos incorporadores de ar com fins de redução da condutividade térmica das argamassas de revestimento. Apesar do domínio da tecnologia e da química dos aditivos, essa prática é ainda bastante empírica e seu uso tem sido apontado como um fator de complexidade operacional. Na prática, o difícil controle das propriedades dos materiais aerados é um dos fatores que têm desaconselhado a utilização desta tecnologia em diversas aplicações no setor construtivo. Assim, apesar das virtudes potenciais, a falta de controle no processamento dificulta o emprego de argamassas aeradas como tipos de materiais sustentáveis (Romano, 2013).

2.5.5 Argamassas com Nanomateriais

Nanomateriais são materiais que possuem graus estruturais na ordem de 10^{-9} m ou um nanômetro (nm) os quais são objeto de estudo da nanociência e da nanotecnologia. Os nanomateriais apresentam propriedades especiais em virtude de sua escala nanométrica e são empregados em projetos de nanotecnologia. Variam quanto ao tamanho, composição química, forma e superfície.

A nanotecnologia tem tido crescente aplicação nas argamassas de revestimento, através da melhoria das propriedades da própria argamassa e/ou da sua superfície de acabamento. Os nanomateriais que têm sido utilizados nas argamassas de revestimento correspondem a nanopartículas de sílica, nanotubos de carbono, aerogel de sílica, nanopartículas de titânio, nanoalumina, nanocal, nanometacaulino e nanoargilas (Flores-Colen *et al.* 2013). Na Tabela 5 são apresentadas algumas características de nanomateriais utilizados em argamassas.

Entre os nanomateriais, o aerogel de sílica destaca-se para melhoria do desempenho térmico das argamassas (Figura 19). Os aerogéis de sílica são materiais nano-estruturados altamente porosos (poros reduzidos, com 10-100nm), com densidades entre 3 e 500 kg/m³, que apresentam excelentes propriedades térmicas e acústicas (condutibilidade térmica na ordem de 0,01- 0,02 W/m.K e impedância acústica na ordem de 10³-10⁶ kg/m²s) que podem ser puramente inorgânicos, orgânicos ou híbridos (Ilharco *et al.* 2007; Aegerter *et al.* 2011).

A incorporação de 60 a 90% em volume de grânulos de aerogel de sílica na argamassa pode conduzir a valores de 0,025 W/m.K para a condutibilidade térmica da argamassa com uma densidade de aproximadamente 200 kg/m³ (Baetens, 2011; Stahl *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2013).

Tabela 5 - Síntese comparativa dos efeitos da incorporação de variados nanomateriais em argamassas.

Tipo de nano material	Nanotubos de carbono	Nanosílica	Nano TiO ₂	Aerogel de Sílica
%	Baixa	Baixa	Baixa	Alta
Trabalhabilidade e mistura	Diminui	Diminui	Diminui	Depende do tipo de aerogel
Resistência à tração	Aumenta	Aumenta	não especificado	não especificado
Resistência à compressão	Aumenta	Aumenta inicial Diminui em idades avançadas	Aumenta inicial Diminui em idades avançadas	não especificado
Propriedades físicas	Diminui absorção capilar	Diminui permeabilidade à água	Fotocatálise e autolimpeza	Diminui condutividade térmica, aumenta a secagem, aumenta a porosidade, aumenta a resistência ao fogo, aumenta a absorção capilar
Durabilidade	Aumenta	não especificado	não especificado	não especificado
Custo	Elevado	não especificado	Custo médio	Elevado
Impacto ambiental	não especificado	não especificado	Aumenta inicial Diminui no final	Aumenta inicial Diminui no final

Fonte: Adaptado de Flores-Colen *et al.*, 2013

Figura 19 - Aerogel de sílica híbrido moído e peneirado, com diferentes granulometrias.



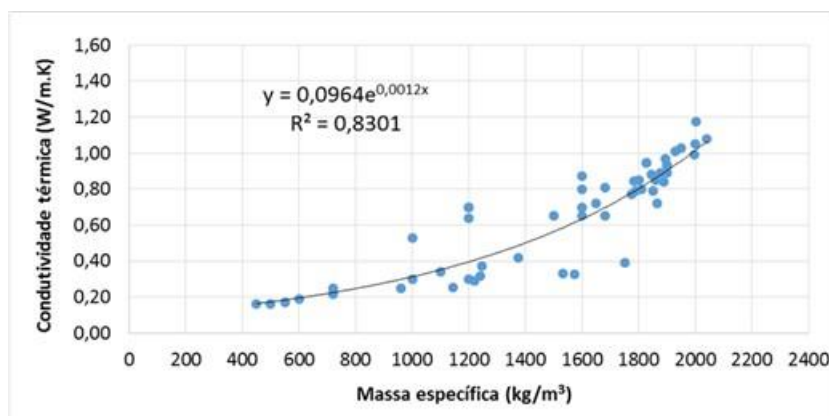
Fonte: Flores-Colen *et al.*, 2013, p.46

2.5.6 Relação entre Massa Específica, Condutividade Térmica e Resistência mecânica

2.5.6.1 Massa específica x Condutividade Térmica

Com intuito de compreender como a massa específica das argamassas interfere na sua condutividade térmica, os dados destas variáveis, quando disponibilizadas nas pesquisas citadas na revisão bibliográfica deste trabalho, foram catalogados. Por meio deste procedimento, foi possível estabelecer por meio de análise de regressão não linear o comportamento da variação da condutividade em função da massa específica das argamassas (Figura 20). O melhor ajuste entre as variáveis se deu por meio de uma equação exponencial, com coeficiente de determinação 0,75 (R^2), indicando que 75% dos dados explicam o modelo determinado. Nota-se que há tendência de elevação da condutividade térmica à medida que os traços com diferentes tipos de composições tendem a elevar a densidade de massa específica das argamassas.

Figura 20 - Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Pela análise da Figura 20 é possível perceber maior dispersão dos dados nas argamassas com massa específica superior a 1500 kg/m³. Pode-se apontar uma série de variáveis intervenientes para justificar o comportamento observado tais como uso de diferentes tipos de aglomerantes na composição das argamassas pesquisadas, diferentes condutividades térmicas entre os agregados miúdos utilizados (areia), qualidade da interface partícula matriz, uso de diferentes metodologias de dosagens e de ensaios etc. Todavia, tal comportamento pode estar relacionado aos resíduos que apresentam diferentes massas específicas, visto que esta propriedade relaciona-se com o transporte de calor em nível de estrutura molecular destes materiais. Por outro lado, as dosagens utilizando materiais leves reduzem não só a massa aparente, como alteram a porosidade, o índice de vazios e a incorporação de ar pela argamassa, justificando as variações na condutividade térmica verificadas nas pesquisas utilizadas como referência neste trabalho.

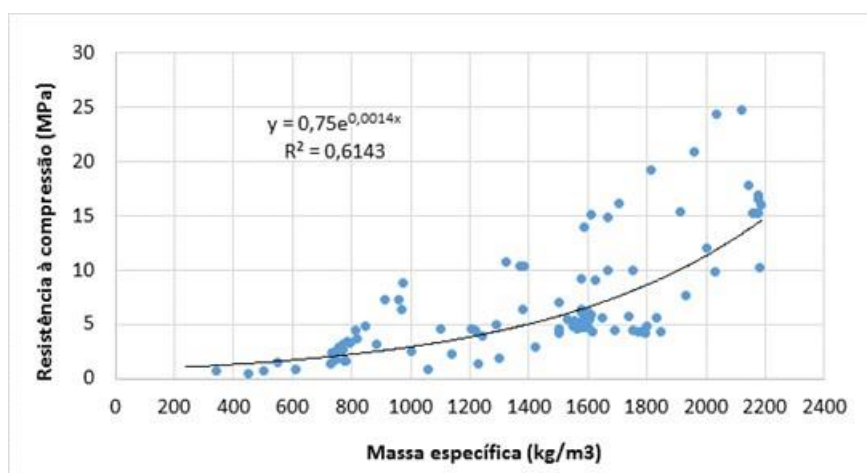
Como a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2008) é restrita em termos de dados de condutividade térmica de argamassas, a relação determinada por meio da equação da Figura 20 poderia ser utilizada como referência para preencher esta lacuna da atual versão da norma. Assim, por meio dela seria possível estimar a propriedade de condutividade térmica de uma argamassa conhecendo ou especificando a sua massa específica aparente.

2.5.6.2 Massa específica x Resistência Mecânica

O comportamento da correlação entre a massa específica e a resistência das argamassas se dá de forma similar a observada entre a massa específica e condutividade térmica, observando-se elevação na resistência à compressão e à tração a medida que a massa específica da argamassa se eleva. No caso da resistência à compressão, verifica-se que o ajuste se deu por

meio de uma equação exponencial, com coeficiente de determinação 0,61 (R^2), indicando que 61% dos dados explicam o modelo determinado (Figura 21). Já no caso da resistência à tração (Figura 22), obteve-se um melhor grau de determinação com a massa específica (0,77), embora a amostra seja menor uma vez que nem todos os pesquisadores avaliaram essa propriedade.

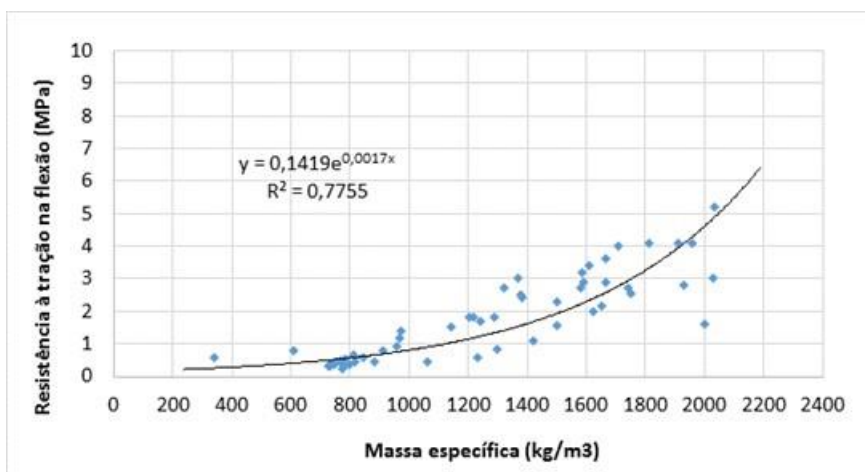
Figura 21 – Comportamento da resistência à compressão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a porosidade dos materiais de matriz cimentícia interfere negativamente no suporte de carga do material, de modo que quanto maior a porosidade, menor serão a densidade e a resistência. Desta forma, o comportamento da resistência tanto à compressão e à tração em função da massa específica se deu de forma prevista visto que as argamassas leves apresentam maior quantidade de poros que as mais densas. O nível de determinação encontrado foi fraco ($R^2 < 0,7$) em virtude da maior dispersão dos dados, fato este que pode ser atribuído em parte às características das partículas de agregados incorporadas às argamassas que são porosas, não contribuindo desta forma para a resistência do conjunto. Ou seja, a porosidade à qual se referem Mehta e Monteiro (1994) é a porosidade encontrada na matriz cimentícia, considerando que os agregados grãos e miúdos são partículas sólidas de rocha que contribuem para o suporte de carga do material. No caso das argamassas aqui analisadas, além da porosidade da matriz, as partículas incorporadas também são porosas e não contribuem para a resistência do conjunto.

Figura 22 - Comportamento da resistência à tração na flexão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.



Fonte: o autor.

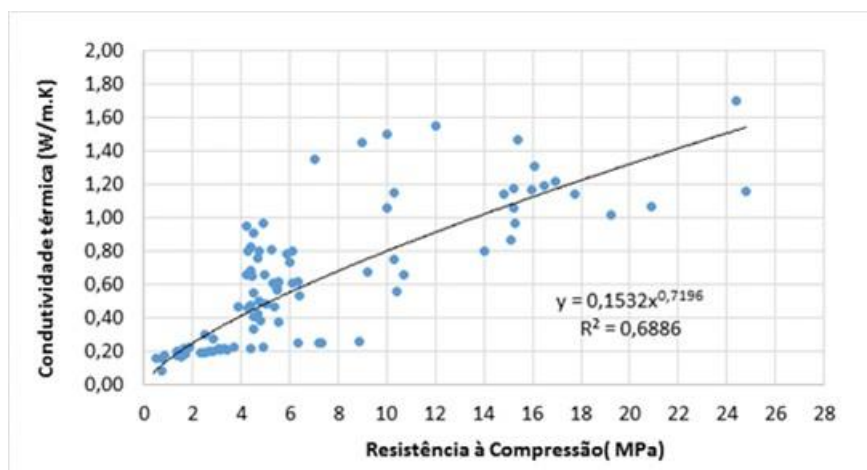
2.5.6.3 Resistência mecânica x Condutividade Térmica

Procedeu-se, quando disponibilizadas, a catalogação das propriedades de resistência mecânica (compressão e tração na flexão) e da condutividade térmica das argamassas citadas na revisão bibliográfica deste trabalho. A relação entre estas propriedades pode ser observada nas Figuras 23 e 24.

A partir da análise das Figuras 23 e 24, verifica-se que a condutividade térmica se eleva com a elevação da resistência mecânica a compressão e à tração na flexão. Enquanto a análise de regressão indicou melhor ajuste dos dados por meio da equação na forma de potencia para a resistência a compressão com coeficiente de determinação de 0,69 (R^2), para a resistência à tração por flexão o melhor ajuste foi obtido por meio de equação exponencial, com coeficiente de determinação de 0,76. Nos materiais de matriz cimentícia, o aumento da resistência está relacionado à maior formação de cristais de silicato de cálcio hidratado, melhor aderência na interface matriz/agregado e menor porosidade (Mehta e Monteiro, 1994), sendo essas justamente as características que facilitam a condução de calor através do material, o que explica a elevação da condutividade térmica em função da elevação da resistência mecânica.

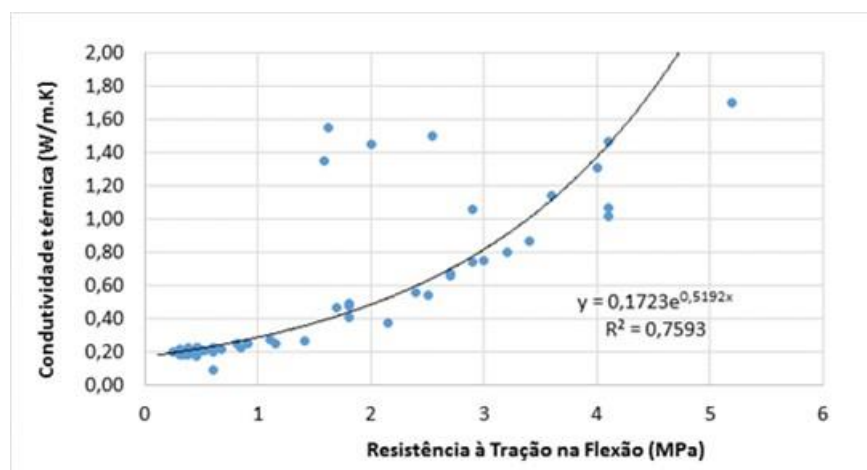
Não foi possível criar gráficos de correlação entre a condutividade térmica e outras propriedades como capilaridade, índice de vazios, resistência de aderência, entre outras, uma vez que nem todas estas características foram analisadas no desenvolvimento das pesquisas estudadas.

Figura 23 ĩ Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à compressão.



Fonte: o autor.

Figura 24 ĩ Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à tração na flexão.



Fonte: o autor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais selecionados para produção da argamassa bem como os procedimentos de beneficiamento e caracterização dos materiais. São também descritos os procedimentos de moldagem, de cura e os testes para caracterização da argamassa fresca e endurecida.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na confecção das argamassas de revestimento foram aqueles usualmente utilizados nas obras da construção civil corrente: cimento, cal, areia natural e água. Além desses foram também utilizados materiais alternativos provenientes de resíduos sólidos disponíveis na região em substituição parcial à areia natural.

3.1.1 Materiais convencionais constituintes das argamassas

As argamassas desta pesquisa foram dosadas com os seguintes materiais convencionais:

- Cimento tipo CP II F 32, de uso corrente em obras de edificações comerciais e residenciais. Segundo a NBR 11578, este é um cimento composto com filler calcário, com resistência mínima à compressão de 32 MPa aos 28 dias (ABNT, 1997);

- Cal hidratada tipo CH III, utilizada com o propósito de conferir maior plasticidade e retenção de água à argamassa e, assim, facilitar a aplicação e reduzir a ocorrência de fissuras. Segundo a NBR 7175, é um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente no mínimo de 85% hidróxidos de cálcio e hidróxidos de magnésio (ABNT, 2003);

- Areia natural, proveniente do Rio Cuiabá, foi o agregado miúdo usado na composição da argamassa de referência e substituído parcialmente por outros materiais, nas demais argamassas. A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como o material particulado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Neste caso, por se tratar de areia para uso em argamassa de revestimento, a mesma foi peneirada em malha com abertura de 2,36 mm a fim de excluir os grãos com maiores dimensões (Figura 25).

Figura 25 ĩ Areia natural: a) material passante na #2,36mm; b) material retido na # 2,36mm.



Fonte: o autor

3.1.2 Materiais provenientes de resíduos sólidos

Dentre os resíduos sólidos urbanos e industriais disponíveis na região de Cuiabá, optou-se por dosar as argamassas com resíduos sólidos de origem vegetal (palha de arroz e pó de serra), de origem polimérica (EPS, PET e borracha de pneu) e de origem mineral (cerâmica vermelha, RCD e pó de vidro), listados a seguir.

- PA (Palha de arroz): resíduo da indústria de alimentos, proveniente da limpeza do arroz em casca (Figuras 26 e 27);
- PS (Pó de serra): resíduo gerado no corte e raspagem de madeiras da indústria moveleira e de madeiras para construção (Figuras 28 e 29);
- PET (Poli Etileno Tereftalato): resíduo de embalagens de polímero usadas para envasamento de bebidas (Figuras 30 e 31);
- EPS (poliestireno expandido): conhecido como isopor, é um resíduo da construção civil, oriundo de sobras e descarte de EPS usado em embalagens, juntas de dilatação e isolamento de lajes (Figuras 32 a 35);
- PN (Raspas de pneu): resultantes da raspagem de pneus durante o processo de recauchutagem (Figuras 36 e 37);
- CV (Cerâmica Vermelha): resíduos de telhas e blocos cerâmicos, peças quebradas, recortes, descartes, provenientes da construção civil e da indústria cerâmica (Figuras 38, 39 e 41);
- RCD (Resíduo de Construção e Demolição): resíduos de cerâmica vermelha, de argamassa e de concreto gerados durante procedimentos de construção e demolição, de modo que não há separação entre os três tipos de material (Figuras 38, 39 e 40).

- PV (Pó de vidro): resíduos oriundos dos processos de corte e polimento durante a produção de vidros para a construção civil, e também de peças quebradas e não-conformes que são descartadas (Figuras 42 a 45).

3.1.3 Preparação dos materiais provenientes de resíduos sólidos

Devido à variedade no formato e dimensões dos resíduos, esses foram submetidos à processos de britagem e/ou moagem seguidos de peneiramento, a fim de obter partículas com dimensões semelhantes àsquelas da areia natural. Nas Figuras 26 a 45 estão ilustrados alguns desses processos e o material resultante.

Figura 26 i Trituração da palha de arroz em liquidificador de três hélices.



Fonte: o autor

Figura 27 i Peneiramento da palha de arroz em malha 2,36mm.



Fonte: o autor

Figura 28 i Resíduos de madeira (pó-de-serra).



Fonte: o autor

Figura 29 i Peneiramento do pó-de-serra em malha 2,36mm.



Fonte: o autor

Figura 30 ĩ Peneiramento do PET em malha 2,36mm.



Fonte: o autor.

Figura 31 ĩ Aspecto do resíduo de PET após peneiramento.



Fonte: o autor.

Figura 32 ĩ Trituração do EPS em ralador doméstico.



Fonte: o autor.

Figura 33 ĩ Trituração do EPS em moinho manual.



Fonte: o autor.

Figura 34 ĩ Peneiramento do EPS em malha 4,8mm.



Fonte: o autor.

Figura 35 ĩ Aspecto do resíduo de EPS após peneiramento.



Fonte: o autor.

Figura 36 ĩ Peneiramento das raspas de pneu em malha 2,36mm.



Fonte: o autor.

Figura 37 ĩ Aspecto do resíduo de pneu após peneiramento.



Fonte: o autor.

Figura 38 ĩ Resíduo de Construção e Demolição.



Fonte: o autor.

Figura 39 ĩ Equipamento usado para a britagem do RCD e da cerâmica vermelha.



Fonte: o autor.

Figura 40 - RCD após britagem e peneiramento.



Fonte: o autor.

Figura 41 ĩ Cerâmica vermelha após britagem e peneiramento.



Fonte: o autor.

Figura 42 ĩ Resíduos de vidro na indústria.



Fonte: o autor.

Figura 43 ĩ Cominuição do resíduo de vidro em moinho de bolas.



Fonte: o autor.

Figura 44 ĩ Resíduo de vidro: a) após britagem; b) após moagem e peneiramento na malha 1,2mm.



Fonte: o autor.

Figura 45 - Aspecto final do resíduo de vidro.



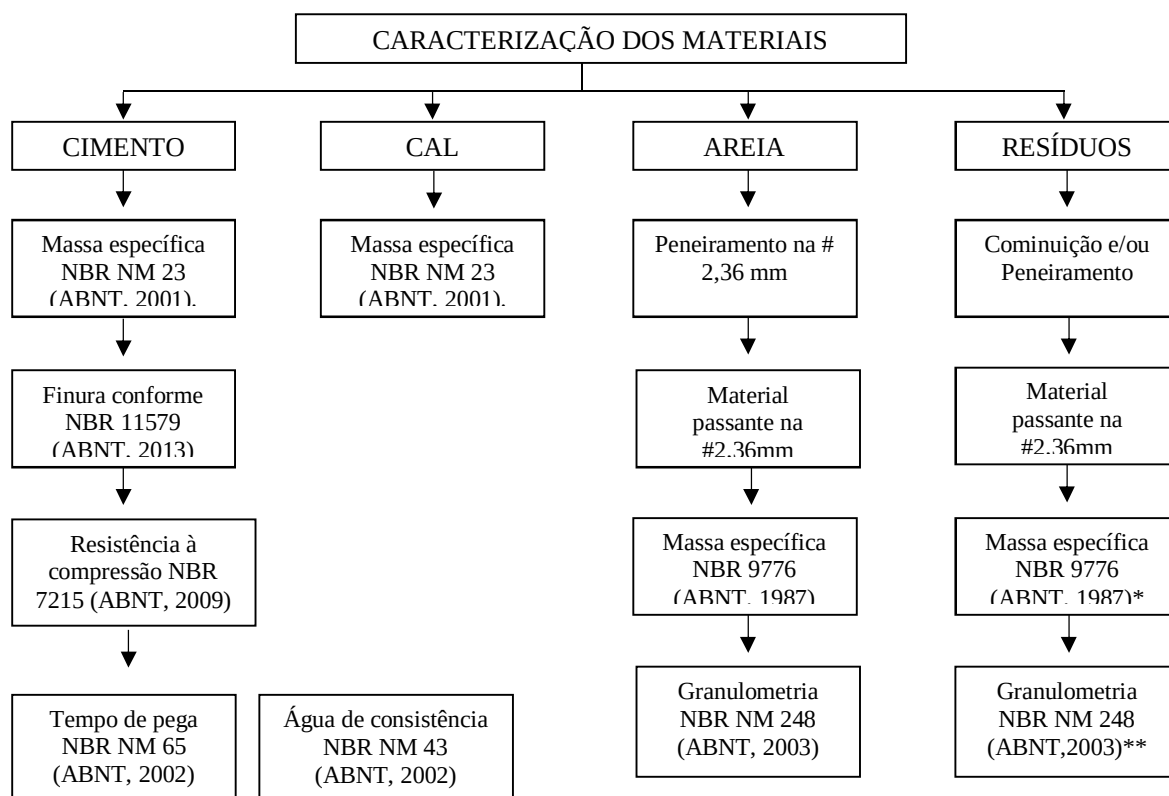
Fonte: o autor.

3.2 MÉTODO

3.2.1 Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

A caracterização dos materiais foi realizada conforme as normas técnicas vigentes, seguindo o roteiro apresentado na Figura 46.

Figura 46 i Roteiro de caracterização dos materiais constituintes da argamassa.



(*) O método de determinação da massa específica de agregados miúdos pelo frasco Chapman (ABNT, 1987) encontra-se cancelado. Entretanto, o método indicado na norma NBR NM 52 (ABNT, 2009b) não foi eficiente na determinação das massas específicas dos resíduos.

(**) Não foi possível realizar o ensaio de granulometria do resíduo de EPS triturado, uma vez que devido a sua leveza as partículas não passam através da malha das peneiras.

Nas Figuras 47 a 54 observam-se os testes para determinação da massa específica dos resíduos, realizados com base na NBR 9776 (ABNT, 1987).

Figura 47 i Determinação da massa específica da palha de arroz (em água).



Fonte: o autor



Figura 48 i Determinação da massa específica do pó de serra (em água).



Fonte: o autor



Figura 49 i Determinação da massa específica do EPS (em água).



Fonte: o autor

Figura 50 i Determinação da massa específica das raspas de pneu (em álcool).



Fonte: o autor

Figura 51 i Determinação da massa específica do PET (em água).



Fonte: o autor

Figura 52 i Determinação da massa específica da cerâmica vermelha (em água).



Fonte: o autor

Figura 53 i Determinação da massa específica do RCD (em água).



Fonte: o autor

Figura 54 i Determinação da massa específica do pó de vidro (em água).



Fonte: o autor

3.2.2 Definição dos traços de argamassa

A definição do traço de referência foi realizada com o auxílio de um pedreiro experiente, a fim de reproduzir o mais próximo possível o que é a dosagem realizada em obras correntes da construção civil. Em seguida, o traço foi reproduzido em laboratório para determinação do

índice de consistência da argamassa, o qual serviu como parâmetro para ajuste da água dos demais traços. Desse modo, obteve-se o traço de referência 1 : 0,2 : 5,36 : 0,92 em massa (relação cimento : cal : areia : água), com 5% de aditivo plastificante em relação à massa de cimento com água suficiente para obtenção da consistência de 250mm +/- 10mm, considerada com adequada trabalhabilidade para execução da argamassa em obra.

Os materiais provenientes de resíduos foram usados para produção dos traços de argamassa em substituição parcial da areia natural. Entretanto, a substituição da areia pelo resíduo foi realizada em volume devido à diferença de massa específica existente entre esses materiais. O cálculo dessa substituição é realizado considerando que o volume ocupado pela areia natural no interior da argamassa passará a ser ocupado pelas partículas de resíduo.

Uma vez que no traço de referência é apresentada uma proporção em massa entre os materiais, inicialmente calcula-se a massa de areia a ser usada no traço de referência e, em seguida, o cálculo da substituição é efetuado pela Equação 19, utilizando-se a massa específica dos materiais envolvidos e a fração de areia a ser substituída.

$$Mr = V \times \frac{Ma}{\rho a} \times \rho r \quad (\text{Equação 19})$$

Onde: Mr é a massa de resíduo a ser utilizada no traço (g)

V é o percentual de areia a ser substituído pelo resíduo

Ma é a massa total de areia no traço (g)

ρa é a massa específica da areia (g/cm³)

ρr é a massa específica do resíduo (g/cm³)

No caso dos resíduos vegetais (palha de arroz e pó-de-serra), os traços se mostraram inviáveis devido ao longo prazo necessário para desmoldagem, aproximadamente 4 dias, e à fragilidade apresentada no momento da desmoldagem. Portanto, no caso desses resíduos foi utilizado outro traço de referência 1 : 0,2 : 3 : 0,67 em massa (relação cimento : cal : areia : água), mas foi mantida a consistência de 250mm +/- 10mm, considerada com adequada trabalhabilidade para a execução da argamassa em obra.

Na Tabela 6 são apresentados os percentuais de substituição da areia pelos resíduos sólidos poliméricos e minerais e, na Tabela 7, os percentuais de substituição da areia pelos resíduos sólidos vegetais. Os teores de substituição da areia pelos resíduos sólidos foram selecionados com vistas a obter argamassas que apresentassem redução da condutividade térmica com o menor prejuízo possível das propriedades mecânicas, em relação à argamassa de referência.

Tabela 6 ĩ Percentual de substituição da areia por resíduos sólidos poliméricos e minerais

Para as argamassas (1 : 0,2 : 5,36)																								
	Resíduos poliméricos												Resíduos minerais											
REF	EPS				PET				PN				CV				RCD				PV			
0	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40

Tabela 7 ĩ Percentual de substituição da areia por resíduos sólidos vegetais

Para as argamassas (1 : 0,2 : 3)								
REF 2	Resíduos vegetais							
	PA				PS			
0	5	10	15	20	5	10	15	20

3.2.2.1 Determinação da água de consistência

Uma vez definida a proporção entre os materiais secos, foi necessário encontrar a quantidade de água a ser adicionada a cada traço a fim de obter uma consistência de 250mm +/- 10mm. Para tanto, foram separadas as quantidades de materiais correspondentes a cada traço e suficientes para a execução do ensaio de consistência conforme NBR 13276 (ABNT, 2005b). Os materiais foram misturados a seco e colocados em uma argamassadeira, na qual foi adicionada água aos poucos até se obter a consistência desejada (Figuras 55 a 58).

Após a identificação da água de consistência, foi possível realizar o cálculo para a produção de aproximadamente 30 litros de cada traço de argamassa, necessários para a moldagem de todos os corpos de prova. Nas Tabelas 8, 9 e 10 encontram-se as identificações dos traços e as quantidades de cada material utilizado.

Figura 55 ĩ Traços separados para os testes de consistência.



Fonte: o autor

Figura 56 ĩ Mistura dos materiais na argamassadeira.



Fonte: o autor

Figura 57 i Moldagem da argamassa na mesa de consistência.



Fonte: o autor

Figura 58 i Verificação da consistência da argamassa.



Fonte: o autor

Tabela 8 i Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos poliméricos.

Materiais	Argamassas (1 : 0,2 : 5,36) (cimento : cal : areia)												
	REF 1	Resíduos poliméricos											
		EPS				PET				PN			
% de resíduo em substituição à areia	0	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
Cimento (kg)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Cal (kg)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Areia (kg)	43	39	34	30	26	39	34	30	26	39	34	30	26
Agua (l)	7,3	7,2	7,0	6,9	6,5	11,5	11,8	12	12	8	8,5	8,9	9,6
Aditivo plastificante para argamassas (ml)	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Resíduo (kg)	0	0,034	0,069	0,104	0,138	2,2	4,4	6,6	8,8	1,9	3,8	5,8	7,7

Tabela 9 i Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos minerais.

Materiais	Argamassas (1 : 0,2 : 5,36) (cimento : cal : areia)												
	REF 1	Resíduos minerais											
		CV				RCD				PV			
% de resíduo em substituição à areia	0	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40
Cimento (kg)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Cal (kg)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Areia (kg)	43	39	34	30	26	39	34	30	26	39	34	30	26
Agua (l)	7,3	9,3	9,7	10,7	12,0	8,6	8,6	9,3	9,3	12,0	12,0	12,5	13,2
Aditivo plastificante para argamassas (ml)	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Resíduo (kg)	0	4,0	8,0	12,0	16,0	4,1	8,1	12,2	16,2	4,1	8,3	12,4	16,6

Tabela 10 ĩ Traços de argamassas de referência e com resíduos sólidos vegetais.

Materiais	Argamassas (1 : 0,2 : 3) (cimento : cal : areia)								
	REF 2	Resíduos vegetais							
		PA				PS			
% de resíduo em substituição à areia	0	5	10	15	20	5	10	15	20
Cimento (kg)	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Cal (kg)	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Areia (kg)	36,0	34,2	32,4	30,6	28,8	34,2	32,4	30,6	28,8
Água (l)	7,9	8,5	9,2	10,1	11,3	8,9	9,4	10,8	12,0
Aditivo plastificante para argamassas (ml)	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Resíduo (kg)	0,0	0,84	1,69	2,53	3,38	0,88	1,75	2,63	3,50

3.2.3 Produção das argamassas

Para a produção das argamassas, a areia foi seca em estufa a fim de garantir a mesma umidade inicial em todas as moldagens (Figura 59). A mistura dos materiais foi realizada em betoneira estacionária, seguindo a mesma sequência realizada na argamassadeira: mistura inicial dos materiais secos e, logo após, o acréscimo de água e de aditivo (Figura 60). Ato contínuo foram realizados os testes de consistência e determinação da massa específica da argamassa fresca e, em sequência, a moldagem dos corpos de prova para os ensaios na argamassa endurecida (Figura 61). As desmoldagens foram realizadas após 24 horas da moldagem, com exceção dos corpos de prova para ensaio de retração, cuja norma requer 48 horas para o desmolde. Além desses, todos os traços contendo resíduos vegetais foram desmoldados somente após 48 horas a fim de garantir a integridade dos corpos de prova. Após a desmoldagem os corpos de prova foram mantidos em cura ao ar, à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, até a idade de realização dos ensaios (Figura 62).

Figura 59 ĩ Secagem da areia em estufa.



Fonte: o autor

Figura 60 ĩ Preparação da argamassa em betoneira estacionária.



Fonte: o autor

Figura 61 ĩ Amostras de argamassa moldadas.



Fonte: o autor

Figura 62 ĩ Cura ao ar das amostras de argamassa.



Fonte: o autor

3.2.4 Ensaios de caracterização das argamassas

Na Tabela 11 é possível visualizar o programa experimental completo, onde são delineados para cada traço estudado os percentuais de substituição da areia, os testes realizados na argamassa fresca e endurecida, as respectivas normas técnicas de referência, o número de corpos-de-prova por idade e o número de ensaios realizados.

Todos os testes foram realizados nas dependências do IFMT ĩ Campus Cuiabá, no Laboratório de Materiais de Construção ĩ DACC ĩ Departamento de Área de Construção Civil.

Tabela 11 i Programa experimental da caracterização das argamassas.

DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS		Ensaio na argamassa fresca		Corpos de prova cilíndricos 50 x 100 mm			Corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm			Corpos de prova prismáticos 25 x 25 x 285 mm	Prismas de alvenaria revestidos com argamassa 600 x 400 x 150 mm				
Identificação dos traços de argamassa		% de Resíduo	Consistência NBR 13276 (ABNT, 2005b)	Massa específica NBR 13278 (ABNT, 2005c)	Resistência à compressão axial NBR 5739 (ABNT, 2009c)	Absorção por imersão, Massa Específica, Índice de Vazios (3 leituras por cp) NBR 9778 (ABNT, 2009)	Absorção por Capilaridade (5 leituras por cp) NBR 9779 (ABNT, 2009)	Velocidade de onda ultrassônica NBR 8802 (ABNT, 2013)	Resistência à Tração na Flexão NBR 13279 (ABNT, 2005d)	Resistência à compressão NBR 13279 (ABNT, 2005d)	Retração dimensional ao longo de 28 dias (4 leituras por cp) NBR 15261 (ABNT, 2005g)	Resistência de Aderência (12 arrancamentos por prisma) NBR 13528 (ABNT, 2010)	Reflectância (33 leituras por prisma) ASTM G173 (ASTM, 2003)	Temperatura superficial (2 leituras por prisma)	
Argamassas (1 : 0,2 : 5,36)	REF 1	0	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1	
	EPS	10	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1	
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	PET	10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	PN	10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	CV	10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	RCD	10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	PV	10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		30	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		40	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
Argamassas (1 : 0,2 : 3)	REF 2	0	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1	
	PA	5	1	1	4	3	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		10	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		15	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
		PS	20	1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1
	5		1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	10		1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
	15		1	1	1	4	3	3	3	3	6	6	1	1	1
Nº CP's		646	34	34	136	102	(*)	102	(**)	(***)	204	34	****	****	
Nº de Leituras		3875	34	34	136	306	510	102	102	204	816	408	1155	68	

(*) Mesmas amostras dos ensaios de Absorção por imersão; (**) Mesmas amostras dos ensaios de ultra-som; (***) Mesmas amostras dos ensaios de Tração na Flexão; **** Mesmas amostras do ensaio de resistência de aderência.

(*) Mesmas amostras dos ensaios de Absorção por imersão; (**) Mesmas amostras dos ensaios de ultra-som; (***) Mesmas amostras dos ensaios de Tração na Flexão; **** Mesmas amostras do ensaio de resistência de aderência.

Figura 69 - Calibração do equipamento para realização do ensaio de ultrassom.



Fonte: o autor

Figura 70 - Execução do ensaio de ultrassom em corpos de prova prismáticos.



Fonte: o autor

Figura 71 - Placas inferior e superior para realização do ensaio de tração por flexão.



Fonte: o autor

Figura 72 - Execução do ensaio de tração por flexão, após a realização do ensaio de ultrassom.



Fonte: o autor

Figura 73 - Corpos de prova prismáticos antes do ensaio de tração por flexão



Fonte: o autor

Figura 74 - Corpos de prova prismáticos após o ensaio de tração por flexão



Fonte: o autor

Figura 75 - Placas e inferior e superior para realização do ensaio de compressão nas amostras de argamassa após a ruptura por flexão



Fonte: o autor

Figura 76 - Execução do ensaio de compressão nas amostras de argamassa após a ruptura por flexão.



Fonte: o autor

Figura 77 - Amostras de retração sob cura ao ar, dispostas sobre fios a fim de garantir as faces livres.



Fonte: o autor

Figura 78 - Leitura do comprimento das barras de retração.



Fonte: o autor

3.2.4.1 Velocidade de propagação da onda ultrassônica

O aparelho de ultrassom utilizado foi da marca PROCEQ, modelo Pundit Lab, com transdutor de 54Khz, resolução de 0,1 μ s e faixa de tempo de trânsito 0,1 a 999 μ s (Figura 12). O aparelho foi calibrado conforme procedimento descrito na norma NBR 8802 - Concreto Endurecido - Determinação da Velocidade de Propagação de Onda Ultrassônica (ABNT, 2013) (Figura 69). E a determinação do tempo de propagação da onda ultrassônica foi realizado pelo método direto nos corpos de prova prismáticos (Figura 70).

3.2.4.2 Resistência de aderência da argamassa

Para o ensaio de aderência foi necessário a moldagem de 1 (um) prisma de alvenaria para cada traço, os quais foram revestidos com argamassa em ambas as faces para determinação da resistência de aderência. Para tanto, foram confeccionadas formas retangulares de 600 mm x 400 mm x 150 mm com compensado naval. A forma foi lubrificada e nela foi depositada uma camada de argamassa de aproximadamente 3 cm de altura. Sobre essa camada foram distribuídos 6 blocos cerâmicos e em seguida foi depositada uma outra camada de argamassa preenchendo-se os espaços entre os blocos e finalizando com uma espessura de aproximadamente 3 cm acima destes. Após a desmoldagem, os prismas foram mantidos em cura ao ar até a idade de 28 dias, quando foi realizado o ensaio de resistência de aderência à tração em conformidade com a NBR 13528 (ABNT, 2010). Nas Figuras 79 a 84 está ilustrada a sequência desse procedimento.

Figura 79 ĩ Lubrificação da forma de madeira.



Fonte: o autor

Figura 80 ĩ Espalhamento da argamassa de revestimento da face inferior do prisma.



Fonte: o autor

Figura 81 ĩ Disposição dos blocos cerâmicos sobre a argamassa.



Fonte: o autor

Figura 82 ĩ Preenchimento dos espaços entre os blocos.



Fonte: o autor

Figura 83 ĩ Deposição da camada superior da argamassa de revestimento.



Fonte: o autor

Figura 84 ĩ Prismas após a desmoldagem.



Fonte: o autor

Para a determinação da resistência de aderência, os prismas foram inicialmente analisados quanto a presença de fissuras, as quais não foram detectadas em nenhuma das argamassas estudadas. Os prismas foram então perfurados com serra-copo numa profundidade suficiente para encontrar o substrato (blocos cerâmicos) e em seguida foram coladas as pastilhas de aço com diâmetro de 50mm, utilizando-se cola de base epóxi. Após 24 horas da colagem,

foi realizado o arrancamento da argamassa por meio de um extrator elétrico portátil da Contenco, ligado a um indicador digital para monitoramento da carga aplicada. Após o arrancamento, verificou-se o tipo de ruptura em conformidade com a NBR 13528 (ABNT, 2010) para revestimentos sem chapisco. Em cada prisma foram realizados 12 furos em pontos aleatórios, totalizando 408 leituras de carga e 408 leituras de tipo de ruptura (Figuras 85 a 89).

Figura 85 ĩ Perfuração dos prismas com serra-copo.



Fonte: o autor

Figura 86 ĩ Colagem das pastilhas metálicas para o ensaio de aderência.



Fonte: o autor

Figura 87 ĩ Equipamento utilizado para o arrancamento da argamassa e verificação da carga de ruptura.



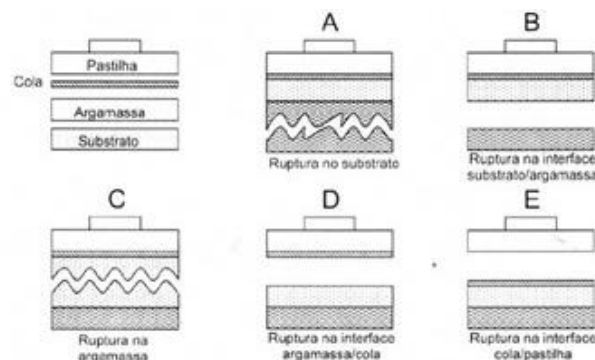
Fonte: o autor

Figura 88 ĩ Avaliação do tipo de fratura após o arrancamento da argamassa.



Fonte: o autor

Figura 89 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco.



Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2010)

Após os testes de aderência, os prismas foram utilizados para análise das características superficiais - índice de refletância e temperatura superficial - os quais foram determinados utilizando-se a face oposta à que foi realizado o arrancamento da argamassa.

3.2.4.3 Determinação do índice de absorvância solar

Os índices de refletância e de absorvância das argamassas foram determinados a partir das leituras de irradiação refletida obtidas por meio do equipamento ALTA II, na forma de voltagem. Foram realizadas 3 leituras para cada comprimento de onda (Tabela 12), em cada prisma, mais uma leitura de fundo por prisma, totalizando 1155 leituras (Figura 90). As leituras foram realizadas com o equipamento protegido com tecido preto, no horário entre 07:00 horas e 08:00 horas da manhã, a fim de minimizar interferências da temperatura e da luz ambientes.

Tabela 12 – Comprimentos de onda do equipamento ALTA II.

ALTA II	Comprimentos de onda na faixa do visível							Comprimentos de onda na faixa do infra-vermelho			
Cor	Blue	Cyan	Green	Yellow	Orange	Red	Deep Red	IR1	IR2	IR3	IR4
λ (nm)	470	525	560	585	600	645	700	735	810	880	940

O método de cálculo adotado foi o procedimento do CB3E (2015) o qual corrige a intensidade de radiação solar para cada comprimento de onda, a partir do espectro solar padrão adotado pela ASTM G173 (ASTM, 2012) e descrito no item 2.3.1 deste trabalho.

As voltagens de referência com o ALTA II foram tomadas em papel branco 75 g/m² (Figura 91) e as respectivas refletâncias de referência foram aquelas obtidas por Dornelles e Roriz (2006) em um espectrofotômetro da marca Varian modelo CARY 5G para uma folha de papel branco comum (75g/m²) (Tabela 13).

Tabela 13 – Refletâncias de referência obtidas em um espectrofotômetro da marca Varian modelo CARY 5G para uma folha de papel branco comum 75g/m².

ALTA II	Comprimentos de onda na faixa do visível							Comprimentos de onda na faixa do infra-vermelho			
Cor	Blue	Cyan	Green	Yellow	Orange	Red	Deep Red	IR1	IR2	IR3	IR4
λ (nm)	470	525	560	585	600	645	700	735	810	880	940
ρ_{ref} (%)	87,8	84,2	80,7	79,8	79,7	87,7	95,1	96,6	96,8	97,3	95,8

Fonte: Adaptado de Dornelles e Roriz (2006)

Figura 90 ĩ Medição da irradiação refletida pela amostra por meio do equipamento ALTA II



Fonte: o autor

Figura 91 ĩ Medição da irradiação refletida pela referência (papel branco 75 g/m²)



Fonte: o autor

3.2.4.4 Determinação da temperatura superficial

A temperatura superficial das argamassas foi determinada em cada prisma utilizando uma câmera infravermelha modelo FLIR E6 (Figura 92). Os prismas foram deixados expostos ao ambiente, sem cobertura, até ficarem completamente secos. Em seguida foram posicionados deitados sobre uma bancada (Figura 93) de forma que uma das faces ficasse protegida da incidência dos raios solares (face interna) e a outra face ficasse exposta (face externa), semelhante à condição de uma parede externa. Foram realizadas duas leituras de temperatura, uma na face interna e outra na face externa de cada prisma, a um ângulo de 90°C, e a uma distância de 90 cm, no horário entre 14:00 horas e 16:00 horas da tarde.

Figura 92 ĩ Verificação da temperatura superficial por meio do termograma.



Fonte: o autor

Figura 93 ĩ Posicionamento para verificação da temperatura superficial.



Fonte: o autor

Uma vez que a radiação é função da temperatura superficial do objeto, ao efetuar a medição da temperatura superficial, a câmera capta a radiação emitida por essa superfície e faz a conversão para uma imagem térmica que pode ser visualizada na tela do equipamento. Por outro lado, parte da radiação emitida por uma superfície corresponde à radiação emitida pelos objetos que a rodeiam e depende da emissividade do material. Sendo assim, é necessário um

ajuste das leituras realizadas pelo equipamento, o qual requer uma entrada com o valor da emissividade da superfície analisada. No âmbito desta pesquisa, o valor da emissividade adotado foi 0,95 para as superfícies de argamassa (Bauer *et al.* 2015).

3.2.5 Metodologia de análise dos resultados

Os resultados de caracterização dos materiais foram analisados em função dos requisitos especificados pelas normas técnicas vigentes destinadas a materiais para uso em argamassas e concreto.

Os resultados obtidos para as características das argamassas foram analisados sob três aspectos:

- avaliação do efeito do teor de resíduo em cada propriedade estudada em relação ao valor obtido para a argamassa de referência;
- classificação das argamassas quanto aos requisitos da norma NBR 13281 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes;
- na ausência da indicação de uso das diversas classes de argamassa pela NBR 13281, foram usadas também as normas NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação (ABNT, 2013) e a norma francesa *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre* - *Cahier 2669-2* (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013) para a análise de adequação ao uso de todas as argamassas;
- por fim foi feita uma análise de regressão não linear a fim de encontrar o grau de correlação entre as variáveis estudadas.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados nas amostras dos materiais utilizados para fabricação das argamassas, os quais foram analisados em relação aos limites especificados pelas normas técnicas vigentes para cada tipo de material. No caso dos resíduos, os resultados foram analisados com relação aos da areia natural, uma vez que foram utilizados em substituição à mesma.

Do mesmo modo são apresentados os resultados dos ensaios das argamassas contendo partículas de resíduos sólidos, os quais foram avaliados em confronto com os resultados das argamassas de referência. Também com base nesses resultados foi possível classificar cada argamassa produzida em função dos critérios estabelecidos pela norma NBR 13281 (Tabela 1).

Por fim, é feita uma análise da correlação existente entre as características térmicas, físicas e mecânicas de todas as argamassas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS CONSTITUINTES DA ARGAMASSA

Nas Tabelas 14 e 15 encontram-se os resultados dos ensaios de caracterização realizados no cimento e na cal, respectivamente. Observa-se que os valores obtidos atenderam aos limites estabelecidos pelas respectivas normas técnicas de referência.

Tabela 14 i Características do cimento CII F 32

Características		Cimento CII F 32	Limites NBR 11578 (ABNT, 1997)
Massa específica (g/cm ³)		3,04	---
Finura na # 0,075mm (%)		0,3	Ø 12
Água de consistência (%)		32	---
Tempo de pega (hora:min)	Início	02:25	Ø 01:00
	Final	04:05	Ø 10:00
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	13,8	Ø 10,0
	7 dias	25,4	Ø 20,0
	28 dias	33,4	Ø 32,0

Tabela 15 i Características do cimento CII F 32

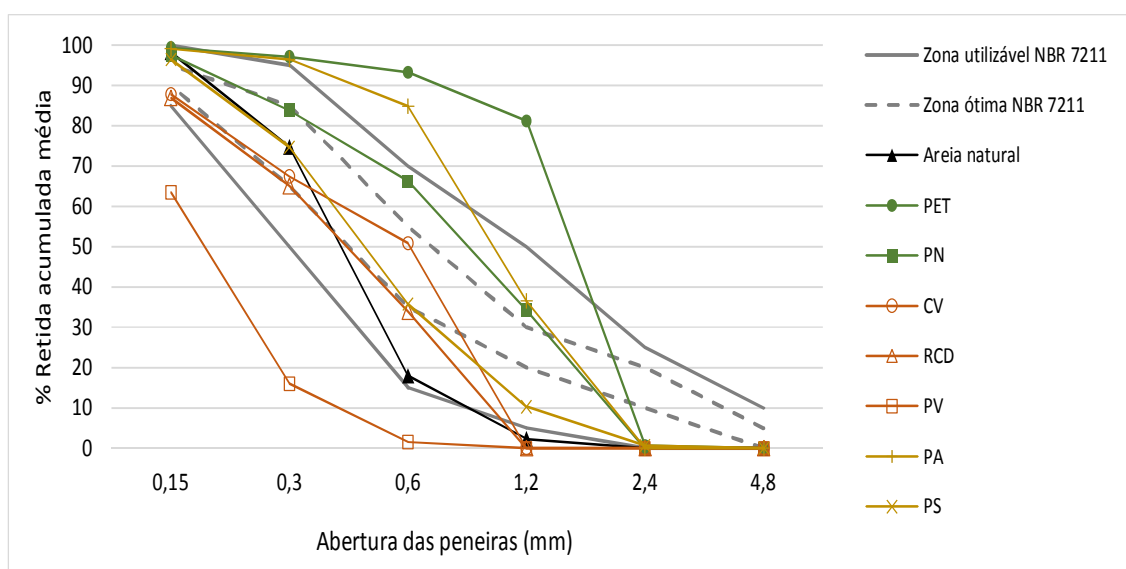
Características	Cal Hidratada CH III	Limites NBR 7175 (ABNT, 2003)
Massa específica (g/cm ³)	2,24	---
Finura na # 0,075mm (%)	8,4	Ø 15

Na Figura 94 é possível observar a distribuição granulométrica da areia natural e dos resíduos sólidos utilizados em substituição parcial à mesma. Na falta de uma norma específica de agregados para argamassa, foram utilizados como referência os limites da NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação (ABNT, 2009).

As curvas granulométricas dos materiais analisados estão identificadas com os respectivos marcadores indicados na legenda da figura (Figura 94). As faixas cinza intermitentes delimitam a distribuição granulométrica considerada como zona ótima para o agregado miúdo e as faixas cinza contínuas demarcam a zona utilizável, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Não foi possível realizar o ensaio de granulometria do resíduo de EPS pois, devido à leveza do material, os grãos não passavam através das peneiras.

Figura 94 – Distribuição granulométrica da areia natural e dos resíduos sólidos.



Observa-se que o pó de vidro tem uma distribuição granulométrica inferior ao limite mínimo utilizável, denotando ser um material de granulometria muito fina, o que é confirmado pelo módulo de finura da ordem de 0,81 e pela Dimensão Máxima Característica ($D_{m\acute{a}x}$) de 0,6mm (Tabela 16). Entretanto, ainda pode ser classificado como agregado miúdo por apresentar a maior fração dos grãos com dimensões acima de 0,15mm, segundo definição da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Por outro lado, o resíduo de PET tem uma distribuição granulométrica superior ao limite máximo utilizável, significando ser um material de granulometria muito grossa, o que é confirmado pelo módulo de finura da ordem de 3,71 (Tabela 16). Entretanto, ainda pode ser classificado como agregado miúdo uma vez que todos os grãos apresentam dimensões inferiores a 4,8mm, segundo definição da NBR 7211 (ABNT, 2009).

A distribuição granulométrica dos resíduos de palha de arroz (PA), por sua vez, se distancia levemente do limite máximo utilizável, mas mantém um módulo finura da ordem de 3,17 (Tabela 16), dentro da faixa de módulo de finura considerado para a zona utilizável superior, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009).

A areia natural e os demais resíduos apresentam curvas granulométricas dentro da zona utilizável e módulos de finura que se enquadram nos limites previstos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 16 i Características do cimento CII F 32

Características	Areia natural	PET	PN	EPS	CV	RCD	PV	PA	PS	Limites NBR 7211 (ABNT, 2009)
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	2,4	2,4	---	1,2	1,2	0,6	2,4	2,4	Máximo 5% dos grãos retidos na # indicada
Módulo de Finura / Zona granulométrica	1,93 ZI	3,71 ---	2,82 ZO	---	2,06 ZI	1,86 ZI	0,81 ---	3,17 ZS	2,18 ZI	1,55 a 2,20*
										2,20 a 2,90**
										2,90 a 3,50***
Massa específica (g/cm³)	2,66	1,33	1,16	0,021	2,42	2,46	2,51	1,22	1,26	---

* Zona utilizável inferior (ZI); ** Zona ótima (ZO); *** Zona utilizável superior (ZS).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Na Tabela 17 estão listados os resultados médios dos ensaios realizados com as argamassas no estado fresco e no estado endurecido. A seguir é discutido o efeito da incorporação de teores crescentes de resíduos em cada característica estudada em comparação aos dados obtidos para a argamassa de referência e em relação aos limites estabelecidos pela norma NBR 13281 (ABNT, 2005a).

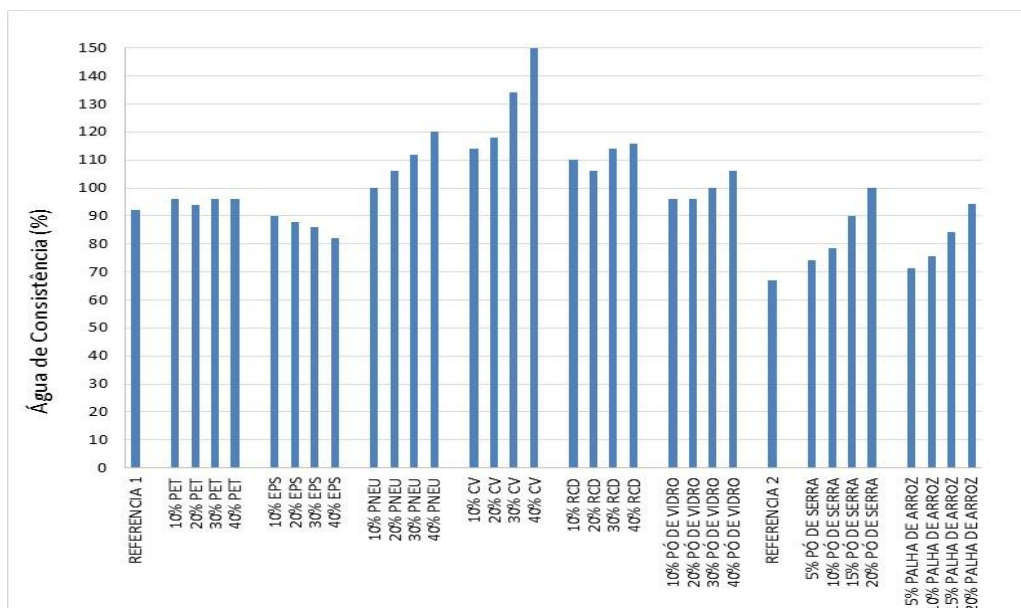
4.2.1 Água de consistência

A determinação da água de consistência foi a primeira característica a ser determinada para cada argamassa e consiste na relação entre a quantidade de água e a quantidade de cimento necessária para obter um espalhamento de 250 ± 10 mm, definido como parâmetro de trabalhabilidade adequado para aplicação em obra. Essa característica também é importante para o desempenho da argamassa, uma vez que o aumento da água de consistência tende a aumentar o índice de vazios e, conseqüentemente, reduzir a resistência do material.

Na Figura 95 encontram-se os índices de consistência obtidos em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em cada argamassa, após consecutivas tentativas, até se obter o espalhamento desejado. Os dados dos ensaios encontram-se no Apêndice D.

Note-se que a argamassa REF1 foi a referência utilizada para as argamassas contendo resíduos poliméricos e minerais e a REF2 a referência para as argamassas contendo resíduos vegetais.

Figura 95 i Água de consistência em função do teor e do tipo de resíduo utilizado na argamassa.



Quatro fatores podem ter contribuído para o comportamento da água de consistência em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em cada argamassa: a finura, a porosidade, a rugosidade e a forma das partículas desses resíduos.

Os resíduos minerais utilizados apresentam partículas granulares de formato cúbico (fator de forma próximo a 1) e superfície rugosa. É possível observar que nas argamassas contendo esse tipo de resíduo a água de consistência é maior do que na argamassa de referência

e tende a aumentar com o aumento do teor de resíduo utilizado. Esse comportamento é mais pronunciado no caso dos resíduos de cerâmica vermelha (CV), que além de apresentar baixo módulo de finura é também um material poroso, o que levou a um aumento de 24 a 60 por cento da água de consistência em relação à referência. O resíduo de construção e demolição (RCD), apesar de apresentar finura semelhante à da cerâmica vermelha, é constituído em sua maior parte de partículas de concreto e argamassa, cuja porosidade é menor do que a da cerâmica vermelha, o que levou a aumentos de 20 a 25% na água de consistência. No caso do pó de vidro (PV), a despeito de sua elevada finura, não é um material poroso, o que minimiza o efeito na água de consistência da argamassa que ficou entre 4 e 15% superior à referência.

O pó de serra (PS) e a palha de arroz (PA), por sua vez, apresentam partículas alongadas e de superfície rugosa. Nesse caso a água de consistência também é maior do que na argamassa de referência e tende a aumentar com o aumento do teor de resíduo utilizado. Nas argamassas contendo esse tipo de resíduo a forma das partículas é essencial para a fluidez da argamassa, pois o espalhamento não ocorre livremente devido ao entrelaçamento das partículas e requer mais água para se obter a consistência desejada, observando-se aumento de 5 a 40% em relação à referência.

No caso dos resíduos poliméricos as partículas não são porosas nem muito finas mas apresentam características de forma bem particulares, que levam a diferentes efeitos no espalhamento das argamassas e, conseqüentemente, na água de consistência. As partículas de PoliEtileno Tereftalato (PET) são de formato lamelar, assemelhando-se a escamas, causando um aumento da área superficial e, conseqüentemente, na água requerida para o envolvimento das partículas. Essa forma lamelar, entretanto, não interfere na fluidez da argamassa pois a água de consistência se mantém constante, na ordem de 4% superior à referência, mesmo com o aumento no teor de resíduo. Os resíduos de PoliEstireno Expandido (EPS), por sua vez, possuem partículas próximas à forma esferoidal e de superfície muito lisa o que favorece a fluidez da argamassa, ocasionando uma redução na água de consistência, na faixa de 2 a 10%, à medida que se aumenta do teor de resíduo na argamassa. Por outro lado, as partículas de borracha de pneu (PN) têm forma acicular e superfície áspera, semelhante aos resíduos vegetais, o que levou a um aumento de 10 a 30% da água de consistência em relação à referência, com o aumento do teor de resíduo na argamassa.

4.2.2 Massa específica da argamassa fresca

Nas Figuras 96 e 97 estão apresentados os valores das massas específicas das argamassas no estado fresco em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. Os resultados apresentados são referentes somente a um ensaio para cada traço de argamassa em virtude da celeridade necessária à realização dos demais procedimentos com a argamassa fresca. Os dados dos ensaios encontram-se no Apêndice D.

Figura 96 i Massa específica da argamassa fresca em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

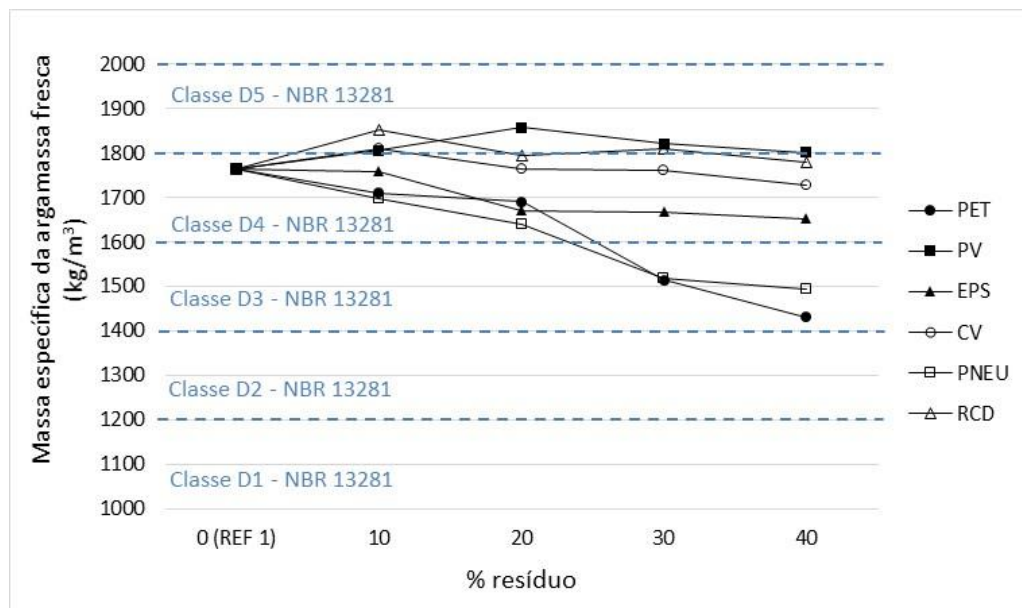
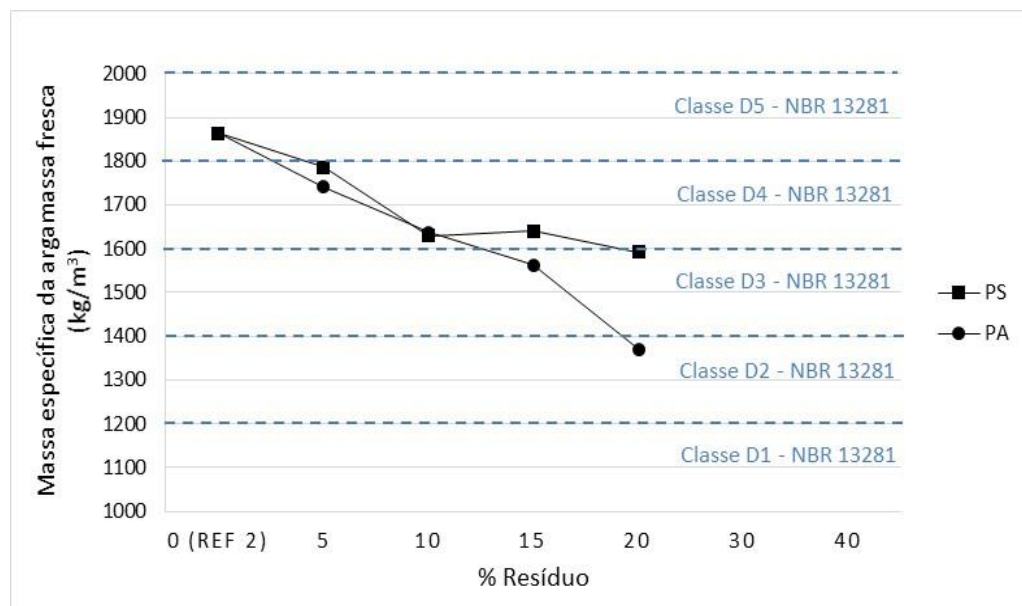


Figura 97 i Massa específica da argamassa fresca em função do teor e do tipo de resíduo (vegetais).



Observa-se que as massas específicas das argamassas frescas se enquadram nas classes D4 e D5, com exceção daquelas contendo 30% e 40% de PET e de raspas de pneu e aquelas com 15% e 20% de palha de arroz, as quais estão nas classes D3 e D2, segundo especificação da NBR 13281 (ABNT, 2005a), constante na Tabela 1 deste trabalho.

À exceção das argamassas contendo resíduos minerais, nota-se uma redução da massa específica com o aumento do teor de resíduo, sendo esse comportamento mais acentuado no caso das argamassas contendo resíduos vegetais. Esse fato era esperado uma vez que os resíduos minerais possuem massa específica muito próxima à massa específica da areia natural, enquanto para os demais resíduos a massa específica é a metade da massa específica da areia, ou menor.

Por outro lado, o aumento no teor de resíduo de EPS, apesar da baixa massa específica do material, não levou a uma redução significativa da massa específica das argamassas, provavelmente em balanceamento com a redução da água de consistência. Ou seja, se por um lado a massa específica da argamassa diminuiria devido à baixa massa específica do resíduo, por outro a massa específica aumenta devido à redução na quantidade de água, como explica-se a seguir.

Observa-se na Figura 98 que há uma tendência de redução da massa específica com o aumento da água de consistência. Essa tendência é mais acentuada no caso dos resíduos vegetais e menor no caso dos resíduos minerais, como se pode verificar por meio dos coeficientes angulares das respectivas equações lineares de ajustamento. É possível afirmar então que a massa específica da argamassa fresca é inversamente proporcional à água de consistência que, por sua vez, sofre a interveniência das características das partículas dos resíduos. Por conseguinte, observa-se uma maior dispersão dos dados entre os resíduos poliméricos, os quais apresentam também maior diferença entre as características de suas partículas e menor dispersão entre os dados dos resíduos minerais, cujas partículas possuem características semelhantes.

Na Figura 99 tem-se uma relação entre a massa específica da argamassa fresca e a massa específica ponderada do agregado miúdo, considerando as frações de areia natural e de resíduo em cada argamassa. Nota-se uma clara tendência do aumento da massa específica da argamassa com o aumento da massa específica do agregado, no caso das amostras contendo resíduos vegetais e minerais. No entanto, as argamassas produzidas com resíduos poliméricos não apresentam uma tendência clara, provavelmente em função da diversidade das características de suas partículas.

Figura 98 i Massa específica da argamassa fresca em função da água de consistência e do tipo de resíduo.

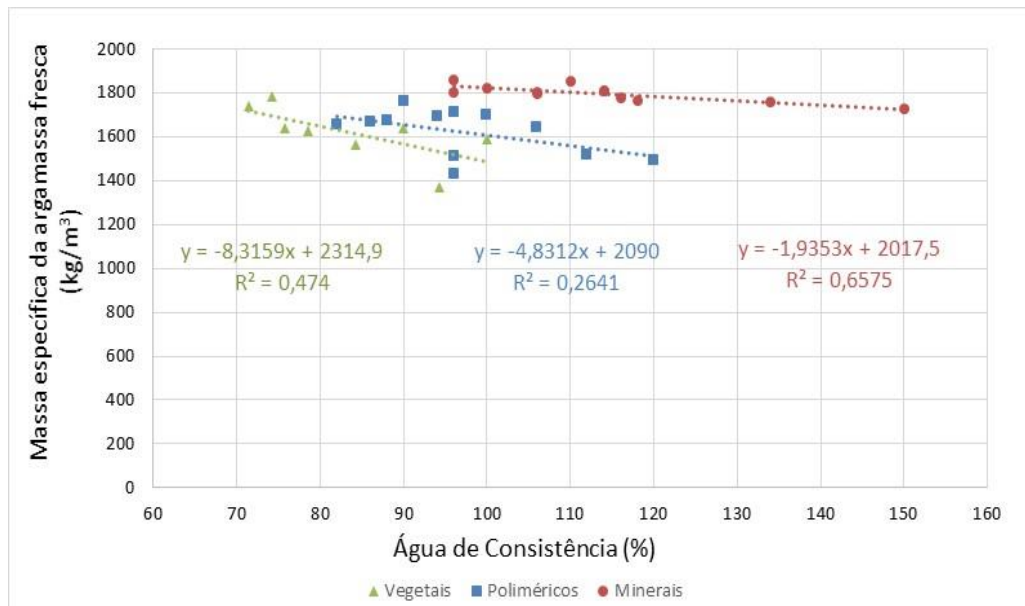
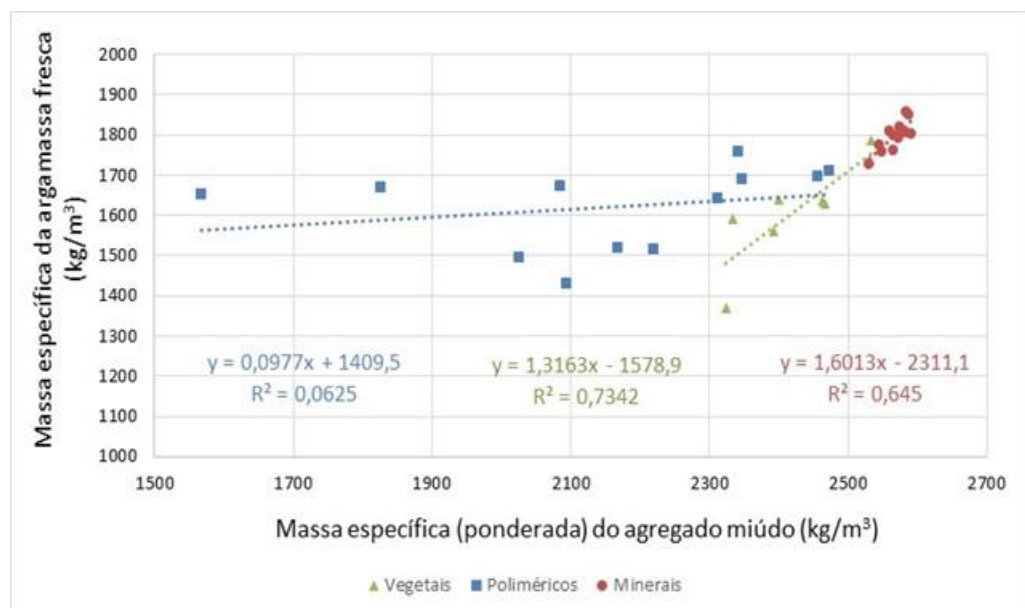


Figura 99 i Massa específica da argamassa fresca em função da massa específica ponderada do agregado miúdo.



Na Tabela 18 é apresentada a classificação das argamassas em função dos critérios da NBR 13281 (ABNT, 2005a) para a massa específica fresca.

Tabela 18 – Classificação das argamassas em função dos critérios estabelecidos pela NBR 13281 para a massa específica fresca

Massa específica da argamassa fresca (g/cm ³)	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas
	D1	≤1400	
	D2	1200 a 1600	
	D3	1400 a 1800	
	D4	1600 a 2000	
	D5	1800 a 2200	
	D6	>2000	

4.2.3 Massa específica da argamassa endurecida

Nas Figuras 100 e 101 estão apresentados os valores das massas específicas das argamassas endurecidas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A massa específica média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de três corpos de prova, conforme procedimento descrito na NBR 9778 (ABNT, 2009) para as argamassas na condição seca. Em virtude da fragilidade apresentada durante a desmoldagem pelos corpos de prova das argamassas contendo 20% de palha de arroz (PA) não houveram amostras suficientes para a realização deste ensaio.

Figura 100 – Massa específica da argamassa endurecida, na condição seca, em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).

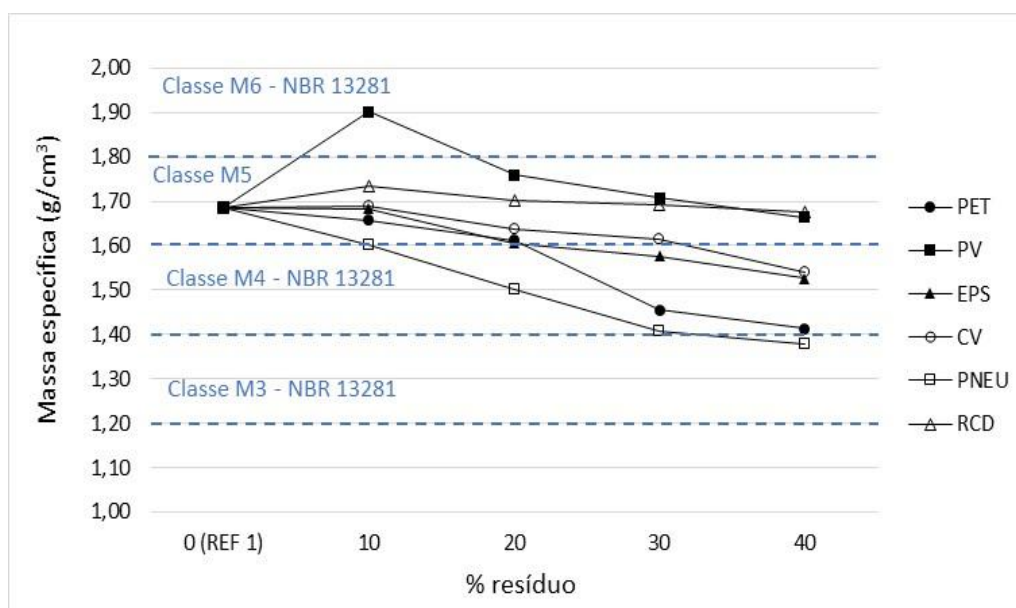
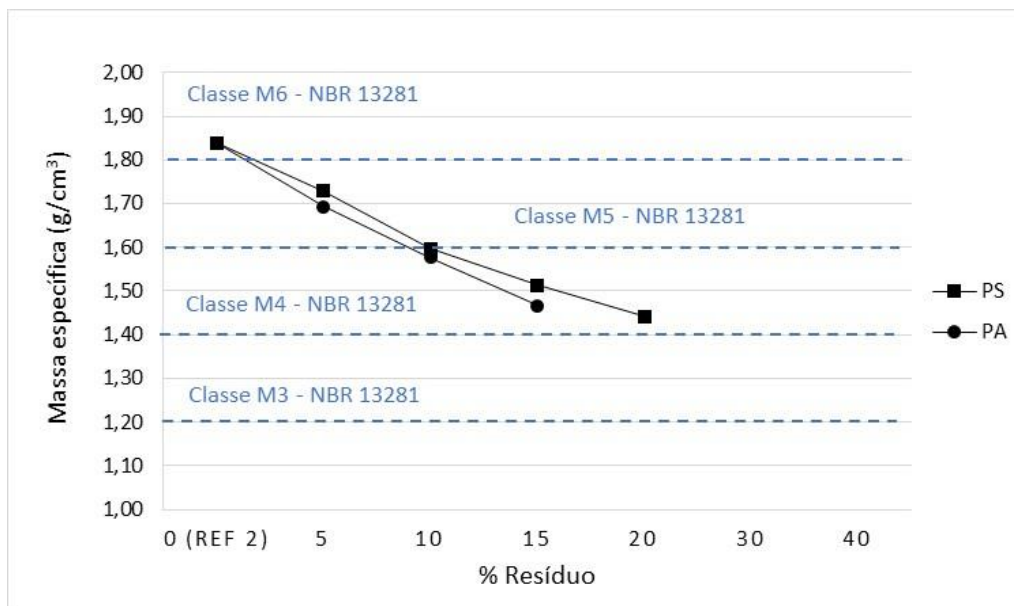


Figura 101 – Massa específica da argamassa endurecida, na condição seca, em função do teor e do tipo de resíduo (vegetais).



Observa-se que as massas específicas das argamassas endurecidas se encaixam na classe M4 e M5, com exceção da referência 2 (REF2) e daquela contendo 10% de pó de vidro (PV) que estão na classe M6 e aquela com 40% de raspas de pneu (PN), a qual enquadra-se na classe M3, segundo especificação da NBR 13281 (ABNT, 2005a), constante na Tabela 1 deste trabalho. A maior massa específica da REF2 em relação à REF1 era um resultado esperado uma vez que a REF2 possui uma maior proporção de cimento em sua composição.

Com exceção das argamassas contendo RCD e pó de vidro, verifica-se que as massas específicas das argamassas tendem a diminuir com o aumento do teor de resíduos, o que também era esperado, uma vez que os resíduos vegetais e poliméricos possuem massa específica menor do que a da areia natural. No caso da cerâmica vermelha a redução da massa específica pode ser atribuída ao aumento da água de consistência, não obstante a massa específica desse resíduo aproximar-se da areia. De forma análoga, embora a massa específica do EPS seja muito inferior à da areia, não houve uma redução significativa da massa específica nas argamassas com EPS, provavelmente em função da diminuição na água de consistência.

Na Tabela 19 encontra-se a classificação das argamassas aqui estudadas em função dos limites especificados pela norma Brasileira (ABNT, 2005a), bem como a indicação de uso das mesmas, conforme a norma francesa (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013).

Tabela 19 – Uso das argamassas de revestimento em função da classificação pela massa específica seca.

Massa específica da argamassa seca (g/cm^3)	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas	Indicação de uso segundo <i>Cahier 2669-2</i> (CSTB, 1993 <i>apud</i> Filho, 2013)
	M1	Ø1200	---	
	M2	1000 a 1400	---	
	M3	1200 a 1600	PNEU40, PA20	sem indicação
	M4	1400 a 1800	PET30, PET40, EPS30, EPS40, PNEU20, PNEU30, CV40, PS15, PS20, PA10, PA15	clima ameno; paredes enterradas
	M5	1600 a 2000	REF 1, PET10, PET20, EPS10, EPS20, PNEU10, CV10, CV20, CV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PV20, PV30, PV40, PS5, PS10, PA5	clima frio; paredes enterradas
	M6	> 1800	REF 2, PV10	

4.2.4 Velocidade do pulso de onda ultrassônica

Nas Figuras 102 e 103 estão apresentadas as velocidades de propagação da onda ultrassônica através das argamassas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A velocidade média de propagação de onda em cada argamassa foi calculada com base no resultado de três corpos de prova, conforme procedimento descrito na NBR 8802 (ABNT, 2013). Para essa característica não há classificação prevista pela especificação técnica NBR 13281 (ABNT, 2005a).

Verifica-se que, de um modo geral, os resultados obtidos estão em coerência com os valores das massas específicas, uma vez que a onda ultrassônica se propaga mais rapidamente através dos materiais mais densos.

Figura 102 – Velocidade de propagação da onda ultrassônica através da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

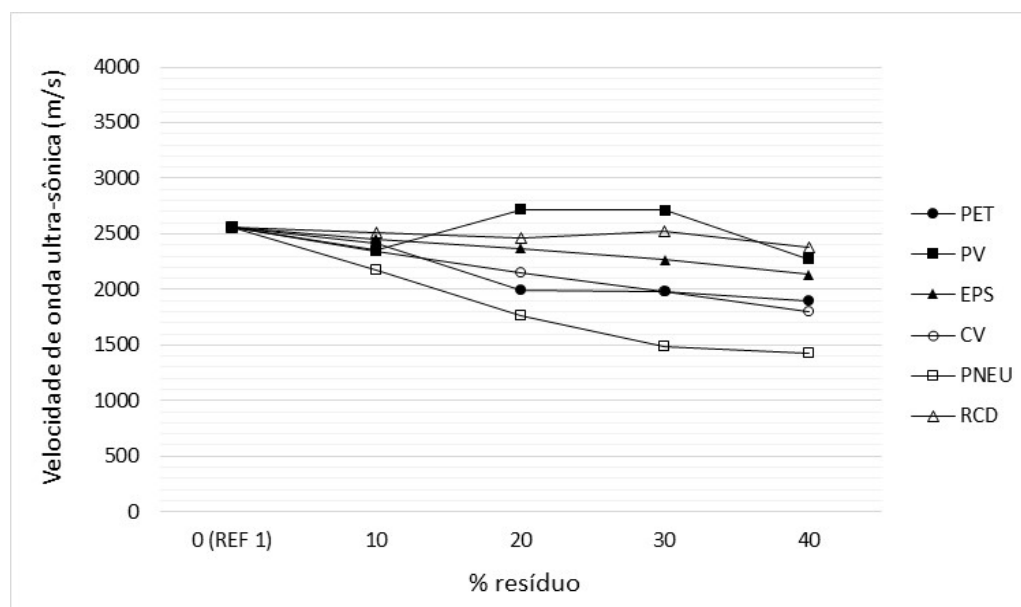
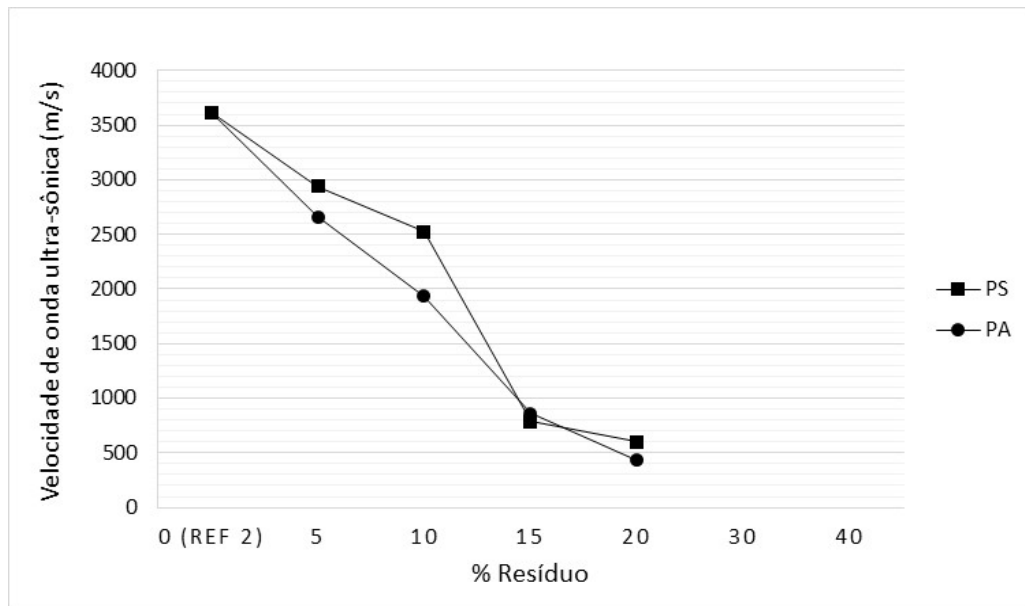


Figura 103 ĩ Velocidade de propagação da onda ultrassônica através da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



As maiores velocidades de propagação da onda ultrassônica são observadas para as argamassas contendo RCD e pó de vidro, as quais também apresentam valores mais próximos à referência. Nas demais argamassas nota-se que a velocidade de propagação da onda ultrassônica decresce com o aumento do teor de resíduos, sendo esse comportamento mais acentuado nas argamassas contendo resíduos vegetais.

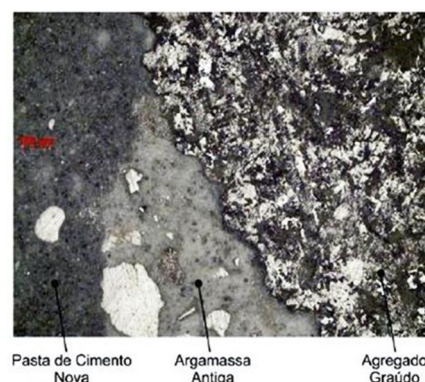
No caso do presente estudo, a velocidade de propagação pode sofrer a interferência da porosidade dos agregados (areia natural e resíduos), da qualidade da zona de transição entre os agregados e a pasta de cimento, além do índice de vazios da pasta de cimento. A título de exemplificar, as Figuras 104 a 107 trazem ilustrações que apontam a zona de transição, bem como a porosidade de agregados e de resíduos estudados por outros autores.

Figura 104 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado natural.



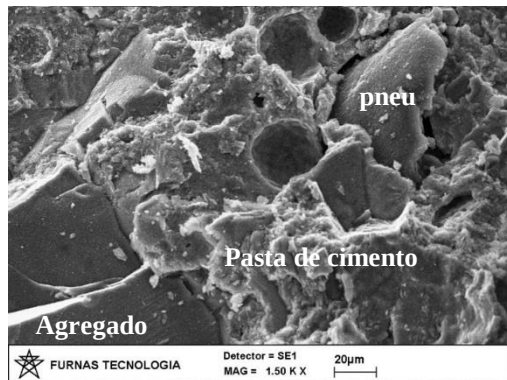
Fonte: Portella *et al.* 2006, p.733

Figura 105 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado reciclado.



Fonte: Tavares e Kazmierczak, 2016, p.87

Figura 106 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e raspa de pneu.



Fonte: Albuquerque *et al.* 2005, p.491

Figura 107 ĩ Zona de transição entre a pasta de cimento e o pó de serra (eucalipto).



Fonte: Stancato, 2006, p.158

4.2.5 Índice de vazios da argamassa endurecida

Nas Figuras 108 e 109 estão apresentados os valores dos índices de vazios das argamassas no estado endurecido, na condição seca, em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. O índice de vazios médio de cada argamassa foi calculado com base no resultado de três corpos de prova, conforme procedimento descrito na NBR 9778 (ABNT, 2009). Para essa característica não há classificação prevista pela especificação NBR 13281 (ABNT, 2005a).

O índice de vazios das argamassas sofre influência direta de dois fatores: da porosidade dos agregados (neste caso areia natural e resíduos) e da porosidade da pasta de cimento que, por sua vez, depende da água de consistência.

Figura 108 ĩ Índice de vazios da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).

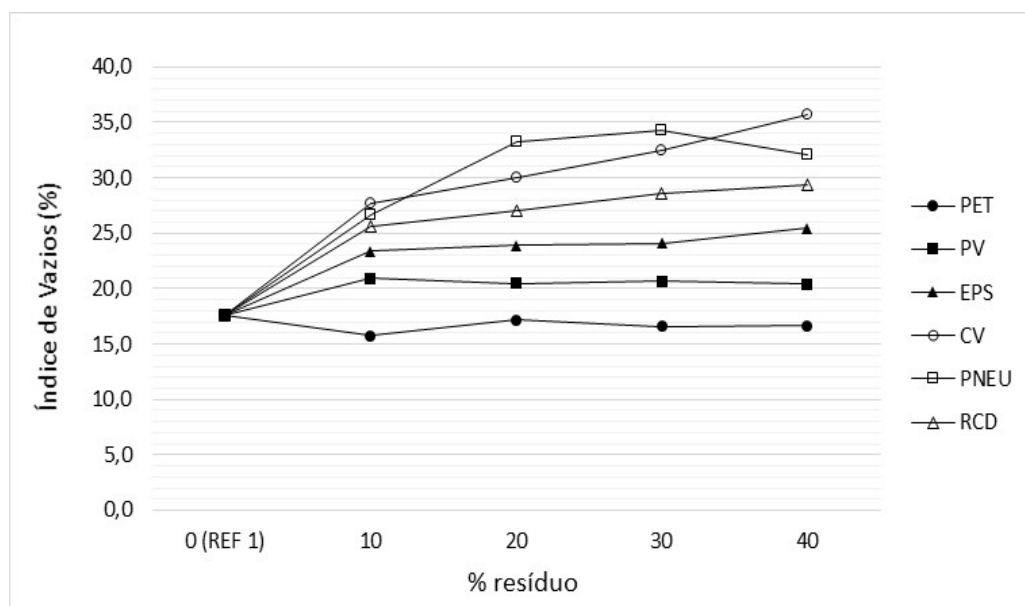
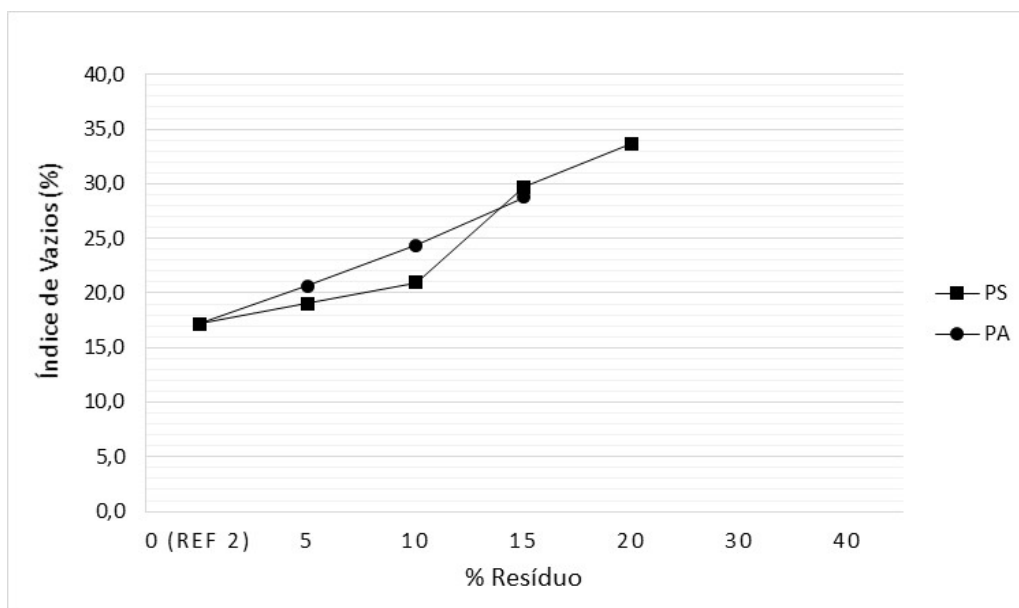


Figura 109 – Índice de vazios da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Com exceção das argamassas contendo PET, todas exibiram índice de vazios superior às argamassas de referência, uma vez que o PET por não ser um material poroso, este resíduo não ocasionou grande aumento da água de consistência.

Verifica-se ainda que o índice de vazios das argamassas tende a aumentar com o aumento do teor de resíduos, com exceção das argamassas contendo pó de vidro, PET e EPS. Os resíduos vegetais e a cerâmica vermelha, além de porosos, resultaram em argamassas com água de consistência elevada o que contribui duplamente para o crescente índice de vazios observado. Por outro lado, a água de consistência das argamassas contendo RCD manteve-se aproximadamente constante com o aumento do teor de resíduos, de onde se infere que o crescente índice de vazios é devido à porosidade das partículas de RCD. Analogamente, as raspas de pneu embora não sejam porosas, remeteram a argamassas com água de consistência crescente e, conseqüentemente, um crescente índice de vazios com o teor de resíduos. Os resíduos de PET, de EPS e o pó de vidro, por sua vez, não são partículas porosas e ocasionaram pequenas variações na água de consistência, acarretando igualmente em menores variações do índice de vazios com o aumento do teor de resíduos.

4.2.6 Absorção da argamassa endurecida por imersão em água

Nas Figuras 110 e 111 estão apresentados os valores da absorção de água das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A absorção média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de

três corpos de prova, conforme procedimento descrito na NBR 9778 (ABNT, 2009). Para essa característica não há classificação prevista pela especificação NBR 13281 (ABNT, 2005a).

Figura 110 i Absorção de água da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (polimérico e mineral).

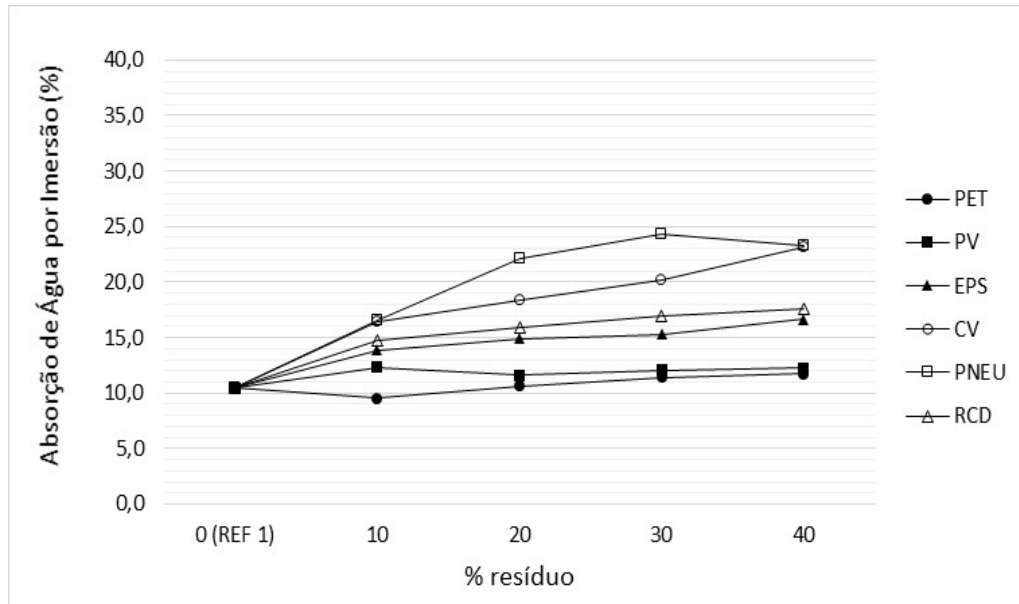
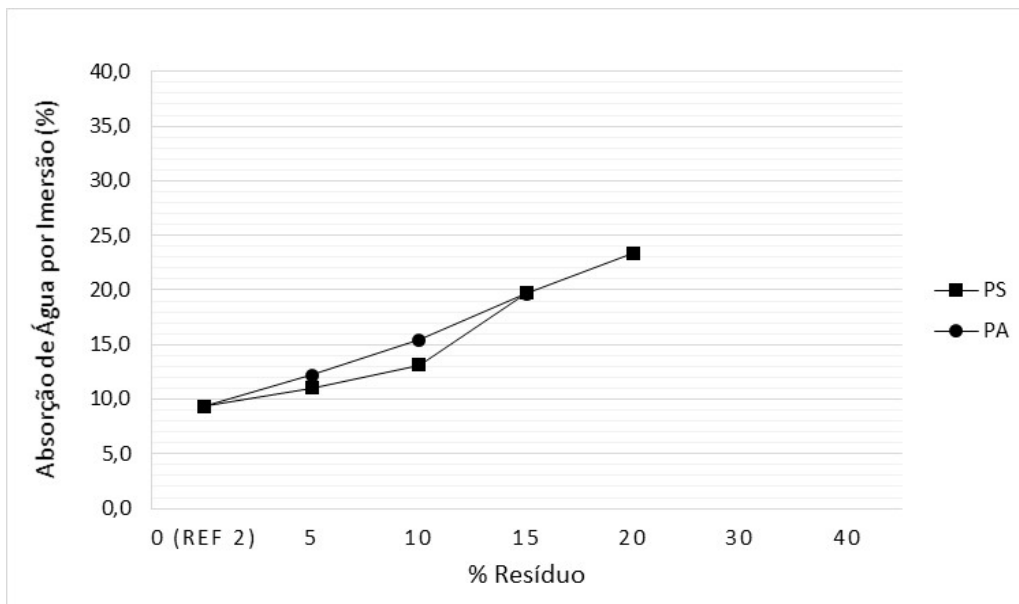


Figura 111 i Absorção de água da argamassa endurecida em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Como era esperado, as curvas de absorção de água apresentam comportamento semelhante às de índice de vazios, tendo em vista que as argamassas com maior índice de vazios têm mais espaço interno para ser ocupado pela água durante o período de saturação dos corpos de prova. Note-se, entretanto, que os índices de absorção de água são menores do que os índices

de vazios: primeiro porque a pasta de cimento, bem como os agregados (areia natural e resíduos), possuem poros não permeáveis que não são preenchidos pela água durante o processo de saturação; segundo, porque o índice de vazios apresenta uma relação entre o volume de vazios com o volume do corpo de prova, enquanto a absorção de água é uma relação da massa de água absorvida pela massa seca do corpo de prova.

4.2.7 Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilar

Nas Figuras 112 e 113 estão apresentados os coeficientes de capilaridade das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A absorção média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de três corpos de prova e retratam a quantidade de água que penetra por ascensão capilar através da área da base do corpo de prova durante o período de 90 minutos.

Segundo a especificação técnica NBR 13281 (ABNT, 2005a), observa-se que a maioria dos coeficientes de capilaridade se encaixam na classe C5. As argamassas com resíduo de cerâmica vermelha se destacam por apresentar os maiores coeficientes de capilaridade (Classe C6), juntamente com as argamassas contendo 15 e 20% de palha de arroz (PA) e de pó de serra (PS).

Por outro lado, as argamassas com RCD e raspas de pneu apresentam os menores coeficientes de capilaridade (Classes C4 a C1), bem como as argamassas REF2 e aquelas contendo 5% e 10% de palha de arroz (PA) e de pó de serra (PS).

Figura 112 i Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilar em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

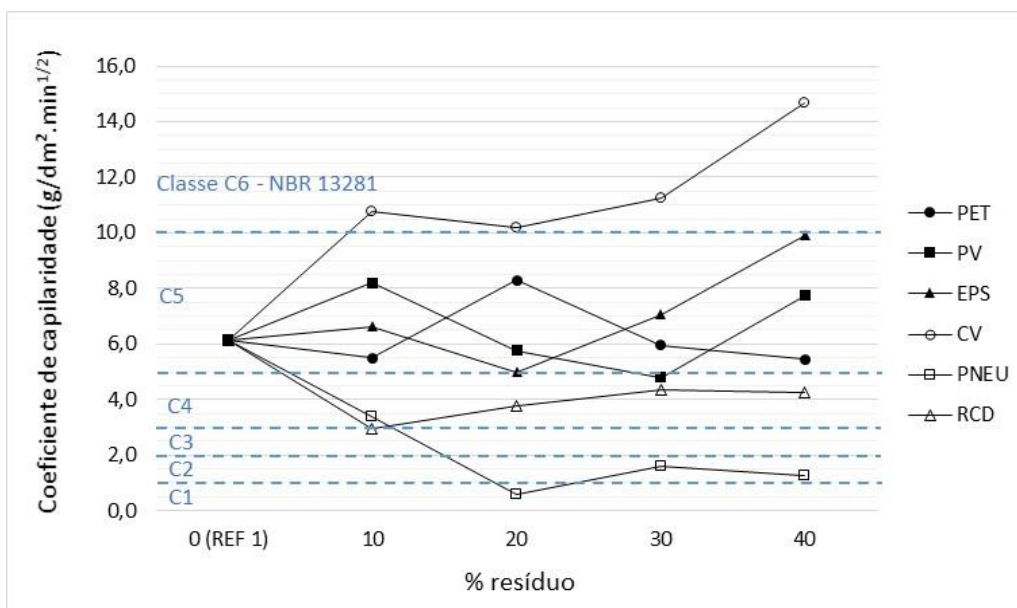
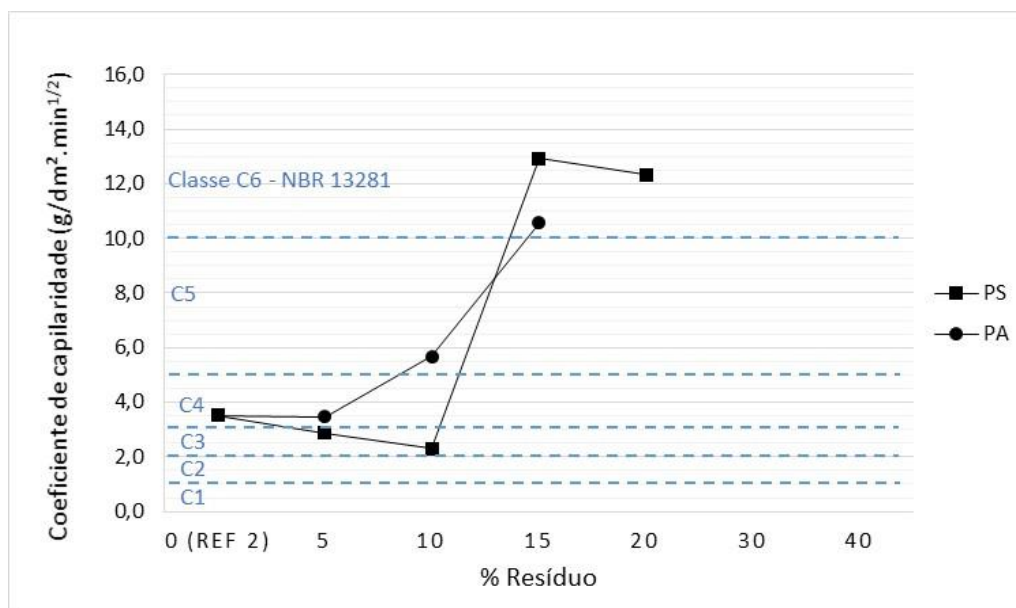


Figura 113 i Absorção de água da argamassa endurecida por ascensão capilar em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Ao contrário do que se esperaria, os coeficientes de capilaridade não apresentaram comportamento que se assemelha ao da absorção de água por imersão nem ao do índice de vazios. Somente as argamassas contendo resíduos de cerâmica vermelha, PA15, PS15 e PS20 demonstram claro crescimento da absorção em função do aumento no teor de resíduo.

Esse fato pode ser explicado pela interferência de alguns fatores: primeiro, a direção de fluxo de água é único e a área de penetração é restrita à base do corpo de prova; segundo, as argamassas REF2, PA5, PS5 e PA10 possuem maior proporção de cimento em sua composição e baixo teor de resíduos, proporcionando um material mais denso e que dificulta a penetração da água; terceiro, a forma das partículas e sua disposição de modo aleatório na matriz cimentícia podem dificultar a ascensão da água, como é o caso das raspas de pneu. Neste último, supõe-se que a despeito do elevado índice de vazios das argamassas, as raspas de pneu funcionam como obstáculos à ascensão capilar, cuja energia da água ascendente se dissipa no espalhamento em torno das partículas.

Não foi possível encontrar uma explicação admissível para o comportamento das argamassas contendo RCD, tendo em vista que estas apresentaram coeficientes de capilaridade menores do que as demais argamassas PET, PV e EPS, inversamente ao que se observou para o índice de vazios e para a absorção de água.

Na Tabela 20 estão apresentadas a classificação das argamassas estudadas em função dos limites especificados pela NBR 13281 e as indicações de uso conforme os critérios de desempenho prescritas pelo *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre* i *Cahier* 2669-2 (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013).

Tabela 20 i Uso e classificação das argamassas de revestimento em função do coeficiente de capilaridade.

Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .m ^{1/2})	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas	Indicação de uso segundo <i>Cahier</i> 2669-2 (CSTB, 1993 <i>apud</i> Filho, 2013)
	C1	≤1,5	PNEU20	- paredes com forte exposição à chuva
	C2	1,0 a 2,5	PNEU30, PNEU40	- parede descida até o solo - parede enterrada (acabamento regularizado recomendado)
	C3	2,0 a 4,0	PS5, PS10	- paredes externas protegidas da chuva
	C4	3,0 a 7,0	RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PNEU10, PV30, REF 2, PA5	
	C5	5,0 a 12,0	REF 1, PET10, PET20, PET30, PET40, EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, PV10, PV20, PV40, PA10	- Revestimento de tetos e paredes internas
	C6	>10,0	CV10, CV20, CV30, CV40, PS15, PS20, PA15, PA20	- Sem indicação

4.2.8 Resistência à tração na flexão

Nas Figuras 114 e 115 estão apresentados os valores de resistência à tração na flexão das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A resistência média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de três corpos de prova, excetuando-se aquele com desvio absoluto superior a 0,3MPa, quando foi calculada uma nova média com os dois resultados restantes, conforme procedimento descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005d). Os dados dos ensaios encontram-se no Apêndice H.

Segundo a especificação técnica NBR 13281 (ABNT, 2005a), observa-se que as argamassas contendo RCD e pó de vidro podem ser classificadas como R4 e R5, com resistência à tração igual ou superior à referência, excetuando-se a argamassa PV40 classificada como R3. As argamassas com resíduo de cerâmica vermelha e as argamassas poliméricas encontram classificação R3 que diminuem para R2 ou R1 à medida que se aumenta o teor de resíduo. A argamassa REF2 e as argamassas PA5, PS5 e PA10 são aquelas que apresentaram maior resistência à tração, com classificação R5 e R6. Teores mais elevados de resíduos vegetais provocam uma brusca queda da resistência à tração para as classes R2 e R1.

Figura 114 i Resistência à tração na flexão em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

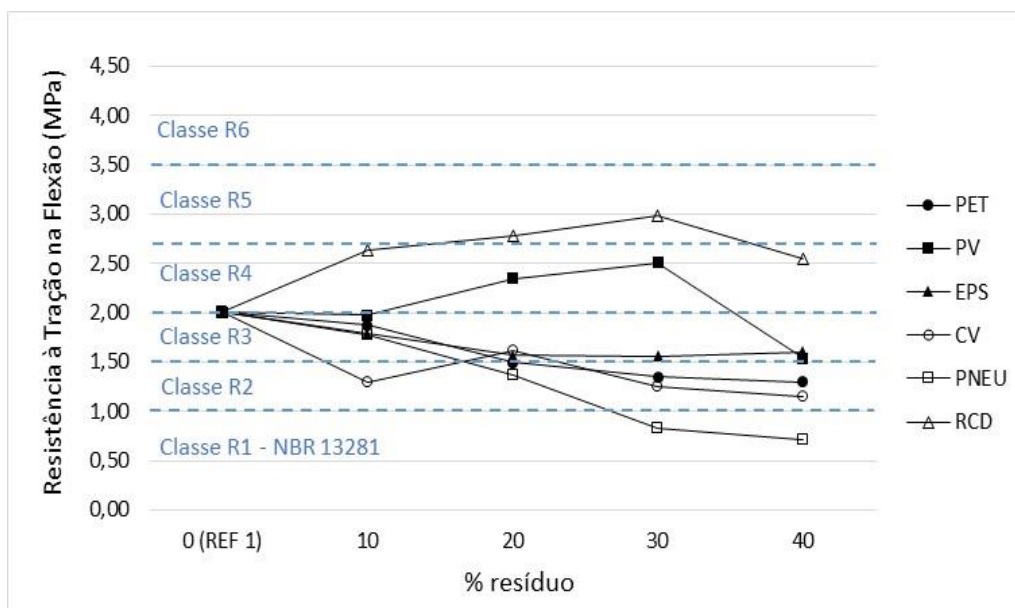
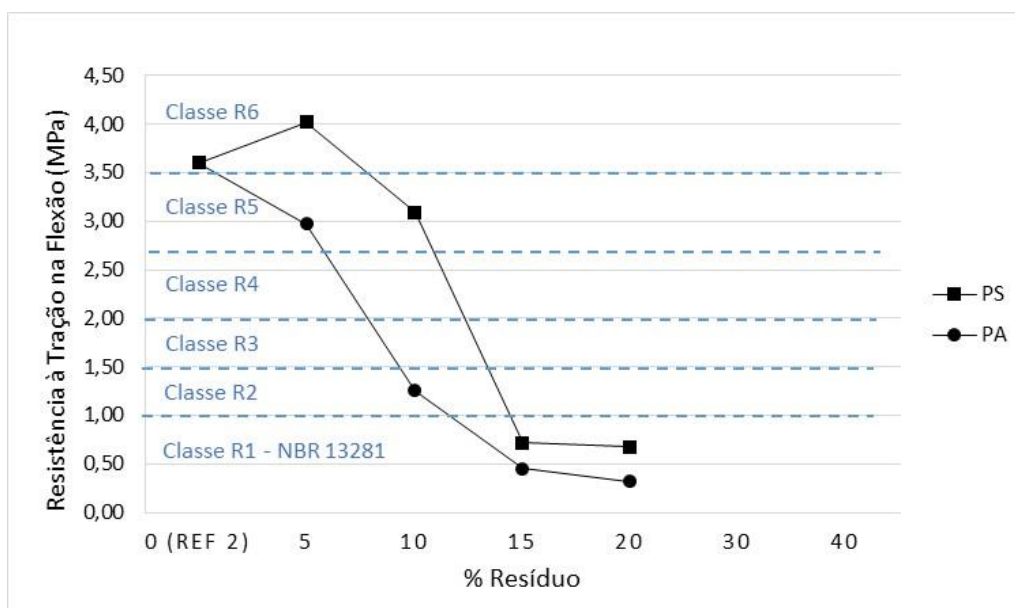


Figura 115 i Resistência à tração na flexão em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Os resultados observados estão coerentes com o comportamento das argamassas quanto à massa específica e à velocidade de onda ultrassônica, uma vez que se espera que essas características sejam diretamente proporcionais entre si.

Na Tabela 21 encontra-se a classificação das argamassas estudadas em função dos limites especificados pela NBR 13281 e as indicações de uso conforme os critérios de desempenho prescritas pelo *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre* ï *Cahier* 2669-2 (CSTB, 1993 *apud* Filho, 2013).

Tabela 21 ï Uso e classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à tração.

Resistência à tração na flexão (MPa)	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas	Indicação de uso segundo <i>Cahier</i> 2669-2 (CSTB, 1993 <i>apud</i> Filho, 2013)
	R1	0,5	PNEU30, PNEU40, PS15, PS20, PA15, PA20,	Sem indicação
	R2	1,0 a 2,0	PET30, PET40, CV10, CV30, CV40, PNEU20, PA10,	- sem risco de choques e deterioração
	R3	1,5 a 2,7	PET10, PET20, EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, PNEU10, CV20, PV40	- exposição a choques e deterioração
	R4	2,0 a 3,5	REF 1, PV10, PV20, PV30, RCD10, RCD40	- exposição a choques e deterioração
	R5	2,7 a 4,5	RCD20, RCD30, PS10, PA5	- parede enterrada
	R6	>3,5	REF 2, PS5	- revestimento cerâmico colado

4.2.9 Resistência à compressão (amostras prismáticas)

Nas Figuras 116 e 117 estão apresentados os valores de resistência à compressão, realizados nas partes dos corpos de prova prismáticos após o ensaio de tração na flexão das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A resistência média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de seis corpos de prova, excetuando-se aqueles com desvio absoluto superior a 0,5MPa, quando foi calculada uma nova média com os cinco ou quatro resultados restantes, conforme procedimento descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005d).

Segundo a especificação técnica NBR 13281 (ABNT, 2005a), observa-se que somente as argamassas contendo RCD alcançaram resistência à compressão igual ou superior à referência e podem ser classificadas como P5. As demais argamassas com resíduos minerais e poliméricos encontram classificação P4 e P3, à exceção das argamassas com resíduos de pneu que caem para as classes P2 ou P1 à medida que se aumenta o teor de resíduo. A argamassa REF2 e as argamassas PA5, PS5 e PA10 são aquelas que apresentaram maiores valores de resistência à compressão, com classificação P5 e P6. Teores mais elevados de resíduos vegetais provocam uma severa queda da resistência à compressão para as classes P2 e P1.

Figura 116 i Resistência à compressão (amostra prismática) em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

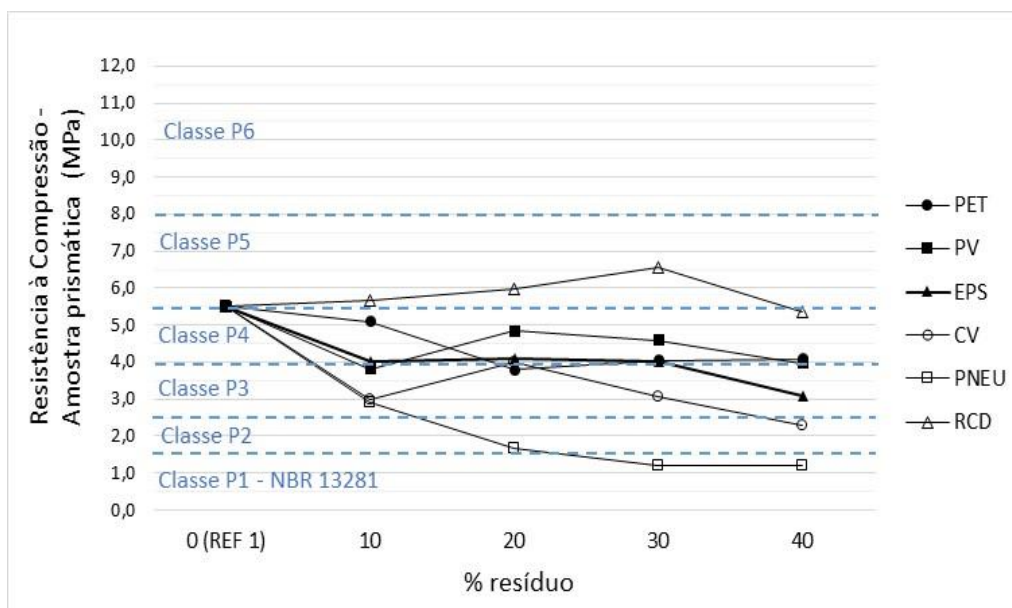
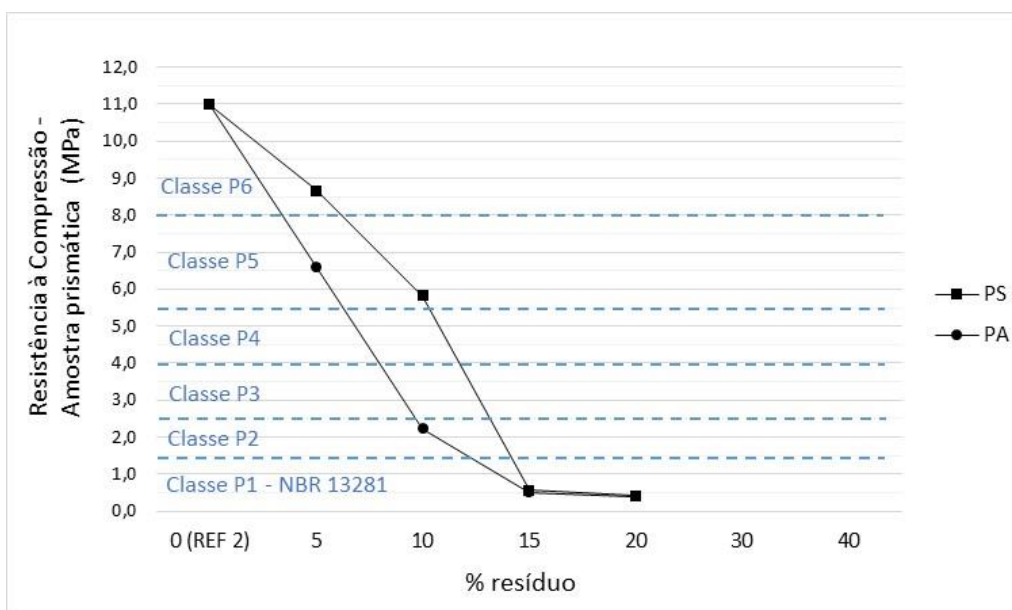


Figura 117 i Resistência à compressão (amostra prismática) em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



De um modo geral, os resultados obtidos para a resistência à compressão nos corpos de prova prismáticos acompanham o mesmo comportamento daqueles obtidos para a resistência à flexão, diferindo particularmente no desempenho das argamassas contendo pó de vidro.

Na Tabela 22 encontra-se a classificação das argamassas estudadas em função dos limites especificados pela NBR 13281.

Tabela 22 – Classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à compressão em amostra prismática.

Resistência à compressão – Amostra prismática (MPa)	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas
	P1	≤ 2,0	PNEU30, PNEU40, PA20, PS20, PA15, PS15,
	P2	1,5 a 3,0	PNEU20, CV40, PA10
	P3	2,5 a 4,5	PET20, EPS40, PNEU10, CV10, CV30, PV10
	P4	4,0 a 6,5	PET10, PET30, PET40, EPS10, EPS20, EPS30, CV20, RCD40, PV20, PV30, PV40
	P5	5,5 a 9,0	REF 1, RCD10, RCD20, RCD30, PS10, PA5
	P6	>8,0	REF 2, PS5

4.2.10 Resistência à compressão axial (amostras cilíndricas)

Nas Figuras 118 e 119 estão apresentados os valores de resistência à compressão axial das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A resistência média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de quatro corpos de prova, excetuando-se aquele com desvio relativo máximo superior a 6,0%, quando foi calculada uma nova média com os três resultados restantes, conforme procedimento descrito na NBR 7215 (ABNT, 1997).

Observa-se que os resultados obtidos para a resistência à compressão axial nos corpos de prova cilíndricos acompanham o mesmo comportamento daqueles obtidos para a resistência à compressão nos corpos de prova prismáticos.

Figura 118 – Resistência à compressão axial (amostra cilíndrica) em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

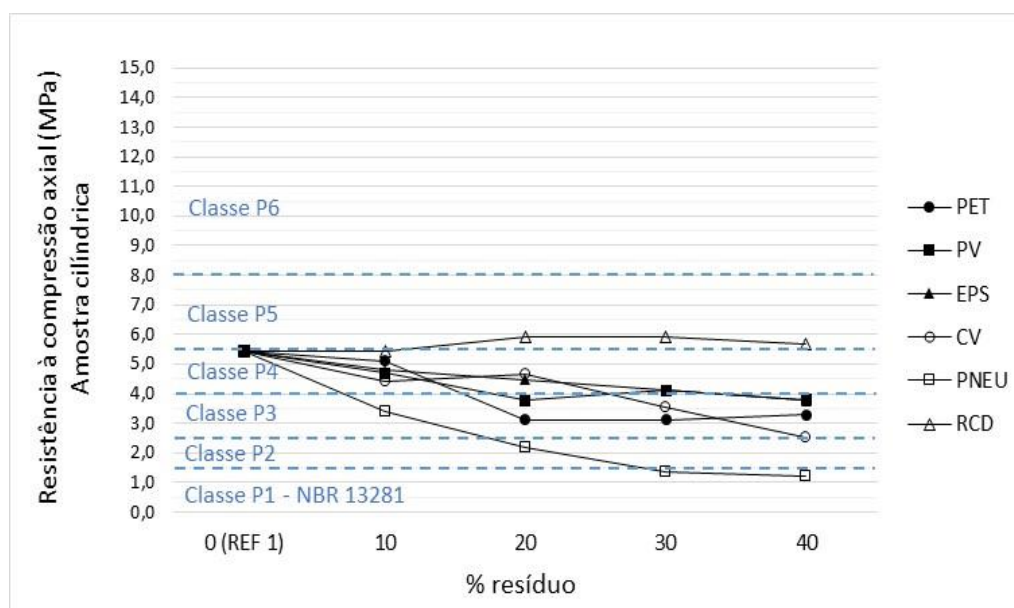
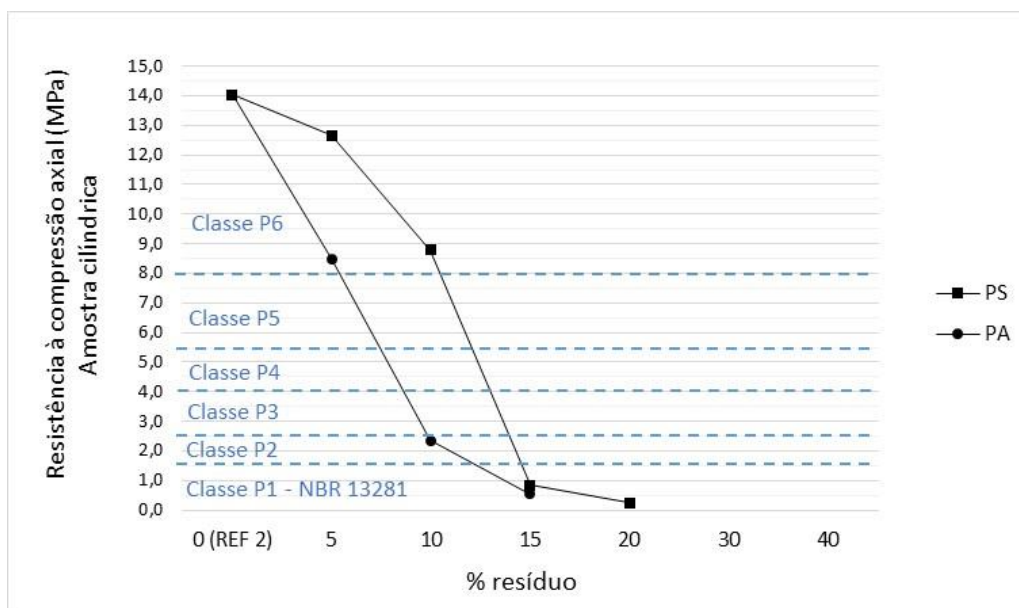


Figura 119 ĩ Resistência à compressão axial (amostra cilíndrica) em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Na Tabela 23 encontra-se a classificação das argamassas estudadas em função dos limites especificados pela NBR 13281.

Tabela 23 ĩ Classificação das argamassas de revestimento em função da resistência à compressão axial ĩ amostra cilíndrica.

Resistência à compressão ĩ Amostra prismática (MPa)	Classe NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Argamassas
	P1	≥ 2,0	PNEU30, PNEU40, PS15, PS20, PA15, PA20
	P2	1,5 a 3,0	PNEU20, PA10
	P3	2,5 a 4,5	PET20, PET30, PET40, EPS40, PNEU10, CV30, CV40, PV20, PV40
	P4	4,0 a 6,5	PET10, EPS10, EPS20, EPS30, CV10, CV20, RCD10, PV10, PV30
	P5	5,5 a 9,0	REF 1, RCD20, RCD30, RCD40
	P6	> 8,0	REF 2, PS5, PS10, PA5

4.2.11 Resistência de aderência à tração

Nas Figuras 120 e 121 estão apresentados os valores da resistência de aderência à tração em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A resistência média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de 12 arrancamentos realizados nos prismas de alvenaria revestidos com argamassa, excetuando-se aqueles onde

houve ruptura tipo E (entre a cola e a pastilha), conforme procedimento descrito na NBR 13528 (ABNT, 2010).

Não foi possível realizar o ensaio nos prismas revestidos com as argamassas PA20 e PS20 pois as mesmas não ofereceram resistência suficiente para a realização dos furos com a serra-copo.

Figura 120 i Resistência de aderência à tração em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

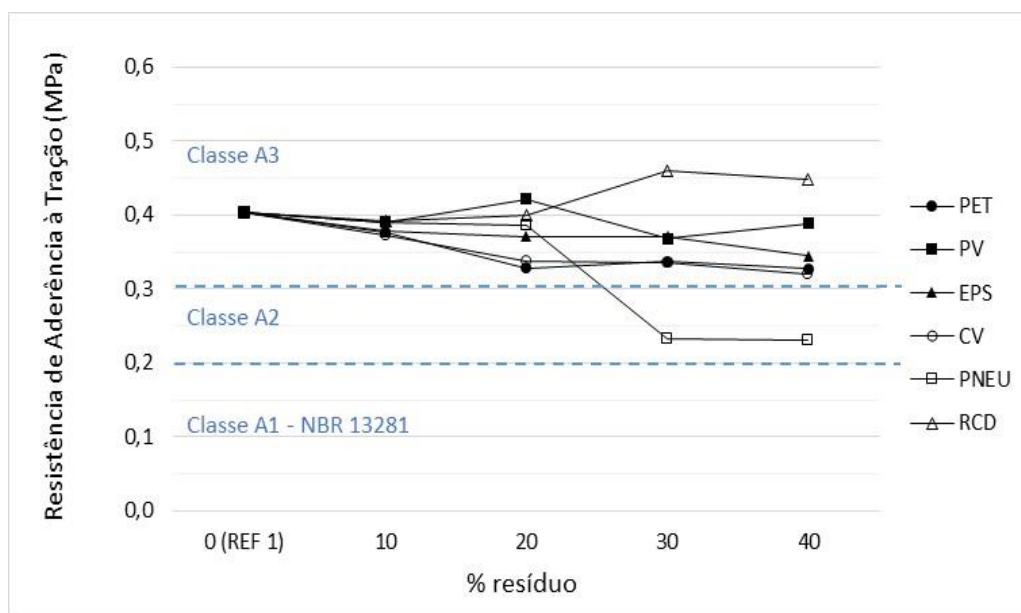
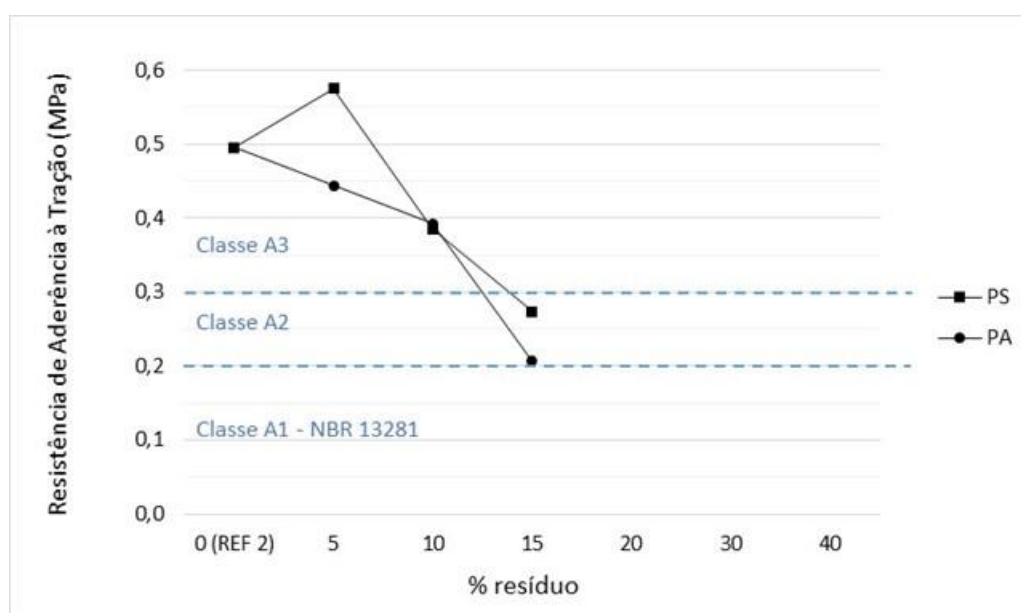


Figura 121 i Resistência de aderência à tração em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



Observa-se que a maioria das argamassas testadas se enquadram na classe de resistência mais alta, A3, segundo a especificação técnica NBR 13281 (ABNT, 2005a). Somente as argamassas PS15, PA15, PN30 e PN40 são classificadas como A2, com uma resistência de aderência intermediária, o que é um resultado inesperado tendo em vista o baixo desempenho mecânico apresentado por esses materiais nos testes de resistência à tração e à compressão.

De acordo com as resistências de aderência à tração obtidas, as argamassas estudadas podem encontrar aplicação segundo os critérios da NBR 13749 i Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação (ABNT, 2013), como detalhado na Tabela 24.

Tabela 24 i Uso das argamassas de revestimento para emboço e camada única segundo NBR 13749 (ABNT, 2013)

Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 13281 (ABNT, 2005a)		Aplicação segundo NBR 13749 (ABNT, 2013)	Argamassas
	A1	< 0,20	PA20, PS20	- sem aplicação definida.
	A2	0,20	PN30, PN40, PA15, PS15	- revestimento de tetos - revestimento de paredes internas que receberão pintura ou reboco
	A3	0,30	REF1, PET10, PET20, PET30, PET40 EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, PN10, PN20, CV10, CV20, CV30, CV40, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PV10, PV20, PV30, PV40 REF2, PS5, PS10, PA5, PA10	- revestimento de tetos - revestimento de paredes internas ou externas que receberão pintura, reboco ou cerâmica

4.2.12 Determinação da variação dimensional (Retração)

Nas Figuras 122 e 123 estão apresentados os valores de retração das argamassas no estado endurecido em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A retração média de cada argamassa foi calculada com base no resultado de três a seis corpos de prova, conforme procedimento descrito pela NBR 15261 (ABNT, 2005g). Para essa característica não há classificação prevista pela especificação NBR 13281 (ABNT, 2005a).

Não foi possível realizar o ensaio com as argamassas PA15, PA20, PS15 e PS20 pois as mesmas não ofereceram resistência suficiente para a desmoldagem dos corpos de prova mesmo após quatro dias da data de moldagem.

Os materiais constituintes da argamassa e a proporção entre eles influenciam sobremaneira na retração final do material: argamassas com elevados consumos de cimento ou de água tendem a apresentar maiores índices de retração; a quantidade e a forma dos agregados, por sua vez, têm o efeito de restringir a movimentação da pasta e, consequentemente, minimizar a retração. Desse modo, observa-se que a REF2, por ter uma proporção bem maior de cimento

em relação à quantidade de agregados, apresentou quase o dobro da retração da REF1. Por outro lado, nas argamassas contendo resíduos vegetais, embora também tenham elevados consumos de cimento e de água, há indicação de que a retração foi reduzida pela presença dos agregados na forma de fibras (pó de serra e palha de arroz).

Figura 122 i Retração da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

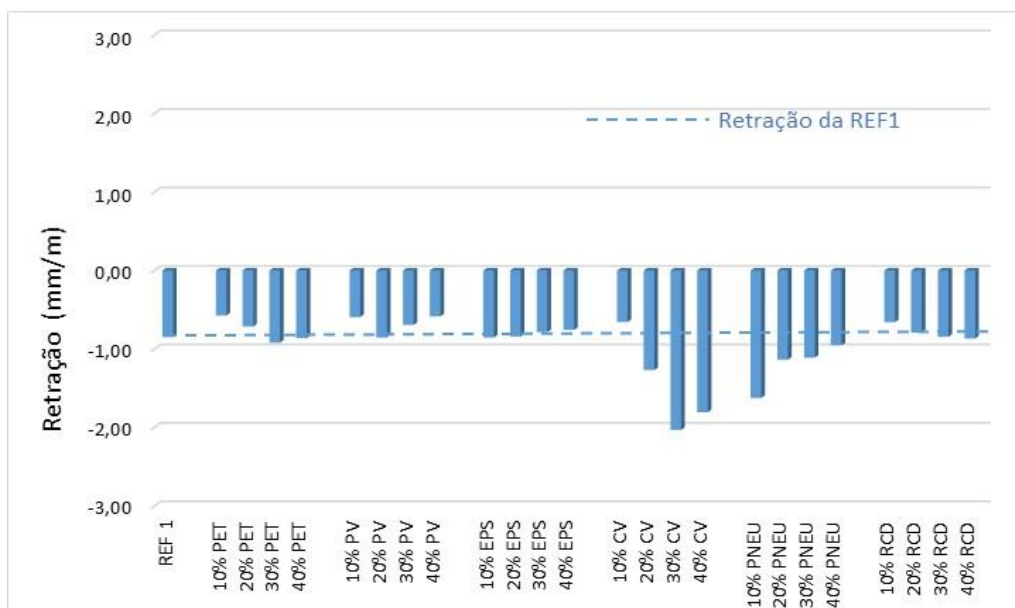
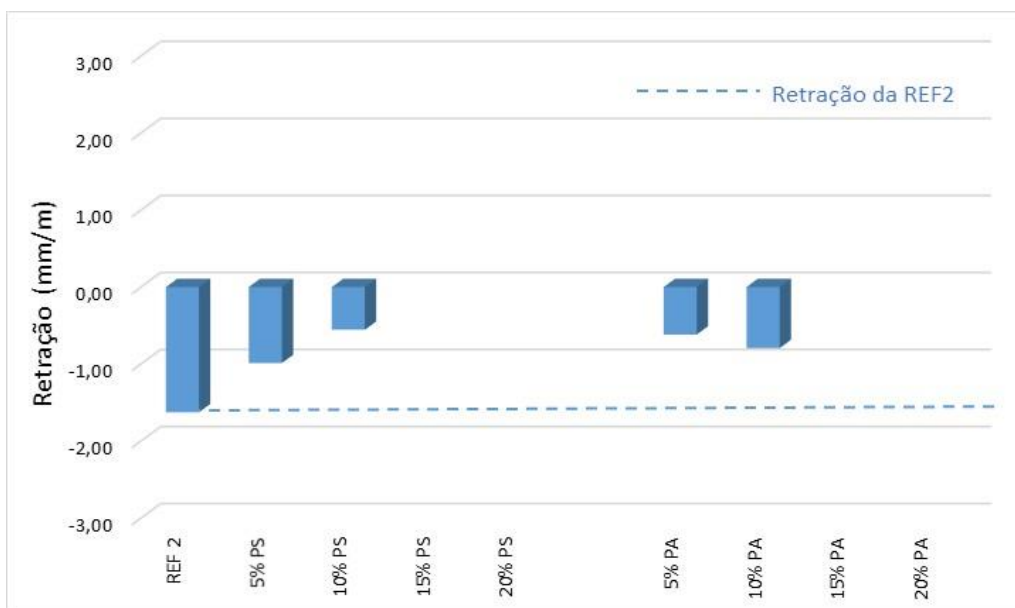


Figura 123 i Retração da argamassa em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



No caso das argamassas contendo resíduos minerais, por possuírem partículas semelhantes à areia natural, a retração parece ter sido influenciada somente pelo consumo de água, uma vez que aquelas com RCD e pó de vidro apresentaram retração próxima à da referência, enquanto aquelas com cerâmica vermelha resultaram em aumento da retração com o aumento do teor de resíduo, chegando a superar em 100% o valor da referência. Também nas argamassas contendo resíduos poliméricos, do tipo PET e EPS, há indícios de que retração foi influenciada somente pelo consumo de água, apresentando valores de retração que se aproximam dos da referência. Por outro lado, embora os elevados consumos de água das argamassas com raspas de pneu tenham resultado em valores de retração superiores à de referência, esses resultados se mostram inversamente proporcionais ao teor de resíduos, indicando haver uma contribuição das fibras de pneu na contenção da retração.

O *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982 *apud* Silva, 2011) desenvolveu critérios de susceptibilidade à fissuração com base na retração apresentada pelas argamassas de revestimentos em um período de 28 dias. De acordo com esses critérios, as argamassas podem ser classificadas como de baixa, média ou alta susceptibilidade à fissuração, conforme apresentem valores de retração menores do que 0,7 mm/m, entre 0,7 e 1,2 mm/m ou maiores que 1,2 mm/m, respectivamente. Na Tabela 25 as argamassas aqui estudadas encontram-se classificadas segundo esses critérios. Para as condições climáticas de Cuiabá, onde o clima é caracterizado por ser quente-úmido e quente-seco, as argamassas mais indicadas são aquelas de baixa susceptibilidade a fissuração.

Tabela 25 i Suscetibilidade à fissuração das argamassas de revestimento segundo CSTB, 1982 *apud* Rodrigues Filho, 2013

Retração aos 28 dias (mm/m)	Suscetibilidade à fissuração	Argamassas
Ret < 0,70	Baixa	PET10, PET40, PV10, PV30, PV40, CV10, RCD10, PS5, PS10, PA5,
(0,7 < Ret < 1,2)	Média	REF 1, PET20, PET30, EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, RCD20, RCD30, RCD40, PV20, PA10
Ret ≥ 1,2	Alta	REF 2, PNEU10, PNEU40, PNEU30, PNEU20 CV20, CV30, CV40

4.2.13 Determinação da absorvância solar

Nas Figuras 124 e 125 estão apresentados os valores da absorvância solar global das argamassas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural. A absorvância média de cada argamassa foi calculada conforme procedimento descrito no item 3.2.4.2 deste trabalho.

Figura 124 ĩ Absortância solar em função do teor e do tipo de resíduo (poliméricos e minerais).

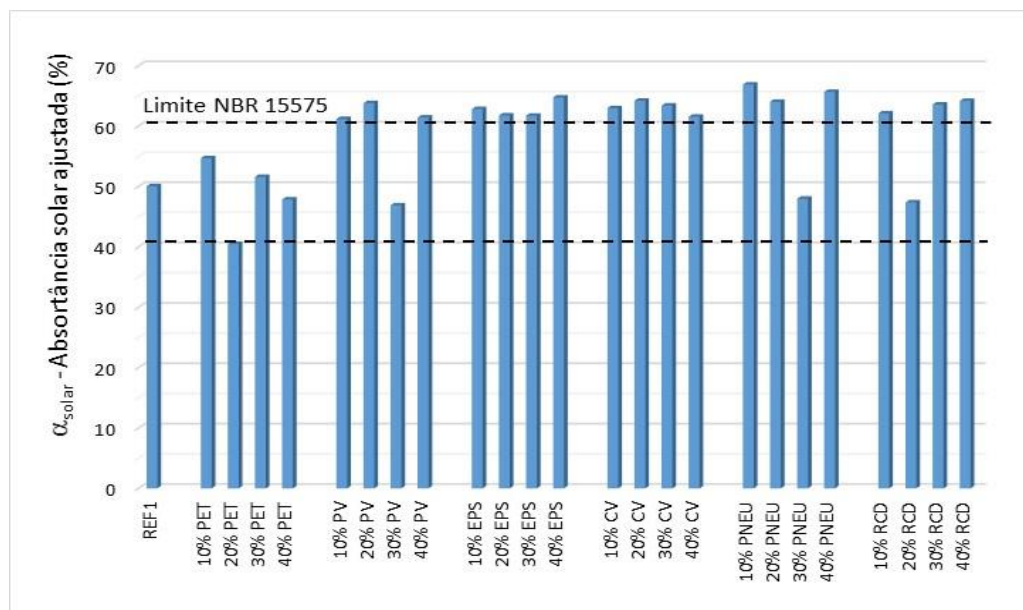
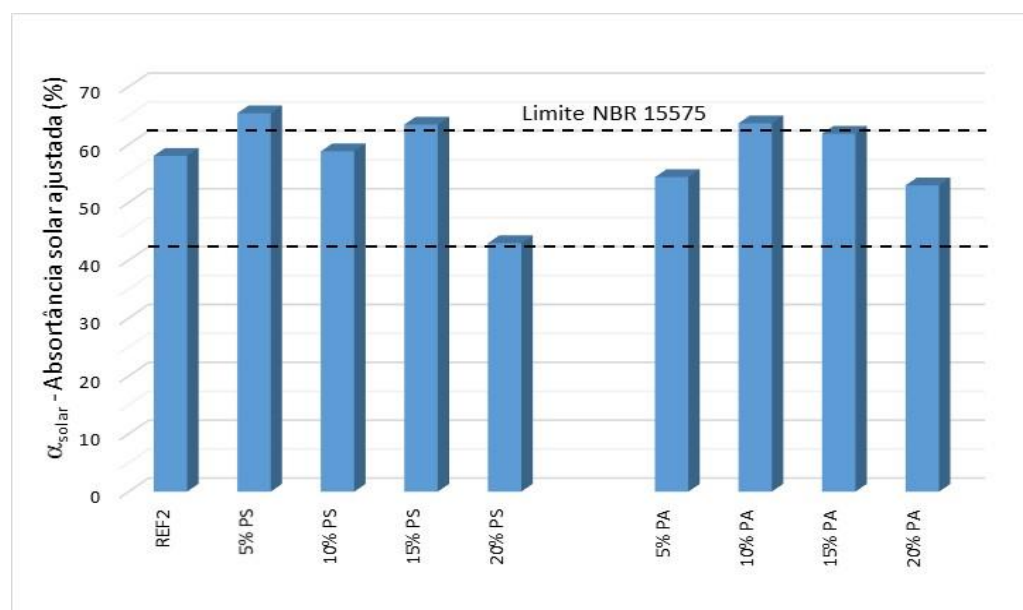


Figura 125 ĩ Absortância solar em função do teor e do tipo de resíduo (vegetal).



A absorptância solar é utilizada como limitadora para o critério de transmitância térmica de coberturas e paredes externas, conforme requisitos da NBR 15575 (ABNT, 2013). No caso das paredes externas, a absorptância solar acima ou abaixo de 0,6 indica diferentes valores máximos admissíveis para a transmitância térmica. Nas coberturas, os diferentes valores máximos admissíveis para a transmitância térmica têm como critério a absorptância solar acima ou abaixo de 0,6, para as zonas bioclimáticas 3 a 6, e acima ou abaixo de 0,4, para as zonas bioclimáticas 7 e 8.

Segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005h), Cuiabá está inserida na zona bioclimática 7, logo, para paredes externas o limite de absorção solar é no máximo 60% e para coberturas é no máximo 40%. Considerando que as argamassas em análise fossem destinadas à aplicação em coberturas, sem qualquer acabamento ou pintura, como camada de proteção mecânica, as únicas que atenderiam ao critério máximo de 40% de absorção seriam a PET20 e PS20. Para paredes externas, entretanto, as argamassas de referência e aquelas contendo resíduos vegetais, com exceção de PS5, atenderiam ao limite máximo de 60% de absorção. Quanto às argamassas com resíduos de PET, todas atenderiam ao limite máximo de 60% de absorção, bem como as argamassas PV30, PN30 e RCD20.

Tal desempenho de absorção era esperado uma vez que essa característica depende diretamente da cor e do brilho da superfície analisada. Superfícies de cores claras e com alto brilho são mais refletivas e, portanto, têm menor absorção. Destaca-se que as argamassas em estudo apresentam- diferentes tons pastéis naquelas com incorporação de resíduos vegetais e de cerâmica vermelha e com diferentes tons de cinza nos demais resíduos e nas amostras de referências. Além da cor, apresentaram superfícies rugosas e opacas, o que contribui para as baixas refletâncias observadas nas amostras e, conseqüentemente, elevada absorção.

4.2.14 Determinação da temperatura superficial

Na Figura 126 tem-se as temperaturas superficiais das argamassas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural, entretanto, não é perceptível uma influência clara do teor de resíduos na temperatura superficial, com exceção das argamassas contendo palha de arroz, cuja temperatura superficial aumenta à medida que se aumenta o teor de resíduos.

Na Figura 127 estão apresentados os valores da temperatura da face interna do prisma, somada à diferença de temperatura, o que resulta na temperatura da face externa. Os resultados encontram-se organizados em ordem crescente de temperatura externa, sendo possível notar diferenças de até 14°C entre as superfícies externas das amostras.

Entretanto, é notória, a diferença de temperatura entre as superfícies externa e interna, que vai de 7 °C a 22°C. Na Figura 128 encontram-se os valores de diferença de temperatura entre as faces dos prismas em ordem crescente.

Figura 126 - Temperaturas superficiais das argamassas em função do teor e do tipo de resíduo utilizado em substituição parcial à areia natural

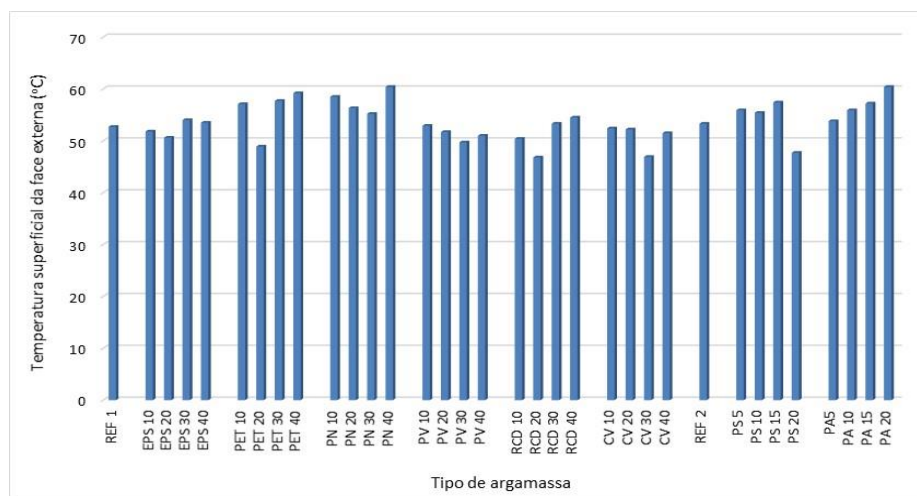


Figura 127 i Temperatura interna e diferença de temperatura para a superfície externa nos prismas revestidos com argamassa

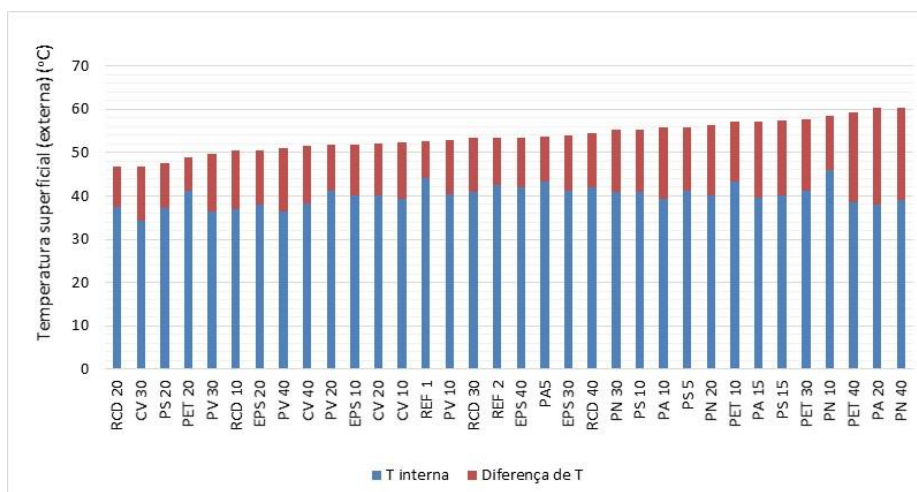
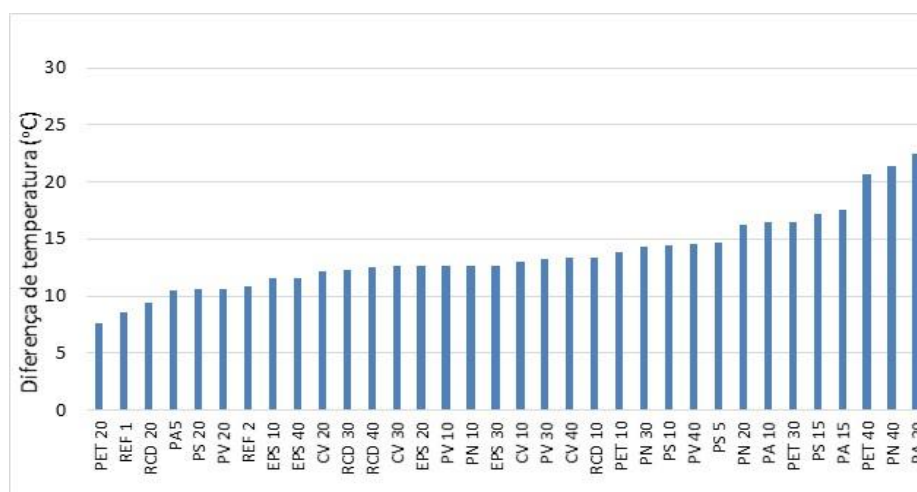
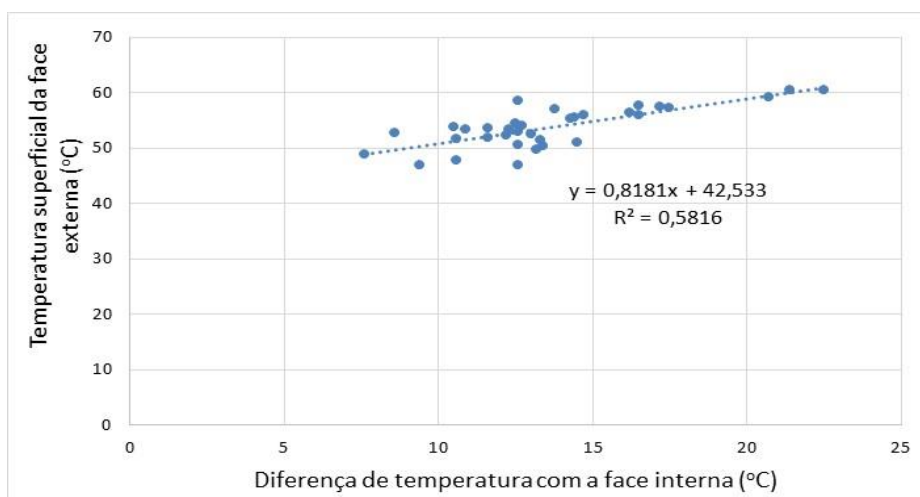


Figura 128 i Diferença de temperatura entre as faces externa e interna dos prismas revestidos com argamassa



Na Figura 129 verifica-se que há uma dependência da diferença de temperatura entre as faces interna e externa do prisma em relação à temperatura da face externa, de modo que quanto maior é a temperatura da face externa maior é a diferença de temperatura entre as faces. Tal constatação induz à conclusão de que os prismas que apresentam maiores temperaturas na face externa estão conduzindo menos energia para a face interna e, portanto, estão revestidos com argamassas com melhor desempenho térmico. Sendo assim, voltando à Figura 127, pode-se concluir que as argamassas listadas no eixo x do gráfico encontram-se em ordem crescente de isolamento térmico.

Figura 129 i Temperatura da face externa das argamassas em função da diferença de temperatura com a face interna



4.3 CLASSIFICAÇÃO E USO DAS ARGAMASSAS ESTUDADAS

Em síntese, a Tabela 26 traz a classificação geral das argamassas segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005a). Note-se que uma mesma argamassa pode apresentar alta classificação em um requisito e baixa classificação em outro. Tome-se como exemplo a argamassa PN20, a qual alcançou máxima classe de aderência (A3) e mas obteve baixa classificação na resistência à tração e à compressão (R2 e P2). Por outro lado, a argamassa REF1 alcançou alta classificação de resistências (R4 e P5) embora tenha apresentado elevado coeficiente de capilaridade. Sendo assim, é importante esclarecer o ambiente e as cargas às quais o revestimento estará exposto, a fim de selecionar a argamassa que apresenta a classificação mais adequada ao serviço.

Ou seja, para revestimento de alvenaria exposta a fortes chuvas ou áreas molhadas as argamassas PN20, PN30 seriam as indicadas. Entretanto, devido às baixas resistências à tração e à compressão também não encontram indicação de uso.

Fazendo essa analogia e com base nos requisitos apresentados pelas normas técnicas referentes à aplicação das argamassas de revestimento (ABNT, 2005a; ABNT, 2013) e à aplicação das argamassas de assentamento (ABNT 2005h; ABNT, 2005i; ABNT 2010; ABNT, 2011), foi construída a Tabela 27 a qual indica o uso mais adequado para as argamassas estudadas nesta pesquisa.

Tabela 26 i Classificação das argamassas segundo NBR 13281 (ABNT, 2005a)

Traço	Massa específica no estado fresco (kg/m³)	Massa específica da argamassa seca (kg/m³)	Coefficiente de capilaridade (g/dm².min^{1/2})	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)
REF 1	D4	M5	C5	R4	P5	A3
PET10	D4	M5	C5	R3	P4	A3
PET20	D4	M5	C5	R3	P4	A3
PET30	D3	M4	C5	R2	P4	A3
PET40	D3	M4	C5	R2	P4	A3
EPS10	D4	M5	C5	R3	P4	A3
EPS20	D4	M5	C5	R3	P4	A3
EPS30	D4	M4	C5	R3	P4	A3
EPS40	D4	M4	C6	R3	P3	A3
PN10	D4	M5	C4	R3	P3	A3
PN20	D4	M4	C1	R2	P2	A3
PN30	D3	M4	C2	R1	P1	A2
PN40	D3	M3	C2	R1	P1	A2
CV10	D4	M5	C6	R2	P4	A3
CV20	D4	M5	C6	R3	P4	A3
CV30	D4	M5	C6	R2	P3	A3
CV40	D4	M4	C6	R2	P2	A3
RCD10	D5	M5	C4	R4	P5	A3
RCD20	D4	M5	C4	R5	P5	A3
RCD30	D4	M5	C4	R5	P5	A3
RCD40	D4	M5	C4	R4	P5	A3
PV10	D4	M6	C5	R4	P4	A3
PV20	D5	M5	C5	R4	P4	A3
PV30	D5	M5	C5	R4	P4	A3
PV40	D4	M5	C5	R3	P4	A3
REF2	D5	M6	C4	R6	P6	A3
PS5	D4	M5	C3	R6	P6	A3
PS10	D4	M4	C3	R5	P5	A3
PS15	D4	M4	C6	R1	P1	A2
PS20	D4	M4	C6	R1	P1	---
PA5	D4	M5	C4	R5	P5	A3
PA10	D4	M4	C5	R2	P2	A3
PA15	D3	M4	C6	R1	P1	A2
PA20	D2	---	---	R1	P1	---

Tabela 27 i Classificação das argamassas estudadas quanto ao uso.

Uso / Aplicação das argamassas	Requisitos	Argamassas que atendem simultaneamente aos requisitos de uso
Revestimento de tetos	Suscetibilidade à fissuração < 1,2 Resistência de aderência ÓA2 Resistência à tração ÓR2 Coeficiente de capilaridade ÒC5	REF 1, PET10, PET20, PET30, PET40, EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, PV10, PV20, PV30, PV40, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PS5, PS10, PA5, PA10
Revestimento de paredes internas que receberão pintura ou reboco	Suscetibilidade à fissuração < 1,2 Resistência de aderência ÓA2 Resistência à tração ÓR3 Coeficiente de capilaridade ÒC5	REF 1, PET10, PET20, EPS10, EPS20, EPS30, EPS40, PV10, PV20, PV30, PV40, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PS5, PS10, PA5
Revestimento de paredes internas que receberão revestimento cerâmico	Suscetibilidade à fissuração < 1,2 Resistência de aderência ÓA3 Resistência à tração ÓR4 Coeficiente de capilaridade ÒC5	REF 1, PV10, PV20, PV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PS5, PS10, PA5
Revestimento de paredes externas que receberão pintura ou reboco	Suscetibilidade à fissuração < 0,7 Resistência de aderência ÓA3 Resistência à tração ÓR3 Coeficiente de capilaridade ÒC4	PV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PS5, PS10, PA5
Revestimento de paredes externas que receberão revestimento cerâmico	Suscetibilidade à fissuração < 0,7 Resistência de aderência ÓA3 Resistência à tração ÓR4 Coeficiente de capilaridade ÒC4	PV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, PS5, PS10, PA5
Assentamento de alvenaria de vedação de blocos cerâmicos	Resistência à compressão ÓP2 Coeficiente de capilaridade ÒC4 Absorção de água 8 a 22%	PNEU10, PV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, REF2, PS5, PS10, PA5
Assentamento de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos acima do nível do solo	Resistência à compressão ÓP3 Coeficiente de capilaridade ÒC4 Absorção de água 8 a 22%	PNEU10, PV30, RCD10, RCD20, RCD30, RCD40, REF2, PS5, PS10, PA5
Assentamento de alvenaria de vedação de blocos de concreto	Resistência à compressão ÓP2 Coeficiente de capilaridade ÒC4 Absorção de água Ò13%	PV30, REF2, PS5, PA5
Assentamento de alvenaria estrutural de blocos de concreto acima do nível do solo	Resistência à compressão ÓP3 Coeficiente de capilaridade ÒC4 Absorção de água Ò13%	PV30, REF2, PS5, PA5
Assentamento de alvenaria estrutural abaixo do nível do solo	Resistência à compressão ÓP3 Coeficiente de capilaridade ÒC2 Absorção de água Ò13%	Nenhuma argamassa estudada atende aos três requisitos simultaneamente.

Na classificação apresentada na Tabela 27 verifica-se que as argamassas PA5, PS5 e PV30 podem ser usadas em todas as aplicações elencadas, com exceção do assentamento de alvenaria abaixo do nível do solo, cujos requisitos não foram preenchidos completamente por nenhuma das argamassas estudadas. Por outro lado, as argamassas PN20, PN30, PN40, CV10,

CV20, CV30, CV40, PS15, PS20, PA15 e PA20 não atendem satisfatoriamente a nenhuma das aplicações.

4.4 CORRELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS

Todos os resultados obtidos foram submetidos a análise por regressão não-linear a fim de identificar o nível de dependência entre as características das argamassas estudadas. Sendo assim, a Tabela 28 apresenta os coeficientes de determinação encontrados nas curvas de regressão, cujos gráficos estão no Apêndice E.

Tabela 28 – Coeficientes de determinação entre as características das argamassas (Apêndice E)

Característica	MF	MS	US	IV	AB	CC	RF	RP	RC	RA	VD	AS	ϕT^*
Água de consistência i AC (Apêndice O.1)	0,033	0,095	0,337	0,560	0,520	0,197	0,241	0,313	0,241	0,107	0,273	0,023	0,124
Massa específica (estado fresco) i MF (Apêndice O.2)		0,821	0,552	0,027	0,144	0,024	0,554	0,440	0,349	0,453	0,0005	0,070	0,453
Massa específica seca (estado endurecido) i MS (Apêndice O.3)			0,609	0,180	0,368	0,011	0,590	0,501	0,512	0,564	0,023	0,026	0,284
Velocidade de onda ultrassônica i US (Apêndice O.4)				0,348	0,517	0,201	0,873	0,926	0,914	0,74	0,076	0,025	0,285
Índice de vazios i IV (Apêndice O.5)					0,954	0,065	0,267	0,388	0,307	0,190	0,306	0,082	0,024
Absorção de água i AB (Apêndice O.6)						0,056	0,432	0,548	0,464	0,369	0,29	0,038	0,078
Coeficiente de capilaridade i CC (Apêndice O.7)							0,251	0,183	0,153	0,012	0,087	0,0001	0,019
Resistência à tração na flexão i RF (Apêndice O.8)								0,879	0,833	0,828	0,062	0,009	0,183
Resistência à compressão prisma i RP (Apêndice O.9)									0,938	0,733	0,028	0,0005	0,189
Resistência à compressão cilindro i RC (Apêndice O.10)										0,788	0,013	0,010	0,089
Resistência de aderência à tração i RA (Apêndice O.11)											0,043	0,022	0,171
Variação dimensional (Retração) -VD (Apêndice O.12)												0,051	0,001
Absortância solar i AS (Apêndice O.13)													0,021

*Diferença de temperatura entre as faces dos prismas - ΔT

O coeficiente de determinação R^2 assume valores que vão de 0 a 1 e quantifica a qualidade do ajustamento de uma linha de regressão, ou seja, mede a proporção da variação total da variável dependente Y explicada pela equação de regressão em relação à variação total da variável explanatória X (Gujarati e Porter, 2008). Elevados valores do coeficiente de determinação sugerem que a equação apresentada pode ser utilizada para estimar a variável Y em função da variável X , ou vice-versa.

Nesse sentido, destacam-se na Tabela 28 os ajustes obtidos entre as características físicas da argamassa: a absorção de água e o índice de vazios, cuja equação apresentou um coeficiente de determinação de 0,954 e entre a massa específica seca (estado endurecido) e a massa específica no estado fresco com coeficiente de determinação igual a 0,821 (Figuras 130 e 131).

Figura 130 i Correlação entre a absorção de água por imersão e o índice de vazios.

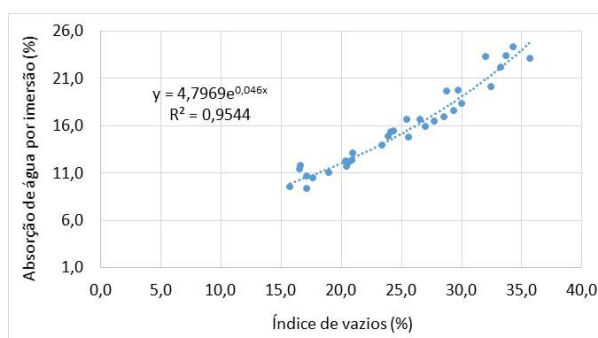
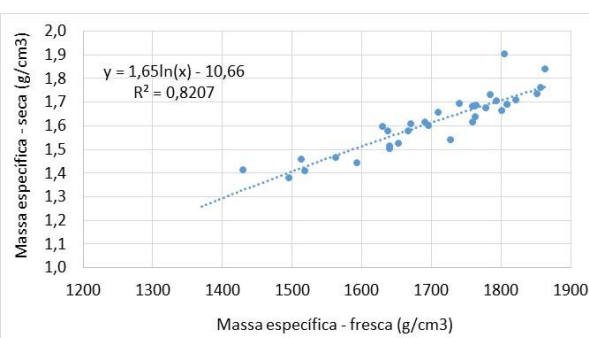


Figura 131 i Correlação entre a massa específica seca no estado endurecido e a massa específica fresca.



Destacam-se também os coeficientes de determinação das curvas de ajuste entre a velocidade de onda ultrassônica e as propriedades mecânicas da argamassa (Figuras 132 a 135), a saber: com a resistência à tração na flexão ($R^2 = 0,873$); com a resistência à compressão no prisma ($R^2 = 0,926$); com a resistência à compressão no cilindro ($R^2 = 0,914$); e com a resistência de aderência ($R^2 = 0,740$).

Figura 132 i Correlação entre a resistência à tração na flexão e a velocidade de onda ultrassônica.

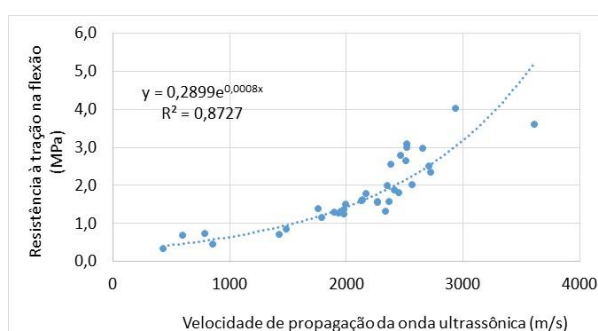


Figura 133 i Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a velocidade de onda ultrassônica.

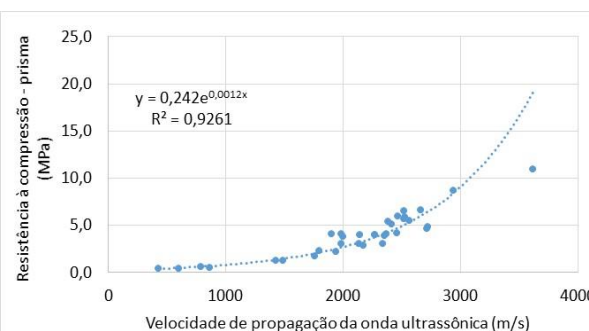


Figura 134 ĩ Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a velocidade de onda ultrassônica.

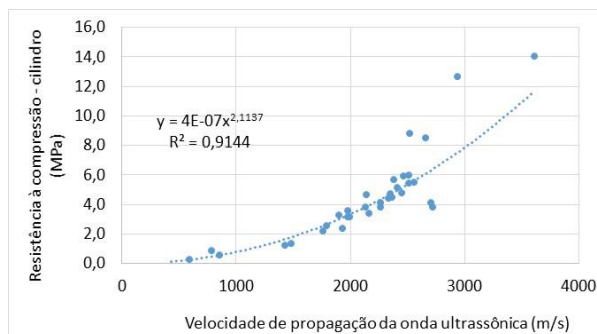
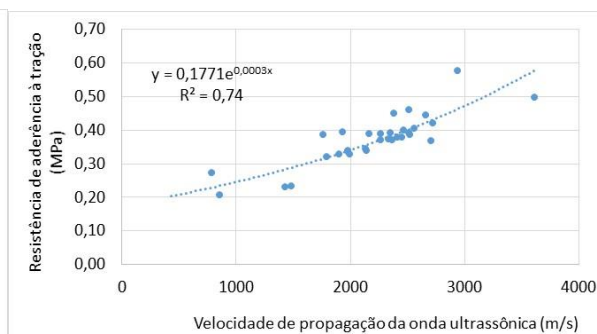


Figura 135 ĩ Correlação entre a resistência de aderência à tração e a velocidade de onda ultrassônica.



Ressalta-se ainda, da Tabela 28, os ajustes obtidos para a relação das propriedades mecânicas entre si: a resistência de aderência e a resistência à tração na flexão ($R^2 = 0,828$); a resistência de aderência e a resistência à compressão no prisma ($R^2 = 0,733$); a resistência de aderência e a resistência à compressão no cilindro ($R^2 = 0,788$); a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão no prisma ($R^2 = 0,879$); a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão no cilindro ($R^2 = 0,833$); e finalmente, a resistência à compressão no prisma e a resistência à compressão no cilindro com um coeficiente de determinação de 0,938 (Figuras 136 a 141).

Figura 136 ĩ Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à tração na flexão.

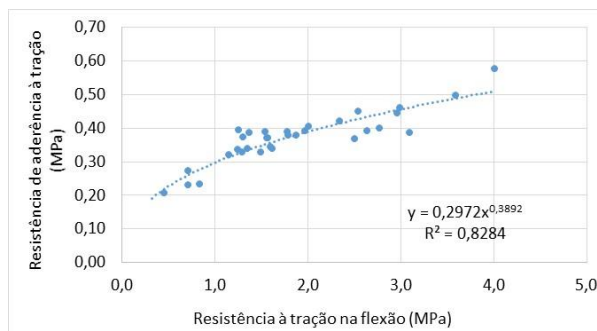


Figura 137 ĩ Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à compressão (prisma).

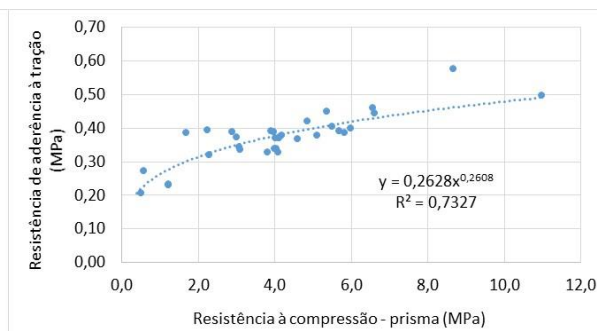


Figura 138 ĩ Correlação entre a resistência de aderência à tração e a resistência à compressão (cilindro).

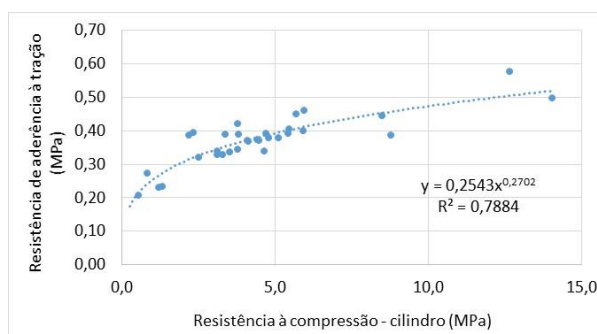


Figura 139 ĩ Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a resistência à tração na flexão.

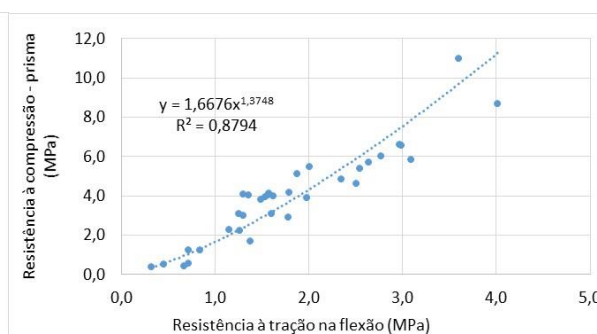


Figura 140 i Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a resistência à tração na flexão.

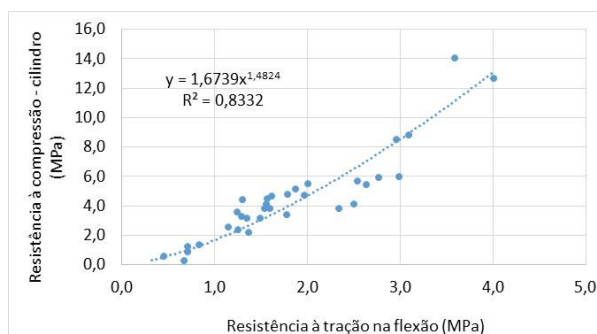
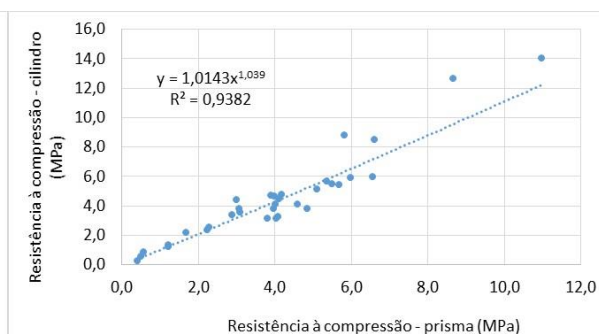


Figura 141 i Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a resistência à compressão (prisma).



No caso da água de consistência, esta influencia razoavelmente o comportamento da absorção de água por imersão (AB) e do índice de vazios (IV), com coeficientes de determinação da ordem de 0,52 e 0,56 respectivamente, de modo que quanto maior o aumento da água de consistência maior é a absorção de água e o índice de vazios (Figuras 142 e 143).

Figura 142 i Correlação entre a absorção de água por imersão e o aumento da água de consistência.

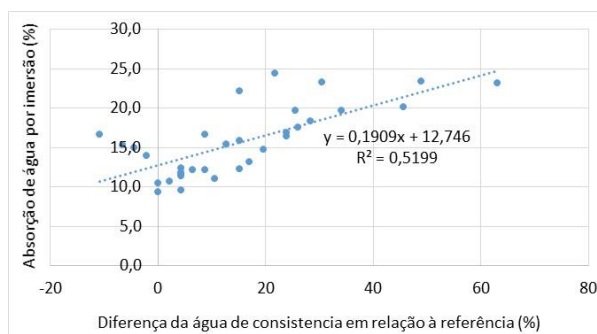
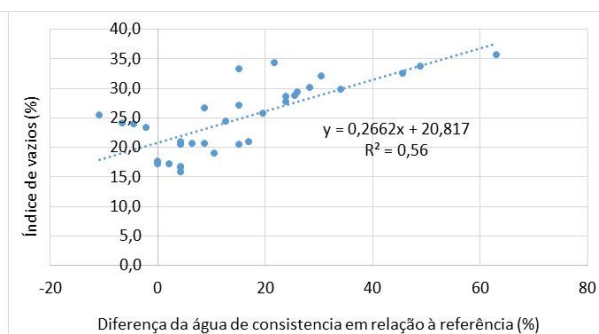


Figura 143 i Correlação entre o índice de vazios e o aumento da água de consistência.



Comportamento semelhante é verificado com relação ao efeito da massa específica seca (MS) sobre os resultados de velocidade de onda ultrassônica (US), de resistência à tração na flexão (RF), de resistência à compressão no prisma (RP), de resistência à compressão no cilindro (RC) e de resistência de aderência (RA), cujas curvas de regressão apresentam coeficientes de determinação entre 0,5 e 0,6, mostrando uma dependência entre essas características de forma diretamente proporcional à massa específica seca (Figuras 144 a 148).

A correlação realizada com os resultados de outros autores (item 2.5.6.2) também demonstraram que há um aumento na resistência à compressão e à tração a medida que a massa específica da argamassa se aumenta.

Figura 144 i Correlação entre a velocidade de onda ultrassônica e a massa específica seca.

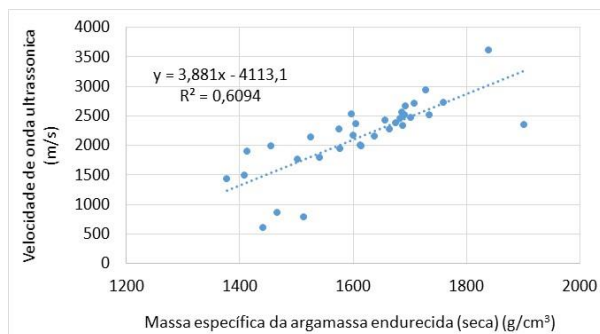


Figura 145 i Correlação entre a resistência à tração na flexão e a massa específica seca.

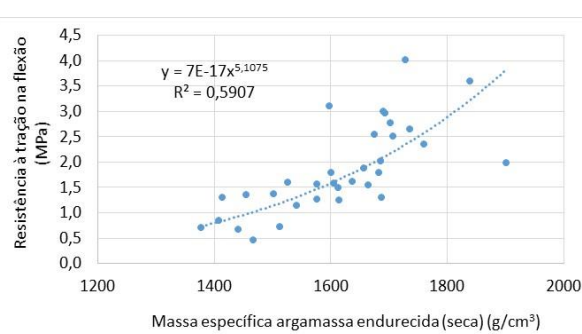


Figura 146 i Correlação entre a resistência à compressão (prisma) e a massa específica seca.

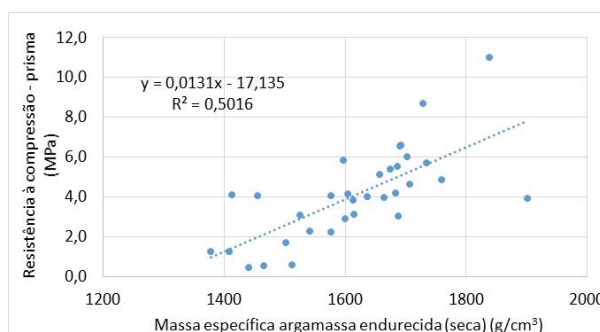


Figura 147 i Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a massa específica seca.

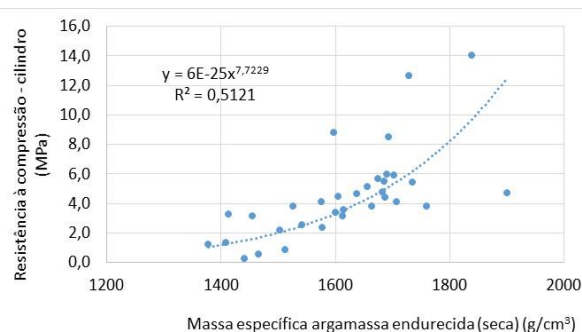
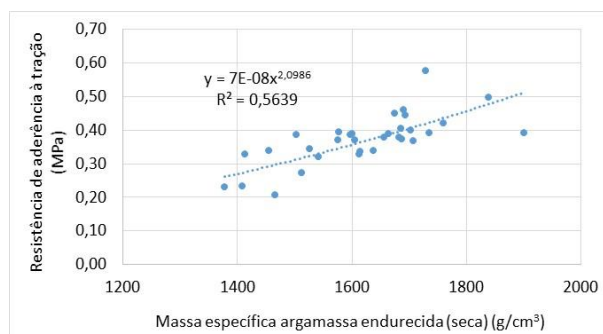


Figura 148 i Correlação entre a resistência à compressão (cilindro) e a massa específica seca.



Um resultado interessante é a relação entre a diferença de temperatura das faces interna e externa dos prismas (ΔT) com a massa específica fresca, as quais se mostram inversamente proporcionais entre si com um coeficiente de determinação de 0,45 (Figura 149), embora não se observe esse comportamento com a mesma intensidade em relação à massa específica seca (Figura 150).

Assim sendo, à medida que a massa específica das argamassas diminui a diferença de temperatura entre as faces interna e externa dos prismas aumenta, o que sugere uma redução da condutividade térmica do sistema. Este comportamento vem ao encontro de resultados de outras pesquisas, as quais demonstraram que a condutividade térmica de argamassas contendo resíduos diminui com a redução da massa específica (Stancato, 2006; Tinker e O'Rourke, 2011; Leal, 2012; Melo, 2014).

Figura 149 ï Correlação entre a diferença de temperatura nas faces interna e externa dos prismas e a massa específica fresca.

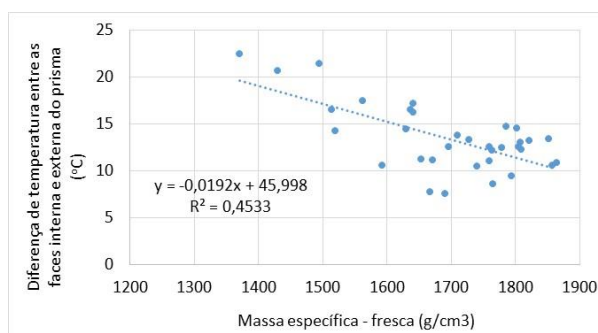
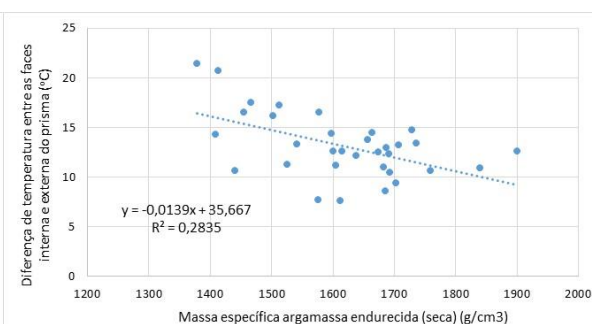


Figura 150 ï Correlação entre a diferença de temperatura nas faces interna e externa dos prismas e a massa específica seca.



Por outro lado, a partir da Tabela 28 observa-se que a massa específica no estado fresco (MF), o coeficiente de capilaridade (CC), a variação dimensional (VD), a absorvência solar (AS) e a diferença de temperatura entre as faces interna e externa dos prismas (φT) apresentam pouca ou nenhuma dependência em relação às demais características estudadas para as argamassas (Figuras no Apêndice E).

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram estudadas características térmicas, físicas e mecânicas de argamassas de revestimento com substituição parcial da areia natural por resíduos sólidos de origem vegetal, polimérica e mineral.

A partir dos resultados obtidos foi possível identificar teores de resíduos sólidos vegetais, poliméricos e minerais que podem ser incorporados nas argamassas de revestimento e resultar em argamassas com desempenho equivalente ao das argamassas confeccionadas com materiais convencionais.

Dentre os resíduos de origem mineral, os que proporcionaram melhor desempenho físico e mecânico, equivalentes ou mesmo superior à referência, foram o RCD e o pó de vidro, para teores de até 40% de substituição da areia. Os resíduos de cerâmica vermelha, por demandarem maior quantidade de água na sua produção, resultaram em argamassas de baixa resistência à tração e à compressão, embora tenham apresentado boa resistência de aderência.

No caso das argamassas contendo resíduos poliméricos de PET e EPS, essas apresentaram características físicas e mecânicas equivalentes às da referência, com exceção daquelas com 30 e 40% de PET, para as quais foi constatada redução da resistência à tração em relação à referência. As raspas de pneu, por outro lado, resultaram em argamassas com desempenho físico e mecânico inferior à referência e com forte declínio quando do aumento do teor de resíduos.

Os resíduos vegetais foram os que proporcionaram maior impacto nas características das argamassas, sendo necessário desenvolver um traço de referência com maior proporção de cimento e diminuir o teor de resíduos, a fim de obter um material exequível. Ainda assim, os resultados demonstraram que são viáveis argamassas com até 10% de palha de arroz ou até 10% de pó de serra.

Quanto ao desempenho térmico, as argamassas contendo resíduos poliméricos e vegetais resultaram em maior diferença de temperatura entre as faces externas e internas dos prismas, indicando maior capacidade de isolamento térmico em relação às demais argamassas e à referência.

Com exceção das argamassas contendo 20% de pó de serra e 20% de palha de arroz, todas as argamassas estudadas encontraram classificação em relação aos requisitos da NBR 13281 (ABNT, 2005a). Ressalta-se, entretanto, que uma mesma argamassa pode apresentar desempenho alto em um requisito da norma e desempenho baixo em outro requisito. Resta,

portanto, identificar qual requisito será mais importante na aplicação ou uso do revestimento e, só assim, escolher a argamassa mais adequada.

Nas curvas de regressão não linear, destaca-se a forte correlação entre a absorção de água e o índice de vazios das argamassas, o que era esperado, dada a dependência entre essas propriedades. Observou-se também que o comportamento das propriedades mecânicas pode ser amplamente explicado a partir de ajustes com a velocidade de onda ultrassônica, o que pode ser de grande valia para algumas investigações uma vez que a determinação desta última se dá por meio de um ensaio não destrutivo. Finalmente, as curvas de ajuste das propriedades mecânicas entre si revelaram elevados coeficientes de determinação, inclusive com a resistência de aderência. Nesse caso, entretanto, deve-se ressaltar a importância do procedimento de execução e preparo do substrato a fim de garantir tal correlação.

Os resultados desta pesquisa indicam uma alternativa para a destinação ambientalmente adequada dos resíduos estudados e, conseqüentemente, para a redução do passivo ambiental.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final desta pesquisa muitas questões ainda restam por responder. Sugere-se, portanto, algumas análises novas que podem dar continuidade a este estudo:

- Realizar análise microscópica da distribuição dos resíduos na matriz cimentícia, com foco na qualidade da zona de transição e na porosidade da matriz;
- Determinar a condutividade térmica das argamassas estudadas nesta pesquisa e avaliar a correlação desta com as demais propriedades físicas e mecânicas;
- Testar o desempenho termo físico e mecânico de argamassas com teores de resíduos de 50% a 100% em substituição à areia natural.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6136 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. NBR 7200 - **Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

_____. NBR 8802 - **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 9289 - **Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura**. Rio de Janeiro, 2000.

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

_____. NBR 9779 - **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 11578 - **Cimento Portland Composto - Especificação**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. NBR 11579 - **Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200)**. Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. 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: 2005c.

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

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

_____. NBR 13281 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. NBR 13528: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**. Rio de Janeiro: 2010.

_____. NBR 13749: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 14399: **Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro: 1999.

_____. NBR 15220-1:2005 - **Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15220-2:2008 - **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. 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: ABNT, 2005f.

_____. NBR 15261: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005g.

_____. NBR 15270-1. **Componentes Cerâmicos - Parte 1 - Blocos Cerâmicos para Alvenaria de vedação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005h.

_____. NBR 15270-2. **Componentes Cerâmicos - Parte 2 - Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005i.

_____. NBR 15575:2013. **Edificações habitacionais - Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR-15812-1. **Alvenaria estrutural - Blocos cerâmicos - Parte 1: Projetos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. NBR15961-1. **Alvenaria estrutural - Blocos de concreto - Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. NBR NM 23 - **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 30 - **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 46 - **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. NBR NM 65 - **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2014.

AEGERTER, MA.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, MM. (EDS.), in: **Aerogels handbook**, edited by Springer Science + Business Media, New York (2011).

ALBUQUERQUE, A.C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2009.

ALBUQUERQUE, A.C., HASPARYK, N.P., ANDRADE, M.A.S., ANDRADE, W.P. **Polymeric Admixtures as Bonding Agent between Tire Rubber and Concrete Matrix**. ACI - Special Publication 229, Michigan/USA, v. 229, p. 479-496, 2005.

ALMEIDA, D.W.F. **Determinação da difusividade térmica de materiais compósitos poliméricos**. (Monografia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2006. 53p.

ALVES, J.M.C. **Argamassas leves para execução de camadas de regularização e de enchimento de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Área Departamental de Engenharia Civil. Lisboa, 2009.

ALVES, J.D., PINHEIRO, D.G.L., CARDOSO, F.A.M., SANTOS, T.M. **Argamassas de revestimento com adição de raspas de pneus**. Prêmio de inovação e sustentabilidade. Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC. 16ª Edição. 2010.

ANIP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **RECICLANIP**. 2012.

ANTAC - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Terminologia de Argamassas**. VIII SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Curitiba, 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G173 - 03 (Reapproved 2012): Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**. ASTM International, 2012a. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/astmg173/astmg173.html>. Acesso em: 19/03/2017.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E903** ï **12: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres**. ASTM International, 2012b.

BAETENS, R., JELLE, B.; GUSTAVSEN, A. **Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review**, Energ. Build. Vol. 43, Issue 4 (2011), pp. 761-769.

BARREIRA, E., FREITAS, V., DELGADO, J., RAMOS, N. **Thermography applications in the study of buildings hygrothermal behaviour**. In Infrared Thermography, p. 171-192, Intech, 2012.

BAUER, E.; FEITOSA, C.P.; RODRIGUES FILHO, H.; ALMEIDA, P.O. **Análise das argamassas de revestimento (industrializadas e usinadas), empregadas em obras do Distrito Federal, quanto aos requisitos e ao desempenho**. In: IX Congresso internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas ï IX CINPAR. João Pessoa, 2013.

BAUER, E.; SALOMÃO, M.C.; RODRIGUES FILHO, H. **Avaliação de argamassas industrializadas quanto à capilaridade e retração de acordo com os critérios da NBR 13281 e do método MERUC/CSTB**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas ï XI SBTA. Porto Alegre, 2015.

BAUER, E.; PAVÓN, E.; HILDENBERG, A. **Erros na utilização de parâmetros termográficos da argamassa e da cerâmica na detecção de anomalias em revestimentos**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas ï XI SBTA. Porto Alegre, 2015. <https://www.researchgate.net/publication/279787365>

BENOSMAN, A.S., MOULI, M., TAIBI, H., BELBACHIR, M., SENHADJI, Y., BAHLOULI, I., HOUIVET, D. **Studies on Chemical Resistance of PET - Mortar Composites: Microstructure and Phase Composition Changes** . Engineering, 2013, 5, 359-378.

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F.F. **Argamassa com adição de fibras de sisal**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, 2003, São Paulo. V SBTA. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2003. v. 1. p. 449-454. Disponível em: www.apuama.org/wp-content/uploads/2012/08/Argamassa-com-adicao-de-fibras-de-sisal1.doc. Acesso em 24/11/2015. (a)

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F.F. **Ensaio não destrutivo (END) aplicado à argamassa com adição de fibra de sisal**. 3rd Pan American Conference for Nondestructive Testing ï PANNDT. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.aaende.org.ar/ingles/sitio/biblioteca/material/T-046.pdf>. Acesso em 24/11/2015. (b)

BRANCO, F.G.; GODINHO L.; MASGALOS, R. **Desempenho de argamassas leves em isolamento a sons de percussão**. Acústica 2008. Coimbra, 2008. Disponível em: http://www.sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/Coimbra08_id008.pdf. Acesso em 24/11/2015.

BRANCO, F.G.; GODINHO, L.; TAVARES, J. **A Utilização de Argamassas Leves na Minimização da Transmissão de Ruídos de Impacto em Pavimentos**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2027_2010.pdf. Acesso em 24/11/2015.

BRASIL. **Investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica**). Lei nº 9991, de 24 de julho de 2000. 2000.

BRASIL. **Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (Lei de Eficiência Energética)**. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. 2001.

BRASIL. **Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Resolução no 307, de 5 de julho de 2002. 2002. (Alterada pela Resolução nº 469/2015

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

CABRAL, A.E.B., SCHALCH, V., DAL MOLIN, D.C.C., RIBEIRO, J.L.D., RAVINDRARAJAH, R.S. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. Cerâmica 55. Pp 448-460. 2009.

CALLISTER Jr, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. LTC ï Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. 2002

CALMON, J.L., SAUER, A.S., VIEIRA, J.L., TEIXEIRA, J.E.S.L. **Effects of windshield waste glass on properties of repair mortars**. Cement & Concrete Composites 53, pp. 88ï 96. 2014.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2v. Cap. 26.

CARVALHO, P.J. **Betões e Argamassas Modificados com Incorporação de PVA**. (Dissertação de Mestrado) Universidade do Minho Escola de Engenharia. 2012.

CBCS - Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas**. 2014. Disponível em <http://www.cbcs.org.br/website/aspectos-construcao-sustentavel/show.asp?ppgCode=31E2524C-905E-4FC0-B784-118693813AC4>. Acesso em 17 mar. 2017.

CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas (v.1)**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

CERUTI, A. **Propriedades Mecânicas e Térmicas dos Materiais Cerâmicos**. Artigo. Engenharia Elétrica. UFPR. 2008

COIMBRA, M. A.; MORELLI, M. R.. **Desenvolvimento de argamassas microporosas para a construção civil**. Cerâmica, São Paulo , v. 45, n. 296, p. 203-206, dez. 1999. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69131999000600008>. Acesso em 24 nov. 2015.

CORINALDESI, V., MAZZOLI, A., MORICONI, G. **Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles**. Materials and Design 32 (2011) 1646ï 1650.

CORINALDESI, V., MORICONI, G. **Characterization of lightweight mortars containing wood waste**. Conference Paper October 2012.

COSTA, E.C. **Física aplicada à construção: Conforto Térmico**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1991.

COSTA, J.S., MARTINS, S.A., BALDO, J.B. **Caracterização da Matriz de Argamassas para Alvenaria Utilizando Rejeitos das Indústrias de Cerâmica Vermelha e de Sanitários**. Cerâmica Industrial, 16 (5-6) Setembro/Dezembro, 2011.

CUIABÁ. **Relatório de Monitoramento 04/2012**. Prefeitura Municipal de Cuiabá. Núcleo Permanente de Gestão do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos de Cuiabá. 2012.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. **Caracterização mecânica e durabilidade de argamassas térmicas**. I Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Coimbra, 2014.

DORNOLLES, K.A. **Absortância solar de superfícies opacas: conceitos, métodos de determinação e base de dados para tintas imobiliárias**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. 135 p.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. **Identificação da absortância solar de superfícies opacas por meio de espectrômetro de baixo custo**. IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, 2006.

ELETROBRÁS. **Regulamento para concessão do Selo Procel de Economia de Energia para Edificações**. 2015.

EMPA, **Aerogel-based render - A simple and effective way to insulate historical buildings**, EMPA - Materials Science & Technology, Media release (Duebendorf, St. Gall, Thun, 18th November 2010)

FADIEL, A., RIFAIE, F., ABU-LEBDEH, T., FINI, E. **Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials**. American Journal of Engineering and Applied Sciences 7 (1): 1-11, 2014.

FERREIRA, A.S.; BRITO, J.; BRANCO, F. **Desempenho relativo das argamassas de argila expandida na execução de camadas de forma**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2007. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/Paper%2029_07.pdf. Acesso em 24/11/2015.

FERREIRA, C.R.G. **Análise de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de argamassa e resíduo de borracha**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. 2010.

FERREIRA, H. F. **Diagnóstico da geração e destinação de embalagens de Polietileno Tereftalato (PET), direcionadas à atual área de disposição final de resíduos sólidos de Várzea Grande, Mato Grosso**. Dissertação (mestrado) i Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Cuiabá, 2015

FERREIRA, P. R. L.; HENRIQUES, V. M.; DE MELO, A. B.; GOMES, E. G. S. **Avaliação do comportamento térmico de paredes monolíticas executadas com diferentes materiais em condições variáveis de oscilações de temperaturas superficiais**. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2016, São Paulo. Anais ANTAC, 2016

FILHO, R. H. (2013). **Avaliação dos requisitos normativos das argamassas industrializadas associados a critérios de emprego e utilização**. Dissertação (Mestrado). Publicação: T. DM 00x x/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 198 p.

FLORES-COLEN, I.; SOARES, A.; BRITO, J. **A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento**. TECH-ITT (ISSN 1645-5576). nº 34 - out. 2013 vol. 11. Disponível em: http://www.researchgate.net/profile/Jorge_Brito5/publication/280878532_A_Nanotecnologia_Aplicada_s_Argamassas_de_Revestimento/links/55d1bfd308aee5504f68ee23.pdf. Acesso em 24/11/2015.

FRADE, D. F.; GONÇALVES, P.J.; NASCIMENTO, R.S.; SEQUEIRA, A.C. **Argamassa de Reboco com Características Térmicas**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2070_2010.pdf. Acesso em 24/11/2015.

FRADE, D.; TADEU, A.; TORRES, I.; MENDES, P.A.; SIMÕES, N.; MATIAS, G.; NEVES, A. **Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2012. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper%20100_2012.pdf. Acesso em 24/11/2015.

FURLANETTO NETO, A.; CASTRO, L.C. **Análise acústica de contrapiso com adição de resíduos de pneus**. Artigo (Trabalho de Conclusão de Curso). Engenharia Civil da UNESC. Criciúma, 2012. Disponível em: <http://200.18.15.27/bitstream/1/204/1/Antonio%20Furlanetto%20Neto.pdf>. Acesso em 24/11/2015.

GARCIA, J.R.R. **Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias em edifícios**. Mestrado (Dissertação). Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto. Porto, 2014. 159p.

GONÇALVES, J.P., **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos**. Rem: Revista Escola de Minas [en linea] 2007, 60 (Outubro-Diciembre): Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56416459009>> ISSN 0370-4467. Acesso em 28/07/2016.

GONÇALVES, P.J.; FRADE, D. F.; BRITES, J. **Argamassas térmicas - Uma solução no cumprimento do RCCTE**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2012. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper%2084_2012.pdf. Acesso em 24/11/2015.

GRANJA L.P.V.O. **Desempenho comparado entre argamassas geopoliméricas correntes e monofásicas com condutibilidade térmica melhorada**. Dissertação (Mestrado) Universidade do Minho Escola de Engenharia. 2014.

GUJARATI, D.N.; PORTER, D.C. **Econometria Básica** - 5.Edição. Editora McGraw-Hill. 2008.

IKEMATSU, P. **Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2007.

ILHARCO, LM.; FIDALGO, A.; FARINHA, JP; GASPAR MARTINHO, JM.; ROSA, ME. **Nanostructured silica/polymer subcritical aerogels**. Journal of Materials Chemistry. Vol. 19 (2007), pp. 2195-2198

INCROPERA, F.P., DeWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Editora Guanabara Koogan. Rio de Janeiro.1992.

INGRAO, C.; GIUDICEB, A.; TRICASEC, C.; RANAC, R.; MBOHWAB, C.; SIRACUSA, V. **Recycled-PET fibre based panels for building thermal insulation: Environmental impact and improvement potential assessment for a greener production**. Science of the Total Environment 493 (2014) 914i 929. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.022>.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9869 - **Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance-- Part 1: Heat flow meter method**. Genebra. 2014.

IUCOLANO, F.; LIGUORI, B.; CAPUTO, D.; COLANGELO, F.; CIOFFI, R. **Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties**. Materials and Design 52 (2013) 916i 922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>.

KIM, S.; SEO, J.; CHA, J.; KIM, S. **Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel**. Constr. Build. Mater. Vol. 20 (2013), pp. 501-505

KREITH, F., BOHN, M.S. **Princípios de transferência de calor**. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2003.

LEAL, M.M.R. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado**. Dissertação (Mestrado). Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal. 2012.

LEIVA, C.; SOLÍS-GUZMÁN. J.; MARRERO, M.; ARENAS, C. G. **Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing construction and demolition waste**. Waste Management, v.33, p.663i 671, 2013.

LOUZICH, K.M.D.; CALLEJAS, I.J.A; DURANTE, L.C.; MARTINS, A.F.S.; ROSSETI, K.A.C.; MARTINS, W.T.O. **Absortância de telhas cerâmicas novas e deterioradas pela exposição às intempéries: impacto no desempenho térmico de edificações**. In: Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MAIO, D.J.D. **Desenvolvimento de tinta com pó de cortiça com desempenho acústico otimizado**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2010.

MANO, E.B., MENDES, L.C. **Introdução a polímeros**. 2ª edição revisada e ampliada - São Paulo: Edgard Blucher, 1999.

MANSUR, A.A.P., NASCIMENTO, O.L., MANSUR, H.S. **Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico)** . Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros. Campina Grande, 2007.

MARQUES, D.F.P.C. **Avaliação da qualidade térmica da envolvente de edifícios i Estudo de caso através da análise numérica e por termografia infravermelha**. Mestrado (Dissertação). UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Departamento de Engenharia Civil. Lisboa, 2014. 111p.

MARTINS, A.F.S.; CALLEJAS, I.J.A.; LOUZICH, K.M.D.; CARDOSO, A.A.; DURANTE, L.C. **Condutividade térmica de argamassas convencionais e não convencionais: uma revisão sistemática**. ENTAC 2016 - XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 2016

MATO GROSSO. **Relatório Final. Câmara setorial temática de resíduos sólidos em Mato Grosso**. Assembléia Legislativa. 2012.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Editora Pini. São Paulo, 1994.

MODRO, N.L.R., MODRO, N.R., MODRO, N.R., OLIVEIRA, A.P.N. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET**. Matéria (Rio J.) vol.14 no.1 Rio de Janeiro Apr. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762009000100007>

NASCIMENTO, M.C.B. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008. Disponível em: http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5080/arquivo3337_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 24/11/2015.

NÓBREGA, A.F. **Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso**. Dissertação (Mestrado) i Universidade Federal da Paraíba i UFPB. Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2007. 117p.

OLIVEIRA, R.B. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro-efeito de filer e pozolânico**. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.

OLIVEIRA, R., BRITO, J., VEIGA, R. **Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.21, p.25-39, Maio, 2013.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

POLONI, M.P., Pezzuto, C.C. **Medidas de refletância de materiais de superfície urbana utilizando o espectrômetro portátil ALTA**. In: XX Encontro de Iniciação Científica, 2015, Campinas. Anais... Campinas: PUC, 2015.

PORTELLA, K.F.; GARCIA, C.M.; VERGÉS, G.R.; JOUKOSKI, A.; FREIRE, K.R.R.; CORRÊA, A.P. **Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto de redes de distribuição de energia: estudo de caso na região de Manaus**. Química Nova vol.29 no.4 São Paulo July/Aug. 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422006000400018>

RODRIGUES, M.R.P.; FERREIRA, O.P. **Argamassa com partículas de borracha derivada da reciclagem de pneus inservíveis**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010. Disponível em: http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2074_2010.pdf. Acesso em 24/11/2015.

ROMANO, R.C.O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. (Tese de doutorado). Escola Politécnica. USP. São Paulo, 2013.

ROSSI, L.A.; CARDOSO, P.E.R.; BERALDO, A.L. **Avaliação térmica de placas de argamassa de cimento e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.37-45, jan./abr. 2005.

SANTOS, E.I. **Comparação de métodos para medição de absorvância solar em elementos opacos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC. Florianópolis, 2013.

SANTOS, W.M.G. CARDOSO, A.A., ALBUQUERQUE, A.C. **Efeito do uso de pó de vidro em substituição parcial do cimento na resistência à compressão do concreto**. VI Seminário Mato-Grossense de Habitação de interesse Social. Cuiabá, 2015.

SAUER, A.S., CALMON, J.L., VIEIRA, J.L. **Avaliação da resistência de aderência à tração de argamassas de recuperação estrutural com resíduo de vidro laminado**. Anais do IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas. João Pessoa, 2013.

SILVA, N.G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, SC, 2011. 329 p.

SILVA, N.G., COLLODETTI, G., PICHETTI, D.Z.C.M., GLEIZE, P.J.P. **Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia**. Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. Curitiba, 2009.

SILVA, R.N.T. **Estudo da termografia por infravermelho: aplicações na engenharia e determinação de parâmetros termofísicos e geométricos de materiais**. Mestrado (Dissertação). Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2007. 90p.

SOUSA, A.J.C. **Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto. Porto, 2010. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59634/1/000141453.pdf>. Acesso em 24/11/2015.

SOUSA, L.F.R. **Aplicação de termografia no estudo do isolamento térmico de edifícios.** Mestrado (Dissertação). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro. Aveiro, 2010. 101p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/3650>. Acesso em: 22/02/2017.

SOUSA, V.A.L. **Estudo do comportamento de materiais não convencionais utilizados como revestimento de paredes, visando à redução da carga térmica.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012.

SOUTSOS, M. N.; TANG. K.; MILLARD. S. G. **Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate.** Construction and Building Materials, v.25, p.726-735, 2011.

STAHL, TH.; BRUNNER, S; ZIMMERMANN, M.; GHAZI WAKILI, K. **Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications.** Energy and Buildings Vol. 44 (2012), pp. 114-117.

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000. 155p.

STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados.** Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006. 155p.

TAOUKIL, D., EL-BOUARDI, A., EZBAKHE, H., AJZOUL, T. **Thermal Proprieties of Concrete Lightened by Wood Aggregates.** Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(2): 113-116, 2011

TASHIMA, M.M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 80 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/91490>>

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. **Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis.** Rev. IBRACON Estrut. Mater. vol.9 no.1 São Paulo Jan./Feb. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100006>

TEIXEIRA, M.G., CÉSAR, S.F. **Resíduo de madeira como possibilidade sustentável para produção de novos produtos.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC 2004. São Paulo, 2004.

THOMAZ, B., ISHIOKA, L. **Materiais de construção e isolamento térmico.** Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto. Ed. FAUP. 2011.

TINKER, J.A.; O'ROURKE, A. **Thermally improved lightweight mortars.** Thermal Envelopes VII Heat Transfer in Walls I-Principles. 1995. pp. 163-167.

UGARTE, J.F.O., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. **In: Rochas e Minerais Industriais. Capítulo 38 e Vermiculita.** Centro de Tecnologia Mineral. CETEM/2008, 2a Edição. 2008.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciências dos materiais**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1970.

WESTPHAL, F.S., MARINOSKI, D.L., LAMBERTS, R. **Isolantes Térmicos e Acústicos para Construção Civil**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Desempenho Térmico de Edificações - Notas de Aula. 2012.

WILEN, G.J., SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo. 1993.

ZAMPIRON, L.C., SOUZA, R.A., OLIVEIRA, A.L. **Utilização de areia de reciclagem proveniente de cerâmica vermelha para a confecção de argamassa de assentamento para alvenaria estrutural**. Caderno de Publicações Acadêmicas - IFSC. v2. n1. 2010.

ZATTERA, A.J., BIANCHI, O., ZENI, M., FERREIRA, C.A. **Caracterização de Resíduos de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila e EVA**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 1, p. 73-78, 2005

ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P.; NUNES, M. F. O.; TUTIKIAN, B.F. **Estudo de contrapisos leves a base de EVA (Etileno Acetato de Vinila) para desempenho acústico e reduzidas cargas permanentes**. XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção e CONPAT. Lisboa, 2015. Disponível em: [http://www.researchgate.net/profile/Maria_Nunes31/publication/280443710_estudo_de_contrapisos_leves_a_base_de_eva_\(etilen_o_acetato_de_vinila\)_para_desempenho_acstico_e_reduzidas_cargas_permanentes/links/55b4c8ff08ae092e96556db0.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Maria_Nunes31/publication/280443710_estudo_de_contrapisos_leves_a_base_de_eva_(etilen_o_acetato_de_vinila)_para_desempenho_acstico_e_reduzidas_cargas_permanentes/links/55b4c8ff08ae092e96556db0.pdf). Acesso em 24/11/2015.

Apêndice A - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de origem vegetal

STANCATO 2000 (pó de serra sem areia)	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
1:0,4:0,84 CPV-ARI	974	0,265
1:0,4:0,91 CPV-ARI	957	0,253
1:0,4:1,0 CPV-ARI	910	0,254
1:0,4:1,10 CPV-ARI	845	0,228
1:0,4:1,18 CPV-ARI	818	0,229
1:0,4:1,36 CPV-ARI	796	0,224
1:0,4:0,84 CPII-E	968	0,251
1:0,4:0,91 CPII-E		
1:0,4:1,0 CPII-E	885	0,223
1:0,4:1,10 CPII-E		
1:0,4:1,18 CPII-E	780	0,218
1:0,4:1,36 CPII-E	775	0,203
1:0,6:1,28 CPV-ARI	811	0,218
1:0,6:1,31 CPV-ARI	783	0,213
1:0,6:1,35 CPV-ARI	769	0,21
1:0,6:1,38 CPV-ARI	755	0,203
1:0,6:1,42 CPV-ARI	748	0,199
1:0,6:1,50 CPV-ARI	732	0,194
1:0,6:1,28 CPII-E	769	0,201
1:0,6:1,31 CPII-E		
1:0,6:1,35 CPII-E	745	0,185
1:0,6:1,38 CPII-E		
1:0,6:1,42 CPII-E	734	0,182
1:0,6:1,50 CPII-E	728	0,182
STANCATO 2006	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
1:0,36:0,84 eucalipto 0% aditivo	1500	0,66
1:0,36:0,84 eucalipto 3% aditivo SBR	1555	0,61
1:0,36:0,84 eucalipto 5% aditivo SBR	1549	0,39
1:0,36:0,84 eucalipto 7% aditivo SBR	1584	0,47
1:0,36:0,84 eucalipto 9% aditivo SBR	1580	0,43
1:0,36:0,84 eucalipto 3% aditivo PVA	1532	0,57
1:0,36:0,84 eucalipto 5% aditivo PVA	1561	0,55
1:0,36:0,84 eucalipto 7% aditivo PVA	1581	0,76
1:0,36:0,84 eucalipto 9% aditivo PVA	1596	0,8
1:0,36:1,08 pinho 0% aditivo	1601	0,61
1:0,36:1,08 pinho 3% aditivo SBR	1577	0,66
1:0,36:1,08 pinho 5% aditivo SBR	1591	0,81
1:0,36:1,08 pinho 7% aditivo SBR	1608	0,59
1:0,36:1,08 pinho 9% aditivo SBR	1602	0,5
1:0,36:1,08 pinho 3% aditivo PVA	1610	0,79
1:0,36:1,08 pinho 5% aditivo PVA	1576	0,8
1:0,36:1,08 pinho 7% aditivo PVA	1579	0,62
1:0,36:1,08 pinho 9% aditivo PVA	1616	0,8
1:0,28:0,65 casca de arroz 0% aditivo	1689	0,65
1:0,28:0,65 casca de arroz 3% aditivo SBR	1752	0,83
1:0,28:0,65 casca de arroz 5% aditivo SBR	1790	0,91
1:0,28:0,65 casca de arroz 7% aditivo SBR	1801	0,97
1:0,28:0,65 casca de arroz 9% aditivo SBR	1833	0,62
1:0,28:0,65 casca de arroz 3% aditivo PVA	1795	0,95
1:0,28:0,65 casca de arroz 5% aditivo PVA	1770	0,69
1:0,28:0,65 casca de arroz 7% aditivo PVA	1787	0,47
1:0,28:0,65 casca de arroz 9% aditivo PVA	1845	0,46

1:0,08:0,60 sisal 0% aditivo	2183	1,15
1:0,08:0,60 sisal 3% aditivo SBR	2167	1,18
1:0,08:0,60 sisal 5% aditivo SBR	2176	1,19
1:0,08:0,60 sisal 7% aditivo SBR	2177	1,06
1:0,08:0,60 sisal 9% aditivo SBR	2188	1,17
1:0,08:0,60 sisal 3% aditivo PVA	2177	1,22
1:0,08:0,60 sisal 5% aditivo PVA	2156	0,97
1:0,08:0,60 sisal 7% aditivo PVA	2144	1,14
1:0,08:0,60 sisal 9% aditivo PVA	2119	1,16
MARTINS 2010 resíduos de cortiça	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cal hidráulica	1600	0,8
CH 40% areia+R1	1195	0,292
CH 40% areia+R2	1151	0,284
CH+C 40% areia+R1	1238	0,444
CH+C 40% areia+R2	1199	0,357
CH+C 20% areia+40R1+40R3	919	0,221
CH+C 20% areia+40R2+40R3	846	0,198
CH+C 30R1+70R3	581	0,108
TAOKIL 2011	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
REF + 2% PÓ DE MADEIRA	1882	0,36
REF + 5% PÓ DE MADEIRA	1619	0,32
REF + 8% PÓ DE MADEIRA	1483	0,3
REF + 10% PÓ DE MADEIRA	1427	0,28
REF + 2% FIBRAS DE MADEIRA	1914	0,34
REF + 5% FIBRAS DE MADEIRA	1779	0,29
REF + 8% FIBRAS DE MADEIRA	1547	0,25
REF + 10% FIBRAS DE MADEIRA	1495	0,24
LEAL 2012 (cortiça)	Densidade Kg/m³	Condutividade W/m^o C
CC10 (cimento, 90% areia , 10% cortiça)	1911	1,47
CC20 (cimento, 80% areia, 20% cortiça)	1706	1,31
CC40 (cimento, 60% areia, 40% cortiça)	1668	1,06
CC40* (cimento, 60% areia, 40% cortiça)	1666	1,14
CC50 (cimento, 50% areia e 50% cortiça)	1589	0,74
CC50* (cimento, 50% areia, 50% cortiça)	1579	0,68
CC70 (cimento, 50% areia e 50% cortiça)	1377	0,54
CC70* (cimento, 30% areia, 70% cortiça)	1218	0,48
CC70** (cimento, 30% areia, 70% cortiça)	1205	0,41
CC80 (cimento, 20% areia, 80% cortiça)	1288	0,49
CC80* (cimento, 20% areia, 80% cortiça)	1243	0,47
FRADE et al 2012		
Argamassa de reboco com cortiça	910	0,163
Argamassa de alvenaria com cortiça	860	0,125
MELO 2014	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
ARGAM INDUSTRIAL+ 70% CORTIÇA	863	0,23
ARGAM INDUSTRIAL+ 100% CORTIÇA	642	0,14
ARGAM TRADICIONAL+ 85% CORTIÇA	855	0,27

Apêndice B - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de resíduos de poliméricos

FERREIRA2010	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa com 10% adição borracha	1750	1,5
Argamassa com 20% adição borracha	1625	1,45
Argamassa com 30% adição borracha	1500	1,35
FRADE 2010	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Substituição de Areia por EPS	340	0,09
IUCOLANO et al 2011	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Plastic sand, 0 %	1650	0,375
Plastic sand, 10 %	1420	0,275
Plastic sand, 15 %	1300	0,225
Plastic sand, 20 %	1230	0,2
Plastic sand, 25 %	1060	0,175
Plastic sand, 33 %	900	0,15
CORINALDESI 2011	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
PU 10% (água, cimento, 90% areia e 10% poliuretano)	1895	0,648
PU 30% (água, cimento, 70% areia e 30% poliuretano)	1621	0,598
PU 10% +LP (água, cimento, 90% cimento, 10%	2090	0,717
GONÇALVES 2012	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Substituição de areia por EPS	250	0,069
LEAL 2012	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
CE10 (cimento, 90% areia , 10% EPS)	1959	1,07
CE20 (cimento, 80% areia , 20% EPS)	1814	1,02
CE40 (cimento, 60% areia , 40% EPS)	1610	0,87
CE50 (cimento, 50% areia ,50% EPS)	1587	0,8
CE70 (cimento, 30% areia , 70% EPS)	1368	0,75
CE70*(cimento, 30% areia , 70% EPS)	1385	0,56
CE80 (cimento, 20% areia , 80% EPS)	1323	0,66
FADIEL et al 2014	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
10% pneu #20 a #10 (0,8 a 1,2mm)	1756	0,558
20% pneu #20 a #10 (0,8 a 1,2mm)	1562	0,514
30% pneu #20 a #10 (0,8 a 1,2mm)	1430	0,505
40% pneu #20 a #10 (0,8 a 1,2mm)	1269	0,492
10% pneu mistura duas granulometrias	1716	0,563
20% pneu mistura duas granulometrias	1497	0,544
30% pneu mistura duas granulometrias	1381	0,523
40% pneu mistura duas granulometrias	1238	0,514
10% pneu #30 a #20 (0,4 a 0,8mm)	1669	0,593
20% pneu #30 a #20 (0,4 a 0,8mm)	1440	0,578
30% pneu #30 a #20 (0,4 a 0,8mm)	1305	0,566
40% pneu #30 a #20 (0,4 a 0,8mm)	1106	0,538
MELO 2014	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
ARGAM INDUSTRIAL+ 100% EPS	237	0,06
ARGAM INDUSTRIAL+ 70% EPS	432	0,10
ARGAM TRADICIONAL+ 85% EPS	683	0,23

Apêndice C - Condutividade térmica de argamassas contendo partículas de resíduos minerais

IRAM 11601:2002,	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa para reboco de juntas (interior)	1900	0,93
Argamassa de cimento e areia	1900	0,89
Argamassa com perlita	600	0,19
Argamassa de gesso e areia	1500	0,65
Argamassa de cal e gesso	1200	0,64
NCh 853.Of2007, INN-Chile	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cal e bastardos	1600	0,87
NBR 15220, ABNT, 2008	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de gesso (ou cal e gesso)	1200	0,7
AKUTSU et al 1987	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cal_1	1600	0,7
Argamassa de cimento e areia_1	1865	0,72
Argamassa de cimento e areia_2	1790	0,79
Argamassa de gesso com agregado de areia	1680	0,806
Argamassa de gesso com agregado de perlita	720	0,216
Argamassa de gesso com agregado de vermiculita	720	0,245
CLARKE, 1990	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cimento 2	1648	0,719
Argamassa de cimento 3	1900	0,93
Argamassa de cimento 5	1900	0,93
Cimento de alvenaria: argamassa de areia 1:2 mix, 3.4%	1928	1,01
Cimento de alvenaria: argamassa de areia 1:4 mix, 2.3%	1878	0,89
Cimento de alvenaria: argamassa de areia 1:5 mix, 2.4%	1858	0,85
Cimento de alvenaria: argamassa de areia 1:6 mix, 2.1%	1810	0,8
Cimento de alvenaria: argamassa de areia 1:7 mix, 1.7%	1776	0,77
Cimento: argamassa de areia 1:2 mix, 3.4% MC by vol.	2041	1,08
Cimento: argamassa de areia 1:3 mix, 3.4% MC by vol.	1998	0,99
Cimento: argamassa de areia 1:4 mix, 3.4% MC by vol.	1949	1,03
Cimento: argamassa de areia 1:6 mix, 3.4% MC by vol.	1893	0,97
Cimento: argamassa de areia 1:7 mix, 3.4% MC by vol.	1844	0,88
Cimento: argamassa de areia 1:8 mix, 3.4% MC by vol.	1852	0,79
INCROPERA E DeWITT, 1993	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de gesso branco e vermiculita	720	0,25
STANCATO, 2000	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Areia fina siltosa	1828	0,946
Areia média quartzosa	2001	1,175
Areia fina quartzosa	1828	0,946
SARAIVA et al 2001	Densidade Kg/m³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa colante A	1680	0,65
Argamassa colante B	1890	0,84

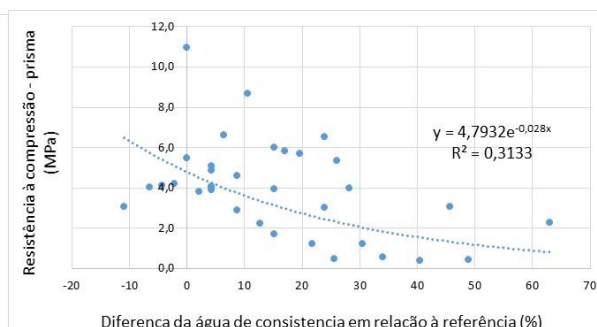
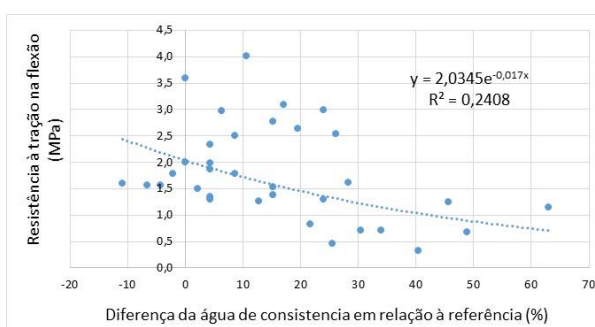
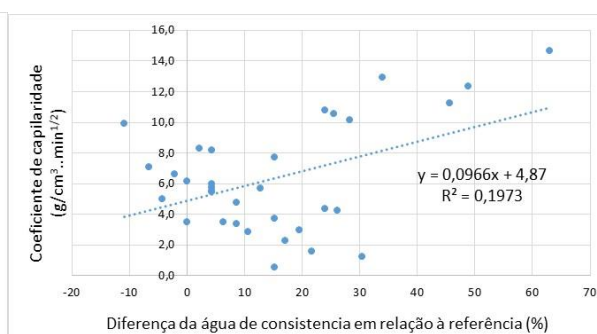
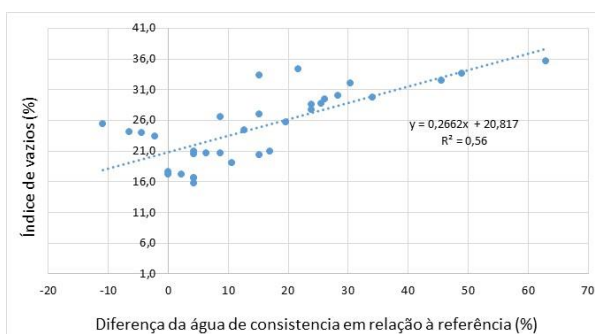
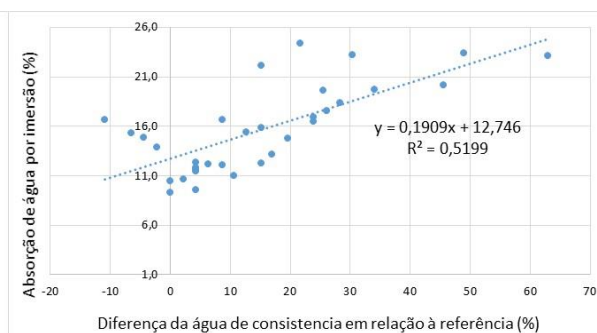
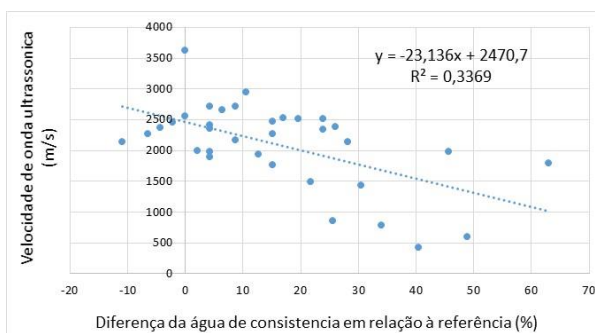
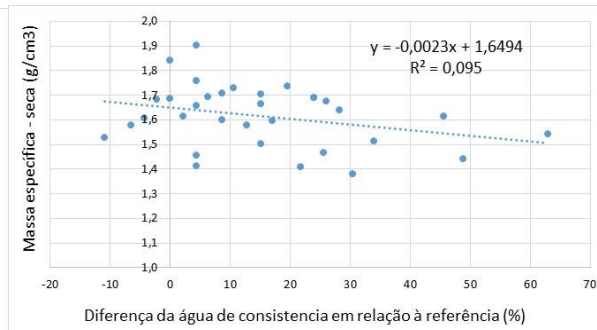
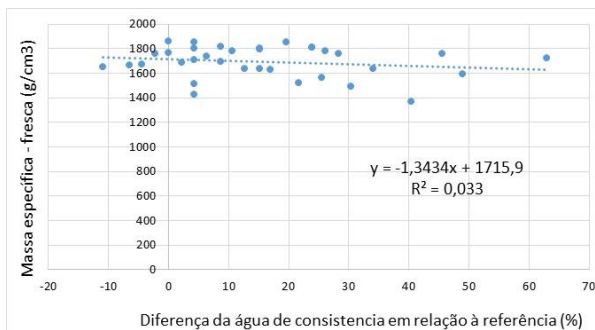
FROTA e SCHIFFER, 2001	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cal e cimento (ou de cimento)	1600	0,65
	1800	0,85
	2000	1,05
Argamassa de gesso (ou de cal e gesso)	1000	0,53
	1200	0,7
FERREIRA et al 2007 argila com diferentes massas específicas	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
argam com argila expandida 300	450	0,16
argam com argila expandida 340	500	0,16
argam com argila expandida 360	550	0,17
argam com argila expandida 430	1000	0,3
argam com argila expandida 700	1100	0,34
MARTINS 2010	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
Argamassa de cal hidraulica	1600	0,8
TINKER E O'ROURKE, 2011	Densidade Kg/m ³	Condutividade W/(m.K)
Cimento, cal e areia 1:1:6	1783	0,846
cimento e areia/resíduos legais carvão 1:5,5	1245	0,373
cimento e areia/cinzas de combustível pulverizado 1:5,5	1374	0,418
Cimento, areia/escória de alto forno	1750	0,393
cimento e areia/pedra-pomes 1:5,5	1239	0,318
cimento, cal e resíduos legais de carvão	1199	0,298
cimento, cal e areia/cinzas de comb. Pulv. 1:1:6	1219	0,291
cimento, cal e areia/escória de alto forno	1532	0,331
cimento, cal e areia/pedra-pomes 1:1;6	960	0,248
cimento, cal e areia/escória de alto forno e incorporador de	1574	0,328
cimento, cal e areia/pedra-pomes 1:1;6 e incorporador de ar	1143	0,254

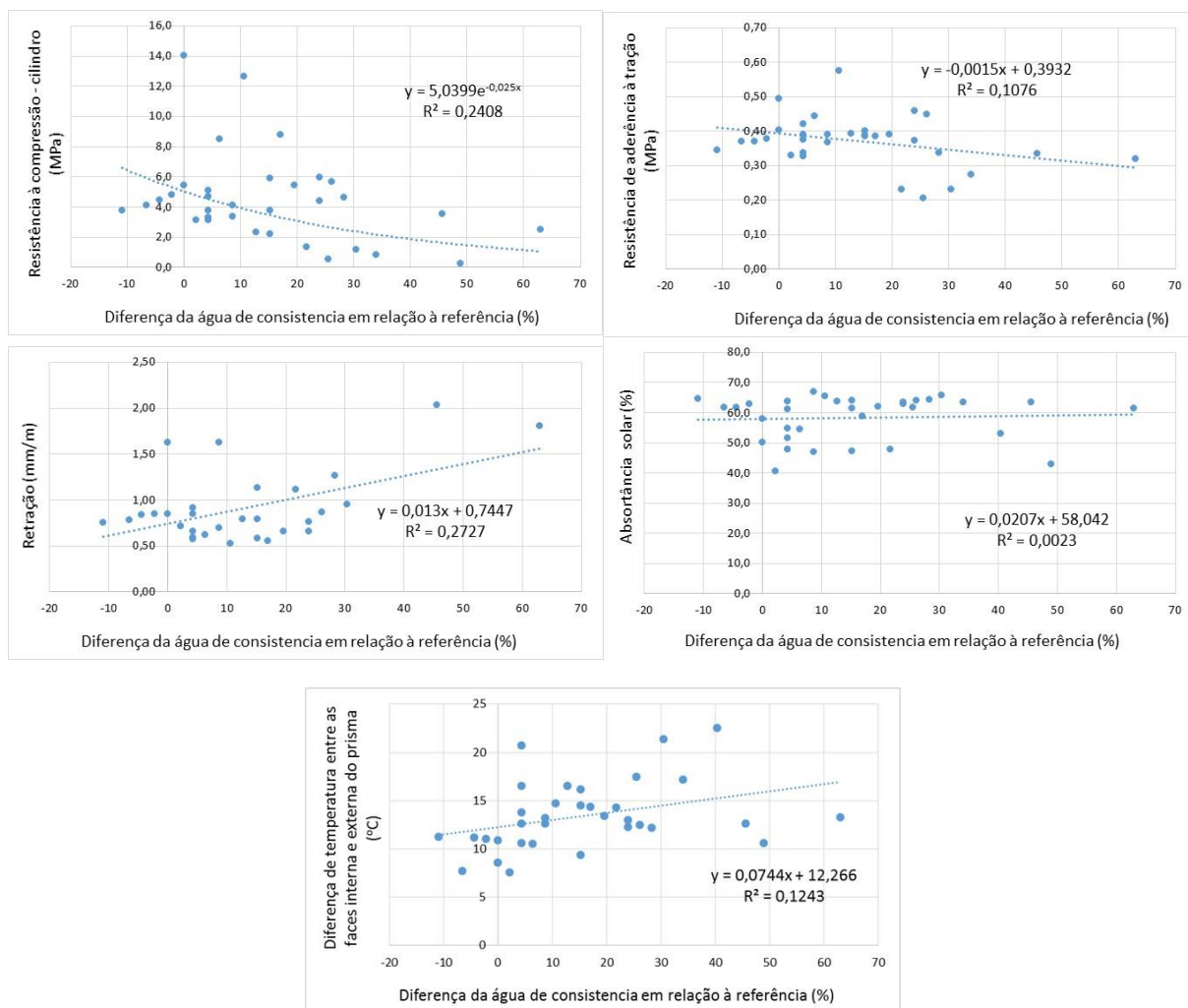
Apêndice D - Ensaios com a argamassa fresca

TRAÇO	MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³)	CONSISTÊNCIA (mm)	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA (%)
REFERENCIA 1	1765,0	255,0	92,0
10% PET	1709,8	258,0	96,0
20% PET	1690,7	247,0	94,0
30% PET	1513,9	243,0	96,0
40% PET	1430,2	246,0	96,0
10% EPS	1759,1	250,0	90,0
20% EPS	1671,2	249,0	88,0
30% EPS	1667,4	251,0	86,0
40% EPS	1653,2	253,0	82,0
10% PNEU	1696,4	248,0	100,0
20% PNEU	1640,3	250,0	106,0
30% PNEU	1519,0	252,0	112,0
40% PNEU	1495,3	251,0	120,0
10% CV	1808,4	248,0	114,0
20% CV	1763,2	241,0	118,0
30% CV	1759,7	253,0	134,0
40% CV	1727,4	253,0	150,0
10% RCD	1852,3	249,0	110,0
20% RCD	1793,6	252,0	106,0
30% RCD	1809,4	243,0	114,0
40% RCD	1778,3	256,0	116,0
10% PÓ DE VIDRO	1805,5	248,0	96,0
20% PÓ DE VIDRO	1857,2	253,0	96,0
30% PÓ DE VIDRO	1821,3	260,0	100,0
40% PÓ DE VIDRO	1801,8	250,0	106,0
REFERENCIA 2	1863,8	255,0	67,1
5% PÓ DE SERRA	1785,3	246,0	74,3
10% PÓ DE SERRA	1629,8	245,0	78,6
15% PÓ DE SERRA	1640,6	244,0	90,0
20% PÓ DE SERRA	1592,8	241,0	100,0
5% PALHA DE ARROZ	1740,5	252,0	71,4
10% PALHA DE ARROZ	1637,2	246,0	75,7
15% PALHA DE ARROZ	1562,6	254,0	84,3
20% PALHA DE ARROZ	1370,4	252,0	94,3

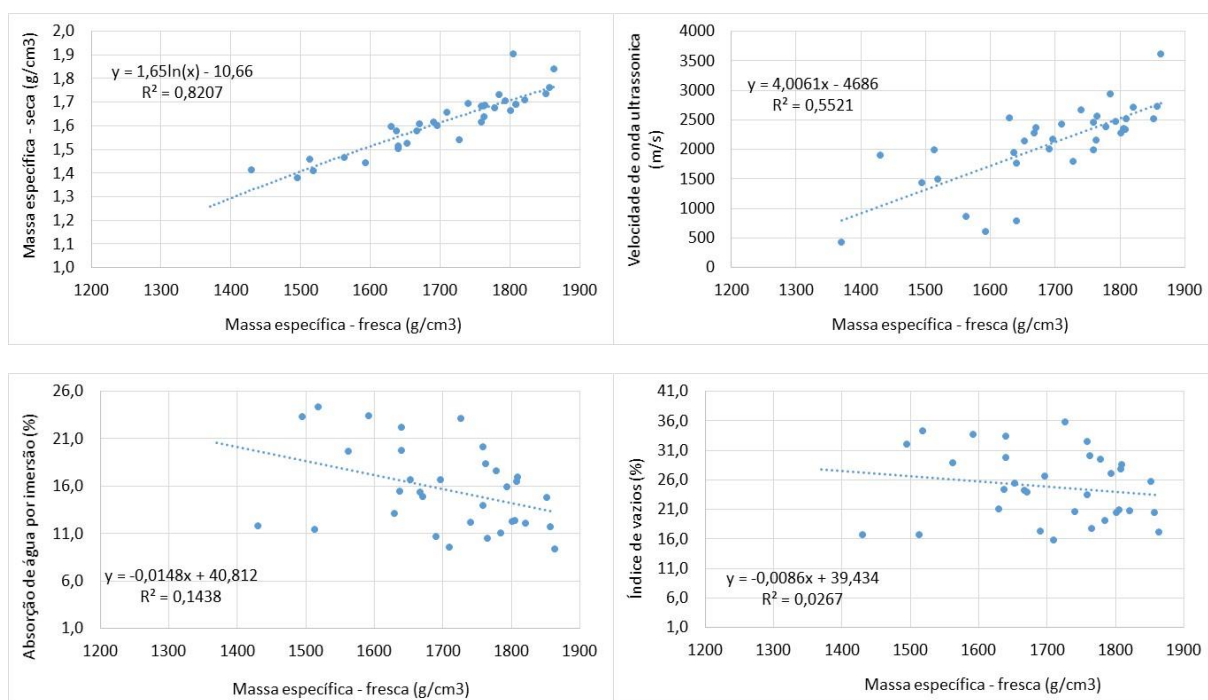
Apêndice E - Curvas de regressão não linear

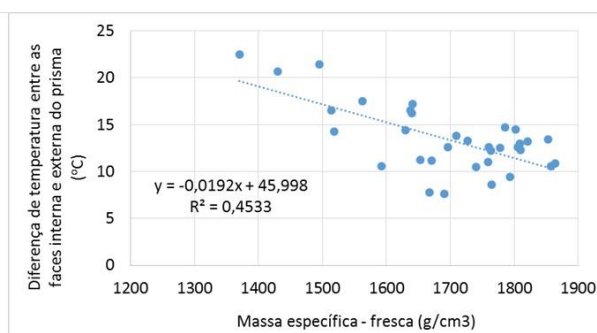
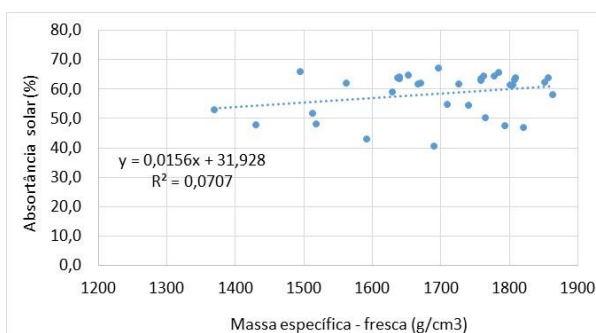
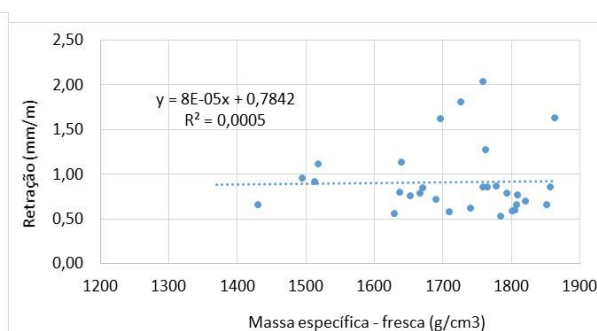
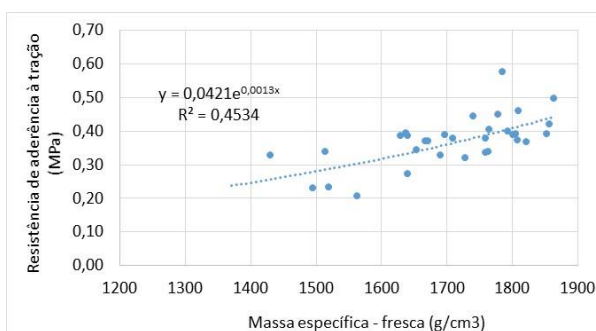
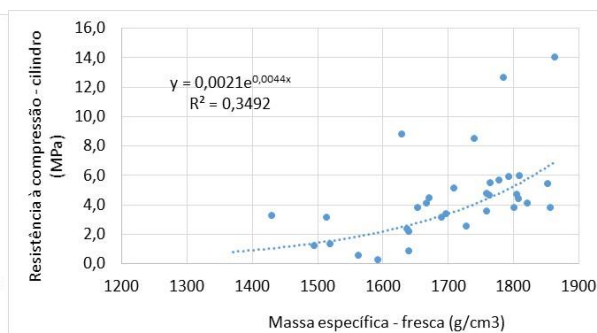
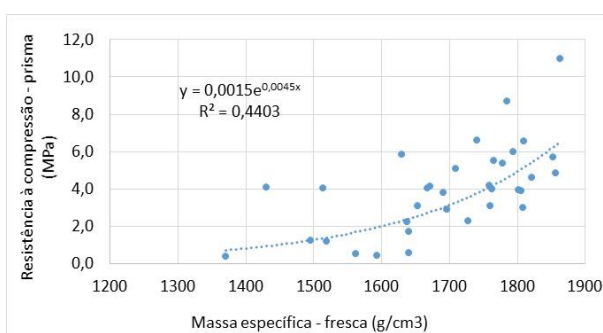
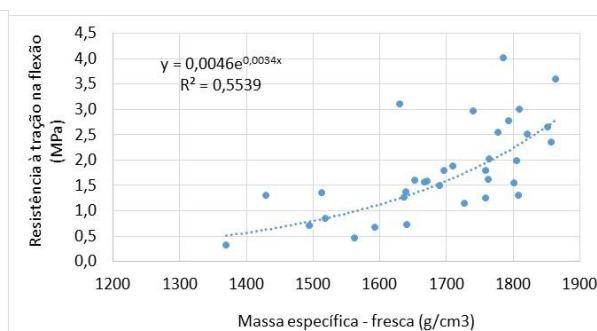
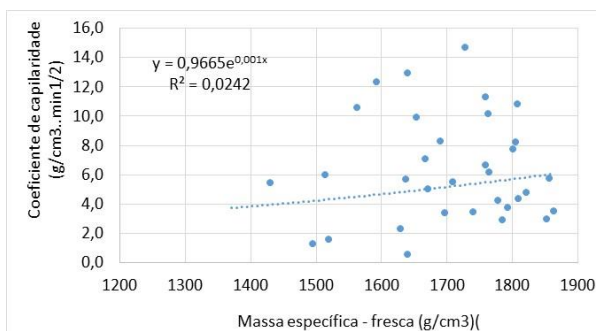
Apêndice E.1 - Regressão não-linear com a variação da água de consistência



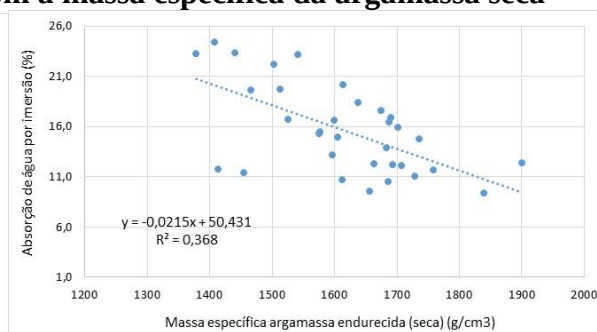
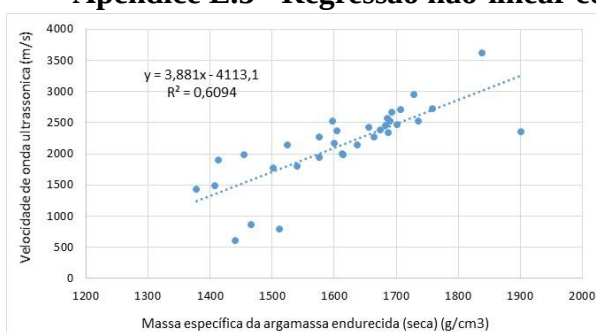


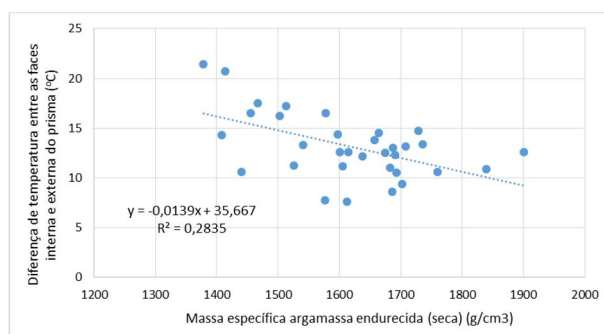
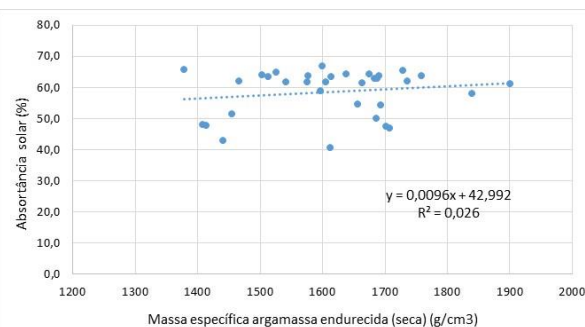
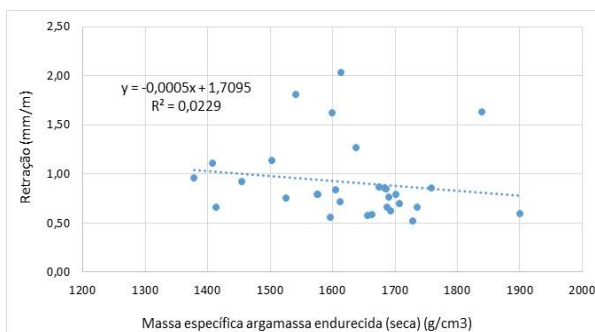
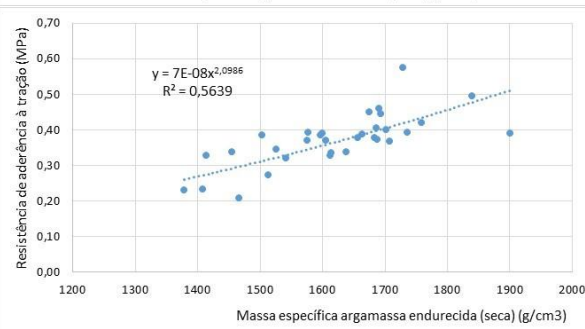
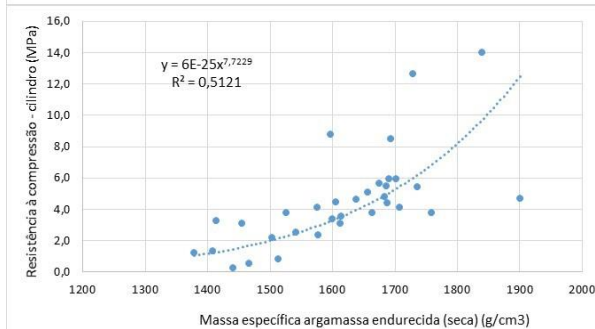
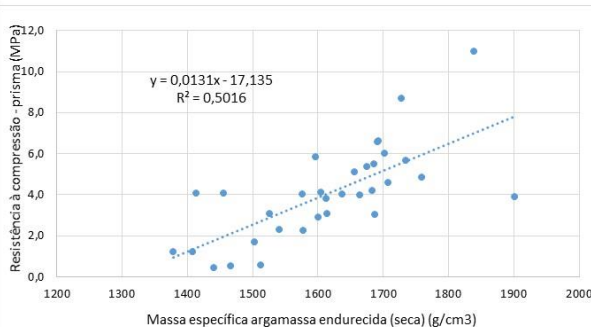
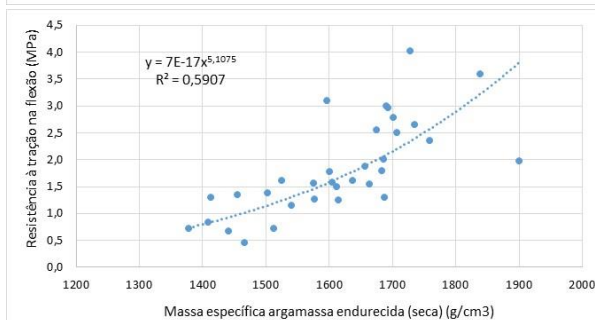
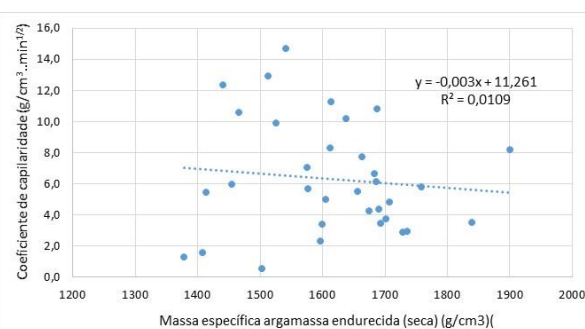
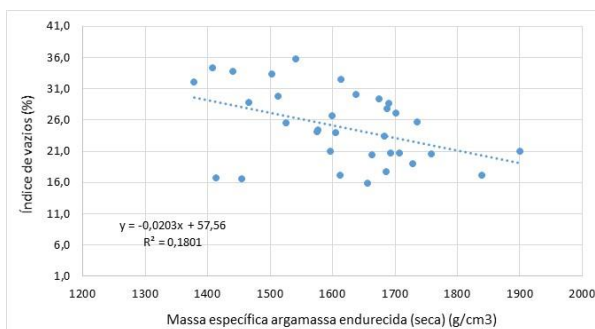
Apêndice E.2 - Regressão não-linear com a massa específica fresca



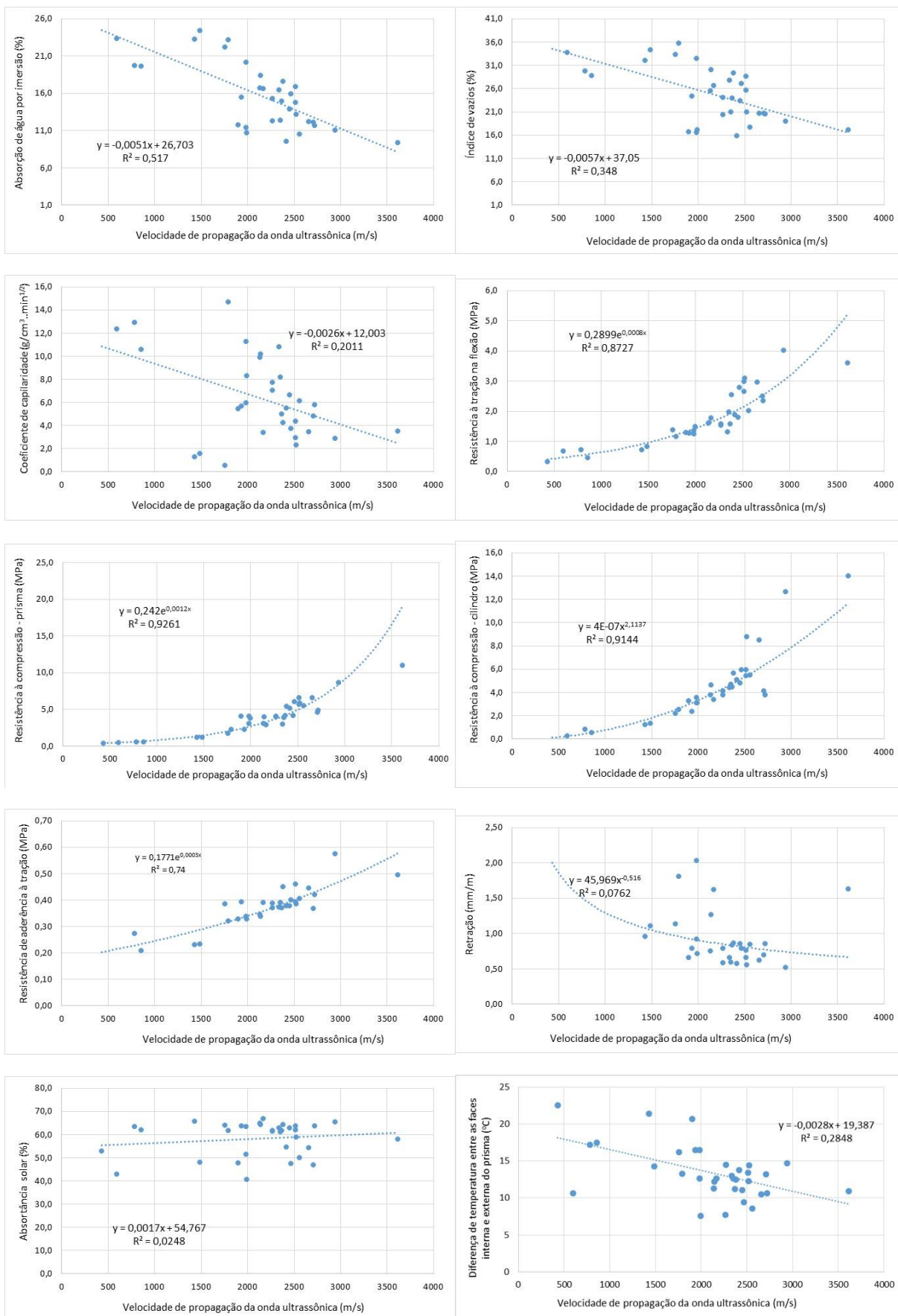


Apêndice E.3 - Regressão não-linear com a massa específica da argamassa seca

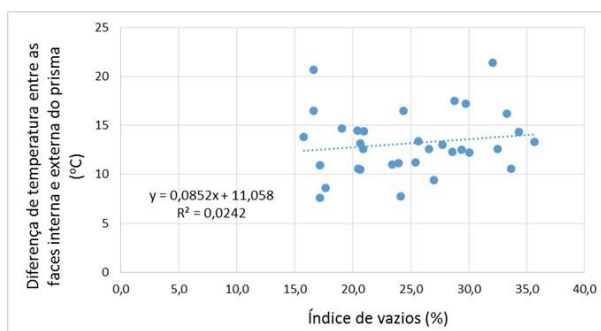
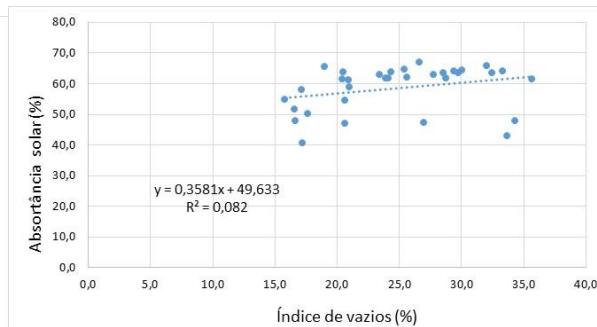
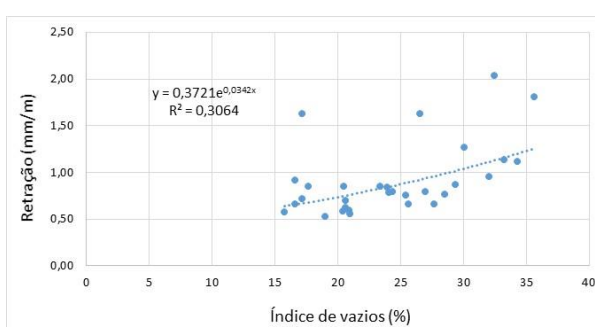
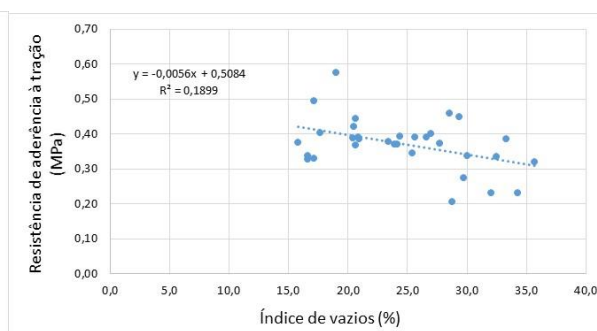
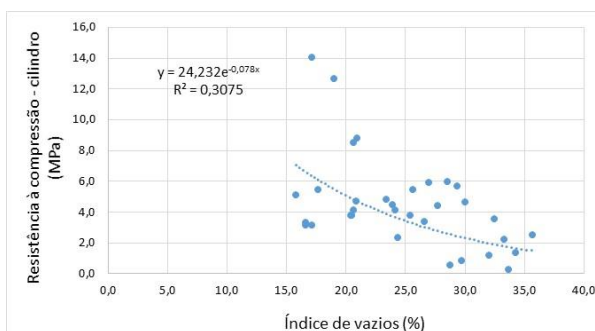
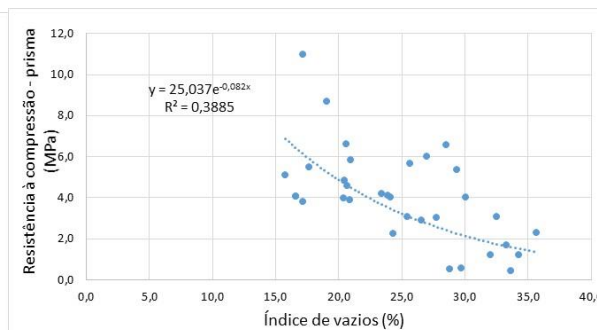
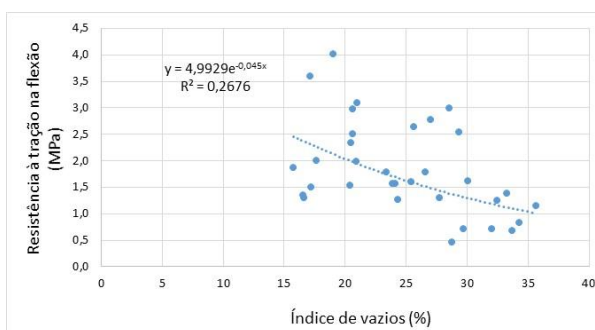
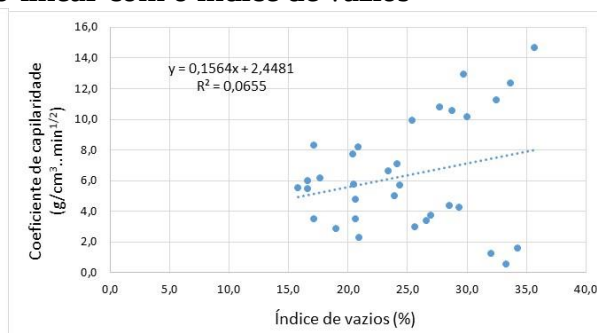
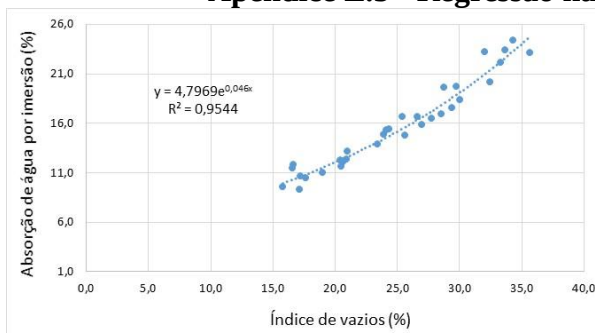




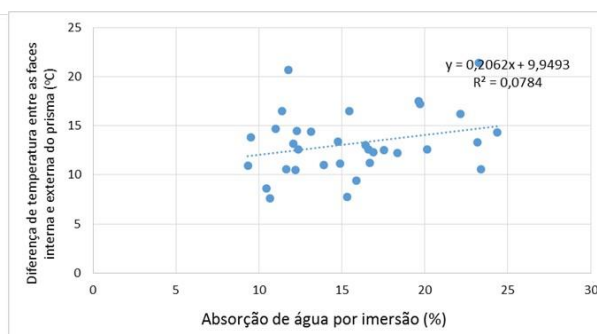
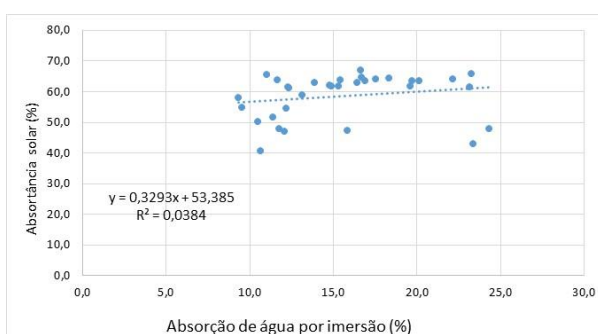
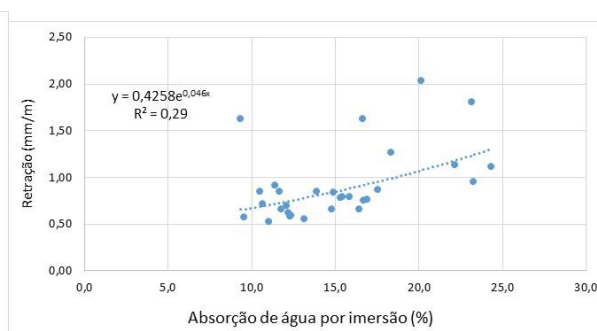
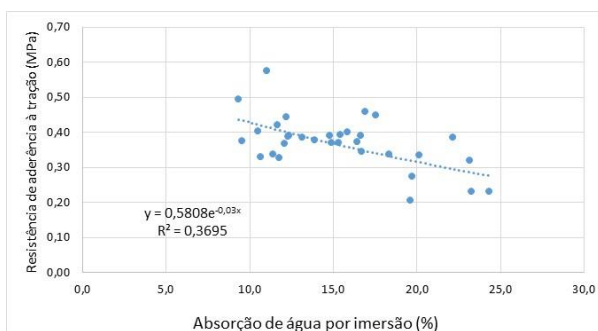
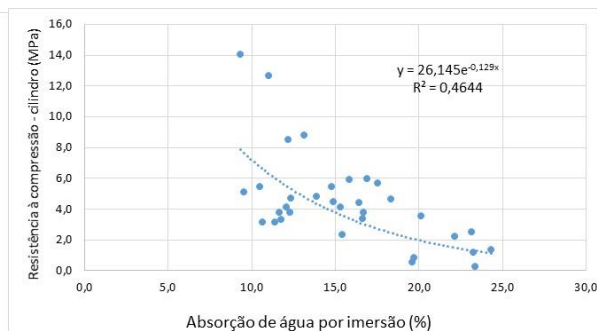
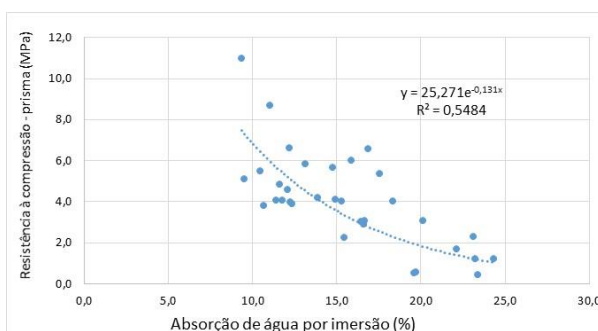
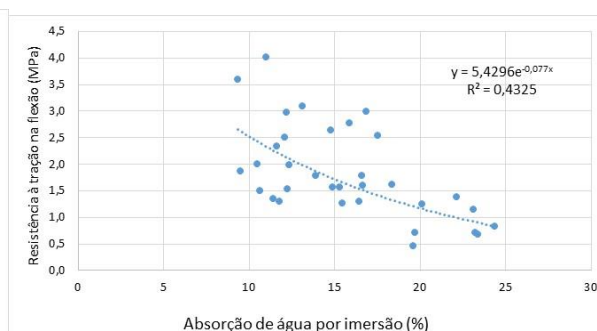
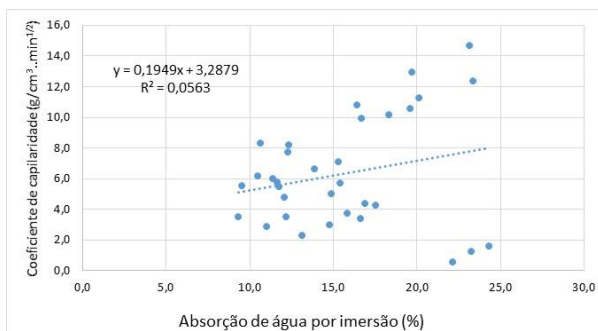
Apêndice E.4 - Regressão não-linear com a velocidade de onda ultrassônica



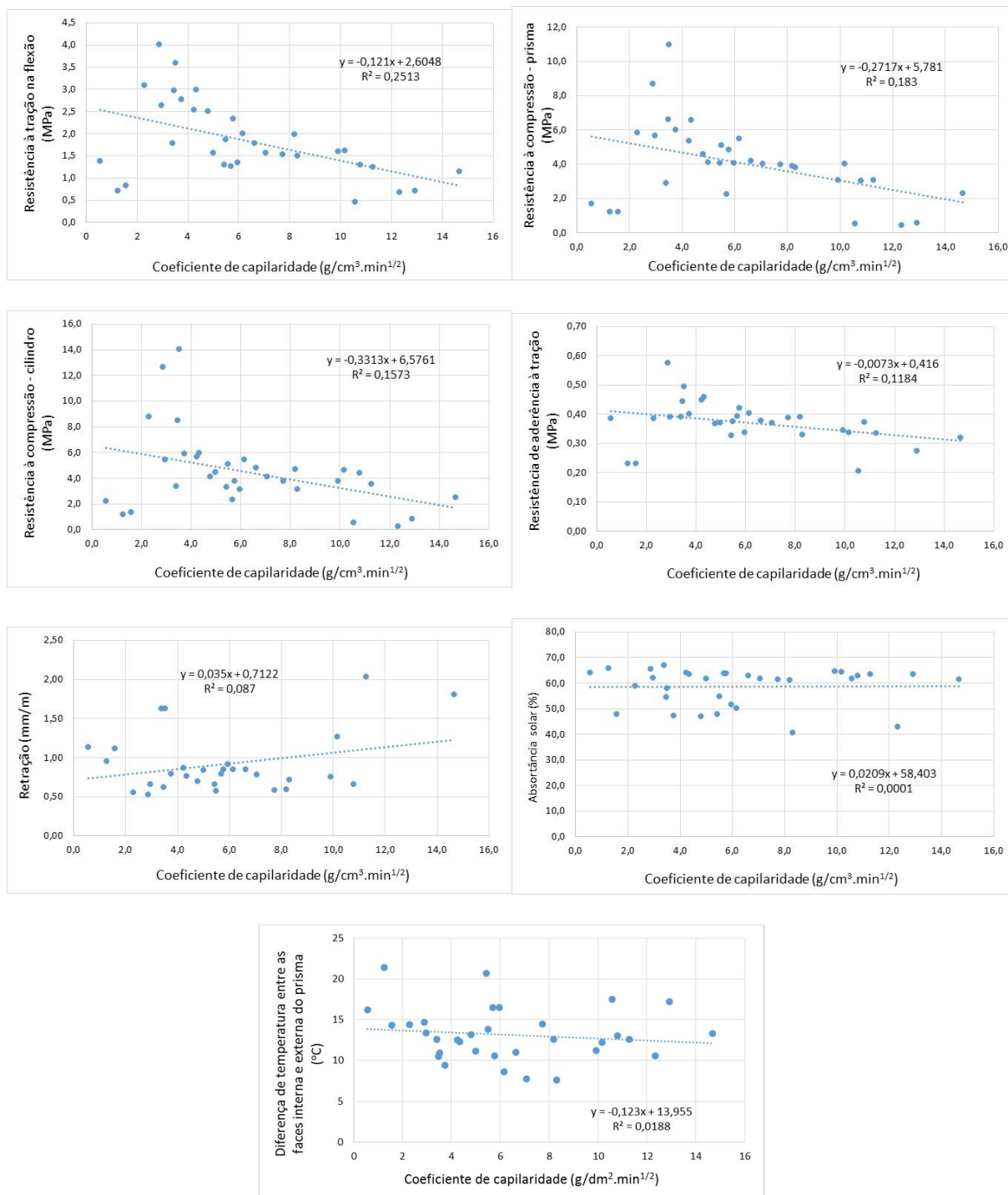
Apêndice E.5 - Regressão não-linear com o índice de vazios



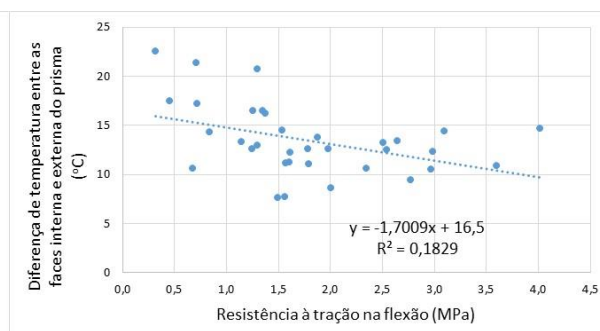
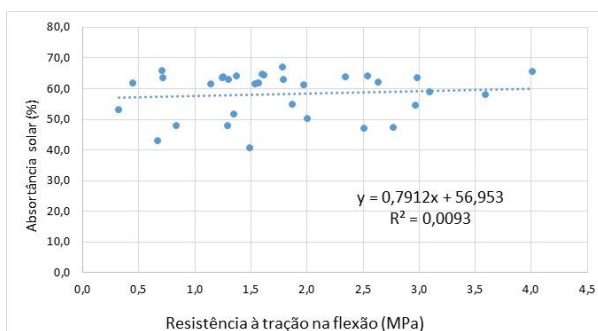
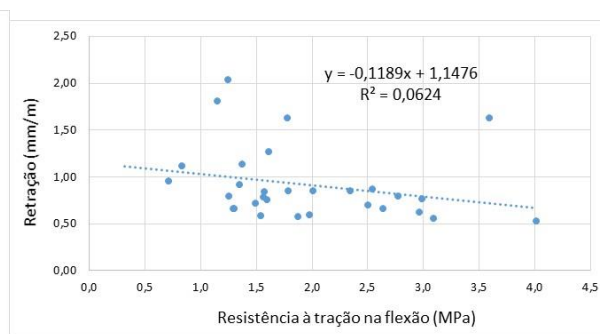
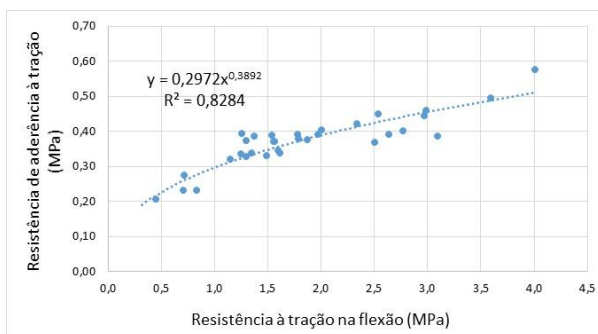
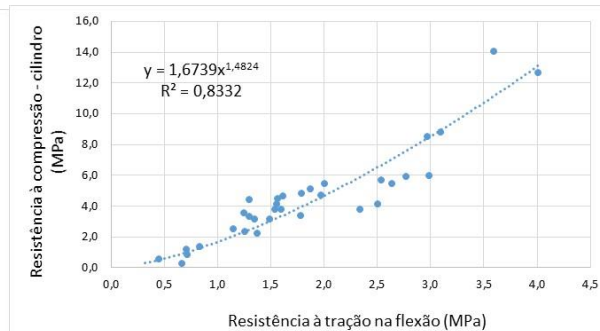
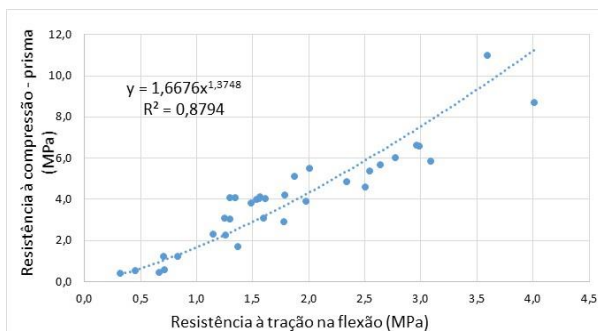
Apêndice E.6 - Regressão não-linear com a absorção de água por imersão



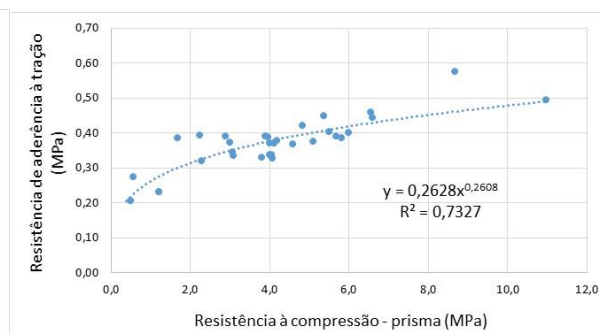
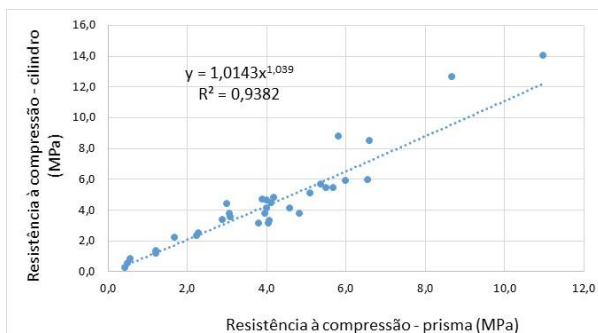
Apêndice E.7 - Regressão não-linear com o coeficiente de capilaridade

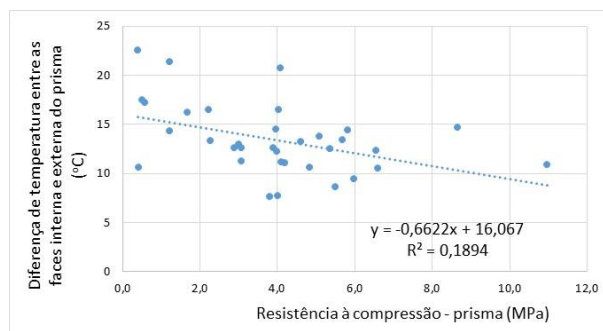
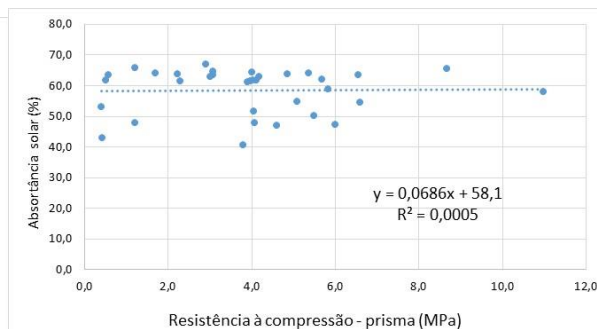
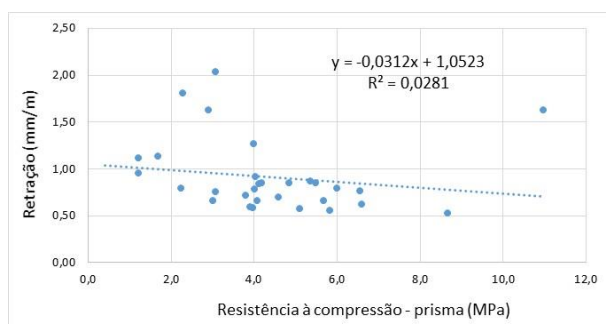


Apêndice E.8 - Regressão não-linear com a resistência à tração na flexão

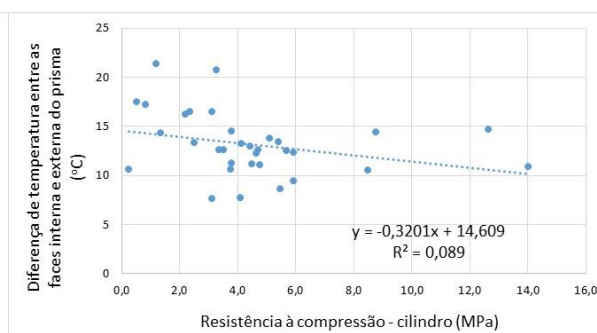
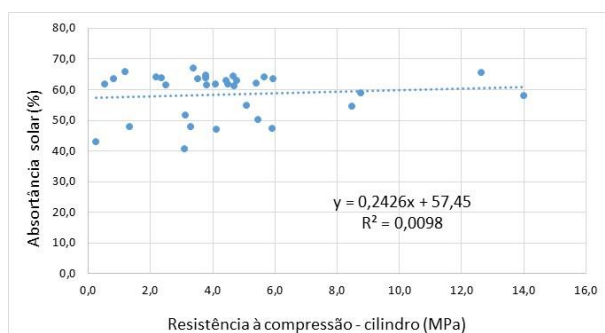
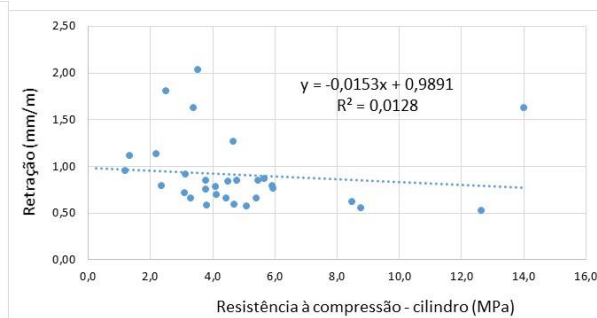
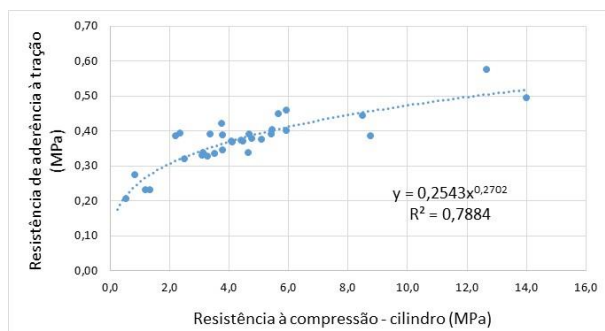


Apêndice E.9 - Regressão não-linear com a resistência à compressão ã prisma

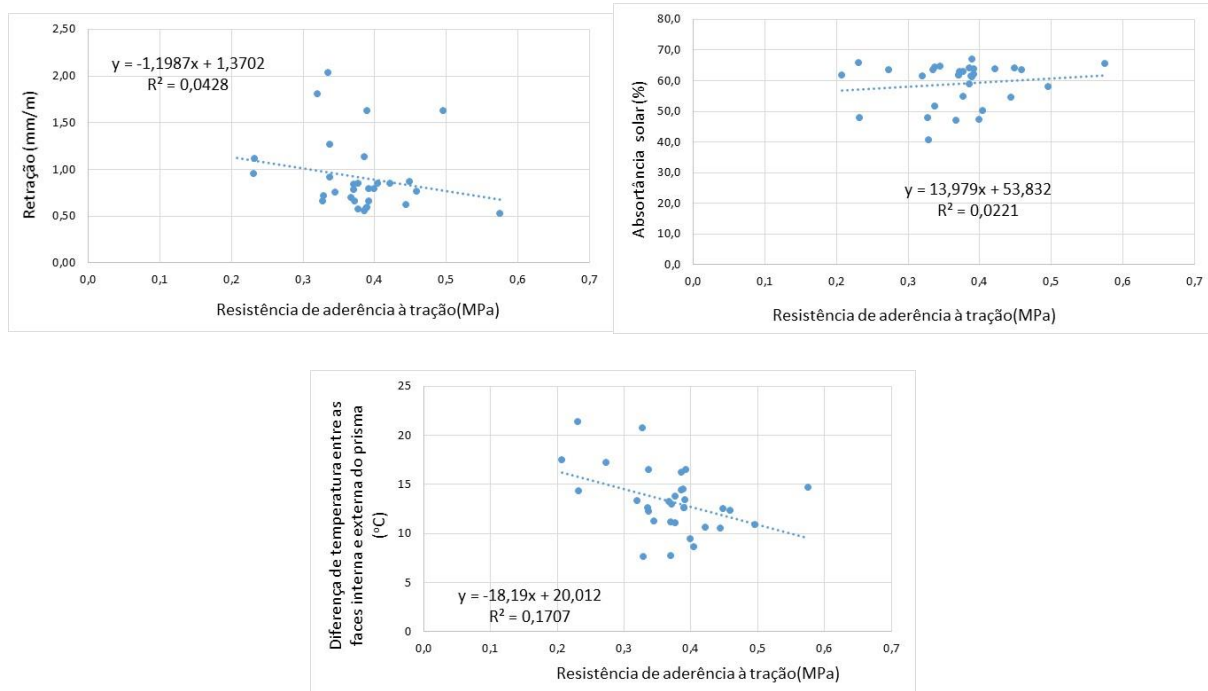




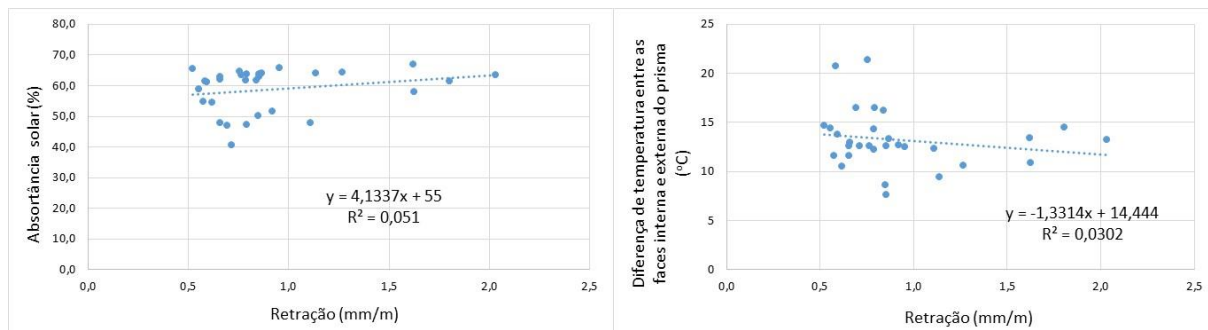
Apêndice E.10 - Regressão não-linear com a resistência à compressão ï cilindro



Apêndice E.11 - Regressão não-linear com a resistência de aderência à tração



Apêndice E.12 - Regressão não-linear com a variação dimensional (retração)



Apêndice E.13 - Regressão não-linear com a absorvância solar

