

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO COM PROPRIEDADES
TERMOACÚSTICAS, PRODUZIDA A PARTIR DE
VERMICULITA EXPANDIDA E BORRACHA RECICLADA DE PNEUS.

Cynthia Leonis Dias Cintra

São Carlos
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO COM PROPRIEDADES
TERMOACÚSTICAS, PRODUZIDA A PARTIR DE
VERMICULITA EXPANDIDA E BORRACHA RECICLADA DE PNEUS.

Cynthia Leonis Dias Cintra

Tese apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências e
Engenharia de Materiais como
requisito parcial à obtenção do título
de DOUTORA EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Prof. Dr. João Baptista Baldo
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Ernandes Paiva Macedo
Agência Financiadora: CAPES

São Carlos
2013

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

C575ar Cintra, Cynthia Leonis Dias.
 Argamassa para revestimento com propriedades
 termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida
 e borracha reciclada de pneus / Cynthia Leonis Dias Cintra.
 -- São Carlos : UFSCar, 2014.
 154 p.

 Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
 2013.

 1. Argamassa. 2. Vermiculita. 3. Borracha reciclada de
 pneus. 4. Revestimentos. I. Título.

CDD: 620.135 (20^a)

DEDICATÓRIA

Dedico minha parcela de perseverança e minha firme conduta em busca dos meus sonhos aos meus pais Diva (in memoriam) e Dyrceu (in memoriam).

Aos mestres que passaram e aos que passarão pela minha vida, desde a minha formação na alfabetização até os deste doutorado.

A mim pela coragem de enfrentar este grande desafio do doutorado, em um momento muito delicado da minha vida. Driblei adversidades na saúde e algumas de cunho pessoal, passando inclusive, pela lastimável perda de meus pais. Por isto, dedico esta conquista a Cynthia bebê, a criança, a menina, a adolescente e a adulta.

VITAE DA CANDIDATA

Mestre em Saúde e Ambiente pela Universidade Federal do Maranhão (2008).
Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Instituto Federal do Maranhão (2000).

Especialista em Metodologia do Ensino Superior pela Universidade Federal do Maranhão (1998).

Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas (1981).

Professora do Departamento de Construção Civil do Instituto Federal do Maranhão – Campus Monte Castelo - São Luis – Maranhão.

Professora do curso de Arquitetura e Urbanismo na Universidade CEUMA – São Luis – Maranhão.

Coordenadora da especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho da Universidade CEUMA – São Luis – Maranhão.

Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine.

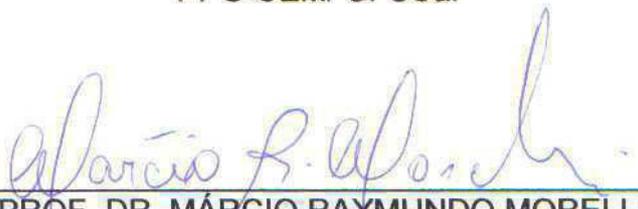
E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.

Coríntios 13:1-3

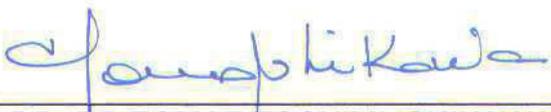
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
CYNTHIA LEONIS DIAS CINTRA
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 19 DE DEZEMBRO DE 2013.



PROF. DR. JOÃO BAPTISTA BALDO
ORIENTADOR
PPG-CEM/ UFSCar



PROF. DR. MÁRCIO RAYMUNDO MORELLI
PPG-CEM/UFSCAR



PROF. DR. DR. TOMAZ TOSHIMI ISHIKAWA
PPG- CEM/UFSCAR



PROF^a. DR^a. CONCEIÇÃO DE MARIA P. CORREIA
INSTITUTO FEDERAL DO MARANHÃO



PROF. DR. ARNALDO CARLOS MORELLI
INSTITUTO FEDERAL DE SÃO PAULO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Diva (in memorian) e Dyrceu (in memorian), que me fizeram ser o que sou, pela dedicação, criação amorosa e por minha formação, com a mais profunda admiração e respeito.

À minha grande amiga Van que trilhou comigo os caminhos desta longa conquista, minha profunda gratidão.

A minha família que sempre torceu por mim na minha incessante busca pelo conhecimento.

Ao Prof. Dr. João Baptista Baldo que, com seriedade, sabedoria e competência profissional, transmitiu seus conhecimentos e experiências na orientação nesta tese.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Antonio Ernandes Macedo Paiva pelo apoio durante todo o doutorado.

Aos professores, Dr. Márcio Raymundo Morelli, Dr. Tómasz Toshimi Ishikawa, Dr^a. Conceição de Maria Pinheiro Correia e Dr. Arnaldo Carlos Morelli por aceitarem fazer parte da banca examinadora e através de seus conhecimentos poder também contribuir com esse trabalho.

Ao Prof. Dr. Wilson Nunes dos Santos pelo apoio nos ensaios térmicos

Aos Prof. Dr. Claudio Cardoso e Prof. Dr. Walter Libardi que viabilizaram a realização dos ensaios acústicos.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da UFSCar, em especial aos servidores Geraldo, Guilherme, Silmara, Fernando e Marcelo.

Ao técnico Luis Staffa (Lula), que muito me ajudou na realização dos ensaios.

Aos Bolsistas Caroline Zambone e Hugo Muniz Bolognesi pelo apoio nos ensaios de absorção acústicos.

Aos técnicos do Laboratório do Dema – UFSCar, Binoto e Leomar pela colaboração na confecção de moldes e formas para alguns ensaios.

Aos técnicos do Laboratório do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP – São Carlos, Paulo, Sergio e Paulo Alberto (Tico) pela colaboração na disponibilização de equipamentos para alguns ensaios.

À empresa Brasil Minérios Ltda, pelo fornecimento de alguns materiais e a viabilização de alguns ensaios físicos e mecânicos.

A CAPES, pela bolsa de doutorado e pelo financiamento da pesquisa.

Ao Centro Multidisciplinar para o Desenvolvimento de Materiais Cerâmicos (CMDMC) e ao Centro de Pesquisa, Inovação e Difusão (CEPID)/Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Aos coordenadores do DINTER Prof. Dr. Aluísio Alves Cabral Júnior e ao Prof. Dr. Tómas Toshimi Ishikawa.

Ao Instituto Federal do Maranhão, em especial aos colegas do Departamento de Construção Civil, Campus Monte Castelo, pelo incentivo em todas as etapas do doutorado.

A todos que participaram ajudando a tecer “pedaços” do que agora apresento nesta tese, meus sinceros agradecimentos.

Por fim, fecho este momento de agradecimento reconhecendo o poder infinito de Deus na minha vida, o arquiteto do universo, fonte de toda criação e sabedoria, sem ele nada seria possível. Agradeço por estar presente na minha vida, protegendo, iluminando e abençoando sempre as minhas escolhas.

A todos, o meu sincero OBRIGADA.

RESUMO

A utilização da vermiculita expandida em argamassas leves para alvenaria é uma prática comum com vistas a isolamento termoacústico. Esta Tese teve como objetivo principal, a incorporação de agregados de borracha reciclada de pneus em argamassas leves, substituindo partes de vermiculita e areia. Com isso, visou-se a proteção de recursos naturais e diminuição de impacto ambiental, através da reciclagem em quantidade apreciável, de um produto de descarte muito complexo (pneus usados). Usando-se a normalização pertinente, foram investigadas seis composições: dois traços de argamassa leve utilizando-se cimento, cal, areia e vermiculita expandida; dois traços de argamassa leve contendo cimento, cal, areia, vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus. Para mostrar diferenças marcantes, também foram investigadas, um traço da argamassa tradicional densa (cimento:cal:areia) e uma argamassa industrializada densa (cimento:cal:areia+aditivos especiais). A substituição de partes da vermiculita e da areia por agregados de borracha reciclada de pneus foi levada até 45% em massa desses agregados, na composição global da argamassa leve. Os resultados mostram que a inclusão dos mesmos, diminuiu a retração, promoveu um aumento razoável da resistência à compressão e um aumento acentuado na resistência de aderência das argamassas leves. Outro fator positivo foi que a presença de agregados de borracha não promoveu alteração na condutividade térmica e nem na absorção acústica, comparativamente aos níveis dessas propriedades essenciais, apresentados pelas argamassas leves sem os agregados reciclados. Os resultados permitem concluir, que as argamassas leves, contendo agregados de borracha reciclada de pneus substituindo partes da areia e da vermiculita, caracterizam uma contribuição nova na área de elementos construtivos sustentáveis, indicando viabilidade de emprego na construção civil, atendendo às exigências da normalização e cumprindo o objetivo alvo desta Tese.

ABSTRACT

MASONRY MORTAR WITH THERMO-ACUSTIC INSULATING PROPERIES BASED ON VERMICULITE AND RECYCLED RUBBER AGGREGATES FROM WASTED TIRES

Light weight masonry mortars containing vermiculite are commonly used when one wants thermal and acoustic insulation. This Thesis investigated the incorporation of recycled used tires rubber crumbs as light weight mortar aggregates, in substitution of parts of vermiculite and sand. The main objective was based on the natural resources protection and decrease in environment impact, by means of the recycling in large quantities, of a problematic dischargeable product (used tires). By means of the pertinent standards, six masonry mortar compositions were investigated; two compositions of light weight masonry mortars containing cement, lime, sand and vermiculite, two compositions containing cement, lime, sand, vermiculite and rubber crumbs from recycled tires. In addition, to have a broader comparative ground ,a traditional mortar (cement+lime+sand) and an industrialized mortar (cemet+lime+sand+additives), not of the light weight class, were also investigated. The substitution of parts of vermiculite and sand by rubber recycled aggregates was taken to 45wt% of the whole light weight mortar mass. The results showed that the incorporation of rubber aggregates, promoted a decrease in the mortar drying shrinkage, a reasonable increase in the compressive strength and an expressive increase in the adherence strength of the light mortars. Another positive factor was that the inclusion of the rubber aggregates did not caused any sensible alteration neither in the thermal conductivity nor on the acoustic absorption, comparatively to the values presented by the light mortars without rubber aggregates. It was concluded that the light weight mortars containing recycled rubber aggregates, constitute a viable new contribution to the sustainable constructive elements field, fulfilling this Thesis main objective.

PUBLICAÇÕES

CINTRA, C.L.D., PAIVA, A. E. M., DOS SANTOS, W. N. E BALDO J.B. Argamassa térmica utilizando vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS. **ANAIS** CBECIMAT - referência 106-120. Joinville – SC. Novembro, 2012.

CINTRA, C.L.D., PAIVA, A. E. M. DOS SANTOS, W. N.e BALDO J.B. Masonry Light Weight Mortars Containing Vermiculite and Rubber Crumbs of Recycled Tires .INTERCERAM. **Revista**. Aceito em 2013.

CINTRA, C.L.D., PAIVA, A. E. M. DOS SANTOS, W. N.e BALDO J.B. Estudo comparativo entre argamassas para alvenaria utilizando vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus. In: 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica, referência 13-064. Natal(RN) de 18 a 23 de maio de 2013. **ANAIS**

CINTRA, C.L.D., PAIVA, A. E. M. DOS SANTOS, W. N.e BALDO J.B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - propriedades relevantes. In Revista Cerâmica. **Revista**. Aceito em 12/10/2013.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	BANCA EXAMINADORA.....	i
	AGRADECIMENTOS.....	iii
	RESUMO.....	v
	ABSTRACT.....	vii
	PUBLICAÇÕES	ix
	ÍNDICE DE ASSUNTOS.....	xi
	ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
	SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxi
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivo Geral.....	3
1.3	Objetivos Específicos.....	3
1.4	Relevância e justificativa.....	4
1.5	Originalidade da proposta.....	5
1.6	Metodologia utilizada.....	5
1.7	Estrutura da tese.....	6
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1	Meio Ambiente, Resíduos Sólidos e Pneus.....	7
2.2	Revestimentos – Argamassas.....	14
2.2.1	Classificações das Argamassas.....	17
2.2.2	Funções e propriedades das argamassas de revestimentos.....	19
2.2.3	Materiais das Argamassas – Cimento e Cal.....	20
2.3	Agregados Leves – vermiculita.....	23
2.3.1	Reservas de vermiculita.....	25
2.3.2	Definição da vermiculita.....	25
2.3.3	Propriedades e características da vermiculita.....	26
2.3.4	Ciclo produtivo da vermiculita.....	27
2.3.5	Aplicação da vermiculita expandida.....	28
2.4	Argamassas com borracha reciclada de pneus.....	30

2.5	Argamassas com vermiculita.....	35
2.6	Conforto nas edificações.....	36
2.6.1	Conforto Térmico: Materiais e a Transferência de Calor.....	38
2.6.2	Conforto Acústico: Materiais e a Propagação do Som.....	48
2.7	Materiais termoacústicos para construção civil.....	58
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1	Caracterizações das matérias primas.....	65
3.2	Etapas da pesquisa experimental.....	72
3.3	Moldagem e cura dos corpos de prova.....	73
3.4	Ensaio realizados.....	75
3.4.1	Ensaio das argamassas no estado fresco.....	77
3.4.1.1	Consistência.....	78
3.4.1.2	Retenção de água.....	79
3.4.1.3	Determinação dos tempos de pega.....	81
3.4.1.4	Densidade de massa e o teor de ar incorporado.....	82
3.4.2	Ensaio das argamassas no estado endurecido.....	83
3.4.2.1	Ensaio físicos.....	84
3.4.2.1.1	Absorção de água.....	84
3.4.2.1.2	Retração por secagem – variações dimensionais.....	85
3.4.2.1.3	Densidade de massa aparente.....	87
3.4.2.2	Ensaio mecânicos.....	87
3.4.2.2.1	Resistência à compressão uniaxial.....	88
3.4.2.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	89
3.4.2.2.3	Resistência de aderência à tração.....	91
3.4.3	Ensaio térmico.....	95
3.4.4	Ensaio acústicos.....	97
3.4.4.1	Absorção sonora.....	97
3.4.4.2	Velocidade da onda sonora.....	99
3.4.5	Ensaio de flamabilidade.....	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	103
4.1	Ensaio Físicos.....	103
4.1.1	Argamassas no Estado Fresco.....	103

4.1.2	Argamassas no Estado Endurecido.....	110
4.2	Ensaio Mecânicos.....	112
4.3	Classificações das argamassas estudadas.....	121
4.4	Ensaio Térmico – Condutividade.....	121
4.5	Ensaio Acústicos.....	129
4.5.1	Absorção sonora – tubo de impedância.....	129
4.5.2	Velocidade da onda sonora – módulo elástico.....	132
4.6	Ensaio de Flamabilidade.....	135
5	CONCLUSÕES.....	137
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Composição média dos materiais do pneu.....	11
2.2	Principais compostos químicos do clínquer.....	21
2.3	Composições dos cimentos Portland.....	21
2.4	Exigências químicas da cal hidratada.....	22
2.5	Exigências físicas da cal hidratada.....	23
2.6	Densidade de massa e condutividade térmica.....	40
2.7	Relação entre nível de decibéis e pressão sonora.....	52
2.8	Isolamento acústico de diversos materiais.....	55
2.9	Coeficientes de absorção acústica de alguns materiais.....	56
3.1	Composições das argamassas estudadas (% em massa)....	66
3.2	Procedências dos materiais utilizados nas argamassas.....	66
3.3	Granulometria da areia Jundu.....	67
3.4	Características físicas da vermiculita expandida.....	68
3.5	Distribuição da granulometria da vermiculita.....	69
3.6	Densidade da vermiculita.....	69
3.7	Análise química da vermiculita.....	69
3.8	Propriedades físicas e químicas do Sulfotan.....	71
3.9	Propriedades físicas e químicas da Microsilica.....	72
3.10	Ensaio físicos realizados.....	75
3.11	Ensaio mecânicos realizados.....	76
3.12	Demais ensaios realizados.....	76
3.13	Classificações das argamassas segundo a sua densidade....	82
3.14	Taxas de carregamento para o ensaio de aderência.....	92
3.15	Limite de resistência de aderência à tração.....	95
4.1	Propriedades gerais das argamassas.....	103
4.2	Densidades e teor de ar incorporado.....	105
4.3	Propriedades complementares das argamassas.....	108
4.4	Médias das densidades de massa aparente.....	110
4.5	Absorção de água.....	110
4.6	Retração por secagem.....	111

4.7	Percentuais de alguns componentes das argamassas.....	112
4.8	Propriedades mecânicas das argamassas.....	112
4.9	Características, identificação e limites das argamassas.....	121
4.10	Classificações das argamassas estudadas.....	121
4.11	Densidade aparente e condutividade térmica.....	121
4.12	Condutividade térmica de alguns materiais.....	122
4.13	Modulo elástico, velocidade do som e demais propriedades...	132

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Pneus poluindo o meio ambiente.....	9
2.2	Estrutura do pneu.....	11
2.3	Critérios de classificações das argamassas.....	17
2.4	Classificações das argamassas segundo suas funções.....	17
2.5	Camadas das argamassas de revestimentos.....	18
2.6	Processos de transmissão de calor.....	41
2.7	Faixas das frequências das ondas sonoras.....	50
2.8	Faixas das variações de pressão sonora.....	50
2.9	Divisões das bandas de frequências sonoras.....	51
2.10	Elementos de uma onda sonora.....	51
2.11	Propagação do som por uma parede.....	53
2.12	Velocidade de propagação do som nos meios.....	57
2.13	Lã mineral em forma de tapete e placa.....	59
2.14	Peças de EPS.....	60
2.15	Celulose – isolante térmico.....	60
2.16	Cortiça de carvalho em rolo.....	61
2.17	Placa de poliuretano e aplicação de poliuretano expandido.....	61
2.18	Painel de isolamento a vácuo (esquerda) e as espessuras de resistência térmica entre o VIP e um isolante tradicional (direita).....	62
2.19	Barreira de lâminas e estrutura interna do GFP.....	63
2.20	Isolamento termoacústico à base de lã de vidro.....	64
2.21	Isolamento termoacústico com composição de lã de rocha.....	64
3.1	Vermiculita expandida utilizadas nas argamassas.....	68
3.2	Borrachas recicladas de pneus utilizadas nas argamassas.....	70
3.3	Preparo das Argamassas.....	74
3.4	Formas e Corpos de Prova.....	74
3.5	Ensaio de consistência.....	78
3.6	Ensaio de retenção de água.....	80
3.7	Ensaio de resistência à compressão uniaxial.....	88
3.8	Esquema do ensaio de tração por compressão diametral.....	90
3.9	Ensaio de resistência à compressão diametral.....	90

3.10	Etapas do ensaio de aderência à tração.....	93
3.11	Formas de ruptura dos corpos de prova.....	94
3.12	Técnica padrão do fio quente (cruz de medição).....	96
3.13	Ensaio do fio quente (cruz de medição).....	96
3.14	Tubo de impedância.....	98
3.15	Esquema do ensaio com o tubo de impedância.....	99
3.16	Ensaio do módulo elástico.....	100
4.1	Ensaio de Consistência e Retenção de Água.....	104
4.2	Ensaio de Consistência e Teor de Ar Incorporado.....	106
4.3	Ensaio de Densidade Aparente e Teor de Ar Incorporado.....	107
4.4	Rendimentos de coberturas das argamassas.....	108
4.5	Rendimentos de cobertura e Percentual de Vermiculita Expandida.....	109
4.6	Absorção de Água por Capilaridade e Percentual de Água/Sólido... ..	111
4.7	Ensaio de Resistência à Compressão e Densidade Aparente.....	113
4.8	Ensaio de Resistência à Compressão e Teor de Ar Incorporado....	114
4.9	Ensaio de Resistência à Compressão e Retenção de Água.....	115
4.10	Ensaio de Resistência à Compressão e Percentual Água/Sólido... ..	115
4.11	Ensaio de Resistências à Compressão Uniaxial e Diametral.....	116
4.12	Modo de ruptura no ensaio de Aderência à Tração.....	117
4.13	Ensaio de Resistência à Aderência e Densidade Aparente.....	118
4.14	Ensaio de Resistência à Aderência e Teor de Ar Incorporado.....	118
4.15	Ensaio de Resistências à Aderência e Compressão Uniaxial.....	119
4.16	Ensaio de Condutividade Térmica e Consistência.....	123
4.17	Ensaio de Condutividade Térmica e Retenção de Água.....	124
4.18	Ensaio de Condutividade Térmica e Teor de Ar Incorporado.....	125
4.19	Ensaio de Condutividade Térmica e Densidade Teórica.....	126
4.20	Ensaio de Condutividade Térmica e Densidade Aparente.....	126
4.21	Ensaio de Condutividade Térmica e Absorção de Água.....	127
4.22	Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Compressão Uniaxial.....	128
4.23	Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Compressão Diametral.....	128
4.24	Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Aderência.....	129

4.25	Coeficiente de Absorção Acústico – face lisa das argamassas.....	130
4.26	Coeficiente de Absorção Acústico – face rugosa das argamassas...	131
4.27	Velocidade de Propagação do Som e o Módulo Elástico.....	133
4.28	Velocidade de Propagação do Som e a Densidade de Massa.....	133
4.29	Velocidade de Propagação do Som e o Teor de Ar Incorporado.....	134
4.30	Ensaio de flamabilidade com maçarico.....	135

SIGLAS, SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABCP	-	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	-	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
CEMPRE	-	Centro Empresarial para Reciclagem
CIRMA	-	Centro de Informações sobre Reciclagem e Meio Ambiente
CONAMA	-	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ETICS	-	External Thermal Insulation Composite Systems
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
NBR	-	Norma Brasileira
OMS	-	Organização Mundial de Saúde
RECICLANIP	-	Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis
TVA	-	The Vermiculite Association

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Acrescentar produtos reciclados em aplicações de engenharia não envolve apenas uma questão ambiental, mas também pressupõe a concepção de um novo material alternativo. Neste aspecto, a construção civil é uma das áreas que tem absorvido uma gama de resíduos sólidos reciclados em componentes de edificações.

Sabe-se que os revestimentos e acabamentos das paredes constituem parte significativa do arcabouço não estrutural dos edifícios e desempenham um papel funcional, uma vez que asseguram a proteção contra as ações climáticas, mecânicas ou ambientais.

Um dos revestimentos tradicionais de presença obrigatória é o revestimento à base de argamassa. Este elemento construtivo tem como principal função proteger as estruturas de vedação, conferindo estanqueidade à água e aos gases, regularizando superfícies para receber outros revestimentos de acabamento final e eventualmente (quando destinada para a condição específica) colaborar no conforto térmico e acústico. Assim, para que uma argamassa cumpra as suas funções adequadamente, necessita apresentar algumas propriedades específicas, tanto no estado fresco como no endurecido [1,2].

Nesta Tese foram desenvolvidas argamassas leves de revestimento para alvenaria, compostas de vermiculita expandida contendo ou não borracha reciclada de pneus, destinadas à aplicação em paredes, pisos e lajes.

O uso da borracha reciclada de pneus na forma particulada (“crumbs”), em substituição à parte do agregado (areia) em argamassas, inclui no macroambiente um aspecto de sustentabilidade e preocupação ambiental. Já no microambiente, contribui com as propriedades inerentes à borracha (baixa densidade, flexibilidade e impermeabilidade).

Por sua vez, a vermiculita, devido às suas características químico/mineralógicas/estruturais, ao ser utilizada como agregado em argamassas, aporta propriedades interessantes, tais como: diminuição de peso

estrutural, ausência de toxidez, incombustibilidade, capacidade de absorção de líquidos e isolamento termoacústico.

Já é consagrado o uso da vermiculita como agregado em isolamentos refratários para temperaturas até 1000°C e também na construção civil, tanto na forma de produtos acabados (placas, painéis entre outros) quanto na de produtos monolíticos (argamassas, enchimentos, recobrimentos) [3]. Por sua vez, agregados de borracha reciclada de pneus têm sido utilizados eminentemente em concreto, visando, principalmente, melhorar a resistência ao impacto. Sob o ponto de vista construtivo, a sua inclusão em argamassa de revestimento não só pode contribuir para a sustentabilidade e proteção ambiental, mas também para diminuir o custo comparativamente ao das argamassas só com vermiculita.

A borracha reciclada utilizada neste Projeto, cumpriu as funções de agregado, tendo sido adicionada em duas granulometrias diferentes (<4mm e <1mm) em substituição tanto de parte da vermiculita como da areia. A combinação de ambas (vermiculita e borracha) em argamassas leves de alvenaria, ainda não foi reportada na literatura e constitui o caráter inédito e a contribuição maior dessa Tese.

A verificação do potencial construtivo das argamassas desenvolvidas consistiu na avaliação quanto aos aspectos físicos, tanto no estado fresco quanto no endurecido, e aos mecânicos no estado endurecido, além dos ensaios térmicos e acústicos, tratados no Capítulo 3, e os resultados, no Capítulo 4.

Para a caracterização das argamassas no estado fresco, procedeu-se aos ensaios de consistência, retenção de água e determinação dos tempos de pega; já no estado endurecido, considerou-se a absorção de água, retração por secagem, densidade de massa aparente e o teor de ar incorporado, e ainda os ensaios mecânicos de resistência à compressão uniaxial, resistência à tração por compressão diametral e resistência de aderência à tração.

Para a caracterização térmica e acústica das composições, foram utilizados os ensaios de condutividade térmica (método do fio quente cruzado), o de absorção sonora (tubo de impedância) e o cálculo da velocidade das

ondas sonoras a partir do módulo elástico. Além disso, foi realizado um teste simples de modo adaptado (não normalizado) de flamabilidade das argamassas contendo agregados de borracha, com a exposição das mesmas à chama por 15 minutos.

1.2 Objetivo Geral

Usando os paradigmas da normalização pertinente, objetivou-se determinar a viabilidade de incorporação de borracha reciclada de pneus na forma de agregados, em substituição a partes da areia e da vermiculita em argamassas leves para alvenaria.

1.3 Objetivos Específicos

Determinar a influência de teores de agregados de borracha reciclada de pneus nas propriedades mecânicas e termoacústicas de argamassas leves contendo vermiculita para uso em alvenaria, sem alterar de modo significativo as propriedades relevantes dessas argamassas, apresentadas na ausência da aditivação com agregados de borracha reciclada.

Uma lista explícita desses objetivos seria:

- ✓ Reutilizar (inertização) efetivamente um material como a borracha reciclada de pneus, passível de causar impactos ambientais importantes.
- ✓ Desenvolver, através de composição com vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, uma argamassa para revestimento com comportamento físico-mecânico e termoacústico que satisfaça requisitos construcionais.
- ✓ Caracterizar, através de ensaios, o comportamento físico (estado fresco e endurecido), mecânico, térmico e acústico das composições das argamassas de revestimento.
- ✓ Avaliar as argamassas através dos resultados dos ensaios realizados.

1.4 Relevância e justificativa

A utilização de borracha reciclada de pneus em elementos construtivos tem focado eminentemente o seu uso com agregado geralmente do tipo graúdo (em substituição à brita) em concreto, com vistas a flexibilizar sua estrutura (diminuição da fragilidade). Aparentemente não existe na literatura a utilização de agregados de borracha reciclada em argamassas leves para revestimento em alvenaria. Neste aspecto repousa o ineditismo e contribuição desta Tese.

As argamassas de revestimento, embora já utilizadas na construção civil, têm pouco colaborado para com as necessidades de conforto termoacústico, tão necessárias nas edificações. Por isso, faz-se necessário colocá-las como objeto de estudos e preocupação constante para os arquitetos e engenheiros.

Em vista disso, o presente estudo de desenvolvimento de um novo material com a vermiculita expandida e a borracha reciclada de pneus se coloca como uma possível alternativa de mercado, ambientalmente correta, que possibilitará o uso de componentes que viabilizem o comportamento termoacústico mais eficaz, de modo a contribuir para a minimização das patologias tão comuns nas argamassas convencionais. Uma das patologias mais importantes é o crescimento de fungos. A esse respeito é sabido que a vermiculita dificulta seu desenvolvimento (pela sua capacidade de troca de cátions), por sua vez a borracha inerentemente não apresenta ambiente para essas patologias.

Por outro lado, analisando o volume considerável que o revestimento de argamassa ocupa em qualquer edificação, a inclusão bem sucedida de agregados de borracha reciclada de pneus em substituição à areia irá colaborar em dois aspectos pilares da sustentabilidade. O primeiro se refere à proteção de um recurso natural (areia) já em fase de exaustão, enquanto o segundo oferece uma via importante de diminuição de impacto ambiental, por meio da reutilização de grandes quantidades de um resíduo de difícil descarte.

1.5 Originalidade da proposta

Na literatura analisada, constatou-se a utilização de alguns materiais isolantes termoacústicos na construção civil, mas nenhuma referência foi encontrada que tratasse especificamente do objeto deste doutorado. Isolamentos termoacústicos usam uma gama de materiais de modo combinado ou individual, porém a literatura aparentemente ainda não reportou nenhum dado do efeito de isolamento térmico e de absorção acústica com composições com vermiculita e borracha reciclada de pneu, em vista disso a presente tese visa contribuir para a classe de argamassas leves, com a inclusão de um agregado, que hoje é um problema de impacto ambiental e em contrapartida proteger alguns recursos naturais.

1.6 Metodologia utilizada

Para atingir o objetivo, o trabalho foi desenvolvido por meio de uma metodologia composta por duas etapas: uma de revisão bibliográfica e outra de pesquisa experimental, com ensaios realizados nos laboratórios da Universidade Federal de São Carlos, Universidade de São Paulo (São Carlos) e no Instituto Federal do Maranhão.

A *revisão bibliográfica* consistiu no levantamento e estudo da bibliografia disponível sobre o tema, em livros, periódicos, dissertações, teses, artigos técnicos, publicações em revistas e jornais, também aqueles encontrados na Internet e no acervo técnico de bibliotecas. Inclui também pesquisa no acervo da Associação Brasileira de Normas Técnicas para a coleta das normas que orientaram os ensaios realizados nos laboratórios.

Na etapa da revisão bibliográfica, realizada ao longo de todo o desenvolvimento do trabalho, buscaram-se conhecimentos e informações complementares para auxiliar no entendimento na interpretação dos resultados obtidos nos ensaios.

Os principais itens desta primeira etapa estão no segundo capítulo desta tese, tendo se constituído no embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa experimental, além de ter tido a finalidade de

coletar dados de estudos anteriores que pudessem ser aplicados neste trabalho.

A segunda etapa, **pesquisa experimental**, consistiu na implementação dos ensaios físico, mecânicos, térmicos e acústicos, realizados nas diferentes composições de argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

1.7 Estrutura da tese

Esta tese foi desenvolvida em cinco capítulos, sendo este o **primeiro capítulo**, o qual apresenta o título de Introdução, em que se busca contextualizar, deixar claro os objetivos, demonstrar a relevância, traçar a importância e a originalidade deste estudo e apontar a metodologia utilizada no trabalho.

O **segundo capítulo**, Revisão de Literatura, norteia a fundamentação teórica para a realização do trabalho, que abrange a produção de maneira sintetizada do objeto desta pesquisa.

No **terceiro capítulo**, Materiais e Métodos, estão descritas as composições das argamassas, seus materiais, procedências e características, além dos métodos e das técnicas utilizadas para a execução de todos os ensaios.

No **quarto capítulo**, Resultados e Discussões, são apresentadas as caracterizações e análises comparativas dos resultados dos ensaios, através de tabelas, quadros e gráficos dos ensaios realizados.

No **quinto capítulo** estão relatadas as Conclusões e em seguida algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para fundamentar este trabalho e ter um melhor entendimento sobre estas novas argamassas produzidas com a adição de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, para ser aplicada como material de revestimento em alvenaria faz-se necessário discutir determinados conceitos, com a finalidade de maior compreensão sobre o tema.

Sendo assim, discorre-se inicialmente sobre o meio ambiente e os resíduos sólidos, revestimentos, argamassa (tipos, funções e propriedades) e materiais alternativos (pneus e vermiculita – agregado leve). Na sequência apresenta-se uma revisão da literatura sobre aplicações da borracha reciclada de pneus e da vermiculita expandida na construção civil, e em seguida aborda-se alguns conceitos de térmico e acústico de materiais com ênfase em comportamento destas variáveis nas edificações.

2.1 Meio Ambiente, Resíduos Sólidos e Pneus

A solução dos problemas ambientais é considerada cada vez mais urgente para evitar a escassez de alguns recursos naturais. Com os rápidos avanços tecnológicos as explorações destes passam a ser feitas de forma intensa, pondo em risco a existência de recursos não renováveis.

Estudos ecológicos começaram a tornar evidentes que a destruição e até a simples alteração de um único elemento pode ser nociva e mesmo fatal para todo o ecossistema.

O homem sempre criou formas para manejar a natureza para suprir suas necessidades, e podem-se criar técnicas e materiais alternativos que possibilitem ações que preservem os recursos naturais.

A compatibilização entre a utilização dos recursos naturais e a conservação do meio-ambiente, deve ser um compromisso da humanidade e pode ser concretizado através de formas de produção que satisfaçam às necessidades do ser humano, sem destruir os recursos que serão necessários às futuras gerações.

Um grande desafio à humanidade é o desenvolvimento sustentável, baseando-se em um planejamento à longo prazo e no reconhecimento de que devemos admitir os limites dos recursos naturais que utilizamos para tornar nossa vida diária possível [4].

No tocante aos resíduos sólidos, muitos são os estudos que tratam da importância da disposição final de resíduos sólidos e a separação de materiais aproveitáveis aí existentes, reduzindo assim a porcentagem não degradável que se acumula nos aterros e poupando o meio ambiente da extração de novos recursos naturais para a fabricação de novos produtos.

A construção civil é uma das áreas que tem absorvido uma gama de resíduos sólidos reciclados em componentes das edificações. Este aproveitamento possibilita uma série de benefícios, como a redução do volume de matérias-primas extraídas da natureza, a redução do consumo de energia na produção de materiais e a diminuição na emissão de poluentes no meio ambiente [5].

Neste sentido, a incorporação de novos materiais como, por exemplo, resíduo cerâmico da construção civil, bagaço de cana, palha de arroz, resíduo de vidro, areia alternativa, dentre outros tem ocorrido [5]. Outros materiais como os pneus inservíveis, continuam sendo dispostos inadequadamente no meio ambiente, apesar da sua reciclagem bastante estabelecida (recauchutagem).

Dentre os resíduos produzidos pelo homem, os pneus se destacam em potencial de impacto, considerando sua baixa degradabilidade e facilidade em se tornar habitat de roedores e insetos. A recauchutagem é a forma mais comum de reciclagem dos pneus. Outras rotas recicladoras podem ser usadas para transformá-los em matéria-prima a ser utilizadas em diversos produtos como, por exemplo, nas lonas de freios, solados de calçados, tapetes de automóveis, ou empregado na construção civil como integrante do cimento asfáltico utilizado na pavimentação de estradas (onde já foi verificado que a vida útil da pavimentação aumenta de 4 a 5 vezes) e como aditivo em concreto para guardrails. A borracha reciclada pode também ser usada em amortecedores de barcos, estofados, carpetes, isolamento de fios e tubos [6].

O processo de reciclagem dos pneus é basicamente mecânico, livre do uso de aditivos químicos, permitindo desta maneira a geração de produtos livres de resíduos químicos e tóxicos adicionais [6].

Existem hoje, empresas que reciclam todos os 3 (três) componentes dos pneus, ou seja, a borracha, ligas de aço ou fibras sintéticas.

Na operação de reciclagem, os fios e fibras de aço são removidos, a borracha passa por diversas etapas de moagem e trituração gerando uma gama de produtos desde mais grossos até pós finos, sendo então limpos embalados e vendidos para vários consumidores.



Figura 2.1 Pneus poluindo o meio ambiente [7]

Apesar da existência de empresas que trabalham com o tratamento para reciclagem de pneus, ainda encontramos um volume expressivo de descarte a céu aberto, e por serem resíduos sólidos intratáveis, podem provocar efeitos nocivos à saúde pública e ao meio ambiente, já que com acúmulo de água da chuva no seu interior, criam ambiente propício para o desenvolvimento de mosquitos e roedores. Os pneus quando acidentalmente ou intencionalmente são queimados, liberam oleosidade com elevado grau de toxidez, capaz de percolar e contaminar o solo. Cada pneu queimado pode liberar mais de 10 litros desse óleo no solo, ameaçando o lençol freático. Vale aqui citar que a queima a céu aberto, é proibida em vários países, inclusive no

Brasil, pois emite gases que são substâncias químicas em fumaça negra de forte caráter tóxico [6].

Como se vê vários são os impactos que os pneus podem causar ao meio ambiente, e pelo fato da estrutura do pneu ser de difícil decomposição, a sua disposição final torna-se mais complexa.

A NBR 10.004 [8] considera o rejeito da borracha como Resíduo Classe II A, isso é, inerte. Neles não se encontra metais pesados passíveis de lixiviação, mas é importante que o seu descarte não ocorra aleatoriamente, pois, nos aterros sanitários os pneus absorvem os gases que são liberados pela decomposição dos outros resíduos, inchando, podendo até estourar, interferindo na estabilidade da cobertura dos aterros. Além disso, ocupam muito espaço, pois tem baixa compressibilidade, podendo diminuir a vida útil dos aterros [9].

A quantidade de pneus descartados no ambiente tem motivado a realização de pesquisas em vários países, inclusive no Brasil. Existem propostas para mitigar os danos ambientais causados por estes resíduos como, por exemplo, o aumento da vida útil dos pneus, incentivando a sua reutilização e promovendo a reciclagem dos pneus.

O surgimento do pneu se deu casualmente quando o norte americano Charles Goodyear ,em 1845, descobriu o processo de vulcanização, ao constatar que a borracha cozida a altas temperaturas com enxofre, mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor. Com esta descoberta pode-se dar forma ao pneu, o que possibilitou a substituição das rodas de madeira e ferro utilizadas nas carroças, pelas de pneus, que tem a vantagem de absorverem melhor o impacto com o solo, além de serem muito mais resistentes. Passados alguns anos da descoberta do processo de vulcanização a Alemanha começou a industrializar borracha sintética a partir do petróleo [10].

Na Tabela 2.1 estão descritos os percentuais, em massa, dos materiais que compõem um pneu.

Tabela 2.1 Composição média dos materiais do pneu [11]

Componentes	Porcentagem
Negro de fumo	28%
Borracha natural	14%
Borracha sintética	27%
S, ZnO, TiO ₂	3%
Óleos	10%
Produtos Petroquímicos	4%
Fibras	4%
Cinta de Aço	10%

A Figura 2.2 ilustra a estrutura dos pneus, formada de carcaça, talões, parede lateral, cintas (lonas), banda de rodagem, ombro, nervura central, dentre outras partes, descritas na sequência.

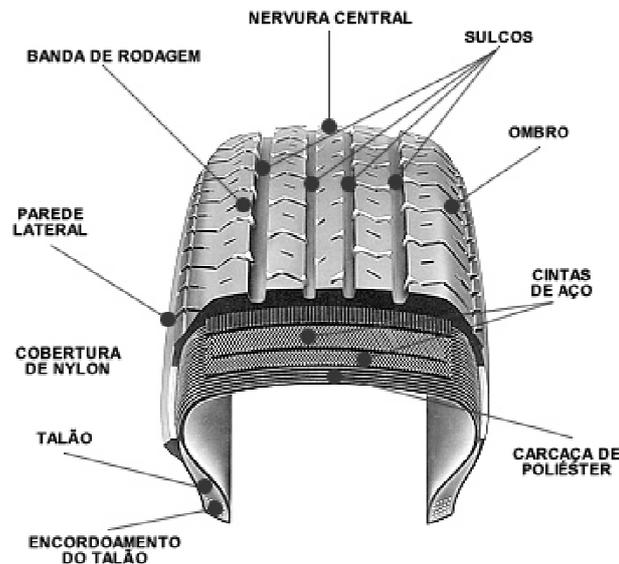


Figura 2.2 Estrutura do pneu [12]

- ✓ Carcaça: parte resistente do pneu; deve resistir à pressão, peso e choques, composta de cordonéis de nylon, poliéster ou aço, com a função de reter o ar sob pressão, para suporta o peso total do veículo.
- ✓ Talões: constituem-se internamente de arames de aço de grande resistência, tendo por finalidade manter o pneu acoplado ao aro.
- ✓ Parede lateral: são as laterais da carcaça. São revestidos por uma mistura de borracha com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga.

✓ Cintas (lonas): compreende o feixe de cintas (lonas estabilizadoras) que são dimensionadas para suportar cargas em movimento. Sua função é garantir a área de contato necessária entre o pneu e o solo.

✓ Banda de rodagem: parte do pneu que entra em contato com o solo, que devido à sua composição de borracha e agentes químicos especiais, tem grande resistência ao desgaste. Seus desenhos possuem partes cheias (biscoitos ou blocos) e partes vazias (sulcos) que proporcionam aderência, tração, estabilidade e segurança ao veículo.

✓ Ombro: É o apoio do pneu nas curvas e manobras.

✓ Nervura central: proporciona um contato "circunferencial" do pneu com o solo [12].

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), em 2011 o Brasil produziu 66 milhões de pneus, sendo que um terço deles foi exportado para mais de 85 países e o restante está rodando nos veículos nacionais. Neste mesmo ano foram reciclados apenas 1.600.000 unidades [13].

No final do sec. XX, os Estados Unidos, o Japão e alguns países europeus se mostraram preocupados com o descarte dos pneus em aterro e a céu aberto, e têm incentivado as pesquisas para o desenvolvimento de novos produtos e mercados para os pneus inservíveis, pois estão cientes dos problemas ambientais que podem advir deste descarte sem monitoramento[14].

O Brasil foi o primeiro país na América Latina a regulamentar a disposição de pneus, com a aprovação da resolução nº 258/99 do CONAMA [15] que estabeleceu regras para a destinação final de pneus fabricados no Brasil ou importados, instituindo a responsabilidade do produtor e do importador pelo ciclo completo, ou seja, da coleta, do transporte e da disposição final. Neste mesmo ano, teve início o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis (REICLANIP), e desde então mais de 390 milhões de pneus de passeio, foram coletados e destinados adequadamente pelos fabricantes.

O CONAMA regulamenta o aproveitamento do resíduo de pneus para aquecer caldeiras e os principais usuários deste destino são as indústrias

de papel e celulose, as de produtos alimentícios e em fornos rotativos na produção de cimento, podendo-se utilizar até a carcaça inteira, com aproveitamento de alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais [15].

Dos pneus inservíveis que são reutilizados, 64% são empregados como combustível alternativo e os demais 36% são reutilizados, após sua trituração, como tapetes de automóveis, mangueiras, solas de sapato, asfalto emborrachado, quadras poli-esportivas, pisos industriais dentre outras aplicações [14].

O pneu pode ser reaproveitado inteiro ou picado. Quando picado, aproveita-se apenas a banda de rodagem já quando inteiro, há inclusão do aro de aço. Cabe aqui citar que meio quilo de borracha feita de materiais reciclados economiza cerca de 75% da energia necessária para produzir meio quilo de borracha virgem [16].

No processo de reutilização desta borracha, os pneus velhos são cortados em lascas, posteriormente são transformados em grãos de borracha ("crumbs") de borracha, até atingir diferentes granulações. Em seguida, o material pode passar ou por tratamento químico, para possibilitar a desvulcanização da borracha ou através de um processo mecânico de peneiramento com custo e impacto ambiental menor do que o da rota química de reciclagem. A injeção de oxigênio, calor e forte pressão em autoclaves giratórias, provocam o rompimento da cadeia molecular da borracha vulcanizada [13].

Na construção civil os resíduos de borracha de pneus são aproveitados pelo seu valor energético, em fornos de cimenteiras, como já foi citado e em pó na composição de asfalto para que tenha maior elasticidade e durabilidade, além de atuarem como elemento aerador de solos compactados, e na composição de outros artefatos de borracha como, tubos, pisos ou ainda na forma de agregado em concretos e argamassas [10,13].

Principais destinos de pneu quando se transformam em sucatas:

✓ pavimentos para estradas - pó gerado pela recauchutagem e os restos de pneus moídos são incorporados ao asfalto, aumentando sua elasticidade e durabilidade;

- ✓ contenção de erosão do solo - pneus inteiros associados a plantas de raízes grandes ajudam a conter a erosão do solo;
- ✓ combustível de forno para produção de cimento, cal, papel e celulose - o pneu é um grande gerador de energia, pois seu poder calorífico é superior ao do carvão;
- ✓ pisos industriais, sola de sapato, tapetes de automóveis, tapetes para banheiros e borracha de vedação – após a desvulcanização e adição de óleos aromáticos tem-se uma pasta, que pode ser usada para produzir estes produtos entre outros;
- ✓ equipamentos para playground - obstáculos ou balança em baixo dos brinquedos ou nas madeiras para suavizar as quedas e evitar acidentes;
- ✓ esportes – como barreira ou limitação de espaço á percorrer, utilizado em corridas de cavalo, de kart ou de automóvel, e demais eventos;
- ✓ recauchutagem ou fabricação de novos pneus - reciclado ou reusado na fabricação de novos pneus, é a maneira mais utilizada no Brasil, atingindo 70% da frota de transporte;
- ✓ sinalização rodoviária e para choques de carros - reciclar os pneus inteiros é vantajoso, pois diminuem os gastos com manutenção e soluciona o problema de armazenagem de pneus velhos;
- ✓ compostagem - O pneu embora não seja adubo, mas, sua borracha cortada em pedaços de 5 (cinco) cm serve para aeração de compostos orgânicos;
- ✓ reprodução de animais marinhos - No Brasil é utilizado como estruturas de recifes artificiais no mar, criando um ambiente adequado para reprodução de animais marinhos [13].

2.2 Revestimentos – Argamassas

Os sistemas construtivos empregados na construção civil brasileira, para edifícios com mais de dois pavimentos são compostos por uma estrutura vertical e com as vedações verticais executadas em alvenaria de blocos (cerâmicos, de concreto, concreto celular auto-clavado e silício-calcário) sendo

a alvenaria revestida, interna e externamente, por uma argamassa mista a base de cimento, cal e areia [11].

O revestimento de argamassa tem sofrido modificações nos últimos anos, devido o desenvolvimento de novos materiais, argamassas industrializadas, inovações nas técnicas construtivas, como por exemplo, as argamassas de revestimento aplicadas por projeção.

A argamassa de revestimento, juntamente com os componentes da vedação vertical exterior, compõe o sistema de revestimento e desempenha um importante papel como parte integrante do edifício, ajudando a satisfazer as exigências dos usuários quanto ao conforto nas edificações.

Segundo a NBR 13281[17], argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

As argamassas preparadas em obra são aquelas em que a medição e a mistura dos materiais ocorrem no próprio canteiro de obras, seus materiais são medidos em volume ou massa, podendo ser classificadas de diferentes maneiras. As industrializadas que surgiram no final o século XIX, na Europa e nos Estados Unidos, são misturas que já chegam pronta nas obras e necessitando apenas da adição de água [18].

Estudiosos apontam vários registros do uso da argamassa de cal e areia entre os egípcios, gregos etruscos e romanos. Os registros mais antigos datam de 9.000 a.C. no sul da Galiléia, próximo de Yifta'El, Israel, aplicado num piso feito com pedras assentadas com esta argamassa e outro registro em 5.600 a.C. onde hoje é a Iugoslávia, sendo esta argamassa aplicada em uma laje de 25 cm de espessura [19].

Em 1824, na Inglaterra com a “invenção” do cimento por John Aspdin, tem início o desenvolvimento de outro tipo de argamassa com cimento. Seu método de fabricação consistia em calcinar argila e calcário em um forno giratório, com temperatura de até 1450 °C; para formação de silicatos de cálcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) a que se deu o nome de clínquer. Após a queima,

para impedir que o cimento endureça instantaneamente com a água o clínquer é moído com a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [19].

Com o desenvolvimento do cimento Portland as argamassas sofreram modificações, pois com a incorporação do cimento, houve o aumento na sua resistência mecânica e melhora na aderência as bases. Com o advento do concreto armado, houve outra mudança no sistema de construção foi quando começou a ser utilizado na construção civil e as alvenarias passam a não mais exercer a função estrutural, passando a ser somente um elemento de vedação.

Os aditivos orgânicos, plastificantes e superplastificantes como os incorporadores de ar, os retentores de água são comumente adicionados a mistura de cimento, areia e água, para gerar um produto final com características de porosidades e propriedades mecânicas adequadas para cada condição de uso [18].

Os aditivos plastificantes e superplastificantes, agem constitucionalmente aumentando a fluidez das misturas com menor quantidade de água, deixando as argamassas mais trabalháveis. Existem também aditivos que aumentam a resistência final do cimento, como é o caso da sílica ativa, que age tanto como filler, como gerador adicional de silicato de cálcio hidratado (CSH) através de reação pozolânica com a portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. A portlandita é liberada no processo inicial de hidratação do cimento ao ser misturado com a água [19].

Ocorreram mudanças significativas na fabricação de argamassas, quando se começou usar os plastificantes, superplastificantes e sílica ativa conjuntamente. A construção civil consegue, por exemplo, produzir concretos de alto desempenho com reduzido número de poros. No caso das argamassas a aditivação tanto com produtos químicos como com minerais pode deixá-las mais leves sem perda apreciável de resistência mecânica, possibilitando a sua utilização nas paredes, tanto no lado interior como no exterior, nos pisos e lajes. Esta nova argamassa possui propriedades de isolamento térmico, resistindo a altas e baixas temperaturas [19].

2.2.1 Classificações das Argamassas

Existem diferentes critérios de classificar as argamassas conforme Figura 2.3 que segue:

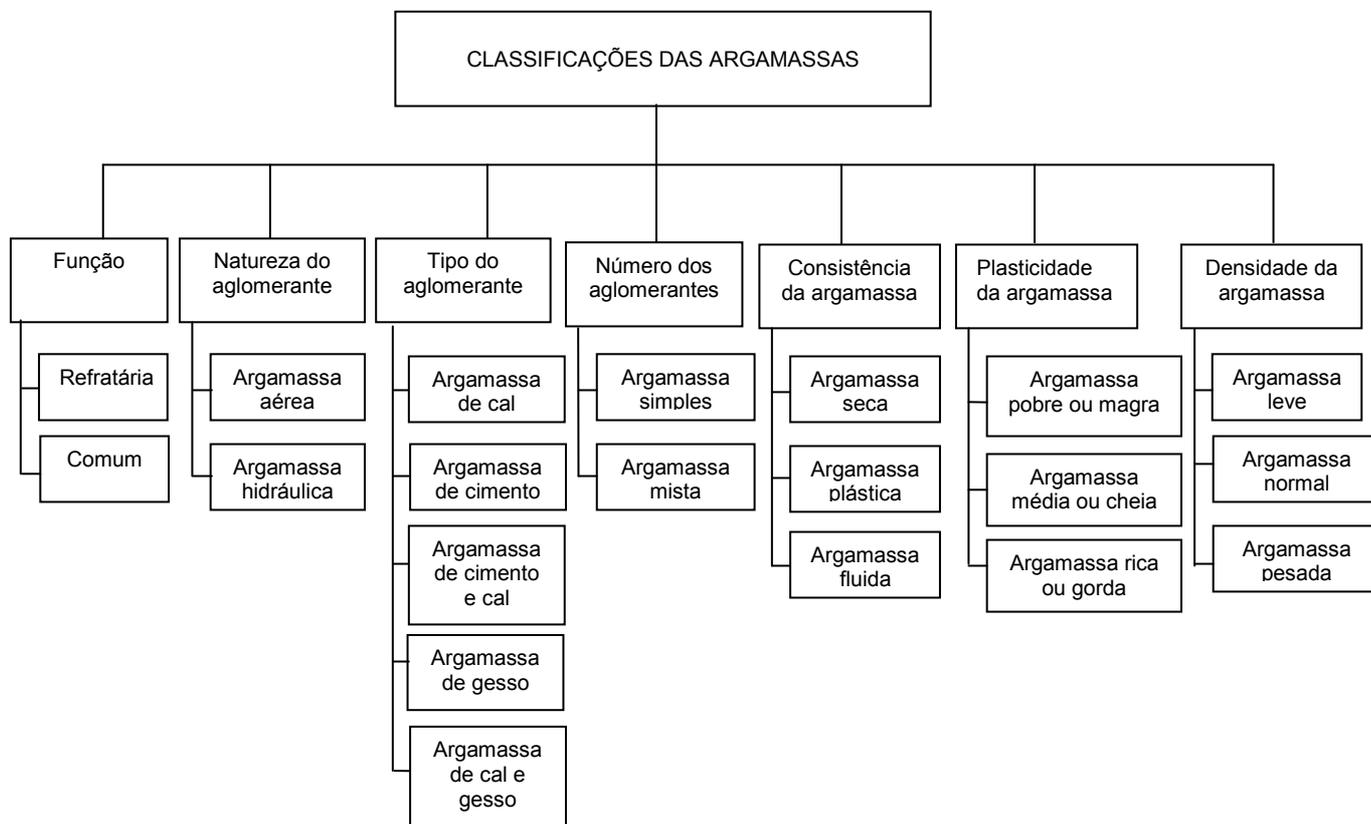


Figura 2.3 Critérios de classificações das argamassas [20]

As argamassas comuns são classificadas de acordo com as funções que desempenham estando associado às suas finalidades e aplicações e são as que constam na Figura 2.4.

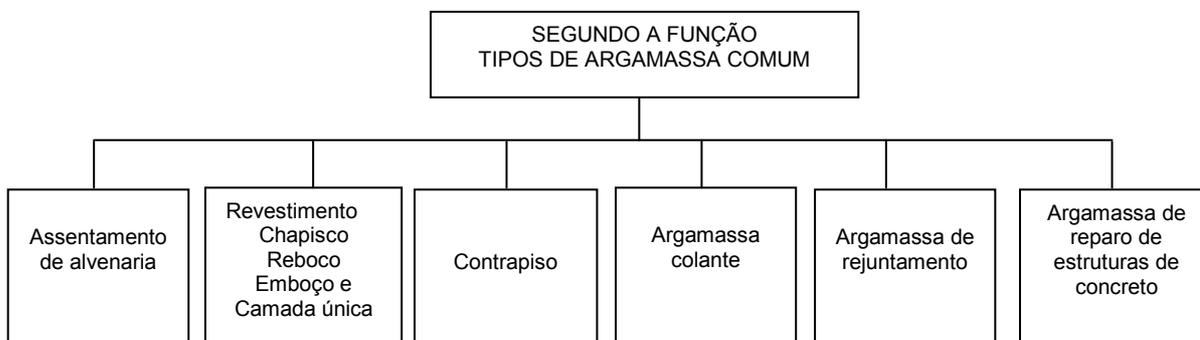


Figura 2.4 Classificações das argamassas segundo suas funções [20]

O revestimento de argamassa segundo a NBR 13529 [21] é o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, deixando este substrato apto a receber acabamento final. O revestimento com argamassa usualmente tem várias camadas, onde cada uma desempenha função específica. Como exemplos têm o chapisco, o emboço, revestimento único e reboco, conforme Figura 2.5 que segue:

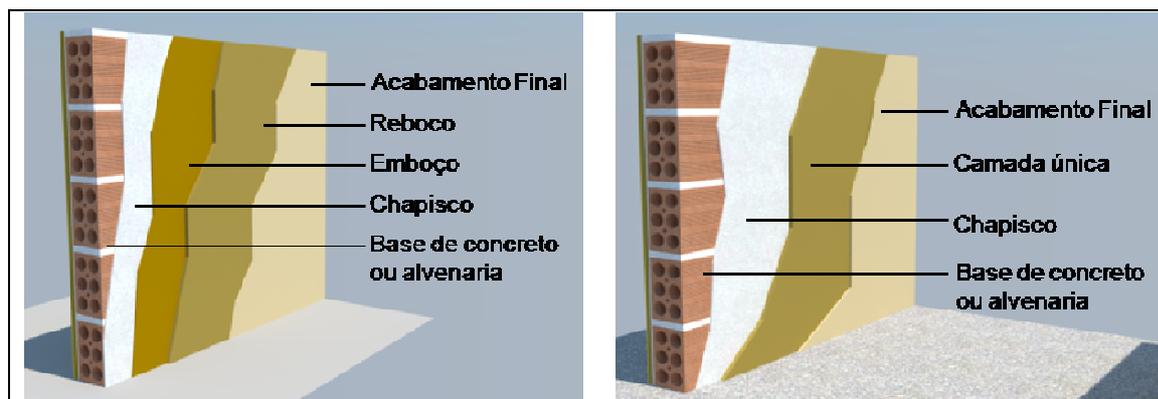


Figura 2.5 Camadas das argamassas de revestimentos

Chapisco é uma camada de argamassa bem fluida, não considerada como camada de revestimento, mas sim um preparo de base. É o elemento de ligação entre o revestimento e o substrato, com finalidade de uniformizar a superfície e regularizar a absorção da base, para melhorar a aderência da próxima camada de revestimento [21, 22,23].

Emboço é uma argamassa mais consistente que o chapisco, executada para cobrir e regularizar a base, permitindo que a alvenaria receba outra camada de revestimento, reboco, ou acabamento final que tenha sido especificado para a obra [21, 22,23].

Reboco é a camada final de argamassa de revestimento utilizada sobre o emboço, com a função de uniformizar a superfície para receber o revestimento decorativo, ou o acabamento final de uma parede.

Camada única é um revestimento único da argamassa aplicado sobre o chapisco, que receberá sobre ela a aplicação de um acabamento final, conhecido também como massa única. É a forma a mais utilizada no Brasil devido a praticidade de aplicação e por diminuir o custo nas obras [21, 22,23].

2.2.2 Funções e propriedades das argamassas de revestimentos

São funções das argamassas de revestimentos:

- ✓ proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos, possibilitando a maior durabilidade das mesmas reduzindo os custos de manutenção dos edifícios;

- ✓ auxiliar as vedações a cumprir com as suas funções, tais como: isolamento termoacústico, estanqueidade à água e aos gases, segurança ao fogo. Um revestimento externo normal de argamassa pode ser responsável por 50% do isolamento acústico, 30% do isolamento térmico e 100% responsável pela estanqueidade à água de uma vedação de alvenaria comum;

- ✓ regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir de base para a aplicação acabamento final[18].

Para que a argamassa desempenhe estas funções é importante que tenham algumas propriedades e características. Dentre elas podemos citar a trabalhabilidade (adesão inicial, plasticidade, consistência, retenção de água, início e final de pega), a retração, a aderência, a absorção de água, a resistência mecânica, a capacidade de absorver deformações, dentre outras.

São justamente estas propriedades que se investigou nesta Tese, através dos ensaios realizados e que se discute no Capítulo 3 e 4.

Trabalhabilidade - avalia qualitativamente a facilidade da argamassa para o manuseio. Propriedade complexa, que depende de variáveis inter-relacionadas como a adesão inicial, plasticidade, consistência, retenção de água, início e final de pega, que concorrem para a boa qualidade e produtividade durante a aplicação. Varias propriedades das argamassas no estado endurecido estão diretamente relacionadas à trabalhabilidade.

Retração- responsável por grande parte das patologias encontradas nas argamassas, é resultado de um mecanismo complexo da variação de volume da pasta aglomerante com papel fundamental no desempenho quanto à estanqueidade e à durabilidade das argamassas aplicadas.

Aderência - resistência e a extensão do contato entre a argamassa e uma base porosa (tijolos ou blocos cerâmicos, blocos de concreto, etc.). A aderência em um primeiro momento ocorre com argamassa ainda fresca, a

adesão inicial, que esta relacionada às características reológicas da pasta aglomerante. A aderência propriamente dita, já no estado endurecido, está relacionada com a resistência de aderência à tração.

Absorção a água - relacionada com a absorção capilar da estrutura porosa e pelo aparecimento de fissuras na camada de argamassa endurecida, o que influencia na estanqueidade do sistema e na proteção do revestimento à base. Os fatores que influenciam esta propriedade são: o traço, natureza dos materiais constituintes da argamassa, espessura da camada, natureza da base, técnica de execução, quantidade e tipo de fissuras existentes;

Resistência mecânica - capacidade de suportar ações mecânicas de diversas naturezas tais como tração, compressão e cisalhamento. Está diretamente ligada ao consumo e natureza dos agregados e aglomerantes;

Capacidade de absorver deformações - capacidade de a argamassa absorver as deformações intrínsecas e deformações de pequena amplitude da base, sem desagregar e sem apresentar fissuração visível. O grau de fissuração devido às deformações, esta diretamente relacionada ao teor e natureza dos aglomerantes, dos agregados, da capacidade de absorção de água da base e da técnica de execução do revestimento [24,25].

2.2.3 Materiais das Argamassas – Cimento e Cal

O termo cimento é derivado do latim caement, trata-se de um material cerâmico que, quando em contato com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, adquirindo resistência mecânica [26].

O cimento sob a ação da água torna-se primeiramente pastoso e depois endurece, unindo fragmentos ou massas de um material sólido para formar um compacto. É o principal material usado na construção como aglomerante, e chega a servir como indicador econômico, por ser uma das principais commodities mundiais.

O Cimento Portland é composto de clínquer e adições. A flexibilidade composicional possibilita a produção de diversos tipos de cimentos, onde cada um apresenta diferentes propriedades mecânicas e

químicas. O clínquer, é o produto da fusão incipiente (1400 a 1500°C) das matérias primas usadas na composição do cimento (argila + calcário + fonte de óxido de ferro). No clínquer existe uma gama de compostos (silicatos de cálcio, aluminato de cálcio e alumino ferritas) [26].

Os componentes mineralógicos principais do cimento Portland e a sua faixa de composição percentual, são mostrados na Tabela 2.2. Um cimento portland puro é feito de clínquer que é moído juntamente com gesso, componente essencial no controle do tempo de pega.

Tabela 2.2 Principais compostos químicos do clínquer [27]

Composto químico	(%)
<u>Silicato tricálcico</u> (CaO) ₃ SiO ₂	45-75%
<u>Silicato dicálcico</u> (CaO) ₂ SiO ₂	7- 35%
<u>Aluminato tricálcico</u> (CaO) ₃ Al ₂ O ₃	0-13%
<u>Ferroaluminato tetracálcico</u> (CaO) ₄ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	0-18%

No Brasil existem diversos tipos de cimento Portland com diferentes composições químico/mineralógicas, sendo que os tipos mais utilizados na construção civil são: o comum, o composto, de alto-forno e o pozolânico. A Tabela 2.3 que segue mostra a composição dos cimentos Portland comuns e compostos.

Tabela 2.3 Composições dos cimentos Portland [27]

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% de massa)				Norma Brasileira
		clínquer + gesso	Escória Granulada de alto-forno (Sigla E)	Material pozolânico (Sigla Z)	Material Carbonático (Sigla F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99-95		1-5		
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Cal Hidratada

Segundo a NBR 7175 [28], a cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação adequada da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

A cal é um aglomerante que endurece devido à reação de carbonatação da cal em carbonato de cálcio, pela fixação do gás carbônico presente no ar. A cal possui propriedades plastificantes e de retenção de água, não permite a sucção excessiva de água pela base, proporcionando uma melhora na trabalhabilidade e maior produtividade na execução do revestimento. A cal também influencia melhorando algumas propriedades físico-mecânicas das argamassas no estado endurecido, tais como a resistência à compressão e aderência à tração [29].

Bauer aborda algumas vantagens da cal hidratada sobre a cal virgem, entre elas, a maior facilidade de manuseio, transporte e armazenamento, pois deixa a argamassa mais leve. É um produto pronto para ser utilizado, e por ser um produto seco e pulverulento, oferece maior facilidade de mistura na elaboração das argamassas do que a pasta de cal resultante da hidratação da cal virgem [30].

A NBR 7175 [28] especifica três tipos de cal hidratada, CH-I, CH-II, CH-III. Nas Tabelas 2.4 e 2.5, estão definidos os requisitos químicos e físicos da cal hidratada.

Tabela 2.4 Exigências químicas da cal hidratada[28]

Requisitos		Limites		
		CH I	CH II	CH III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 5%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e de magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO + MgO)		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Tabela 2.5 Exigências físicas da cal hidratada [28]

Requisitos		Limites		
		CH I	CH II	CH III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5%	≤ 0,5%	≤ 0,5%
	Peneira 0,075 mm	≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Retenção de água		≥ 75%	≥ 75%	≥ 70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110%

A presença de cal nas argamassas mistas é essencial. Porém, ela é também responsável pelo aumento na demanda de água de amassamento, para uma determinada consistência. Deve-se lembrar de que, qualquer água não consumida na hidratação do cimento, permanece livre no sistema e, ao evaporar, dá origem a porosidade elevada da argamassa quando endurecida, afetando negativamente sua resistência mecânica final [31].

2.3 Agregados Leves – vermiculita

Agregado é o material inerte, tal como areia, cascalho, pedra britada ou suas variações, que é misturado a um material do tipo cimento e /ou cal, para formar argamassa ou concreto [32].

São considerados agregados leves, agregados minerais de baixa densidade aparente, que podem ser encontrados ao natural ou produzidos sinteticamente a partir de materiais naturais ou de subprodutos industriais. Dentre eles nós temos a argila expandida, a vermiculita, a perlita e tijolos isolantes moídos. Sua principal característica é a elevada porosidade, o que resulta numa baixa massa específica, sendo usado em argamassa e concreto quando se necessita prioritariamente de leveza e isolamento térmico. Porém deve-se ficar atento à pequena resistência mecânica final [33].

As propriedades necessárias para um bom agregado leve são:

- ✓ apresentar baixa massa específica, algo importante para diminuir o peso próprio da mistura em que for incorporado. Ele deve pesar no máximo a metade do que pesa o agregado normal que for substituir, ou seja, ser inferior a 800 kg/m³ de massa solta (metade do peso do cascalho ou a pedra britada);

- ✓ apresentar resistência mecânica suficiente com o menor teor de cimento na mistura, para a obtenção de uma determinada resistência mecânica estabelecida em norma;

- ✓ preferencialmente as partículas devem ter superfície arredondada, sem pontas e arestas agudas, partículas irregulares diminuem a trabalhabilidade da mistura e tendem a aumentar os vazios no concreto;

- ✓ deve possuir faixa adequada de dimensões para assegurar boa trabalhabilidade;

- ✓ apresentar absorção de água não tão elevada, por que os agregados com poros abertos tendem a absorver a água da mistura, impedindo a hidratação do cimento;

- ✓ deve apresentar inércia química, considerando que as reações entre o agregado e o cimento portland podem ser indesejáveis, por serem prejudiciais para a mistura;

- ✓ deve ter baixo custo, para sua aceitação no mercado. Seu preço, é geralmente superior aos outros agregados da mistura, deve ser compensado por alguma outra propriedade obtida com a mistura, seja a diminuição da massa específica aparente ou melhoria no isolamento térmico ou acústico [32].

As características mais relevantes do agregado leve são as propriedades de porosidade e absorção, pois não são encontradas nos agregados normais. Estas representam um papel muito importante tanto na dosagem de argamassas e concretos como nas propriedades resultantes.

O agregado leve tem a capacidade de absorção de grandes quantidades de água e de permitir a entrada da pasta de cimento fresca nos poros abertos da superfície das partículas, com esta absorção de água, a massa específica das partículas se torna maior do que das partículas secas em estufa, o que é importante para a massa específica do concreto ou argamassa [33].

A vermiculita foi descoberta no início do século XX nos Estados Unidos, em Wooncester, Massachusetts, por Thomas H. Webb. Tem este nome pela semelhança entre as contrações dos vermes e o movimento da partícula do agregado ao expandir [34].

2.3.1 Reservas de vermiculita

O início da exploração da vermiculita no Brasil ocorreu na metade do sec.XX em S. Paulo, e a partir de 1971, a Empresa MINEBRA iniciou a exploração em minas de São Luis de Montes Belos, Goiás o que intensifica a utilização deste material [35].

Em 1977, a Eucatex Mineração do Nordeste iniciou suas operações em Paulistana, no Piauí, e no final da década de 80, a União Brasileira de Mineração iniciou a exploração de um depósito em Santa Luzia, na Paraíba [35].

A maior reserva de vermiculita no Brasil, 4º maior produtor do mundo encontra-se em Catalão, no estado de Goiás, representando 40% das reservas do país. A nível mundial a maior reserva esta em Palabora, na África do Sul, que representa 42% das reservas mundiais, ficando em segundo e terceiro as reservas dos Estados Unidos (33%) e da China respectivamente [35].

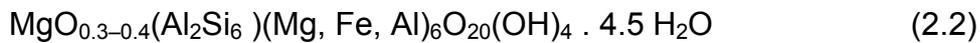
2.3.2 Definição da vermiculita

A Vermiculita é um filossilicato trimórfico (uma camada octaédrica $M(OH)_6$ aprisionada entre duas camadas tetraédricas de SiO_4), pertencente à família das Micas. No caso M pode ser Alumínio, Magnésio e/ou Ferro. Como característica principal apresenta camadas de cátions de Mg hidroxilados $[Mg(O(OH)_6)]$ entre as lamelas terminais. Neste aspecto, pode ocorrer a presença de uma ou duas camadas de cátions hidroxilados entre as lamelas, o que altera a distância interplanar de 11,59 para aproximadamente 14,36 Å.

A Vermiculita pode ser considerada uma mica plenamente hidratada já que geologicamente se forma no final da decomposição das micas flogopita ou biotita, após a lixiviação dos álcalis, já com substituição de Silício por Alumínio nos sítios tetraédricos. A substituição gera um desequilíbrio de cargas e para manter a eletroneutralidade, cátions Mg^{+2} se colocam interlamelamente de forma hidroxilada. A composição teórica da Vermiculita pode ser expressa através das fórmulas 2.1 ou 2.2:



Uma fórmula alternativa genérica é dada por:



A presença de camadas de Mghidroxilados tem efeitos na exfoliação que ocorre sob aquecimento (eliminação da água interlamelar acima de 300C) e, portanto nas propriedades gerais. A exfoliação é caracterizada por uma expansão volumétrica de 200 a 300% (o que depende da temperatura final e da taxa de aquecimento do material in natura). Estes espaços vazios que se originam com esta expansão volumétrica são preenchidos por ar, que conferem à vermiculita leveza, isolamento térmico e absorção acústica [3].

2.3.3 Propriedades e características da vermiculita

Como material cerâmico devido às suas características químico/mineralógicas/estruturais, a vermiculita agrega propriedades interessantes tais como: ausência de toxidez, incombustibilidade, capacidade de absorção de líquidos, trocador de cátions, lubrificante para altas temperaturas, isolante térmico e acústico. Destas as duas últimas, indicam um grande potencial de uso como agregado em isolamentos refratários para temperaturas até 1000°C e na construção civil, tanto na forma de produtos acabados (placas, painéis dentre outros) como monolíticos (argamassas, enchimentos, recobrimentos) [3].

Pode-se destacar como propriedades da vermiculita expandida :

✓ *Baixa densidade*

A densidade ou massa unitária da vermiculita expandida, sem compactação, varia com os tipos de granulometria do produto e de acordo com a NBR 9230 [36] deve estar entre 70 e 140 kg/m³.

✓ *Baixa condutividade térmica*

Pela quantidade de espaços preenchidos por ar, entre as lamelas, após a expansão, torna-se um material de alta porosidade, o que fornece a vermiculita uma baixa condutividade térmica, permitindo a sua utilização em isolamentos térmicos.

✓ *Incombustibilidade*

É incombustível, pois como não possui componentes orgânicos, suporta temperaturas até 1.100°C sem alterar a sua estrutura, por isso a sua sinterização ocorre a partir dos 1150°C.

✓ *Alta retenção de água*

A vermiculita expandida pode reter grande quantidade de água, chegando até 5 vezes (500%) seu próprio volume, em virtude da sua alta porosidade, o que lhe confere grande aplicação como retentora de água.

✓ *Elevada capacidade de troca iônica*

Esta propriedade é de grande importância quando da aplicação da vermiculita na agricultura, pois lhe dá aptidão para a formação de complexos com substâncias orgânicas. Como a vermiculita tem uma composição de placas delgadas de pequena espessura e pela sua configuração química e estruturação interna, confere a esta a capacidade de troca de íons.

✓ *Baixa condutividade acústica*

Esta propriedade possibilita a redução dos ruídos externos em até 50%, ao usar vermiculita expandida em argamassas e concretos [37].

2.3.4 Ciclo produtivo da vermiculita

O ciclo produtivo da vermiculita envolve a prospecção e pesquisa, extração, transporte e esfoliação [35].

Prospecção e pesquisa

No Brasil as regiões exploradas pelas empresas de mineração são o Centro-Oeste e o Nordeste. São utilizados os métodos tradicionais como mapeamento geológico métodos geofísicos de eletroresistividade, magnetometria e potencial espontâneo, com a finalidade de delimitar corpos mineralizados, e sua área de circunscrição nos veios e bolsões de vermiculita, deste modo evitando trabalhos de sondagens em áreas estéreis.

Lavra ou extração

A vermiculita é extraída por método de lavra a céu aberto e levando-se em conta que o material é friável, o desmonte é efetuado por equipamentos mecânicos, tipo trator de esteiras ou escavadeira hidráulica, sendo às vezes necessário o uso de explosivos, isto quando o minério é um veio na rocha, algo que raramente ocorre no Brasil. Quando escavado pelo trator de esteiras, o material empilhado é removido por meio de pá carregadeira até caminhões basculantes, quando escavado com a escavadeira hidráulica, é colocado direto nos caminhões basculantes, que encaminham minério para a usina de beneficiamento e estéreis para o banco de rejeito [3].

Transporte

Geralmente a vermiculita é transportada como “concentrado” e sua esfoliação acontece próxima ao mercado consumidor. O mais comum é o transporte em “big-bags” de polipropileno retornáveis, com capacidade de 1(uma) tonelada, que simplificam a estocagem, a separação por granulometria e o carregamento dos fornos para esfoliação da vermiculita [35].

Esfoliação ou expansão

A esfoliação é o processo onde a vermiculita ao ser aquecida a uma temperatura aproximada de 1000 °C em fornos, expande devido à saída da água de sua estrutura lamelar [35].

2.3.5 Aplicação da vermiculita expandida

A vermiculita expandida é comercializada em diferentes tamanhos, podendo ser aplicada e manuseada sem restrições, pois é inerte, inodora, não apodrece, tem propriedades lubrificantes e não oferece riscos à saúde, sendo desta maneira utilizada de diversas maneiras em diferentes setores [3].

Existem mais de 70 aplicações para a vermiculita no mercado mundial, sendo que o maior consumo de vermiculita no Brasil, ainda é proveniente de demanda agrícola e horticultura [3].

A vermiculita é muito utilizada como substrato agrícola, que são misturas contendo a vermiculita expandida e outros nutrientes de origem mineral ou orgânica, utilizado na criação de mudas em reflorestamento, fruta, hortaliças, vasos domésticos, jardins, etc [35].

Outra aplicação da vermiculita é como concreto leve, este é o termo empregado por alguns autores para denominar uma argamassa contendo agregados leves, como a vermiculita. Esta argamassa tem um campo de aplicação amplo devido a sua baixa massa específica aparente, sendo utilizado principalmente em lajes de cobertura como isolante térmico, proteção da impermeabilização ou simplesmente enchimento em laje para diminuição de carga nas estruturas convencionais [35].

A trabalhabilidade deste concreto é melhor quando comparada com o concreto convencional que tenha o mesmo abatimento, sendo que normalmente a demanda de água é muito influenciada pela textura superficial e forma das partículas, fazendo com que o valor real da relação água/cimento normalmente não seja conhecido [33].

Em relação à resistência à compressão, o concreto leve pode variar de 0,24 MPa a 4,2 MPa[29], e geralmente para uma mesma resistência de concreto, o teor de cimento em concretos leves é maior que em concretos convencionais. Como existe uma ampla relação entre o teor de cimento do concreto e a resistência à compressão, quando se quer aumentar a resistência aumenta-se o percentual de cimento. O aumento da massa específica aparente do agregado aumenta a resistência do concreto leve, porém reduz a capacidade de isolamento térmico e acústico [33].

O concreto leve pode ser aplicado na forma de placas pré-moldadas utilizadas em forros, paredes divisórias, miolos para porta corta-fogo, tendo como principais características a baixa condutividade térmica e a absorção acústica de 50%. Também é utilizado em blocos para alvenaria, onde a leveza facilita o manuseio e a aplicação, possuindo uma resistência ligeiramente superior a do bloco cerâmico de vedação [3].

A vermiculita pode também ser usada como produto auxiliar filtrante, absorvente de derrames de óleo no mar, agente de tratamento de águas poluídas, dentre outras aplicações.

A utilização da vermiculita expandida no isolamento térmico das câmaras frigoríficas é bastante difundida em diversos países, sobretudo na Europa. Este uso se destaca devido ao seu baixo custo, possibilitando a construção econômica de grandes armazéns frigoríficos, devido à facilidade de aplicação, oferecendo segurança ao usuário por ser inodora, e por suas características de isolamento a baixas temperaturas, reduzindo o gasto de energia nos compressores [3].

2.4 Argamassas com borracha reciclada de pneus.

A quantidade crescente de pneus inservíveis tornou-se um problema ambiental em todos os países, e procurando uma destinação adequada para estes resíduos, alguns pesquisadores tem proposto sua incorporação em concretos e argamassas, originando novos produtos com este agregado, que se tornou atraente sob o ponto de vista tecnológico, econômico e ambiental.

Como a grande maioria dos materiais empregados na construção civil utiliza cimento na sua composição, o produto resultante acaba tendo uma elevada rigidez e retração, sendo suscetíveis ao trincamento, mas estas propriedades podem ser melhoradas, incorporando materiais que muitas vezes são descartados sem a reutilização.

Estudos mostram a possibilidade de melhorar algumas destas propriedades através da criação de compósitos cimentícios. Nos últimos anos algumas pesquisas foram realizadas pretendendo além de dar um destino final adequado a vários tipos de resíduos, uma vez que estes constituem uma fonte de poluição, também analisar as propriedades físicas e mecânicas destes materiais resultantes desta incorporação como, por exemplo, do cimento acrescido de borracha reciclada de pneus, e dentre elas, cita-se aqui algumas.

As dimensões das partículas de borracha têm influencia na *resistência à compressão* do concreto. Fattuhi e demais autores relatam que incorporar ao concreto a borracha fina diminui em até 15 % a resistência á

compressão, enquanto que os usos de agregados grossos de borracha diminuem em até 30%, considerando a mesma relação borracha /cimento. Além disso, quanto maior a relação borracha /cimento menor a resistência à compressão. O concreto com a incorporação de borracha reciclada de pneus é obviamente menos denso do que com agregados comuns, propiciando uma maior facilidade de manuseio e transporte, diminuindo o desgaste das betoneiras e outros equipamentos quando do seu uso [38].

A *propagação de fissuras* também pode ser melhorada ao se utilizar a borracha de pneus na argamassa tradicional, como destacou Accetti e Pinheiro. As fibras de borracha atuam como obstáculos ao desenvolvimento e propagação das mesmas, interceptando aquelas que surgem durante o endurecimento da pasta, impedindo e limitando o aumento do número e a abertura das fissuras [39].

Raghavan e outros autores avaliaram a *trabalhabilidade e propriedades mecânicas de argamassa* de cimento contendo agregados reciclados de borracha de pneus. Para isto utilizaram partículas de borracha com 2mm de diâmetro, sem tratamento, nas proporções 5, 10 e 15%. Constataram uma diminuição da resistência à flexão proporcional a quantidade de borracha adicionada. Destacaram ainda que as argamassas onde foram adicionadas as partículas em forma de fibra tiveram maior resistência à flexão, do que as com borrachas em forma granular. Os autores ainda mostraram que argamassa contendo fibras de borracha apresentou melhor índice de trabalhabilidade do que a argamassa sem adições [40].

Li e colaboradores avaliaram as propriedades de concreto com partículas de borracha de pneus de diâmetro máximo de 2,5mm na proporção de 10%, incorporadas sem tratamento químico superficial, mas recobertas em um caso com polímero solúvel derivado de celulose , em outro caso, recobertas por pasta de cimento. Verificaram uma redução de 10% na densidade, resistência à compressão e à flexão. As amostras recobertas com pasta de cimento apresentaram os melhores desempenhos do que as demais [41].

A resistência à tração da pasta de cimento com borracha de pneu de 0,8mm e 0,4mm, nas proporções de 5 e 15%, sem tratamento superficial e

tratada com HNO_3 diluído foram avaliadas por Lee e colaboradores . Concluíram que a resistência à tração do material onde se utilizou 5% de borracha sem tratamento diminuiu 18% e decresceu mais ainda com o aumento desta porcentagem. Na composição com 5% de borracha tratada constataram uma diminuição de 44% na resistência à tração, com o aumento da quantidade de borracha as propriedades foram mais negativamente afetadas. Foi também observado que o tamanho da partícula não afetou o desempenho do material e que a densidade diminuiu em todos os casos [42].

Eldin e Senouci também utilizaram borracha de pneu como agregado em concreto. Seus resultados mostraram diminuição na resistência à compressão assim como aumento de volume, alta tenacidade e boa trabalhabilidade desta composição [43].

Rostami e colaboradores substituíram de 10 a 100% do agregado graúdo do concreto por 3 (três) tipos de borracha de pneu; sem tratamento superficial ou tratada com água ou com CCl_4 . Quanto maior a quantidade de borracha adicionada maior foi a diminuição da resistência à compressão. Tal diminuição foi de 22MPa do concreto convencional sem borracha, para 5MPa no concreto com 100% de agregado graúdo substituído por borracha. Nesta pesquisa a utilização de 10% de borracha tratada com CCl_4 , provocou uma diminuição de 10% na resistência à compressão em relação ao concreto convencional. Sob este mesmo percentual de borracha o tratamento com água, provocou uma diminuição de resistência à compressão de 27% e sem tratamento uma diminuição de 46% [44].

Ali e colaboradores estudaram a adição na pasta de cimento partículas de borracha de pneu com diâmetros entre 0,6-1,2mm sem tratamento e também constataram uma diminuição nas resistências à flexão de 3,5MPa (pasta sem borracha) para 2,5MPa (pasta com borracha). No caso da resistência à compressão a diminuição foi de 45MPa para 28Mpa [45].

Topçu estudou as propriedades mecânicas do concreto contendo borracha de pneu e verificou que além da redução na resistência mecânica das mesmas, quanto maior a granulometria da borracha maior foi diminuição da resistência [46].

Toutanji trabalhou com resíduos de pneus, tendo reafirmado o potencial deste agregado como material a ser empregado na construção civil. O autor estudou o efeito da substituição de agregados minerais graúdos no concreto por lascas de borracha de pneu. Foram substituídos os agregados minerais nas proporções 25, 50, 75 e 100% e como resultado houve também a redução na resistência à compressão e à flexão [47].

Khatib e Bayomy utilizaram dois tipos de fragmentos de borracha de pneu em sua pesquisa: ultra fina (graduação próxima a da areia fina) e tiras de pneu, produzidas por retalhamento mecânico, e relatam que houve redução na *resistência à compressão* conforme o aumento da quantidade de borracha. Entretanto verificaram que o concreto com adição do resíduo suporta mais deformação que o concreto usual e que a quantidade de borracha incorporada não deve exceder 20% do agregado em substituição [48].

Segundo pesquisa de Akasaki, Fioriti e Nirschile esta fração volumétrica máxima de 20% do volume do concreto em borracha permite uma melhor *trabalhabilidade* do concreto, com isto os autores estabeleceram uma base de quanto de borracha deve ser utilizado visando um melhor aproveitamento da mesma sem prejudicar a sua trabalhabilidade [49].

Benazzouk e demais autores pesquisaram as propriedades físico-mecânicas da pasta de cimento com agregados de borracha. Este estudo indicou redução da *resistência à compressão* para as amostras contendo borracha de 10% a 50%,concluindo além disso que para o mesmo peso unitário a resistência à compressão é maior com a borracha expandida do que com a borracha compactada [50].

A *absorção de água por capilaridade* feitas em concreto com formulações de borracha compactada também foi estudada e concluiu-se que a adição da borracha de pneu reduz a absorção de água [50].

Segre e Joeke definiram após estudos que em concreto, as partículas de borracha de pneus devem ter a dimensão máxima de 16mm para não comprometer a *resistência mecânica*, em vista de que os resultados obtidos em seus trabalhos mostraram que a adição de resíduos mais grossos afetou as propriedades mais negativamente do que os mais finos. Alguns

autores sugerem que a perda de resistência possa ser minimizada pelo tratamento químico da superfície das partículas de borracha [51].

Nos Estados Unidos existem estudos que avaliam a dosagens de concreto contendo resíduos de borracha de pneus, usando-se valores que variam de 5 a 20% em volume de resíduos em sua composição [52].

Quanto à preocupação com o risco de incêndio, e a dificuldade de extinguir o fogo da borracha dos pneus, pela grande quantidade de derivados de petróleo na sua composição estudos de Maganha e Komatsu ,mostram que pneus podem ser queimados como combustíveis auxiliares quando existem equipamentos de controle de poluição apropriados para controlar as emissões geradas no processo de utilização desses [53].

Quanto a taxa de substituição de agregados por borracha reciclada de pneus, Turatsinze e demais estudiosos, baseado em ensaios de *resistência à compressão*, definiram como limite máximo 30%, pois resultados mostraram que, para uma substituição de 20% acontecia uma queda de 50% na resistência à compressão e, para 30%, a perda de resistência era de cerca de 80% [54].

O estudo realizado por Uygunoğlu e Topçu verificou-se ainda que a *resistência à compressão* diminuía tanto com o aumento da taxa de substituição, mas também com o aumento da relação água/cimento. Através desta pesquisa constata-se que o aumento do percentual de borracha aumenta a porosidade das argamassas [55].

Resultados obtidos por Correia e demais pesquisadores também estão alinhados com os ensaios já expostos, o aumento da quantidade de borracha e da relação água/cimento diminui a *resistência à compressão* [56].

Outra propriedade que foi estudada apenas em concreto é o *teor de ar incorporado*. Khatib e Bayomy constata maior teor de ar no concreto com agregados de borracha reciclada de pneus do que no concreto de referencia, sem aditivos. Segundo os pesquisados, isto ocorre por causa da natureza não-polar das partículas de borracha que tem a tendência para repelir a água [48].

A *retração* é também uma propriedade que devemos nos preocupar quando da substituição de agregados naturais por agregados de borracha,

porque, como estes agregados apresentam um módulo de elasticidade mais baixo, espera-se um aumento desta propriedade devido à redução da restrição interna.

Turatsinze e demais estudiosos obtiveram resultados que confirmam estas expectativas, tendo-se registrado maiores valores de retração nas composições com agregados de borracha. Quanto ao trincamento por *retração*, esta pesquisa apontou que a incorporação de agregados de borracha foi benéfica, constatando-se que ocorria um caminho de fendas descontínuo quando houve a substituição de 20% e múltipla fissuração para substituição de 30%. Este comportamento contrastava com a da argamassa de referência, que apresentou fendas, que percorria a amostra ao longo de toda a sua altura [57].

Quanto às *propriedades no estado fresco*, Correia e demais autores, verificam que com o aumento da quantidade de partículas de borracha e se mantendo a relação água/cimento, o índice de consistência diminui o que representa uma piora na *trabalhabilidade* [58].

Num trabalho anterior a adição de 10% de pó de borracha de pneus (35 mesh de tamanho máximo) em pastas de cimento Portland, foi investigada. Esta borracha foi usado sem tratamento de superfície, e após o tratamento com solução aquosa saturada de NaOH. A aderência da borracha- melhorou com este tratamento, a resistência à abrasão e a absorção de água apresentaram resultados significativamente melhores do que nas pastas não tratadas [59].

Akasaki e demais autores demonstraram que com o aumento de 13% para 25% no percentual de fibras de borracha ocorre uma diminuição na *trabalhabilidade* de até 33% mesmo com o aumento da relação água/cimento de 0,69 para 0,81 [49].

2.5 Argamassas com vermiculita

A argamassa com vermiculita tem um vasto campo de aplicação por ser leve, ter boas propriedades de isolamento termoacústico e resistentes ao fogo. Estas argamassas podem sofrer variação nas suas composições, podendo ser de cimento portland e vermiculita, gesso e vermiculita, cimento, cal e vermiculita e cimentos aluminosos e argilas com vermiculita [3].

Devido às características de baixa massa específica e isolamento, a argamassa com vermiculita é utilizada para reboco isolante termo acústico, no contrapiso e enchimento de caixões perdidos, para proteção de lajes de cobertura, como revestimento protetor contra fogo em estruturas metálicas e equipamentos e na fabricação de produtos pré-moldados [3].

Encontram-se no mercado produtos a base de vermiculita fabricados pelas empresas *Brasil Minérios Ltda*, *Isar Isolamentos térmicos e acústicos e Refrátíl Refratários Ltda*, que utilizados juntamente com outros materiais, tem propriedades termoacústico, podendo ser aplicados em lajes, paredes duplas de salas que necessitam de um tratamento acústico, em painéis de fechamentos de prédios, casas pré-fabricadas, galpões, na elaboração de elementos pré-fabricados como lajotas, blocos vazados, pilares para muros, dentre outras aplicações. Vale aqui citar que como algumas destas informações foram baseadas em catálogos e publicações dos fabricantes e comerciantes de vermiculita, nem sempre estão lastreadas em fundamentação científica.

Segundo Pessatto a substituição de parte de areia por vermiculita na argamassa produz um revestimento de boa qualidade e trabalhável, pois este agregado tem se destacado como um agregado de características compatíveis para a argamassa de revestimentos, embora ensaios para averiguar as propriedades de resistência à compressão, umidade, retração por secagem e absorção de água, apontaram comportamento inferior ao da argamassa tradicional [3].

2.6 Conforto nas edificações

A sensação de conforto, tão importante á saúde e bem estar dos indivíduos, é alcançada quanto o usuário de um ambiente ficam satisfeitos com as condições de temperatura e umidade, de iluminação e acústica dos ambientes. A necessidade de conforto ambiental representa uma constante para a sociedade em todos os seus aspectos, desta maneira o conforto térmico, luminoso e o acústico define o nível e as condições de conforto em um determinado espaço físico.

lida destacou que as condições ambientais desfavoráveis como excesso de calor e de frio, ruídos e vibrações causam desconforto, aumentando o risco de acidentes, podendo provocar danos consideráveis à saúde, em vista disso a correta especificação de materiais de construção, revestimento e acabamentos podem conferir melhores condições de conforto nas edificações, possibilitando situações em que a permanência nestes espaços torna-se uma experiência agradável [60].

As edificações devem oferecer conforto termoacústico aos seus usuários, e os materiais de construção, revestimento e acabamentos especificados adequadamente pode contribuir para que as edificações tenham ambientes termicamente e acusticamente favoráveis, e possibilitando situações em que a permanência neste ambiente, que seja local de trabalho ou de moradia, seja agradável para seus usuários.

O conforto não é algo a ser desconsiderado no contexto projetual ou colocado em segundo plano, pois influencia as relações de trabalho- produtividade, saúde mental e física. O ambiente com adequado conforto termoacústico é definido, sobretudo pelas características das suas paredes, piso e cobertura, seus materiais, a sua disposição ao longo do terreno, além das aberturas das portas e janelas.

Para que uma edificação tenha adequado nível de conforto é preciso à utilização de materiais com bom isolamento térmico e absorção acústica para contribuir na redução dos níveis sonoros, reverberação, e manter as condições térmicas do espaço com temperatura interna agradável, mesmo que a temperatura externa seja muito elevada ou baixa, pois estas variáveis afetam a concentração, os níveis de produtividade e a qualidade de vida do homem.

Outro aspecto que deve ser destacado quando se fala em conforto térmico é a necessidade atual de se conservar energia, não apenas para evitar desperdícios, mas para que não sejam necessários novos investimentos em obras de geração, por esta razão é importante estudar os processos térmicos que ocorrem nas edificações para que possa ser equacionada a eficiência energética, ou pelo condicionamento artificial de ambientes ou com o uso de materiais adequados [61].

O crescimento das cidades traz um aumento nos vários tipos de poluição ambiental, poluição do ar, da água, poluição visual, sonora, dentre outras. A poluição sonora é a classificada pela Organização Mundial de Saúde como a que mais atinge a população mundial depois da poluição do ar e da água, mas como o crescimento das cidades é difícil de ser evitado, pode-se melhorar o conforto acústico das edificações utilizando materiais que absorvam parte desta poluição sonora.

2.6.1 Conforto Térmico: Materiais e a Transferência de Calor

A preocupação com o conforto térmico é um item obrigatório nas construções por isso, um isolamento térmico adequado proporciona benefícios para uma edificação. Em vista disso, estudar os processos térmicos que ocorrem no interior de edificações é importante para que possa ser equacionada esta eficiência energética, quer pelo condicionamento artificial quer com o uso de materiais termicamente adequados.

O isolamento térmico tem por objetivo principal satisfazer as exigências de conforto, fazer com que a temperatura do ar no interior do ambiente se mantenha dentro dos limites razoáveis a um custo mínimo. Para que isto ocorra é necessário determinar o fluxo de calor que penetra na edificação, monitorando esta temperatura para que não ultrapasse o limite máximo considerado adequado [62].

Diversos itens do projeto influenciam no conforto térmico interno das edificações, dentre eles podemos citar o isolamento térmico da cobertura, a orientação solar e material empregado nas paredes (incluindo os revestimentos) e as condições climáticas do local da construção.

Para discorrer sobre este parâmetro térmico é importante conceituar *conforto, desempenho e comportamento térmico*.

Estudos sobre *conforto* térmico em climas quentes afirmam que o organismo humano exige, para funcionar em condições normais de saúde, uma temperatura interna constante, em torno de 37°C, podendo apenas por pouco tempo, esta temperatura sair deste equilíbrio, sem riscos á saúde do ser humano. Todas as funções vitais como a circulação, respiração, digestão,

dentre outras, e as atividades físicas desenvolvem energia calorífica, e a manutenção desta temperatura interna faz com que o organismo dissipe esta energia, sendo imprescindível que o meio exterior absorva essa dissipação.

O conforto térmico está ligado ao ajuste entre a temperatura ambiente, o trabalho normal das funções vitais e a possibilidade deste equilíbrio. Como é um conceito que envolve, pelo menos, dois tipos de variáveis: fisiológicas e psicológicas, as determinações dos limitantes, superiores e inferiores são subjetivas, o que torna o conforto térmico um conceito um tanto subjetivo [63].

Já o *desempenho* térmico pressupõe a utilização de padrões de referência, comparativo a outras situações definidas ou analisadas, uma vez que o desempenho exige sempre um padrão de comparação [63].

Quanto ao comportamento térmico ele é resultante da análise da resposta térmica, em função de algumas variáveis como o tempo de exposição, às condições de utilização e às excitações do clima, do ambiente ou material, podendo desta maneira ser estudado. O comportamento térmico das edificações depende diretamente das condições do clima e dos fatores geográficos. O clima interfere no comportamento das edificações determinando o desempenho térmico dos ambientes internos, cabendo aqui destacar a incidência da radiação solar como o grande responsável pelo estresse térmico de calor no interior das edificações [63].

Para estudar material o comportamento térmico de um determinado, deve-se verificar a condutividade térmica dos seus componentes.

A condutividade térmica (K) é definida como a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente uma superfície de área unitária, por um determinado tempo. O fluxo de calor que atravessa a placa é diretamente proporcional às superfícies e diferenças de temperaturas da placa e inversamente proporcional à sua espessura [62].

Os revestimentos de paredes de fachada das edificações com propriedades isolantes poderão contribuir para que as paredes satisfaçam as exigências de isolamento térmico, pois fazem com que as paredes participem na inércia térmica dos edifícios [64].

A baixa condutividade térmica dos materiais isolantes decorre da grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares [65].

A Tabela 2.6 reproduz parte da tabela da NBR 15220, onde consta a condutividade térmica e densidade de massa de alguns materiais utilizados na construção civil [66].

Tabela 2.6 Densidade de massa e condutividade térmica [66]

Material	Densidade de massa (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/mK)
Concreto normal	2200 – 2400	1,75
Argamassa comum	1800 – 2100	1,15
Tijolos cerâmicos	1300 – 1600	0,90
Argamassa celular	600 – 1000	0,40
Concreto com vermiculita (e= 3 a 6 mm)	600 – 800	0,31
Madeiras (pinho, cedro e pinus)	600 – 750	0,23
Lã de rocha	20 – 200	0,045
Poliestireno expandido	15 – 35	0,040
Aço, ferro fundido	7.800	55
Vidro Comum	2.500	1,0
Pedra - granito	2.300-2.900	3,0

Nota-se que a variação da condutividade térmica está diretamente relacionada com a densidade de massa do material, quanto menor a densidade de massa menor a condutividade térmica.

Cincotto, Silva e Carasek constataram através de pesquisas, que as propriedades termo físicas do revestimento em argamassa recebem influencia direta de alguns aspectos da sua composição, como a quantidade de matéria sólida e sua distribuição, geometria e dimensões dos poros, do teor de umidade e do tipo de gás contido no interior dos poros [67].

A condutividade térmica dos materiais é inversamente proporcional à quantidade de ar presente no material, diretamente proporcional à densidade de massa aparente, aumenta em função do teor de umidade contida nos materiais e tem valores delimitados pela microestrutura dos agregados. Os agregados de estrutura cristalina com poros abertos conduzem mais calor do que os agregados de estrutura vítrea com poros fechados [68].

O calor ou energia térmica se transmite por duas razões ou pela existência de diferença de temperatura entre os corpos, troca seca quando se denomina a energia transmitida em calor sensível ou pela mudança de estado físico, a troca úmida cuja energia transmitida denomina-se de calor latente.

Para estudar ou prever a transmissão de calor e o comportamento dos edifícios frente a ele, é preciso conhecer o modo de propagação do calor através dos elementos de uma construção. Esta propagação é estudada através dos processos de transmissão da energia, os princípios básicos: condução, convecção e radiação [62].

Quando se constrói uma edificação, estabelece-se uma interface entre o homem e o seu entorno e entre estes 3 (três) elementos acontecem estas trocas térmicas secas. Dentre estas trocas destacam-se as trocas por radiação, a condução e a convecção, conforme pode se ver na Figura 2.6.

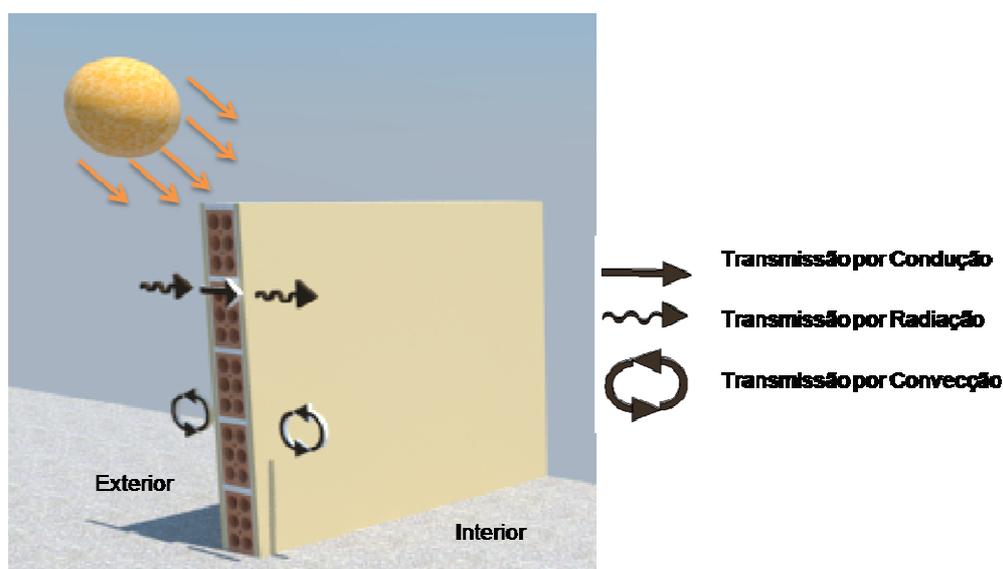


Figura 2.6 Processos de transmissão de calor.

As trocas por radiação ocorrem entre o Sol e a construção, entre a abóbada celeste e a construção, entre o corpo e as paredes, entre as faces internas da envoltória; as trocas por condução acontecem a partir do contato entre o corpo e toda superfície em que ele toca, através das paredes e as trocas por convecção ocorrem entre o corpo e o ar que está em seu contato direto, entre o ar e os componentes da edificação (externa e internamente) [62].

Transmissão de calor por *condução* é a transferência através do contato direto das partículas de matéria, de molécula em molécula, de átomo para átomo, sendo necessário um meio material, ocorrendo sempre do ponto de maior para um de menor temperatura, onde a quantidade de calor que flui através de um elemento opaco depende das variáveis deste elemento, do material que o constitui, da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. É a propagação de calor em que a energia térmica passa de partícula para partícula, sem transporte de matéria [69].

A grandeza física que caracteriza se um material é ou não um bom condutor de calor é a já citada condutividade térmica (K), e a fundamentação científica da transferência de calor por condução é representada pela *Lei de Fourier*, que em 1822, baseado em provas experimentais, conseguiu traduzir esta transferência através de fórmulas e equações. Estas experiências foram realizadas em paredes planas, submetendo alguns materiais às mesmas diferenças de temperatura e medindo o fluxo de calor (Q).

O fluxo sendo unidirecional, o seu valor é proporcional a diferença de temperatura ($T_1 - T_2$) entre as faces paralelas, a área (A) e inversamente proporcional à espessura da parede (e). Ensaando diversos materiais nas mesmas condições, encontraram-se fluxos diferentes, conduzindo à introdução de um coeficiente relativo ao material, simbolizando por (K), coeficiente de condutividade térmica de um determinado material [69].

A equação 2.3 representa o valor do fluxo de calor que é transmitido por condução atravessa a placa.

$$Q_c = - \frac{K A (T_2 - T_1)}{e} \quad (2.3)$$

Q_c = fluxo de calor transmitido por condução que atravessa a placa (W/m²)

K = coeficiente de condutividade térmica do material (W/m.K)

A = superfície de placa (m²)

T_1 e T_2 – temperaturas superficiais do elemento (K)

Sendo $T_1 > T_2$

e = espessura da placa (m)

Nesta equação é preciso o sinal negativo, pois o calor é transferido no sentido da perda de temperatura e a condutividade térmica é positiva. O coeficiente de condutividade térmica (K) introduzido na lei de Fourier indica a maior ou menor facilidade do material de conduzir ou isolar calor.

A condução de calor é importante para determinar como a temperatura varia com a posição no meio. O fluxo de calor por condução, em qualquer ponto do meio ou na sua superfície pode ser determinado através desta *Lei de Fourier*. Para um sólido o conhecimento da distribuição da temperatura pode ser para verificar sua integridade estrutural, através da determinação das tensões térmicas, expansões e deflexões. A distribuição de temperatura também pode ser usada para otimizar a espessura de um material isolante, ou mesmo para determinar a compatibilidade entre revestimentos.

Convecção é a transferência de energia térmica pelo movimento de moléculas de uma parte do material para outra. À medida que aumenta o movimento dos fluidos, ocorre a transferência de calor convectiva. É a propagação de calor com transporte de matéria que ocorre somente nos líquidos e gases. Esta transferência por convecção pode ser natural ou forçada.

Ela é natural quando o movimento do fluido ocorre unicamente devido a variações de seu peso específico já na força o movimento do fluido é provocado por uma bomba, no caso de um líquido, ou por um ventilador, no caso de um fluido gasoso. A quantidade de calor que flui neste processo é diretamente proporcional ao gradiente de temperatura entre o material sólido e a região do fluido não “perturbado” pelo seu deslocamento [62,69].

A grandeza física que caracteriza este modo de transferência de calor chama-se coeficiente de trocas térmicas por convecção (h), que mostra se o processo convectivo é mais ou menos intenso. Através de um meio fluido – o ar – em movimento, acontecem as “trocas térmicas por convecção” entre diversas zonas gasosas do ambiente, o ar que nos circunda, a pele de nosso corpo, e os elementos sólidos em contato – paredes, tetos, pisos, móveis, etc. – criando um processo de equilíbrio térmico [62,69].

A transmissão de calor por convecção é dada por uma expressão linear, a *Lei de Newton do resfriamento*, que relaciona o fluxo de calor

transmitido entre o sólido e o fluido e a diferença de temperatura a que se encontram, isto é, se for S a superfície do sólido em contato com o fluido a temperaturas respectivamente de T_1 e T_2 , o fluxo de calor Q_{cv} trocado e entre si será dado e representado pela equação 2.4:

$$Q_{cv} = hA (T_s - T_f) \quad (2.4)$$

Q_{cv} = fluxo de calor transmitido por convecção que atravessa a placa (W/m^2);

h = coeficiente de transferência por convecção ($W/m.K$);

A = superfície de placa (m^2);

T_s = temperatura da superfície;

T_f = temperatura do fluido.

O coeficiente de convecção é uma constante que resume a condições nas camadas mais próximas à superfície, considerando algumas variáveis, como por exemplo, a geometria da mesma, a natureza do escoamento e propriedades do fluido como a viscosidade, densidade, condutividade térmica e calor específico [62,69].

A transferência de energia térmica através do espaço vazio sem nenhum meio ocorre por ondas eletromagnéticas recebendo o nome de radiação. É a propagação de calor através de raios infravermelhos (chamados de ondas de calor), ocorrendo inclusive no vácuo. Todos os objetos com uma temperatura acima do zero absoluto irradiam energia a uma taxa igual à sua emissividade multiplicado pela taxa na qual a energia que irradia a partir deles. Como exemplo podemos citar a energia do Sol que percorre vácuo do espaço para o aquecimento da Terra [62,69].

As trocas de calor entre 2 (dois) corpos por radiação da energia que emitem e/ou absorvem dependem de 3 (três) variáveis; das temperaturas em que se encontram, do estado das suas superfícies e ainda da posição de um em relação ao outro.

O fluxo de calor trocado por radiação (Q_{rd}) em corpos porosos é dado através de uma modificação da *Lei de Steffan-Boltzmann* representado pela equação 2.5:

$$Q_{rd} = (1/\mu)4.g.d.n^2.\sigma.\varepsilon.Ts^3 \quad (2.5)$$

Q_{rd} = fluxo de calor transmitido por radiação (W/m^2);

μ = coeficiente de absorção de radiação do meio ($1/l$);

l = caminho livre médio do fóton no material (m);

g = fator geométrico que depende do formato dos poros;

d = diâmetro médio de poros (m);

n = índice de refração do material;

σ = constante de Steffan Boltzmann ($W/m^2 k^{-4}$);

ε = emissividade do poro;

Ts = temperatura absoluta da superfície (k).

A emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) é uma propriedade radiante da superfície, que define uma relação entre a capacidade de emissão do material comparado com um componente ideal ($\varepsilon = 1$), conhecido como corpo negro dependendo do material usado na superfície, seu acabamento e sua cor [69].

Quando se projeta uma fachada, coloca-se um anteparo entre o homem e o Sol, ocorrendo uma troca por radiação em duas etapas entre o Sol e o homem: entre o Sol e a parte externa da fachada; em outro momento entre a face interna da fachada e o usuário [62,69].

Materiais translúcidos, como o vidro, deixam a radiação solar atravessá-los, permitindo que alcance piso e paredes, mas impedem o sentido contrário, pela absorção da radiação solar, retendo o calor no ambiente.

A principal função do isolamento térmico de um edifício é o aumento da resistência térmica, reduzindo as trocas de calor entre o edifício e o exterior, reduzindo desta maneira as necessidades de aquecimento e refrigeração. Ao diminuir o fluxo de calor, estes isolantes possuem várias funções, dentre elas: conservar a energia devida à redução das perdas de calor; controlar a temperatura superficial de equipamentos e estruturas; reduzir as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico dos ambientes [70].

As trocas térmicas por condução são responsáveis pelo “trânsito” do calor no interior dos elementos construtivos das edificações, pois são elas que propiciam a propagação do calor através de um corpo ou entre camadas

distintas de um corpo em temperaturas diferentes. Este fluxo de calor varia com a diferença de temperatura; a densidade do material (o ar enclausurado é melhor isolante que a matéria); sua condutividade (dependendo de sua natureza físico-química, materiais amorfos são menos sujeitos à condução que os cristalinos); e sua taxa de umidade (já que a água é melhor condutora de calor do que o ar) [69,70].

Em vista disso, pode-se dizer que a resistência térmica de uma parede é o resultado da razão entre a espessura a ser utilizada, pela capacidade de condução (condutividade) do material utilizado. As trocas de calor por condução, ao contrário das por radiação, não cessam na ausência da fonte de calor. Por isso nas edificações submetidas à forte insolação, os ambientes internos permanecem quentes horas após o pôr do Sol.

Neste aspecto a capacidade de absorção, armazenamento e transmissão do fluxo térmico do material dos elementos construtivos das paredes é um parâmetro importante. É a chamada capacidade térmica, função de sua densidade, natureza química, calor específico, projeto de construção e até da umidade que existe no momento da troca em seu interior [70].

Nesta pesquisa para medir a condutividade térmica do material emprega-se o Método do Fio Quente, técnica que usa a medida transiente na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos, sendo também, o método de medida comumente utilizado para materiais refratários.

A condutividade térmica é calculada a partir do transiente de temperatura gerado por uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina [71]. Este método permite determinar, a partir do mesmo transiente térmico experimental a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, que são as três propriedades físicas de um material, mais importantes do ponto de vista de cálculos térmicos.

O cálculo da condutividade é feito a partir de uma determinada temperatura fixa, elimina-se o conceito de “temperatura média” entre a face quente e a face fria de uma amostra utilizado nos cálculos dos métodos calorimétricos. Este método não é aplicável para os materiais condutores elétricos, e materiais de alta condutividade térmica ($>25\text{W/m.K}$), sendo

considerada como uma técnica precisa na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos [71].

O método do fio quente possui quatro variações técnicas: padrão de fio quente (cruz de medição); resistência do fio quente; dois termopares; fio quente paralelo.

O método teórico é o mesmo nas 4(quatro) variações, a diferença entre as respectivas variações consiste no método de medição da temperatura. Este método foi utilizado pela primeira vez em 1960, por Haupin, para determinar a condutividade térmica dos materiais cerâmicos, mas somente duas das variações estão normalizadas desde 1976, pela DIN 51046, parte 1- padrão de fio quente (cruz de medição); parte 2 - fio quente paralelo [71].

A condutividade térmica é calculada a partir da equação 2.6:

$$k = \frac{q' \cdot \ln(t_2/t_1)}{4\pi \cdot T_2 - T_1} \quad (2.6)$$

onde:

k = condutividade térmica do material (W/mK);

q' = densidade linear de potência (W/m);

t₁ e t₂ = tempos contados a partir do início da liberação de calor (s) ;

T₁ e T₂ = excessos de temperatura no fio quente nos tempos t₁ e t₂, em relação à temperatura de referência (K).

A equação 2.7 mostra como se calcula o q':

$$q' = \frac{V^2}{R} \quad \text{ou} \quad q' = RI^2 \quad (2.7)$$

V = tensão nos terminais do fio quente (V);

R = resistência elétrica do fio (Ω/m);

I = corrente que passa pelo fio (A).

No próximo capítulo item 3.4.3 Ensaio térmico, detalha-se a aplicação deste método para verificar a condutividade térmica das composições estudadas [72].

2.6.2 Conforto Acústico: Materiais e a Propagação do Som

O excesso de ruído e as elevadas intensidades dos sons provocam desconforto, perdas auditivas, além de afetarem o sistema nervoso comprometendo a saúde mental e psíquica. As principais fontes de ruído urbano são decorrentes do crescimento das cidades, do aumento das frotas de carros e ônibus, das obras de construção civil. Por sua vez, os ruídos no interior das edificações, são provenientes dos sistemas de ventilação, equipamentos mecânicos coletivos, utensílios domésticos, tráfego de pessoas e sua interação e das vizinhanças.

Uma das maneiras de minimizar este efeito maléfico da poluição sonora no homem é trabalhar melhor o tratamento acústico das edificações, através da aplicação de materiais adequados que isolem ou absorvam estes incômodos sonoros de tal forma que o ambiente se torne confortável do ponto de vista acústico.

O som aéreo é originado pela excitação direta do ar decorrente de fontes sonoras, podendo ser transmitido através dos elementos de uma construção como paredes, portas e janelas, enquanto os ruídos de impacto e vibração são transmitidos e propagados pela estrutura da edificação, como o som de marteladas na parede, o andar com sapatos de salto ou o som do impacto de uma muleta no chão. Ambas as transmissões podem ser reduzidas ao utilizar nas edificações materiais com propriedades acústicas adequadas para cada caso [73,74].

Para uma melhor compreensão sobre o comportamento acústico de um material é de fundamental importância rever alguns conceitos de som, do modo de propagação das ondas sonoras e de acústica arquitetônica.

Segundo a NBR 12179 “som é toda e qualquer vibração ou onda mecânica que se propaga longitudinalmente através de um meio elástico produzindo no homem a sensação de ouvir” [75].

Já para Bistafa, som é uma sensação (pressão) auditiva, causada por ondas sonoras, geradas por objetos em vibração, que provocam o movimento periódico ou oscilação das moléculas do meio envolvente (sólidos líquidos ou gasosos),cuja propagação ocorre através de ondas mecânicas

longitudinais, aonde o deslocamento de cada elemento oscilante, é paralelo à direção de propagação da onda [76].

Quando o som provoca uma sensação desagradável ou indesejável, é definido como ruído, considerado fisicamente, como todo fenômeno acústico não periódico, resultante da superposição sem harmonia de várias fontes, que pode gerar incômodos, perturbação do sono, insônia, aumento da pressão arterial, irritação, chegando até mesmo à perda auditiva, sendo um dos principais causadores da redução da qualidade de vida nas cidades [76].

Quem transforma as pressões sonoras em pressões auditivas é o ouvido, que só consegue perceber o som, quando as variações de pressão e a frequência de propagação estiverem dentro dos limites compatíveis com a sua anatomia e fisiologia. O ouvido humano distingue o som através de um mecanismo que transforma as ondas sonoras em impulsos nervosos transmitidos ao cérebro, mas nem todos os sons são percebidos da mesma maneira, devido às diferenças físicas entre as ondas sonoras quanto à *frequência, a amplitude e o timbre* [76].

A frequência está relacionada com a altura do som, com a sequência das vibrações sonoras, mostrando o quanto ele é grave (baixa frequência – entre 20 a 360 Hz;) ou agudo (alta frequência – > 1400 Hz) [76,77].

A amplitude é a medida física da onda sonora, relacionada com quão forte o som é percebido, é a intensidade sonora que caracteriza a variação de pressão do meio em que se verifica a sua propagação, e esta relacionada à intensidade (energia) do som permite distinguir um som fraco de um forte, medido em dB (decibéis) [76,77].

O timbre está relacionado com a sua forma e permite a identificação da procedência do som, ou seja, de um instrumento musical, de uma voz feminina, de uma geladeira, dentre outras. É a característica que permite distinguir dois sons com a mesma frequência e a mesma amplitude, mas produzidos por fontes sonoras diferentes [76,77].

A frequência é dada em ciclos por segundo, ou Hertz (Hz), que é o número de oscilações ou ciclos completos que um fenômeno realiza com

periodicidade temporal de um segundo, ou seja, o número de vezes que a molécula do ar oscila em um segundo.

Para que esta vibração seja considerada sonora e interpretada pela região cortical do cérebro como sons audíveis é preciso que esteja entre 20 e 20.000 hz (Figura 2.7) e com variação de pressão sonora (intensidade) de 0 dB (limiar da audição) até 140 dB (limiar de dor), Figura 2.8.

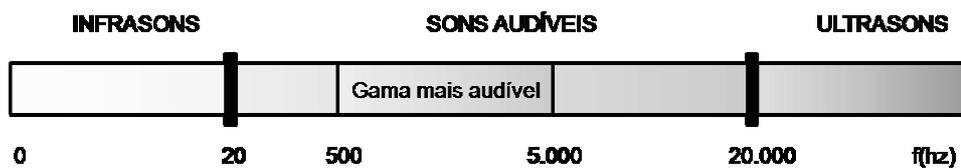


Figura 2.7 Faixas das frequências das ondas sonoras



Figura 2.8 Faixas das variações de pressão sonora

Na acústica as frequências são divididas em *diferentes bandas*, muito embora, o ouvido humano considere como iguais (igual sensação de altura) as frequências que se encontram dentro de uma mesma banda.

As divisões dessas frequências são normalizadas em bandas de oitava e bandas de terço de oitava. Esta denominação de oitava vem da música, que dá este nome ao conjunto de notas, que vai da nota dó de uma escala musical a escala seguinte, que tem dobro da frequência da escala anterior.

Nas bandas de oitava a frequência é dividida em uma largura igual a uma oitava, sendo a razão entre uma frequência e outra igual a 2(dois) e os centros das faixas são: 16hz;31,5hz;63hz.....16000hz .

As bandas de terço de oitava são semelhantes à anterior, sendo que as frequências são separadas por uma faixa de um terço da oitava, com isto

tem-se mais frequências, com intervalos menor entre elas, sendo os centros das faixas: 25hz;31,5hz;40hz;50hz;63hz.....16000hz, Figura 2.9 [76].

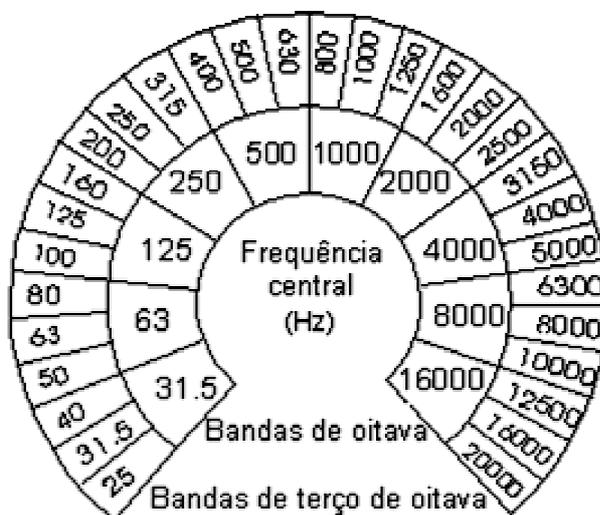


Figura 2.9 Divisões das bandas de frequências sonoras [76]

A figura 2.10 mostra os principais elementos de uma onda sonora: amplitude, comprimento, crista e velocidade.

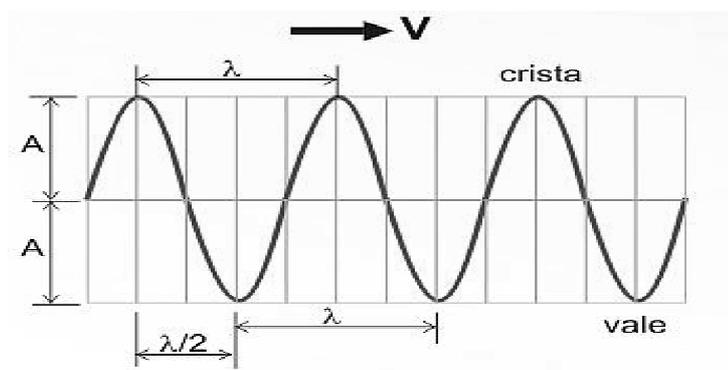


Figura 2.10 Elementos de uma onda sonora [78]

Sendo:

A = amplitude da onda sonora;

λ = comprimento da onda sonora;

V = velocidade da onda sonora.

Foram os neurologistas, Webber e Fechner, no final do sec. XIX, os responsáveis pela conclusão de que a percepção da intensidade sonora sentida pelo ouvido humano não é linear, mas sim logarítmica. Por esta razão utiliza-se a unidade logarítmica do Bel, para medir a variação de pressão sonora em relação à percepção auditiva destas oscilações [77].

O Bel (B), nomeação dada em homenagem ao inventor do telefone Alexander Graham Bell, é uma escala relativa, adimensional, que compara a intensidade de um sinal a uma referência. Sendo uma escala logarítmica, uma diferença de 1 bel corresponde a uma relação de 10 em potência, por isto, utiliza-se geralmente seu submúltiplo, o decibel (dB). Assim, ao se dobrar a pressão sonora, haverá apenas um aumento de 3 dB, pois $\log 2 = 0,3 \text{ Bel} = 3 \text{ dB}$. O sonômetro, mais conhecido como decibelímetro, é o aparelho que mede os níveis de som, em decibel (dB) [73, 76,77].

A correlação do nível em decibéis (dB) com a pressão sonora em N/m^2 está expressa na Tabela 2.7 que segue.

Tabela 2.7 Relação entre nível de decibéis e pressão sonora [76,77]

Pressão (dB)	Pressão (N/m^2)	Similaridade
140	2×10^2	Decolagem de jato
120	2×10^1	Britadeira
100	2×10^0	Banda de rock
80	2×10^{-1}	Tráfego urbano
60	2×10^{-2}	Escritório com barulho
40	2×10^{-3}	Campo/Floresta
20	2×10^{-4}	Quarto de dormir
0	2×10^{-5}	Limite mínimo audível

Quando uma onda sonora incide sobre uma superfície o resultado do seu modo de propagação do som pode ter três comportamentos: *a reflexão*, *a absorção* e *a transmissão* (Figura 2.11). Isto é, parte deste som é refletida, parte é absorvida pelo material e outra parte é transmitida através desta barreira. Teoricamente estes três efeitos estão interligados, mas conforme o tipo do material, um destes três fenômenos ocorre com maior intensidade, por isto afirma-se que o material é refletor, absorvente ou isolante [73,76].

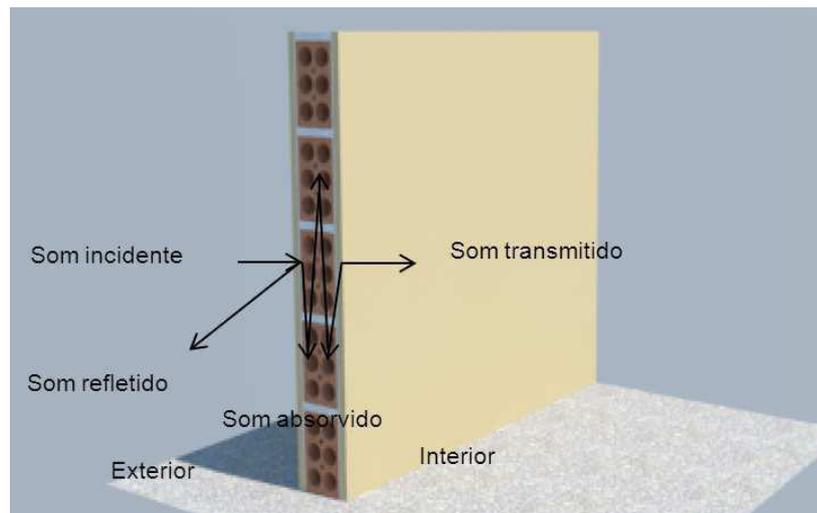


Figura 2.11 Propagação do som por uma parede

Nota-se, observando a Figura 2.11 que quando ocorre à incidência da onda sonora, uma fração do som é refletida retornando ao ambiente de onde partiu, outro percentual é refratada na parede, sendo uma parte absorvida e o restante transmitido para o interior do ambiente [73,76]. Estes três comportamentos originam os coeficientes de reflexão (Equação 2.8), absorção (Equação 2.9), e transmissão (Equação 2.10) sonoros dados formalmente por:

$$r = \frac{\text{Energia Refletida}}{\text{Energia Incidente}} \quad (2.8)$$

$$\alpha = \frac{\text{Energia Absorvida}}{\text{Energia Incidente}} \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{\text{Energia Transmitida}}{\text{Energia Incidente}} \quad (2.10)$$

Da *reflexão do som* originam-se dois outros comportamentos: o *eco*, quando ocorre a repetição de um som, claramente percebido como um sinal distinto do transmitido originalmente e a *reverberação* quando o som permanece no ambiente, mesmo depois de ter sido extinta sua emissão por uma fonte, ocasionando o prolongamento da sensação auditiva [73,76].

O coeficiente de absorção permite que se calcule o tempo de reverberação do som em determinado ambiente através da fórmula de Sabine

(Equação 2.11). Com ela se pode fazer uma adequação acústica, através da especificação de materiais com um melhor comportamento acústico para cada tipo de ambiente. Este coeficiente está relacionado com a frequência, o ângulo do som incidente, a espessura e o modo de utilização do material. Quanto menor for este valor, menor será a intensidade sonora absorvida.

$$T_R = \frac{0,161 \times V}{A} \quad (2.11)$$

T_R = tempo de reverberação em seg;

0,161 = constante que torna o cálculo mais exato;

V = volume do ambiente em m^3 ;

A = absorção sonora total em m^2 Sabine.

Sendo a absorção sonora total (m^2 Sabine) calculado pela fórmula:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad (2.12)$$

α_i = coeficiente de absorção sonora de cada elemento construtivo;

S_i = área da superfície de cada elemento construtivo em m^2 .

Obs: m^2 Sabine varia conforme o revestimento, sendo que, alguns materiais não têm coeficiente de absorção fixo.

Quanto ao isolamento sonoro o parâmetro para caracterizá-lo é a grandeza do coeficiente de transmissão, ou a perda de transmissão sonora (dB). Quanto menor for o valor deste coeficiente, menor será a intensidade sonora transmitida e mais isolante será a parede [73,76].

A absorção acústica é importante para eliminar ou reduzir a reflexão do som (a reverberação e o eco), melhorando a inteligibilidade no ambiente, já a isolamento sonora é utilizado para impedir que um ruído passe de um ambiente para outro [73,76].

Uma dificuldade encontrada ao se especificar determinado material é a falta de informações dos fabricantes quanto ao seu coeficiente de absorção e/ou isolamento acústico, e algumas vezes falta esclarecimento sobre a

metodologia utilizada para se chegar aos resultados de um dado acústico inseridos nos catálogos técnicos.

Não se deve confundir isolamento com absorção acústica. Isolamento é a maneira como o som atravessa o material, enquanto a absorção é a capacidade do material em transformar a energia sonora, que o atinge, em energia térmica e mecânica, como acontece num tapete grosso, no qual o som que chega praticamente desaparece, pois a perda de energia ocorre nos poros e fios do tapete que não consegue refletir de volta ao ambiente.

Isolamento acústico está relacionado à propriedade de determinados materiais formarem uma barreira que impede (por reflexão) que o som ou ruído, passe de um ambiente para outro, reduzindo desta maneira o nível de intensidade sonora transmitida para outro ambiente. Usualmente emprega-se para esta finalidade materiais densos como o concreto, vidro ou chumbo [73].

A NBR 12179 traz valores de isolamento acústico de alguns elementos de uma edificação, valores na frequência de 500hz e expressos em decibéis, Tabela 2.8 [75].

Tabela 2.8 Isolamento acústico de diversos materiais [75]

Material	Isolamento acústico em decibéis (500 Hz)
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 10 cm)	45
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 20 cm)	50
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 30 cm)	53
Alvenaria de tijolo maciço(espessura de 40 cm)	55
Alvenaria de tijolo furado (espessura de 25 cm)	10
Chapas ocas de gesso (espessura de 10 cm)	24
Compensado de madeira (espessura de 6,0 mm)	20
Compensado de madeira (espessura de 6.0 mm) duas placas com camada de ar intermediária de 10 cm	25
Concreto - laje entre pavimentos	68
Vidro de janela (espessura de 2.0 a 4.0 mm)	20 a 24
Vidro grosso (espessura de 4,0 a 6,0 mm)	26 a 32
Vidro de fundição (espessura de 4 a 6 mm) duas placas com camada de ar intermediaria	36

Esta mesma norma traz também alguns coeficientes de absorção, os quais são mostrados de maneira resumida na tabela 2.9. O coeficiente varia

conforme a frequência, e tem seus valores expressos entre 0 e 1. Zero (0) significa ausência de absorção (toda a energia incidente é refletida) e um (1) significa absorção total da energia [75].

Tabela 2.9 Coeficientes de absorção acústica de alguns materiais [75]

Material	Espessura [cm]	Frequência [Hz]					
		125	250	500	1K	2k	4K
Lã de rocha	10	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79
Lã de vidro solta	10	0,29	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Feltro	1,2	0,02	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Piso de tábuas de madeira sobre vigas		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Placas de cortiça sobre concreto	0,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Carpete tipo forração	0,5	0,10		0,25		0,4	
Tapete de lã	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
Concreto aparente		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parede de alvenaria		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Vidro		0,18	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
Cortina de algodão com dobras		0,07	0,31	0,49	0,81	0,61	0,54
Reboco áspero, Cal		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Tapete 5mm sobre feltro(5mm)	1,0	0,07	0,21	0,57	0,66	0,81	0,72
Madeira compensada de 3mm a 50mm.	0,3	0,25	0,34	0,18	0,10	0,10	0,05
Forro de gesso c/manta de lã de vidro	2,0	0,68	0,90	0,78	0,65	0,50	0,45
Cortina de veludo		0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65

Nota-se pelos dados da Tabela 2.9 que os materiais com melhor absorção acústica normalmente são lã, fibras cerâmicas, tecidos, carpetes, espuma, cortiça, pois esta propriedade está relacionada às características de baixa densidade e a presença de fibras ou poros. A absorção acontece pela perda da pressão sonora, devido ao movimento das moléculas de ar no espaçamento entre as fibras ou dentro dos poros, quando da passagem da onda sonora. Parte da energia acústica é transformada em energia térmica através da viscosidade do ar, algo que normalmente ocorre em materiais que possuem alta porosidade [73,76].

Como nesta tese estudou-se argamassa de revestimento com vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, onde o percentual de porosidade é grande, a caracterização acústica desse revestimento foi feita através da determinação do coeficiente de absorção acústica pelo ensaio do tubo de impedância e pelo cálculo da velocidade de propagação do som,

através do módulo de elasticidade nas diferentes argamassas, métodos estes detalhados no item 3.3.4 do capítulo 3 desta tese.

A equação 2.13 que segue relaciona o deslocamento, o tempo, espaço e velocidade de uma onda sonora [76].

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.13)$$

u = deslocamento;

t = tempo;

c = velocidade

x = espaço

A velocidade de propagação do som depende do meio onde está sendo propagado, quanto mais denso este meio, maior é a velocidade do som, sendo por isto, mais rápido nos sólidos e mais lento nos gases, Figura 2.12.

$$V_{\text{sólidos}} > V_{\text{líquidos}} > V_{\text{gases}}$$

Figura 2.12 Velocidade de propagação do som nos meios

A velocidade da onda sonora (equação 2.14) está relacionada a duas características do meio onde ela se propaga: a densidade (quantidade de massa existente em uma porção unitária do meio) e a elasticidade (quando uma parte do meio é deslocada de sua posição por um agente externo, surge uma força que tende a trazer essa parte para a posição inicial [79]).

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.14)$$

C = velocidade do som no meio

E = módulo de elasticidade do material

ρ = massa específica do material

Com a densidade e o módulo elástico das argamassas, pode-se calcular a velocidade do som nos revestimentos aqui estudados, cujos resultados estão expressos no item 4.5.2 do Capítulo 4.

A elasticidade é a capacidade da argamassa no estado endurecido em deformar sem apresentar ruptura, quando submetida a solicitações mecânicas. Ao cessar esta solicitação as argamassas retornam a sua dimensão original. O módulo de elasticidade ou módulo de Young é um parâmetro que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido e depende diretamente da composição mineralógica do sólido, microestrutura e defeitos (poros e trincas) [67].

A capacidade de deformação da argamassa é importante, pois ela acaba sofrendo alguns ajustes ao acompanhar as variações dimensionais que podem vir a ocorrer nas edificações, evitando assim alguns defeitos, como fissuras, trincas, dentre outro. Como referência se compararmos a ordem de grandeza dos módulos de elasticidade do aço e da borracha, pode-se dizer que o aço é um material de elevado módulo de elasticidade e a borracha um material de módulo de elasticidade muito baixo [23].

2.7 Materiais termoacústicos para construção civil

Os materiais isolantes térmicos utilizados como revestimentos podem ser incorporados como um agregado na argamassa, ou mesmo trabalhar como uma camada extra, aliando assim ao conjunto como um todo.

Podem ser empregados isolantes térmicos pelo exterior, interior ou no centro de paredes duplas, ou preenchendo parcialmente o espaço intermediário entre paredes, ou preenchendo totalmente este espaço [80].

Dentre os isolamentos térmicos tradicionais destaca-se a *lã mineral*, formada por fibra de vidro e lã de rocha, o poliestireno expandido (EPS) ou extrudado, a celulose, o isolante térmico de cortiça e o poliuretano [80].

A lã mineral é formada por fibra de vidro e lã de rocha, normalmente produzida em tapetes, placas ou material de preenchimento, com condutividade térmica entre 0,03 a 0,04 W/mK, que tem a vantagem de poder ser perfurada, rasgada e ajustada sem perder esta resistência. (Figura 2.13)



Figura 2.13 Lã mineral em forma de tapete e placa [81]

Em vista das inovações tecnológicas que vem ocorrendo na construção civil, as paredes convencionais têm sido substituídas por painéis com a função de vedação. Painéis sanduíche com características diferentes e com diversas camadas foram desenvolvidos com o objetivo de proporcionar resistência, isolamento térmico e acústico, etc.

Outro tipo de painel desenvolvido foi o tipo sanduíche para paredes externas de casa de madeira, utilizando como aglomerante a argamassa de gesso e vermiculita, para reduzir a sua inflamabilidade e a massa específica, bem como melhorar o desempenho térmico e acústico dos painéis. Foram também estudadas por Guimarães e Tubino a adição de três tipos de rejeitos: resíduos de pneus (borracha), garrafa PET triturada e casca de arroz *in natura* neste mesmo tipo de vedação [82].

ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*) é um sistema de isolamento térmico colocado no exterior de algumas edificações na Europa, também chamado de “casacos”, formados por um isolante fixado mecanicamente ou por cola no suporte, recoberto por um revestimento em geral misto e armado com redes especiais, protegidos por um acabamento [83].

Poliestireno expandido (EPS-isopor) ou extrudado (XPS) são materiais isolantes térmicos tradicionais formados por pequenas esferas de poliestireno expandidas por vapor de água (EPS), figura 2.14, e poliestireno

derretido por adição de um gás de expansão (XPS). Ambos têm condutividade térmica entre 0,03 e 0,04 W/mK e podem ser perfurados, cortados e ajustados no local de aplicação, sem perda desta resistência térmica [80].



Figura 2.14 Peças de EPS [84]

A celulose (polissacarídeo $(C_6H_{10}O_5)_n$) é um isolante térmico feito papel reciclado ou fibra de madeira (Figura 2.15). Através do seu processo de produção adquire uma consistência parecida com a da lã. Tem condutividade térmica entre 0,040 e 0,050 W/mK, e podendo ser perfurada, cortada e ajustada nos diferentes locais, sem perda de resistência térmica [80].



Figura 2.15 Celulose – isolante térmico [85]

O isolante térmico de cortiça (carvalho), Figura 2.16, produzido como material de preenchimento ou em placas, tem condutividade térmica entre 0,04 e 0,05 W/mK, pode ser perfurado, cortado e moldado nos lugares de aplicação, sem perda de resistência térmica [80].



Figura 2.16 Cortiça de carvalho em rolo [86]

Outro isolante térmico é o poliuretano (PUR), formado pela reação entre isocianetos e polióis, produzido em placas ou utilizado como espuma expansiva para preenchimento de cavidades, tem a condutividade térmica entre 0,02 e 0,03 W/mK, mais baixa que os demais isolantes térmicos tradicionais, Figura 2.17. Esse material também pode ser perfurado, cortado e ajustado nos diferentes locais de aplicação sem perda de resistência [80].



Figura 2.17 Placa de poliuretano e aplicação de poliuretano expandido [87]

Existe também o painel de isolamento a vácuo (VIP), com um núcleo de poros abertos de sílica ativa, envolto por camadas laminadas de polímeros metalizados (Figura 2.18). A condutividade térmica deste sistema é de 0,03 a 0,04 W/mK, chegando a 0,08 W/mK, quando da sua aplicação. O inconveniente deste isolante é que sua perfuração provoca o aumento da sua condutividade térmica, por esta razão, estes painéis não podem ser cortados, perfurados, sem que haja perda de desempenho do seu isolamento térmico [80].

Apesar destas desvantagens, incluindo seu alto custo, os VIP's, podem apresentar uma condutividade térmica entre 5 e 10 vezes menor que um isolante tradicional, como lã mineral e produtos de poliestireno. Este material tem a vantagem que as espessuras das vedações podem ser mais finas, o que possibilita o aumentando as áreas úteis de uma edificação [80].

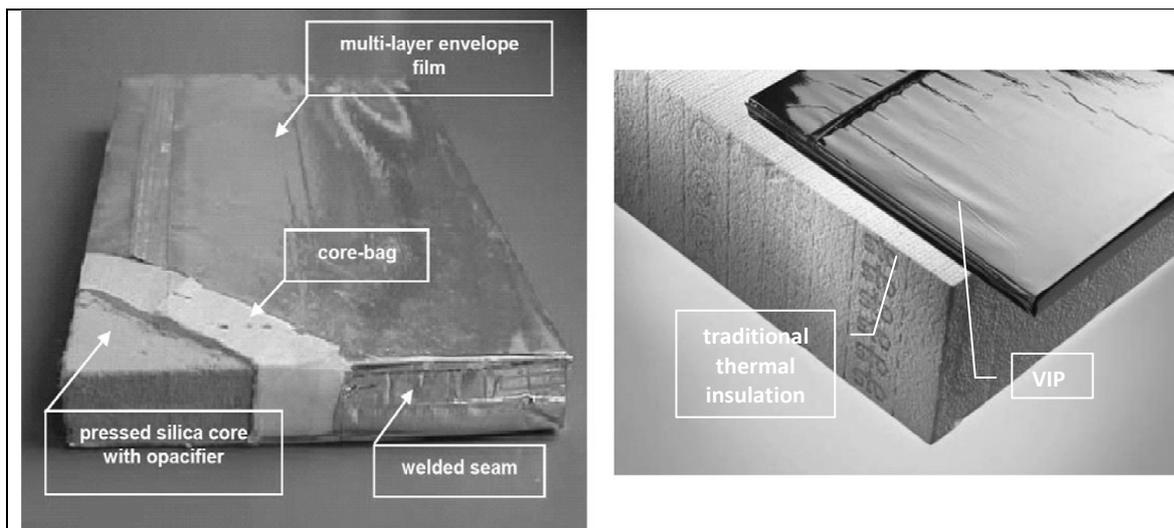


Figura 2.18 Painel de isolamento a vácuo (esquerda) e as espessuras de resistência térmica entre o VIP e um isolante tradicional (direita) [80].

Existe também a tecnologia de painéis com preenchimento de gás (GFP) o argônio, o criptônio e o xenônio, estes gases têm condutividade térmica menor do que o ar, mas, para um adequado desempenho térmico é necessário evitar a penetração de ar e umidade no seu interior. Os protótipos já testados com GFP apresentaram condutividade térmica por volta de 0,04 W/mK, sendo mais caro que o VIP [80].

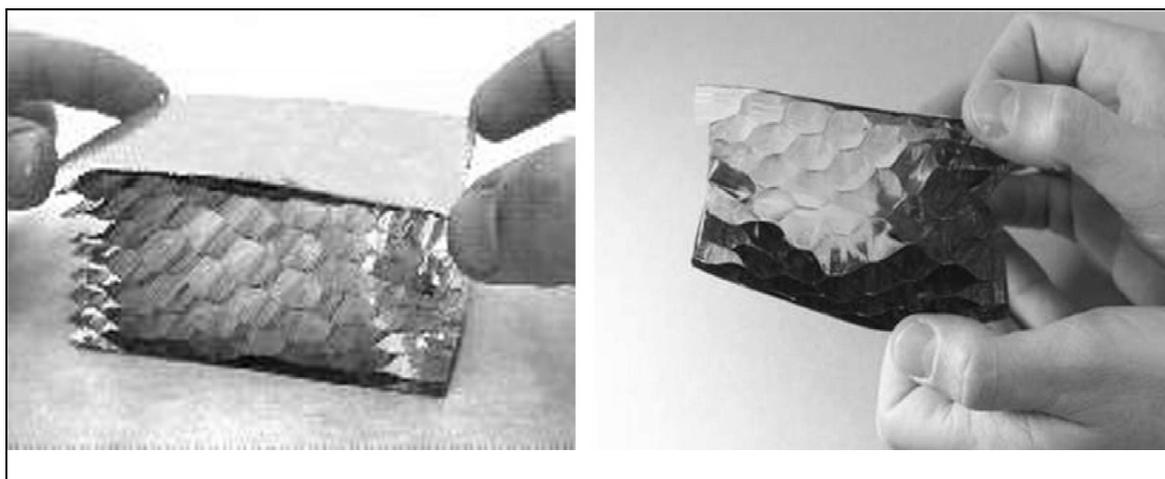


Figura 2.19 Barreira de lâminas e estrutura interna do GFP [80]

Os aerogels são também uma solução de isolamento térmico, com baixa condutividade térmica, entre 0,013 e 0,014 W/mK, mas com o custo muito alto. Apresentam altos valores de resistência à compressão, mas são frágeis devido à baixa resistência à tração. Usando este isolante tem-se a vantagem de poder aplicar materiais opacos, translúcidos ou transparentes nas nossas edificações. Dentre os materiais citados pode-se dizer que os painéis de isolamento a vácuo (VIP) e os aerogels com menores valores de condutividade térmica, comparados com os materiais tradicionais são bastante promissores para uso, caso haja um barateamento do seu custo [80].

Cabe aqui citar que além da condutividade térmica, outras propriedades devem ser consideradas na hora de procurar um isolante térmico, a resistência à tração e compressão; proteção ao fogo; emissão de fumaça e gases tóxicos durante a queima; durabilidade às diversas exposições climáticas; resistência à água; impacto ambiental na produção e execução do sistema e o custo que deve ser competitivo com os demais materiais isolantes.

Quanto ao isolamento acústico os materiais utilizados na construção civil, blocos cerâmicos, de concreto e o de concreto celular, já têm características isolantes, embora nem sempre suficientes para situações que exigem melhor desempenho acústico. Em vista disso, são utilizados juntamente com outros materiais desenvolvidos especialmente para isolar acusticamente alguns ambientes que requerem um melhor tratamento acústico [88].

Algumas empresas desenvolveram um material de lã de vidro aglomerada com resinas sintéticas, com alta resistência mecânica, proporcionando excelentes índices de isolamento termoacústico, podendo ser também encontrado em feltros leves e em painéis semirrígidos.



Figura 2.20 Isolamento termoacústico à base de lã de vidro [89]

A lã de rocha tem sido empregada como material acústico, na forma de placa ou manta, originada a partir de rocha vulcânica, tem excelentes níveis de isolamento térmico e acústico, tendo a vantagem de ser um material incombustível, inócuo e perene [88].



Figura 2.21 Isolamento termoacústico com composição de lã de rocha [90]

No Capítulo 3, abordam-se os Materiais e Métodos dos ensaios realizados nas argamassas estudadas nesta Tese.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo trata dos materiais utilizados nas composições e os métodos empregados neste estudo experimental. Os ensaios realizados seguiram a orientação das normas da ABNT. Além dos ensaios das propriedades necessárias a uma argamassa de revestimento, foram realizados também, ensaios de condutividade térmica, de absorção acústica e calculado a velocidade da onda sonora a partir do módulo elástico, aspectos adicionais importantes de conforto ambiente das edificações.

A parte experimental foi pautada inicialmente pela escolha, caracterização e dosagem dos elementos que compuseram as argamassas para revestimento. Foram eleitas para o estudo 6 (seis) composições de argamassa, especificadas abaixo:

1 - Um traço da argamassa tradicional usada como referência, preparada em uma obra de São Carlos.

2 - Uma argamassa industrializada também usada também como referência da marca Votomassa® de uso já consagrado no mercado.

3 - Dois traços de argamassa leve, utilizando cimento, cal, areia e vermiculita, nas quais se variou o teor de vermiculita expandida.

4 - Dois traços de argamassa leve contendo cimento, cal, areia, vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus, também com variações do teor de vermiculita. Nessas argamassas o teor de agregados de borracha e suas granulometrias também foram variados, conforme Tabela 3.1.

3.1 Caracterizações das matérias primas.

Os materiais utilizados na composição das argamassas leves desta Tese foram:

- ✓ aglomerantes: cimento, cal hidratada (aglomerante hidráulico e aéreo);
- ✓ agregado miúdo: areia fina lavrada em solo;
- ✓ agregados leves: vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus;

✓ aditivos especiais:

1- um sal sódico de ácido naftaleno sulfônico (SSNS) em pó, com função superplastificante para contribuir com a trabalhabilidade.

2- a microsilica, um aditivo mineral, com efeito, filler e pseudo-pozolânico, com a finalidade de compensar a baixa resistência mecânica das argamassas leves.

A Tabela 3.1 mostra os materiais e seus respectivos percentuais utilizados nas composições estudadas.

Tabela 3.1 Composições das argamassas estudadas (% em massa)

Composição	A 1 (%)	A 2 (%)	A 3 (%)	A 4 (%)	Argamassa Industrial (%)	Argamassa Tradicional (%)
Cimento	25	30	25	20		8,5
Cal	15	10	20	15	Detalhes de	9,5
Areia	27	12	12	28	composição	82
Vermiculita	20	12	40	34	não	-
Bor.grossa (<4mm)	7	18	-	-	divulgada	-
Bor. Fina(<1mm)	3	15	-	-	pelo	-
Microsilica	3	3	3	3	fabricante	-
SSNS	0,3	0,3	0,3	0,3		-
H ₂ O	50	40	80	70	18	16

A Tabela 3.2 mostra a procedência dos componentes que foram usados em todos os ensaios.

Tabela 3.2 Procedências dos materiais utilizados nas argamassas

Componente	Fabricante
Cimento CII – Z 32	Votorantim®
Areia Fina	Mineração Jundu Ltda
Cal CH III	Votorantim
Arg.Industrial	Votomassa - Votorantim
Vermiculita Expandida(2mm)	Brasil Minérios Ltda
Sulfotan 131 NSS pó	Resinac Polímeros Ltda
Microsilica 920 U	Elken do Brasil
Borracha Grossa < 4mm	EcoBalbo
Borracha Fina < 1mm	EcoBalbo

Todas as argamassas foram caracterizadas através de ensaios físicos nos estados fresco e endurecido, além dos ensaios mecânicos para avaliar as resistências à compressão uniaxial, à compressão diametral e à aderência à tração.

O desempenho térmico das argamassas foi avaliado através do ensaio de condutividade térmica pelo método do fio quente cruzado.

O desempenho acústico das argamassas foi avaliado utilizando-se a técnica do tubo de impedância e o cálculo da velocidade da onda sonora em cada argamassa através do ensaio de frequência de ressonância para se calcular o módulo elástico das composições, utilizado para se calcular a velocidade do som em cada argamassa.

Cimento Portland

O cimento utilizado nesta Tese foi o Portland composto CP II Z 32 (adição de material pozolânico), do Grupo Votorantim cuja fábrica fica em Rio Branco do Sul, região de Curitiba, Paraná.

Cal Hidratada

A cal hidratada aqui utilizada é a CH III, do Grupo Votorantim, cuja fábrica esta localizada em Itaú de Minas, em Minas Gerais.

Areia

A areia natural utilizada nas composições das argamassas como agregado miúdo foi da Mineração Jundu Ltda, e na tabela 3.3 encontra-se a análise granulométrica desta areia.

Tabela 3.3 Granulometria da areia Jundu

Agregado Miúdo					
Peneira Abertura (mm)	Peneira (Mesh)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Massa acumulada(g)	Massa acumulada (%)
2,8	# 7	0		0	
2	# 10	0		0	
1	# 16	12,79	4,26	12,79	4,26
0,5	# 35	233,75	77,92	246,54	82,18
0,15	# 100	53,07	17,69	299,61	99,87
TOTAL		299,61	99,87	299,61	

A granulometria da areia está relacionada ao desempenho da argamassa, pois no estado fresco, interfere na trabalhabilidade, no consumo de água e aglomerantes e no estado endurecido, exerce influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência de aderência [91].

Vermiculita Expandida

Nesta pesquisa foi utilizada a vermiculita expandida da Brasil Minérios Ltda, beneficiada na indústria de Cosmópolis, São Paulo, com granulometria denominada de fina, Figura 3.1.



Figura 3.1 Vermiculita expandida utilizada nas argamassas.

As principais características da vermiculita expandida utilizada nas composições estudadas estão descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Características físicas da vermiculita expandida [92]

Características físicas	
Cor	Marron claro
Densidade Solta	0.07 a 0.14 g/cm ³
Densidade real	2.6 g/cm ³
Temperatura máxima recomendada	1.200 ° C
Temperatura de amolecimento	1.260 ° C
Temperatura de fusão	1.315 ° C
Calor específico	0,84 kcal/kg °K
Condutividade térmica	0,062 – 0,065 W/m°K
Ph em água a 25°C	7%
Umidade máxima a 110°C	7,0 %
Não tóxica	silicato mineral inerte
Não abrasiva	dureza de 1,5 na escala de Mohs (1 á 10)
Incombustível	não pega fogo não propaga chama
Capacidade de retenção de água (CRA)	200 – 600%
Absorve líquido	quantidade de líquido superior a sua própria massa.
Capacidade de troca de cátions (CTC)	90-100 meq /100g

As Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 trazem respectivamente a distribuição da granulometria, a densidade e a análise química da vermiculita da Brasil Minérios [92].

Tabela 3.5 Distribuição da granulometria da vermiculita [92].

Distribuição Granulométrica (% Retido na malha)				
Malha (mm)	Tipo			
	Médio	Fino	Superfino	Mícron
8,00	0 - 1			
4,00	10 - 45	0 - 1		
2,40	55 - 95	5 - 35	0 - 1	0 - 1
1,20	75 - 100	65 - 95	10 - 45	0 - 5
0,60	85 - 100	80 - 100	70 - 95	15 - 60
0,30	90 - 100	90 - 100	90 - 100	30 - 90
0,15		95 - 100	95 - 100	45 - 100

Tabela 3.6 Densidade da vermiculita [92]

Densidade (Kg/m ³)				
Tipo	Médio	Fino	Superfino	Mícron
Densidade	70 - 100	80 - 115	90 - 130	120 - 150
Peso por saco (kg)	7 a 10	8 a 11	9 a 13	12 a 15

Tabela 3.7 Análise química da vermiculita [92]

Análise Química Típica (%)								
TiO ₂	-	0,90	MgO	-	16,73	CaO	-	0,80
Al ₂ O ₃	-	12,10	K ₂ O	-	3,20	SiO ₂	-	49,77
Fe ₂ O ₃	-	5,95	Na ₂ O	-	0,30	Perda de peso	-	-9,97

Borracha Reciclada de Pneus

A borracha reciclada de pneu utilizada nos ensaios experimentais foram adquiridos da fabrica da EcoBalbo Ltda, localizada na região de Cravinhos, interior de São Paulo. Utilizou-se borracha reciclada de pneus com granulometria passantes nas peneiras de abertura de $\leq 4\text{mm}$ e $\leq 1\text{mm}$, denominadas borracha grossa e fina respectivamente, Figura 3.2, peneiradas pelo EcoBalbo e conferidas no Laboratório de Cerâmica da UFSCar.

O processo de reciclagem dos pneus realizada pela Ecobalbo é completo, podendo transformar qualquer parte do pneu, em matérias-primas reaproveitáveis como o aço, o nylon e a borracha granulada, atendendo aos mais diversos segmentos da indústria, caracterizando pela destinação total de todos os 3

(três) componentes – borracha, aço e fibras – do pneus ,pois esta equipada com maquinário importado de última geração.

Suas propriedades são: aparência de cor preta, forma sólida, odor característico, insolúvel na água e quanto à volaticidade tem no máximo 2%. Quando o ar das imediações é inalado, nas condições normais não apresenta perigo e em contato com a pele não causa irritação. Suas características físicas, químicas e mecânicas atendem os requisitos exigidos pela ABNT.

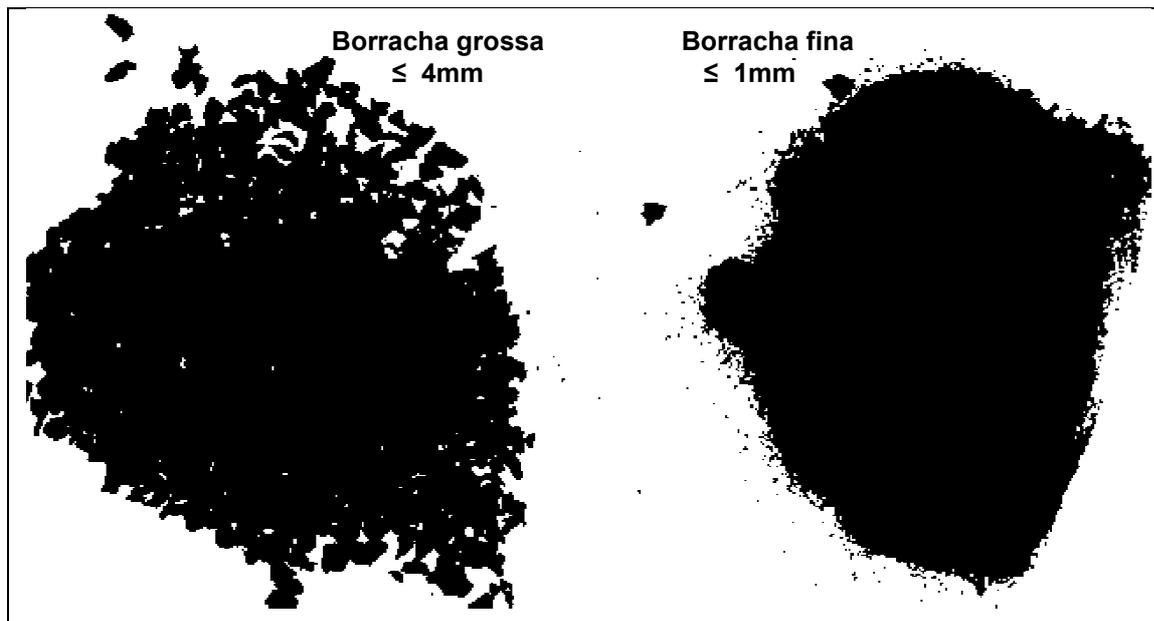


Figura 3.2 Borrachas recicladas de pneus utilizadas nas argamassas.

Aditivos

Os aditivos são produtos químicos ou minerais adicionados em pequenas proporções à argamassa como o objetivo de modificar alguma propriedade no estado fresco, podendo ou não atuar também comportamento da mesma no estado endurecido. Dentre estas propriedades pode-se citar a plasticidade, tempo de trabalho, resistência mecânica, impermeabilidade, aparência e durabilidade.

Como aditivos foram utilizados, um sal sódico de ácido naftaleno sulfônico (Sulfotan 131 NSS), de função superplastificante e a Microsilica Elkem 920 U, ambos em pó e caracterizados como não perigosos para o meio ambiente, objetivando contribuir para a trabalhabilidade e compensar a perda natural da resistência mecânica das argamassas, uma vez que nas

composições onde foram incluídas a vermiculita e a borracha o nível de porosidade é elevado, levando à resistência mecânica inerentemente baixa.

Sulfotan 131 NSS

O Sulfotan utilizado nesta pesquisa foi da Resinac Polímeros Ltda. Trata-se de um Naftaleno sulfonato de sódio condensado em pó, utilizado como agente estabilizante, dispersante e para proteção coloidal, podendo ser aplicado em pigmentos, tintas, couros, têxtil, detergentes, desengraxantes, agroquímicos, borrachas, indústria da construção civil, etc.[93].

O Sulfotan 131 NSS pó apresenta as propriedades físico-químicas descritas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 Propriedades físicas e químicas do Sulfotan [93]

Propriedades do Sulfotan	
Aspecto Físico	Pó marrom
Não Voláteis	Mínimo 94,0 %
Umidade	Máximo 6,0 %
Solubilidade (100g/l a 25°C)	Solução límpida
Sulfato de Sódio	Máximo 20,0 %
pH (solução 10%)	6,5 – 8,0

Microsilica Rogertec 920 U.

Microsilica usado na pesquisa foi da Elkem do Brasil. Trata-se de um aditivo que melhora as propriedades reológicas do concreto no estado fresco e colabora no aumento resistência mecânica no estado endurecido. Este aditivo contém de 85% a 98% de dióxido de silício (SiO_2) vítreo, suas partículas têm forma esférica e microscópicas com diâmetro médio de 0,10 a 0,15 μm . Apresenta uma área específica extremamente elevada, 15-30 m^2/g , aproximadamente 100 vezes a do cimento [94].

A ação deste aditivo é baseada em duas propriedades do efeito filler e pozolânico. Quanto ao efeito pozolânico, a microsilica reage com os íons de cálcio da solução alcalina que a envolve, formando produtos dessa reação que se assemelham aos produtos de hidratação encontrados na pasta de cimento (CSH), e devido ao pequeno tamanho das partículas permeiam facilmente os

espaços entre os grãos de cimento, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como pontos de nucleação de produtos de hidratação [94].

Considera-se impossível obter altas resistências mecânicas sem o uso deste aditivo. Mantendo o consumo de cimento e água de um concreto, a simples adição da microsilica, na faixa de 5 a 10% da quantidade de cimento, aumenta consideravelmente a resistência à compressão, pois os pontos fracos como bolsas de água sob os agregados e armadura serão reduzidos ou eliminados favorecendo a resistência à tração. A menor porosidade, a elevada aderência da pasta de cimento aos agregados faz com que este aditivo proporcione uma maior resistência à abrasão.

As propriedades físico-químicas da Microsilica estão na tabela 3.9.

Tabela 3.9 Propriedades físicas e químicas da Microsilica [94].

Propriedades da Microsilica	
Forma	Pó ultrafino e amorfo poeira respirável. A poeira forma aglomerados
Cor	Cinza, cinza claro
Odor	Sem odor
Ponto de fusão (°C)	1550-1570
Solubilidade (água)	Insolúvel/ligeiramente solúvel
Solubilidade (solvente orgânicos)	Insolúvel/ligeiramente solúvel
Densidade específica (água =1)	2,2-2,3
Densidade solta (kg/m ³) aprox.	150-700
Superfície específica (m ² /g)	15-30
Tamanho de partícula primária (µm)	≈ 0,15 (≈ 80% das partículas primárias, em massa, possuem diâmetro > 0,5 µm)

Água

A água utilizada no amassamento das composições foi proveniente do sistema de abastecimento público, era potável, livre de impurezas para não afetar a sua reação com o cimento e estava na temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, conforme determina a NBR 7215 [95].

3.2 Etapas da pesquisa experimental

A etapa experimental, para melhor operacionalização, foi dividida em 2 (duas) partes: estudo preliminar e estudo principal.

Num primeiro momento para definir os traços das argamassas leves estudadas, e fazer a dosagem das composições, confeccionou-se 5 (cinco)

corpos de prova, de 10 (dez) composições com diferentes percentuais de substituição de borracha reciclada de pneus e da vermiculita. Os corpos foram moldados de acordo com a NBR 7215, desmoldados após 24 hs e curados por 14 dias. Neles foram realizados 3 (três) ensaios iniciais: de resistência compressão, condutividade térmica e densidade de massa aparente [95].

Através do critério de escolha de caráter eliminatório baseado nas propriedades gerais exigíveis pelas normas, de condutividade térmica abaixo de 0.4 W/mK, do melhor comportamento das composições nos ensaios iniciais, foram selecionadas 2 (duas) composições contendo vermiculita e borracha reciclada de pneus e 2 (duas) com vermiculita (sem as partículas de borracha).

As argamassas leves ensaiadas no estudo principal tiveram seus traços definidos por estes estudos preliminares. Além destas 4 (quatro) composições estudou-se também 2 (duas) composições de argamassas densas, denominadas de referência, uma tradicional e outra industrializada de uso comum em obras. Definidas estas 6 (seis) composições deu-se o início a segunda parte da fase experimental.

As argamassas industrializadas, conforme a NBR 13529 são aquelas provenientes da dosagem controlada, em instalações próprias, de aglomerantes, agregados e eventualmente aditivos em estado seco e homogêneo, compondo uma mistura seca na qual o usuário adiciona água necessária para preparar a mistura e fazer a sua aplicação [96].

A segunda parte deste estudo experimental utilizou um conjunto de ensaios que seguiram as normas da ABNT, que padronizam as propriedades das argamassas de revestimento para paredes.

3.3 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova foi realizado primeiramente a pesagem dos elementos da composição, misturando-os à seco em um misturador planetário conforme determinação da NBR 13279 em seguida adicionou-se a água previamente medida. A mistura prosseguiu por mais 5 minutos para homogeneização figura 3.3. Concluída a mistura da argamassa moldaram-se os corpos de prova [97].



Figura 3.3 Preparo das Argamassas

Os corpos de prova, em média 5 (cinco) por composição, foram moldados de acordo com a NBR 7215 [95], por socagem, em moldes cilíndricos confeccionados de PVC com base de madeira, medindo 50mm x 100 mm, para os ensaios de: determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, variação dimensional, densidade de massa aparente, resistência à compressão uniaxial e resistência á tração por compressão diametral. Utilizou-se moldes metálicos (150mm x 150 mm x 25mm) para os ensaio de condutividade térmica e dos módulos elásticos (150mm x 25mm x 25mm), moldes cilíndricos de PVC com ϕ de 100mm x 20mm para os ensaios acústicos, Figura 3.4.



Figura 3.4 Formas e Corpos de Prova

Todos os corpos de prova foram retirados dos moldes após 48 horas, curados ao ar na temperatura de 25 °C e 65% de umidade, durante 28 dias, e testados nesta idade, conforme determina a norma NBR 5738 [98].

Os ensaios de aderência á tração foram feitos através de aplicações das argamassas sobre um substrato padrão (concreto) de 250 mm x 500 mm x 20 mm, conforme NBR 14082 [99].

Este mesmo procedimento de preparo das composições foi utilizado para os ensaios físicos á fresco.

3.4 Ensaios realizados

As propriedades analisadas nas argamassas estão diretamente relacionadas aos ensaios experimentais que foram realizados segundo as normas da Associação Brasileira de Normas técnicas (ABNT), normas do MERCOSUL e a DIN foram seguidas para os ensaios de tempo de pega e de condutividade térmica respectivamente.

A Tabela 3.10, apresenta os ensaios físicos, nos estados fresco e endurecido, realizados e as respectivas normas que os nortearam.

Tabela 3.10 Ensaios físicos realizados

Ensaios físicos			
Estado Fresco		Estado Endurecido	
Consistência	NBR 13276	Absorção de água	NBR15259
Retenção de água	NBR 13277	Retração por secagem	NBR 15261
Determinação dos tempos de pega	NM 43 e NM 65	Densidade de massa aparente	NBR 13280
Densidade de massa e o teor de ar incorporado	NBR 13278		

Os ensaios mecânicos executados e as normas que os conduziram estão na Tabela 3.11, já a Tabela 3.12 traz os demais ensaios realizados para caracterização das argamassas desta pesquisa.

Tabela 3.11 Ensaio mecânicos realizados

Ensaio mecânicos	
Resistência à compressão uniaxial	NBR 13279
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222
Resistência de aderência à tração	NBR 13528

Tabela 3.12 Demais ensaios realizados

Demais ensaios ^(*)		
Condutividade Térmica	Absorção Sonora	Flamabilidade
Método do fio quente	(Tubo de Impedância)	Exposição de
DIN 51046	Velocidade do som	chama por 15
	(Módulo elástico)	minutos

^(*) Ensaio adaptados sem normalização.

Os ensaios de consistência, determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração e de resistência de aderência à tração foram executados no Laboratório do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – São Carlos.

O ensaio de retenção de água foi executado no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Os ensaios de densidade de massa, teor de ar incorporado; determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade; retração por secagem; densidade de massa aparente; resistência à compressão uniaxial; resistência à tração por compressão diametral; flamabilidade e condutividade térmica foram realizados no Laboratório de Cerâmica do Departamento de engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar.

O ensaio de absorção acústica foi realizado no Laboratório de Acústica Aplicada do Departamento de Engenharia Física da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, e o ensaio do módulo elástico foi realizados no Grupo de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais - GDCM do Instituto Federal de Educação do Maranhão – IFMA.

3.4.1 Ensaio das argamassas no estado fresco

Foram realizados 4 (quatro) ensaios com as argamassas no estado fresco: consistência, retenção de água, determinação dos tempos de pega, e de densidade de massa e teor de ar incorporado.

A trabalhabilidade depende de variáveis inter-relacionadas que conjuntamente concorrem para a boa qualidade e produtividade durante a aplicação. Algumas destas variáveis são: adesão inicial, plasticidade, consistência, retenção de água, início e final de pega. Várias propriedades das argamassas no estado endurecido estão diretamente relacionadas à trabalhabilidade inicial. Diz-se que uma argamassa é trabalhável quando ao ser lançada na parede, pode ser distribuída com facilidade, não endurece e nem adere à ferramenta do pedreiro, mantém-se sem segregação ao ser transportada, permanecendo plástica durante o tempo da sua aplicação [26].

A adesão inicial é a capacidade de união da argamassa no estado fresco ao substrato. Após a argamassa ser lançada deve fixar-se à parede, sem escorrer ou desprender, possibilitando o manuseio para conformá-la corretamente, fazendo com que ao endurecer tenha uma boa aderência.

Plasticidade é a propriedade que permite a argamassa se deformar sem que haja a ruptura mantendo a forma adquirida quando da sua aplicação. As argamassas com cal hidratada são mais plásticas, facilitando o espalhamento devido as suas características coloidais.

Para Cincotto a plasticidade e a consistência são as propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade, sendo que ambas são influenciadas pelo teor de ar incorporado, teor de água e processo de mistura.

Quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será, reduzindo o esforço do pedreiro e resultando em um aumento de produtividade [100].

As variáveis de consistência, retenção de água, início e final de pega, densidade de massa e teor de ar incorporado, que influenciam a trabalhabilidade serão descritas na sequência. Estas propriedades das 6 (seis) argamassas estudadas, foram caracterizadas no estado fresco, de acordo com as normas e os métodos que seguem.

3.4.1.1 Consistência

É a propriedade em que a argamassa no estado fresco tende a resistir às deformações impostas, sendo determinada pelo conteúdo de água e influenciada pelos fatores: relações água/aglomerante e aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante. De modo geral, o comportamento da argamassa no estado fresco, está indiretamente relacionado com a consistência da argamassa [100].

O índice de consistência é determinado pela medida do espalhamento de uma porção de argamassa, inicialmente moldada em forma tronco-cônica sobre a mesa de ensaio [95, 101]. Utilizou-se a mesa de consistência (flow table) descrita pela NBR 7215 [95] e a metodologia descrita na NBR 13276 [101], onde a argamassa colocada em um cone vazado sobre esta mesa, depois se retira este cone e a argamassa deforma mediante quedas padronizadas. Após uma sequência de golpes, a deformação resultante é medida 3 (três) vezes com o auxílio de um paquímetro, sendo o índice de consistência o resultado da média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais. Este procedimento está ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 Ensaio de consistência

3.4.1.2 Retenção de água

Retenção de água é uma propriedade associada à capacidade da argamassa no estado fresco, manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento ou pela evaporação ou pela absorção da água pelo substrato. Esta propriedade afeta o comportamento da argamassa tanto no estado fresco como no endurecido, pois após o endurecimento, as argamassas precisam de uma quantidade de água, para que as reações de hidratação e o endurecimento dos aglomerantes ocorram adequadamente.

A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativa, promovendo a adequada hidratação do cimento e conseqüente ganho de resistência. A quantidade de água utilizada para conferir trabalhabilidade à argamassa de revestimento é maior que a necessária para produzir as reações de endurecimento, por isto excesso de água pode ser perdida, por evaporação, ou para a base de aplicação.

A movimentação da água decorrente destes fatos afeta a resistência, a capilaridade, a permeabilidade e a aderência da argamassa à base, por esta razão a argamassa que não possuir capacidade adequada de retenção de água, tem seu manuseio diminuído e também a qualidade do revestimento pronto, pois as reações de hidratação do cimento e carbonatação da cal ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$) ficarão comprometidas. A retenção de água pela argamassa depende da capacidade de aprisionamento do líquido pelas partículas finas com elevada atividade de superfície, por isto a sua natureza e características é importante para este poder de retenção [26].

O método que usamos para o ensaio de retenção de água foi o citado na NBR 13277[102] e realizado na câmara climatizada (ambiente controlado, capaz de manter a temperatura e umidade relativa do ar constante) do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) do curso de Engenharia Civil da UFSCar. Conforme a NBR 13276 [101] a câmara climatizada foi estabilizada a uma temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60 \pm 5)\%$, e todos os equipamentos utilizados foram dispostos no ambiente controlado com uma antecedência de 12 horas.

Iniciou-se o procedimento de preparo com a pesagem dos materiais, com uma balança de resolução de 0,1g. Após esta pesagem, a água foi colocada na cuba do misturador mecânico, em seguida, acrescentou-se a areia, a cal hidratada e o cimento. O misturador foi ligado em velocidade baixa por um período de 90 segundos. O molde metálico foi limpo, seco e pesado na balança (*Mm*). Posteriormente foram pesados 12 discos de papel filtro de media filtração e com 110 milímetros de diâmetro (*Mse*). Encheu-se o molde metálico de argamassa, utilizando uma espátula, o excesso é rasado e alisado com uma régua metálica, e novamente pesado (*Mma*).

Sobre a superfície da argamassa, colocou-se duas telas de gaze de tecido de algodão, tipo cirúrgica, de 110 milímetros de aresta, o conjunto de 12 filtros de papel, a placa metálica rígida, e centralizado foi posicionado sobre a placa o peso de 2kg, o cronometro é acionado e após dois minutos, o peso e a placa rígida foram retirados, e o conjunto de papeis filtro foram pesados em uma balança com 0,01 gramas de resolução (*Mf*).

Este procedimento foi realizado nas 6 (seis) composições e está ilustrado na figura 3.6 que segue.

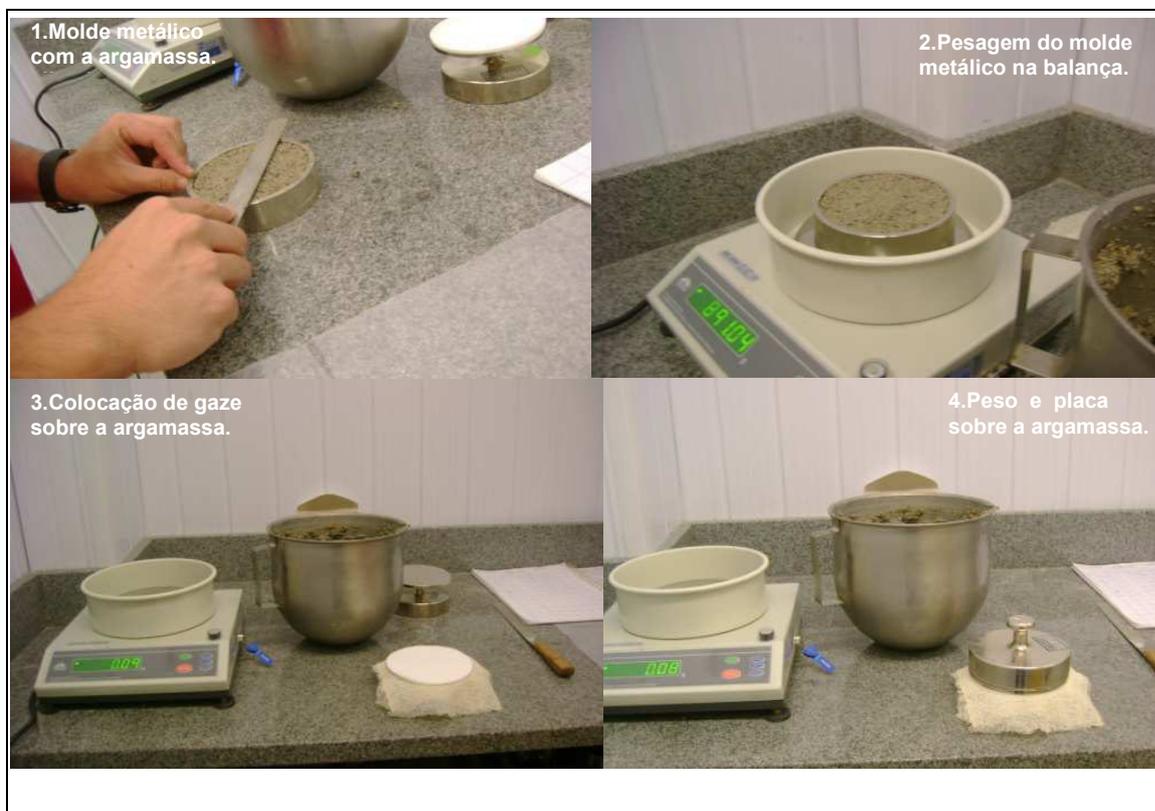


Figura 3.6 Ensaio de retenção de água

Calcula-se o percentual de retenção de água das argamassas, através das equações 3.1 e 3.2 que constam na NBR 13277[102].

$$Ra = \left[1 - \frac{(Mf - Mse)}{AF \times (Mma - Mm)} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

Mf = massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro, em g;

Mse= massa do conjunto de discos secos, em g;

Mma= massa do molde com argamassa, em g;

Mm = massa do molde vazio, em g;

AF= fator água/argamassa fresca.

$$AF = \frac{Mw}{M - Mw} \quad (3.2)$$

Mw = massa total de água acrescentada á mistura, em g;

M = massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em g.

3.4.1.3 Determinação dos tempos de pega

O tempo de pega de uma argamassa é uma propriedade que esta relacionada às reações de hidratação do cimento após o contato com a água, sendo caracterizado pelo enrijecimento progressivo da pasta da argamassa até o completo endurecimento. A determinação deste tempo é um dos parâmetros mais importantes para o controle de qualidade da argamassa.

Este ensaio foi realizado por meio de resistência à penetração, utilizando-se o aparelho Controls Vicamatic, mais conhecido como Agulha de Vicat, do Laboratório USP – São Carlos, seguindo as orientações da NM 43 [103] e NM 65 [104].

O inicio de pega é o instante onde ocorre um crescimento brusco da viscosidade (por volta de 1 hora), tempo este determinado pelo intervalo de tempo entre adição de água no cimento até o momento em que a agulha

pontiaguda de Vicat ao penetrar no sentido vertical a pasta, registra a leitura de 4 ± 1 mm em relação á base inferior do corpo de prova. O final da pega acontece quando ocorre a passagem da pasta do estado plástico para o estado sólido, determinado pelo intervalo de tempo entre adição de água no cimento até o momento em que a agulha de área maior, utilizada para o final da pega, ao tentar penetrar a pasta não deixar marca na superfície. O início da pega determina o ponto em que a pasta não é mais trabalhável, iniciando a solidificação e o fim da pega representa o tempo necessário para uma solidificação aparente [105].

3.4.1.4 Densidade de massa e o teor de ar incorporado

A densidade de massa das argamassas varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais desta argamassa.

Quanto à densidade de massa as argamassas são classificadas como leve, normal e pesada conforme segue na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 Classificações das argamassas segundo a sua densidade [106]

Argamassa	Densidade de massa (g/cm ³)	Principais agregados utilizados	Aplicação
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq A \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

A densidade de massa, também denominada massa específica, é a relação entre as massas da argamassa e o seu volume podendo ser absoluta e relativa. Na absoluta não são considerados os vazios que estão no volume da argamassa, e na relativa os vazios já são considerados, ocorrendo desta maneira, a variação também do teor de ar de acordo com a massa específica dos materiais constituintes desta argamassa. A NBR 13278[107] determina que o cálculo da densidade de massa no estado fresco deve ser realizado através da equação 3.3.

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (3.3)$$

M_c = massa do recipiente cilíndrico de PVC, com argamassa, em g;

M_v = massa do recipiente cilíndrico de PVC vazio, em g;

V_r = volume do recipiente cilíndrico de PVC, em cm^3 .

O teor de ar incorporado é a quantidade de ar presente em um determinado volume de argamassa, NBR 13278 [107], equação 3.4, expresso em porcentagem, arredondado ao número inteiro mais próximo.

$$AI = 100 \times \left(1 - \frac{A}{B}\right) \quad (3.4)$$

A= densidade de massa com vazios

B= densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios. É a somatória do percentual de cada componente multiplicado pela sua densidade específica.

A porosidade de um revestimento em argamassa está diretamente relacionada aos materiais da sua composição, ao seu modo de aplicação, ao processo de cura adotado, mas também à porosidade e textura da base onde será aplicada, pois ela interfere na durabilidade do revestimento e podendo acumular umidade o que possibilita o crescimento de fungos. Caso a argamassa seja submetida a molhagem e secagem, os sais dissolvidos cristalizam provocando expansão resultando na fissuração do revestimento.

Por esta razão o percentual de porosidade da argamassa, o tipo e a distribuição de poros em sua microestrutura, permitem prever se algo irá prejudicar o desempenho do revestimento, além de contribuir para análises melhor fundamentadas das propriedades mecânicas dessa argamassa [31].

3.4.2 Ensaio das argamassas no estado endurecido

Após o tempo de cura de 28 dias e isentos de óleo ou outros materiais aderidos na moldagem, iniciaram-se os ensaios com os corpos de provas seguindo as normas e metodologias descritas na sequência.

3.4.2.1 Ensaios físicos

Os ensaios físicos realizados no estado endurecido foram os de absorção de água, retração por secagem e de densidade de massa aparente.

3.4.2.1.1 Absorção de água

A determinação da absorção de água foi medida pelo método descrito na NBR15259 [108], por capilaridade pela ascensão capilar dos corpos de prova. Esta absorção é obtida através do aumento de massa dos corpos de prova que são parcialmente imersos em água por um determinado tempo.

Os corpos de prova foram pesados e medidos aos 28 dias de idade, antes e depois de serem colocados na água. Inicia-se o ensaio com a determinação da massa inicial (m_0), posteriormente são colocados no recipiente de ensaio, evitando a molhagem de outras superfícies. O nível de água deve permanecer constante a (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água em um ambiente com temperatura constante de $(23 + 2)^{\circ}\text{C}$.

A partir da colocação dos corpos de prova, em contato com a água, determina-se a massa de cada um, em gramas, aos 10 min (m_{10}) e aos 90 min (m_{90}). Os corpos de prova devem ser enxutos com pano úmido, antes de cada pesagem. Completada a pesagem aos 10 min, os corpos de prova retornam ao recipiente de ensaio por mais 80 minutos completando os 90 minutos finais.

A absorção de água por capilaridade calculada para cada tempo deve ser expressa em gramas por centímetro quadrado, dividindo a variação de massa pela área da seção transversal do corpo de prova em contato com a água conforme a equação 3.5:

$$A_t = \frac{M_t - M_0}{S} \quad (3.5)$$

A_t = a absorção de água por capilaridade, para cada tempo, aproximada ao centésimo mais próximo, em gramas por centímetro quadrado;

M_t = a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

M_0 = massa inicial do corpo de prova, em gramas;

t = corresponde aos tempos de 10 min e 90 min, em segundos;

S = área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

O coeficiente de capilaridade para cada corpo de prova é aproximadamente igual ao valor médio das diferenças de massa aos 10 min e aos 90 min, sendo calculado de acordo com a equação 3.6:

$$C = (M_{90} - M_{10}) \quad (3.6)$$

C = o coeficiente de capilaridade, em gramas por decímetro quadrado;

M_{90} = a massa do corpo de prova aos 90 min., em gramas;

M_{10} = a massa do corpo de prova aos 10 min., em gramas.

3.4.2.1.2 Retração por secagem – variações dimensionais

As variações dimensionais e de massas ocorrem por causa da retração ou expansão devido à eliminação da água de amassamento e pelas reações na hidratação dos aglomerantes, fatos que podem provocar as fissuras nos revestimentos.

A retração esta associada à variação de dimensão da pasta aglomerante e tem um papel fundamental no desempenho das argamassas aplicadas, principalmente, quanto á estanqueidade e a durabilidade. Caso a pasta tenha alta relação água/aglomerantes, retrai ao perder a água em excesso de sua composição. Uma parte dessa retração é decorrente das reações químicas de hidratação do cimento, mas a parcela principal é por causa da secagem.

A retração se inicia no estado fresco e prossegue após o endurecimento da argamassa. A areia tem um papel fundamental na argamassa, pois ela atua como esqueleto sólido que evita um pouco as variações volumétricas por secagem diminuindo o risco da fissuração. Já as argamassas ricas em cimento apresentam maiores disponibilidades para o aparecimento de fissuras durante a secagem [109].

É importante que a secagem da argamassa seja lenta para que se tenha tempo suficiente para atingir uma resistência á tração necessária para suportar as tensões internas que surgem. Se o clima estiver quente, seco e com ventos fortes, a evaporação fica acelerada e a perda de água origina

fissuras de retração. Este mesmo efeito ocorre quando argamassa é aplicada sobre uma base muito absorvente.

No acaso de revestimentos, estas fissuras formam ângulos próximos a 90° entre elas. Quando duas fissuras forma ângulos muito agudos entre si, pelo menos uma delas não é de retração. Vale aqui citar que quanto maior a espessura do revestimento maior a retração esperada. A retração é responsável pela maioria das patologias encontradas nos revestimentos, pois geram fissuras que possibilitam a penetração de água, provocando o aparecimento de fungos e bolor, o que pode provocar o deslocamento do revestimento e do acabamento final [106].

Neste ensaio foi realizada a determinação da variação dimensional e a variação de massa dos corpos de prova das 6 (seis) composições, que foram medidos e pesados nas idades de 2 e 28 dias para se verificar a retração por secagem em um ambiente do ar com temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$.

O ensaio de variação dimensional segue a NBR 15261[110] que caracteriza como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva) e foi calculada pela equação 3.7 que segue:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (3.7)$$

ε_i = medida da variação dimensional, na idade “i”, arredondada ao centésimo mais próximo, em milímetros por metro;

L_i = a leitura efetuada na idade final, em milímetros;

L_0 = a leitura efetuada após a desforma, em milímetros;

i= a idade de leitura, em minutos.

Para a apresentação dos resultados calculam-se as variações dimensionais (altura e diâmetro) a partir da média dos cinco corpos de prova de cada composição estudada.

3.4.2.1.3 Densidade de massa aparente

A densidade de massa aparente é calculada a partir dos corpos de prova no estado endurecido seguindo as orientações da NBR 13280 [111] .

Aos 28 dias de idade, 5 (cinco) corpos de prova foram medidos e pesados com um paquímetro e uma balança. O diâmetro do corpo de prova é medido em duas posições ortogonais no seu terço médio e a sua altura em três pontos diferentes. Com estes dados calculam-se os volumes (V) e a razão da massa (M) pelo volume (V), a equação 3.9.

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (3.8)$$

ρ_{ap} = densidade de massa aparente, em g/cm³;

M = massa do corpo de prova, em grama;

V = volume do corpo de prova, em cm³.

3.4.2.2 Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados foram os de resistência à compressão uniaxial, á tração por compressão diametral e de aderência á tração.

A resistência mecânica esta diretamente relacionada a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens por tensões simultaneamente de tração, compressão e cisalhamento [106].

Um dos principais problemas nos revestimento que esta diretamente relacionada à resistência mecânica da argamassa, é a baixa resistência superficial, que se traduz na pulverulência, o que acaba prejudicando a fixação das futuras camadas de acabamento, como a pintura ou as peças cerâmicas.

3.4.2.2.1 Resistência à compressão uniaxial

Como as argamassas de revestimento devem resistir a pequenos esforços de compressão axial, foram realizados estes ensaios, conforme procedimento descrito na NBR 13279[112], para determinar a tensão máxima suportada pela argamassa.

Os corpos de prova cilíndricos foram rompidos utilizando uma máquina de ensaio mecânico EMIC Modelo DL 10.000, sob velocidade e carregamento constante. Os corpos de prova com a idade de 28 dias foram colocados diretamente sobre o prato inferior da prensa devidamente centralizado, e a seguir transmitiu-se a carga de compressão com a célula de carga de 500 kgf, até seu rompimento ou com o limite de deformação de 10% numa velocidade de aplicação da carga de 1mm/minuto.

A Figura 3.7 ilustra a máquina de ensaio, o modo de colocação das amostras na máquina e os corpos de prova após os ensaios.



Figura 3.7 Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Após os ensaios dos 5 (cinco) corpos de prova das 6 (seis) composições, calcula-se a resistência à compressão (MPa) de cada corpo de prova, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção deste corpo de prova e tomou-se como resistência final a média aritmética dos resultados, desprezando o menor e o maior valor obtido nos ensaios.

3.4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio mede de modo indireto a resistência à tração simples da argamassa, baseando-se no princípio de que um cilindro, carregado diametralmente, recebe tensões de tração, além das de compressão; como a resistência à tração da argamassa bem inferior à de compressão, a amostra rompe por tração. O equipamento utilizado para este ensaio é o mesmo do ensaio de compressão uniaxial, a máquina de ensaio mecânico EMIC Modelo DL 10.000. Este ensaio, realizado conforme determina a NBR 7222 [113], consiste em aplicar a carga na direção do diâmetro de um cilindro até a ruptura.

Após os 28 dias da cura, os corpos de prova cilíndricos de 0,50 mm x 100 mm foram cortados ao meio para que estes corpos de prova tivessem a relação comprimento/diâmetro o mais próximo de 1 (um), depois de removido qualquer pó que tenha ficado superficialmente, o corpo de prova é colocado sobre o prato da máquina de compressão, em posição horizontal, repousando segundo uma geratriz. Em seguida aplica-se uma força de compressão de maneira progressiva e sem choques sobre o plano diametral do corpo de prova, até que se dê a ruptura por separação das duas metades do corpo de prova segundo o plano diametral. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram este ensaio e os corpos de prova após o ensaio.

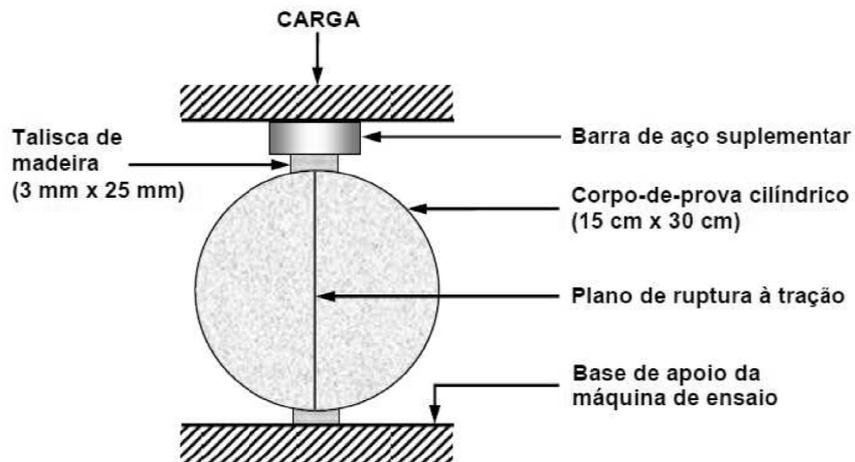


Figura 3.8 Esquema do ensaio de tração por compressão diametral [105]



Figura 3.9 Ensaio de resistência à compressão diametral

O valor da resistência á tração por compressão diametral é obtido através da equação 3.10 e expressa em MPa , desprezando o menor e o maior valor obtido nos ensaios.

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{\pi d L} \quad (3.9)$$

$f_{t,D}$ = resistência á tração diametral, em MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio;

d = diâmetro do corpo de prova, em mm;

L = altura do corpo de prova, em mm.

3.4.2.2.3 Resistência de aderência à tração

A aderência é uma propriedade do revestimento em se manter fixo ao substrato, apresentando resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-revestimento. Esta aderência é resultante da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa. As propriedades da argamassa no estado fresco, o material, as condições do substrato, os procedimentos da execução do revestimento influenciam esta propriedade [114].

A aderência da argamassa já endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades do substrato, sendo também relevante para a aderência das argamassas as ligações secundárias do tipo Van der Waals, pois a argamassa ainda no estado fresco entra em contato com a superfície do substrato e parte da água de amassamento penetra nos poros e cavidades do substrato, onde ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, após algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base [115].

A maioria dos estudos sobre ensaios de aderência à tração foi realizada em substratos cerâmicos ou em blocos de concreto, mas nesta pesquisa, as argamassas foram aplicadas em substratos padrão de concreto confeccionado seguindo a NBR 14082 [99]. Quando a base dos ensaios são substratos padronizados, os resultados obtidos apresentam uma menor variação de valores, embora não caracterizem o desempenho da argamassa aplicada no sistema construtivo.

Os ensaios foram realizados no Laboratório do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da USP, São Carlos, seguindo a NBR 13528[116]. Inicia-se com a aplicação das argamassas sobre os substratos, confeccionados com 28 dias de antecedência. Após 28 dias de cura, efetua-se os 12 (doze) cortes empregando-se serra de copo diamantada, acoplada a um equipamento de extração de testemunhos, aonde serão coladas pastilhas.

No dia seguinte, após a remoção de partículas, na superfície dos corpos de prova é feita a fixação das pastilhas de alumínio (\varnothing 50 mm) onde

são rosqueadas olhais para acoplar o equipamento de tração. Com a superfície da pastilha limpa de resíduos, aplica-se a cola com uma espátula. Após 24 h da colagem da pastilha, seleciona-se a taxa de carregamento, conforme a Tabela 3.14, em função da resistência de aderência à tração, de tal maneira que o ensaio dure de 10 a 80 segundos, iniciando-se os ensaios com o equipamento de tração mecânico pull-off tester modelo Dyna.

Tabela 3.14 Taxas de carregamento para o ensaio de aderência [116]

Resistência de Aderência (MPa)	Taxa de carregamento (N/a)
Até 0,20	5
Acima de 0,20 a 0,50	25
Acima de 0,50 a 1,00	100
Acima de 1,00	200

As etapas do ensaio de aderência á tração estão na Figura 3.10.



Figura 3.10 Etapas do ensaio de aderência à tração

Concluído o ensaio examina-se e anota-se a forma de ruptura do corpo de prova tomando com referência os tipos de rupturas definida pela NBR 13528 [116] representados na Figura 3.11.

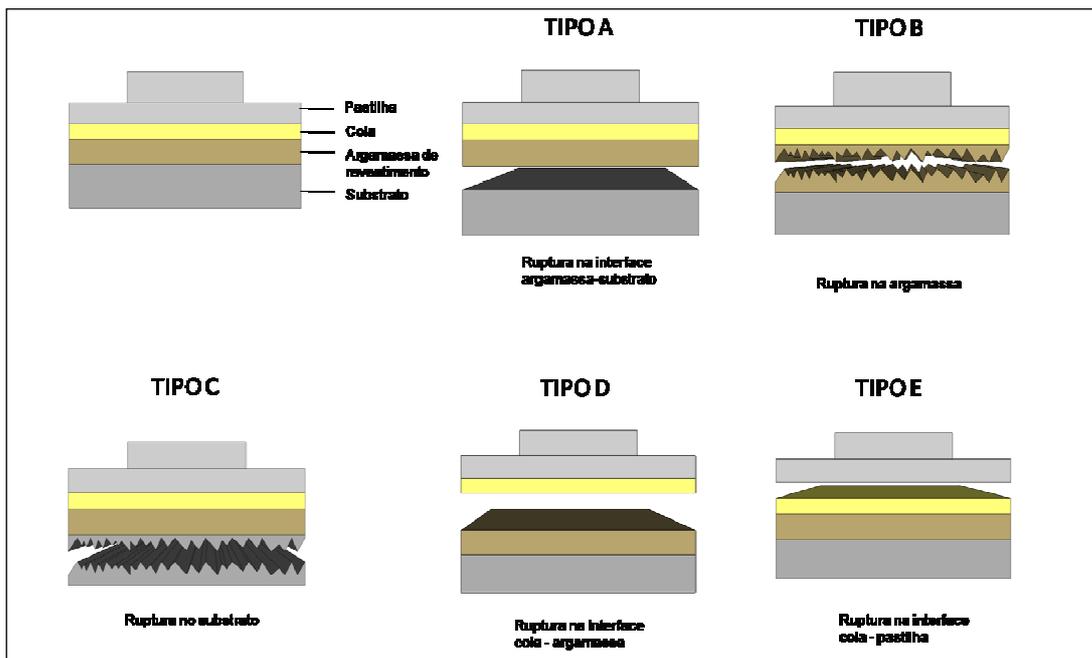


Figura 3.11 Formas de ruptura dos corpos de prova [116]

Além dos valores de resistência de aderência obtidos é importante a análise do tipo de ruptura. Se a ruptura ocorre no interior da argamassa ou da base, tipos B e C, e os valores sejam baixos são menos preocupantes. Por outro lado, quando a ruptura é do tipo adesivo, tipo A, ocorrendo na interface argamassa /substrato, os valores serão mais elevados, pois o potencial para esta patologia é maior. A ruptura do tipo D significa que a parte mais fraca é a camada superficial da argamassa. Neste caso, se os valores são baixos, a resistência superficial é inadequada (polverulência). A ruptura do tipo E deve ser descartada por representar um defeito de colagem.

Calcula-se a resistência de aderência à tração pela equação 3.10.

$$Ra = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

Ra = resistência de aderência á tração, em MPa;

P = carga de ruptura, em N;

A = área da pastilha, em mm².

Na apresentação dos resultados a carga (P) e a área (A) são expressas na fórmula em números inteiros, enquanto que os valores de resistência de aderência à tração com duas casas decimais. O cálculo da média e do coeficiente de variação da resistência de aderência à tração somente pode ser feito para as pastilhas com mesma forma de ruptura, desprezando o menor e o maior valor obtido nos ensaios.

A aderência é uma das poucas propriedades da argamassa que possuem critérios de desempenho fixado pela NBR 13749 [117] que seguem na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 Limite de resistência de aderência à tração [117]

Local	Acabamento	Ra (MPa)
Parede	Interna Pintura ou base para reboco	≥ 0,20
	Cerâmica ou laminado	≥ 0,30
Teto	Externa Pintura ou base para reboco	≥ 0,30
	Cerâmica	≥ 0,30
		≥ 0,20

3.4.3 Ensaio térmico

O coeficiente de condutividade térmica (κ) foi medido seguindo a norma DIN 51046, utilizando-se a técnica de fio quente cruzado. Com a idade de 28 dias, os corpos de prova foram secos a 50 ° C durante 12 horas antes das medições de condutividade térmica. Este ensaio foi realizado em um ambiente com uma temperatura ambiente de 30 ° C e umidade relativa de 60%.

Utilizou-se duas amostras de igual dimensão (150mm x150 mm x 25mm), uma junção do termopar é soldada no meio do fio quente. A variação da temperatura no fio é medida em função do tempo. Em uma das faces de uma das amostras são feitas duas ranhuras ortogonais e centrais – a cruz de medição – para a colocação da resistência elétrica e do termopar.

A profundidade destas ranhuras deve corresponder aproximadamente ao diâmetro dos fios que serão colocados. Esta cruz de medição é formada pelo fio quente e pelo termopar, que tem uma de suas junções soldada perpendicularmente ao fio. A junção de referência do termopar é colocada a

cerca de 10 mm da extremidade do corpo de prova. Após a colocação dos fios a fenda é preenchida com o pó da mesma amostra, e sobre a amostra é colocada o segundo corpo de prova, conforme Figuras 3.12 e 3.13.

Para medir a condutividade térmica passa-se uma corrente elétrica constante através do fio e registra-se o aumento de temperatura em um determinado ponto a uma distância do fio quente, a partir da temperatura inicial de equilíbrio [72].

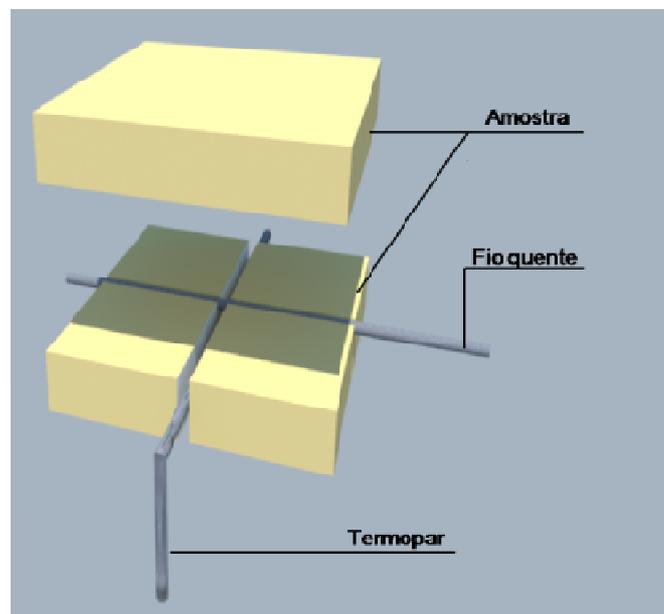


Figura 3.12 Técnica padrão do fio quente (cruz de medição) [72]



Figura 3.13 Ensaio do fio quente (cruz de medição)

3.4.4 Ensaios acústicos

Para caracterizar as argamassas acusticamente foram realizados os ensaios de absorção acústica e o calculo a velocidade da onda sonora.

3.4.4.1 Absorção sonora

Os métodos mais utilizados para se obter o coeficiente de absorção sonora são a câmara reverberante e o tubo de impedância, ambos com normas internacionais que os descrevem.

O ensaio em uma câmara reverberante é realizado em uma sala com baixa absorção acústica onde se coloca uma grande porção do material a ser analisado e a partir da redução do tempo de reverberação, se inicia a incidência de ondas sonoras aleatórias separadas em frequências. Este método depende de laboratórios com esta câmara, tendo por isto alto custo, por este motivo, o tubo de impedância é economicamente mais viável, pois trabalha com amostras menores.

O ensaio de absorção acústica desta Tese foi realizado justamente com o tubo de impedância, no Laboratório de Acústica Aplicada do Departamento de Engenharia Física da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, com base na norma internacional ISO 10534-4 [118]. Desenvolveu-se um tubo de impedância e com a ajuda de 2 (dois) alto falantes de 150 w 4 Ω e um microfone G.R.A.S. Sound & Vibration Modelo 46AE, realiza-se a medição e o cálculo dos coeficientes de absorção das argamassas estudadas, em função da frequência pelo método de função transferência, que mede a diferença de pressão sonora em 2 (dois) pontos distintos ao longo do eixo longitudinal do tubo.

O equipamento utilizado foi construído com placas de MDF e tubo de PVC com \emptyset de 3" + 3/4" com um encaixe para uma base com 8 (oito) orifícios para a captação de sinais pelo microfone, interfaceado com um analisador de sinal de 4 canais com microfone condensador de alto desempenho. Este equipamento consiste em um tubo de parede rígida onde em uma das extremidades coloca-se um alto-falante e na outra a amostra do material

ensaiado, internamente estabelece-se um modelo de ondas estacionárias, que percorre ao longo do tubo e vão até a amostra e são refletidas, Figura 3.14.

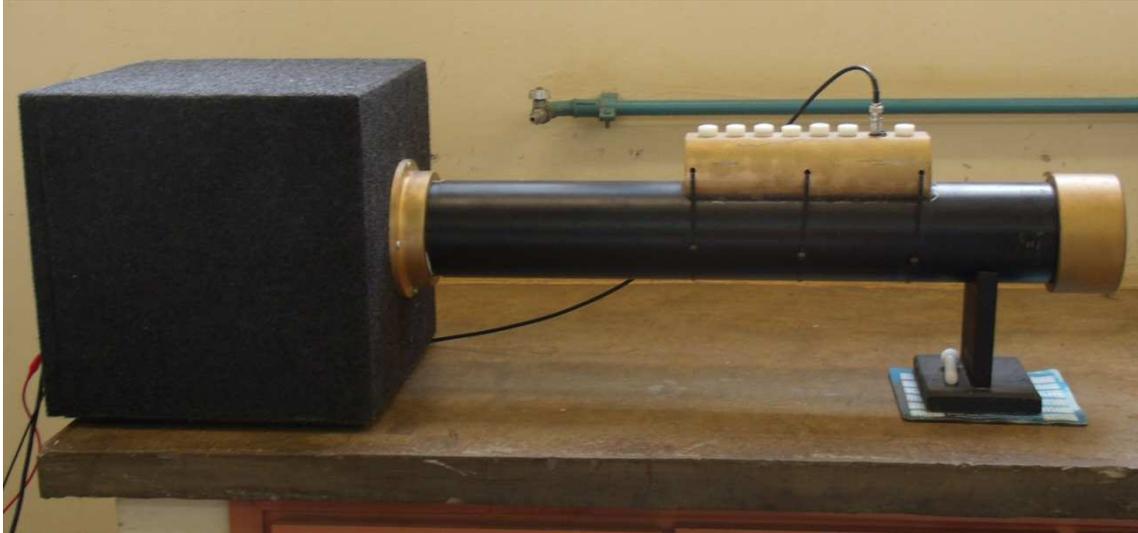


Figura 3.14 Tubo de impedância

Esta técnica se baseia em 2 (dois) pontos de captação previamente determinados ao longo do comprimento do tubo que são suficientes para diferenciar ondas incidentes e refletidas na amostra. Para cada amostra mede-se 2 (duas) vezes as faces (lisa e rugosa). A leitura é feita através do microfone e transferido pelo analisador de 4 (quatro) canais Orchestra (do fabricante 01dB) para o Notebook.

O software dBFA 4.9 viabiliza o cálculo do auto-espectro dos sinais do microfone e da fonte, do espectro cruzado entre o microfone e a fonte e da função de transferência, assim como a transferência dos dados para o MatLab. Este software calcula o índice de reflexão e, conseqüentemente o índice de absorção. Após esta etapa plota-se um gráfico do coeficiente de absorção por frequência e outro da média de coeficiente de absorção por banda de frequência, assim como seus valores, Figura 3.15.

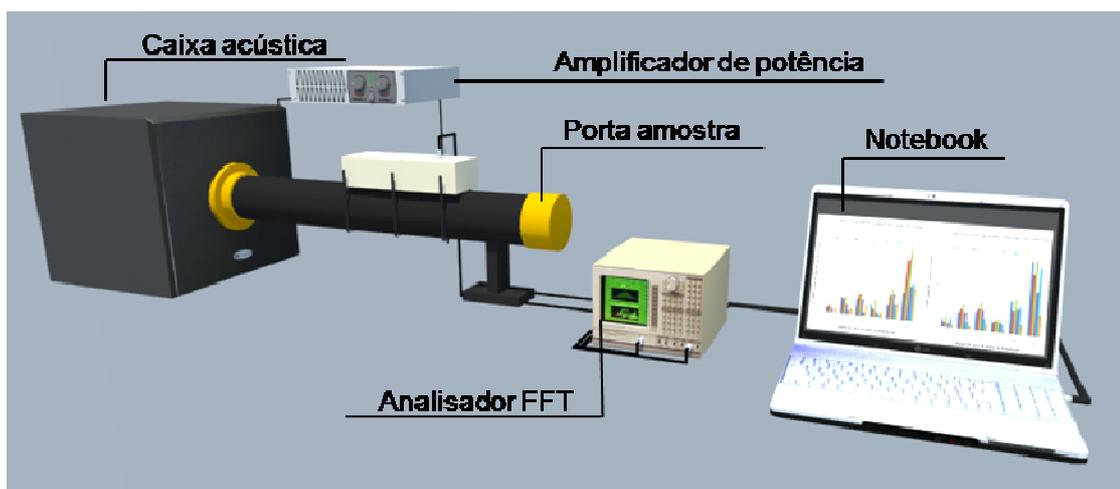


Figura 3.15 Esquema do ensaio com o tubo de impedância.

Embora o tubo de impedância tenha fornecido os resultados de absorção acústica pode-se também calcular a transmissão sonora, para isto é só acoplar outro tubo atrás da amostra, e o método de transferência é adaptado para esta configuração.

3.4.4.2 Velocidade da onda sonora

Como já foi tratado no Capítulo 2, item 2.6.2, a velocidade do som depende da densidade e do módulo elástico do meio de propagação. Para se obter a velocidade do som em cada composição estudada, é necessário calcular o módulo elástico, pois já se calculou as densidades das argamassas.

O ensaio do módulo elástico foi realizado no Grupo de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais - GDCM do Instituto Federal do Maranhão – IFMA, em 3 (três) corpos de prova prismáticos (150 mm x 25 mm x 25 mm) de cada composição, seguindo as instruções da norma ASTM 1876-07[120] e utilizando o aparelho Scan Elastic - 02 ,Dynamic Elastic Modulus Meter acoplado ao computador [119].

O Scan Elastic - 02 é um equipamento automático capaz de medir as propriedades elásticas dos materiais a partir do método dinâmico de ressonância de barras. Para as medidas das propriedades elásticas, as amostras foram excitadas por vibração flexional e torcional (1 a 50 KHz) simultaneamente para a obtenção do módulo elástico, do módulo de

cisalhamento e da razão de Poisson, utilizando um atuador para excitar e um sensor para captar a resposta, Figura 3.16.

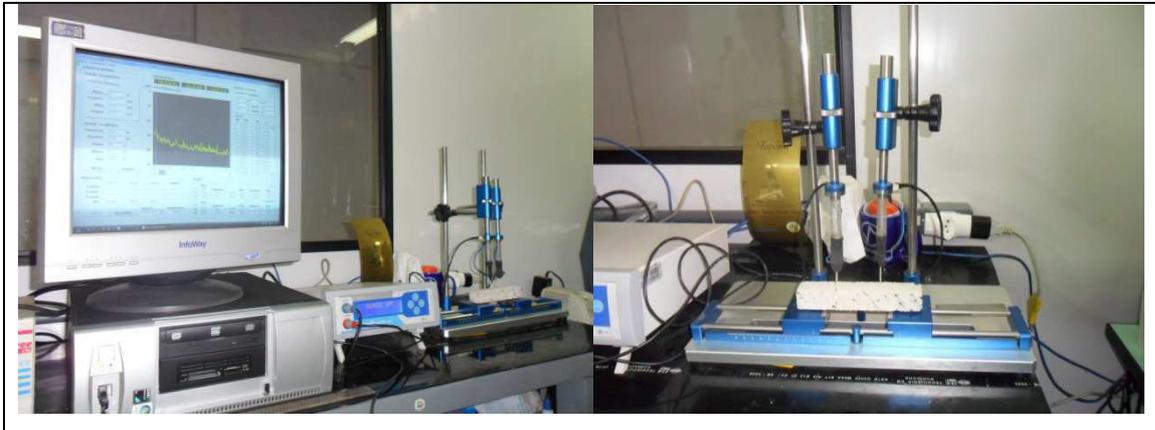


Figura 3.16 Ensaio do módulo elástico

Para a identificação de todas as frequências de ressonância foi utilizado um software acoplado ao equipamento, que facilita a identificação das frequências e os cálculos. A partir da informação das características da amostra e da faixa de frequência desejada, o software comanda a eletrônica para que se realize a varredura e obtenha, assim, o espectro.

Obtido o espectro e a partir de um critério de amplitude mínima ajustada pelo usuário, o software lista os picos de ressonância, analisa as razões entre as frequências, sugere uma seleção de picos e calcula os módulos e a razão de Poisson de acordo com as equações sugeridas pela norma, informando, inclusive, o intervalo de confiança dos resultados. Após os cálculos, o software gera um relatório dos resultados contendo todas as informações solicitadas pela norma [119].

Para o cálculo das propriedades elásticas utilizou-se o procedimento matemático descrito na norma ASTM 1876-07[120] aplicável a materiais elásticos, homogêneos e isotrópicos. Essa Norma sugere a utilização das equações e método que levam em consideração apenas os modos fundamentais de vibração.

3.4.5 Ensaio de flamabilidade

O Teste da Flamabilidade, não seguiu norma específica, sendo realizado para avaliar de uma maneira simples, o efeito de uma chama sobre a superfície de um corpo de prova de 150mm x 150mm x 25mm. O ensaio foi realizado na oficina mecânica do DEMA, com um corpo de prova da composição com maior percentual (33%) de borracha reciclada de pneu. O objetivo foi observar as características de queima do corpo de prova e verificar a combustão, fusão, fratura e fumaça. Este ensaio consistiu em incidir chamas, com um maçarico, de oxi-acetileno durante 15 minutos neste corpo de prova, conforme ilustração no item 4.6 no Capítulo 4.

Os resultados destes ensaios, as análises e comparações entre as características e propriedades das argamassas estudadas que tem como objetivo, antecipar diversos comportamentos, estão descritas no Capítulo 4 desta Tese.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo estão os resultados e discussões da pesquisa experimental, organizados de acordo com os ensaios realizados, físicos (estado fresco e endurecido), mecânicos, térmicos, acústicos e de flamabilidade.

4.1 Ensaio Físicos

4.1.1 Argamassas no Estado Fresco

Os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco foram obtidos através do cálculo da média dos valores conseguidos e estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Propriedades gerais das argamassas

Argamassa	Consistência (mm)	Final de pega (hs)	Retenção de água (%)
A1	243,5	≤ 15	99,91
A2	231,5	≤ 15	99,94
A3	273,5	≤ 15	99,89
A4	261,5	≤ 15	99,90
Arg. Tradicional	272,5	5	88,58
Arg. Industrial	190	9	99,90

Consistência

A *consistência* é uma propriedade diretamente influenciada pela quantidade de água. Nas argamassas leves investigadas nesta Tese, o percentual de água necessário está relacionado ao percentual de vermiculita. Como pôde ser observado na Tabela 3.1 (Capítulo 3), a argamassa A3 contendo 40% de vermiculita exigiu 80% de H₂O, para adquirir a consistência necessária para uma boa aplicação. Por outro lado, a argamassa A2 contendo 12% de vermiculita precisou de apenas 40% de H₂O.

A facilidade de espalhamento da argamassa depende da facilidade da movimentação entre as partículas e da lubrificação interna. Na argamassa industrializada a lubrificação se dá pela presença de bolhas de ar, já que na sua composição existe o incorporador de ar. Na argamassa tradicional, as características da água associada à cal, controlam a consistência. Nas

argamassas leves, A1, A2, A3 e A4, o espalhamento é controlado pelas propriedades de absorção e retenção de água da vermiculita [121].

Em relação à *consistência das argamassas*, pode-se observar que nas argamassas que não tem a borracha reciclada de pneus (A3 e A4) os resultados são proporcionais ao percentual da vermiculita. A composição que tem um percentual maior de vermiculita (A3 = 40%) tem medida de espalhamento maior sendo este similar a da argamassa tradicional, e quanto menor a quantidade de vermiculita menor o espalhamento. Analisando as que contem a borracha reciclada de pneu (A1 e A2) percebe-se que a borracha aumentando o teor de borracha e a consistência diminui.

A Figura 4.1 representa a relação entre o resultado dos ensaios de consistência e de retenção de água das 6 (seis) argamassas estudadas.

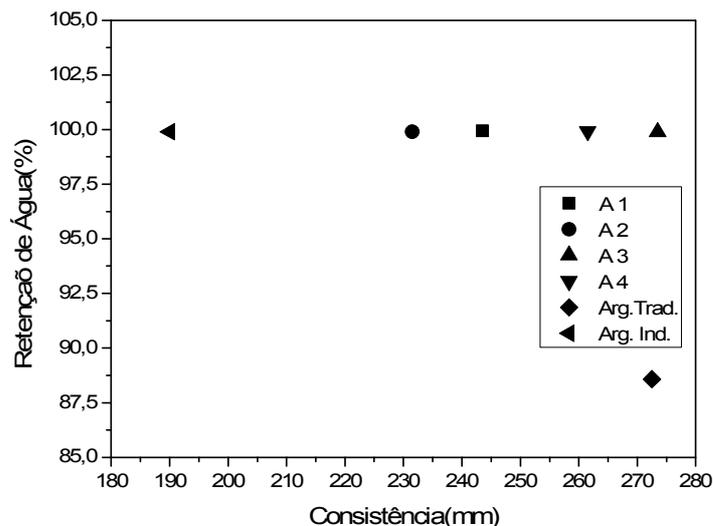


Figura 4.1 Ensaio de Consistência e de Retenção de Água

Pela Figura 4.1 percebe-se que a consistência das argamassas, não tem relação com a retenção de água, são propriedades independentes.

Final de pega

Quanto ao *tempo final de pega* as 4 (quatro) argamassas leves tiveram tempos similares e menores do que 15 (quinze) horas.

Retenção de água

Como pode ser observado na Figura 4.1, a retenção de água nas argamassas com vermiculita (A1, A2, A3 e A4) é maior do que a da argamassa tradicional e similar a argamassa industrial, que contem em sua formulação aditivos para melhorar esta retenção.

Pelos resultados dos ensaios de *retenção de água* segundo a NBR 13281[122], as 4 (quatro) argamassas com vermiculita apresentam alta capacidade de retenção de água (> 90%). Este é um aspecto importante para garantir trabalhabilidade por tempo suficiente, e melhora na qualidade da cobertura de argamassa, pois, permite que as reações de hidratação do cimento e a carbonatação da cal se processem mais lentamente, com isto a argamassa adquire maior resistência mecânica .

Densidades e teor de ar incorporado.

A Tabela 4.2 apresenta as densidades; experimental, teórica e aparente e o teor de ar incorporado das argamassas.

Tabela 4.2 Densidades e teor de ar incorporado

Argamassa	Densidade experimental (g/cm ³)	Densidade teórica (g/cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)	Teor de ar incorporado (%)
A1	1,59	1,90	0,80	16.37
A2	1,56	1,75	1,05	10.81
A3	1,21	1,71	0,65	29.23
A4	1,27	1,67	0,78	23.95
Arg. Tradicional	2,08	2,38	1,91	12,75
Arg. Industrial	1,78	1,83	1,55	10,40

As densidades de massa aparente das argamassas com borracha reciclada, A1 e A2, são aproximadamente 30% maiores comparativamente aos valores das argamassas A3 e A4, que não contêm agregados de borracha. Este fato já era previsto considerando-se que a borracha tem uma densidade de 0.95g/cm³ enquanto que a vermiculita expandida utilizada tem densidade de 0.30g/cm³. Pode-se perceber que as densidades obtidas são substancialmente menores do que as de argamassas tradicionais de cimento, cal e areia (1,55 a 2.0g/cm³), o que as tipifica como argamassas leves. Cabe aqui lembrar que o

teor de areia foi variado em função de seu substituto, vermiculita ou borracha, como mostrado na Tabela 3.1, Capítulo 3.

A maior densidade apresentada pela argamassa A2 dentre as argamassas leves, pode ser explicada pelo fato da sua composição ter menor percentual de vermiculita (12%) e maior teor de borracha (33%), para teores de semelhantes de aglomerante (cimento +cal). Aparentemente a inclusão de agregados de borracha, também conduz a um melhor empacotamento da microestrutura da argamassa.

Os resultados das densidades, experimental e aparente e o teor de ar incorporado para todas as argamassas leves são os esperados. Isto é, as argamassas contendo apenas vermiculita apresentaram teores superiores de ar incorporado, devido à natureza deste componente. É evidente que a inclusão de agregados de borracha contribuiu para diminuir o teor de ar incorporado em comparação com argamassas com vermiculita, sendo comparável ao das argamassas tradicional e industrializada. Isto pode ser creditado ao caráter impermeável de agregados de borracha, que não absorve água, necessitando menos água de mistura do que as argamassas leves sem borracha.

A relação gráfica entre os resultados dos ensaios de consistência e o teor de ar incorporado nas argamassas tem-se como resultado a Figura 4.2.

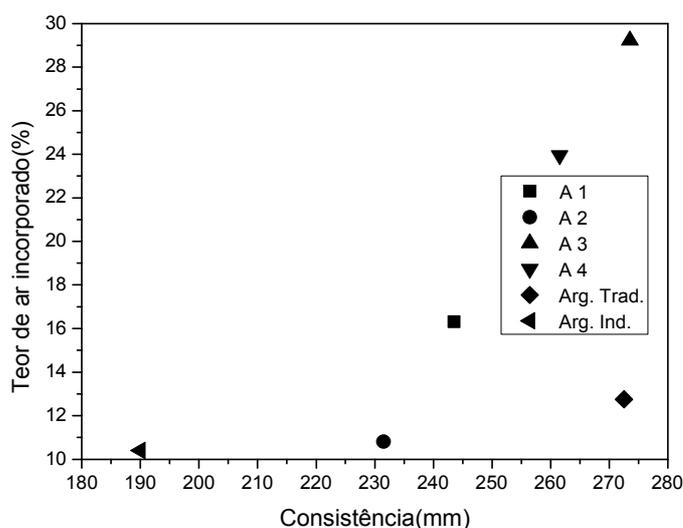


Figura 4.2 Ensaio de Consistência e Teor de Ar Incorporado

Pela Figura 4.2, pode-se dizer que quanto maior o teor de ar incorporado, maior o índice de consistência. Este fato é bem evidente no grupo das argamassas leves. A argamassa tradicional também apresenta consistência elevada. Este fato nos leva a inferir que a elevada consistência da argamassa tradicional, deve-se ao caráter impermeável e ao aspecto arredondado das partículas de areia, o que causa menor impedimento hidrodinâmico e no movimento relativo das partículas durante seu deslocamento.

Quanto ao teor de ar incorporado, naturalmente a composição com um maior percentual de vermiculita (A3) apresentou o maior percentual de ar incorporado, enquanto que a com menor percentual de vermiculita (A2) o menor teor de ar incorporado. Isto já era esperado, pois isto está diretamente relacionado aos vazios existentes entre as lamelas da vermiculita expandida.

O teor de ar incorporado é um parâmetro que influencia na trabalhabilidade. Quanto mais leve for a argamassa, maior a trabalhabilidade e por mais tempo permanece trabalhável, possibilitando a redução do esforço na sua aplicação, resultando em maior produtividade. Porém vale lembrar que o ar incorporado (vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa), favorece a trabalhabilidade mas prejudica a resistência mecânica final [123].

Ainda quanto ao teor de ar incorporado, a Figura 4.3 mostra a relação entre os resultados desta característica e a densidade aparente.

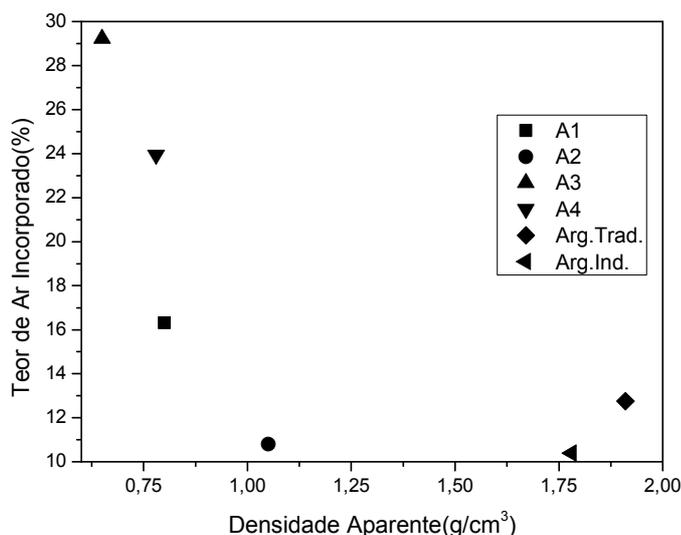


Figura 4.3 Ensaio de Densidade Aparente e o Teor de Ar Incorporado

Como era esperado a proporção entre teor de ar e densidade de massa são inversamente proporcional. Entre as argamassas leves a com maior percentual de ar incorporado (A3), tem menor densidade de massa aparente, e as composições com borracha reciclada de pneus, devido às suas características, acabam tendo um menor percentual de ar do que as demais.

Rendimentos, percentual água/sólido e o teor de vermiculita.

A Tabela 4.3 traz os resultados dos rendimentos, os percentuais da proporção água/sólido e de vermiculita nas argamassas.

Tabela 4.3 Propriedades complementares das argamassas

Argamassa	Rendimento (kg/m ²) Espessura =2 cm	Água/sólido (%)	Vermiculita (%)
A 1	21,42	50	20
A 2	24,35	40	12
A 3	14,28	80	40
A 4	17,85	70	34
Arg. Tradicional	60,71	18	-
Arg. Industrial	39,28	16	-

Os resultados da Tabela 4.3, demonstram que as argamassas leves envolvem menor percentual de material acarretando menos peso na estrutura dos edifícios, exigindo menor esforço físico de quem às aplica manualmente.

Os rendimentos de cobertura das argamassas estão na Figura 4.4.

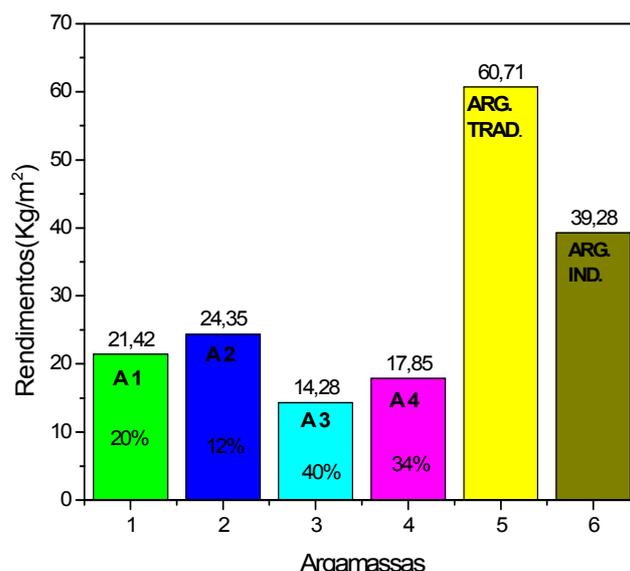


Figura 4.4 Rendimentos de coberturas das argamassas

Pode-se notar que os valores de cobertura das argamassas leves são pelo menos duas vezes maiores que os das argamassas de comparação, quando aplicadas como um revestimento de 2 cm de espessura sobre 1m² de um painel de parede de tijolo vermelho.

A Figura 4.5 traz a relação dos rendimentos de cobertura e percentual de vermiculita das argamassas.

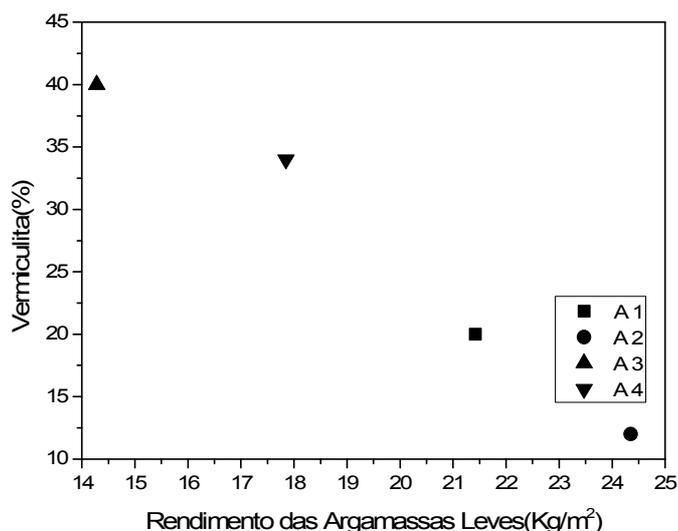


Figura 4.5 Rendimentos de cobertura e Percentual de Vermiculita Expandida

Como já era esperado, as argamassas A3 e A4, contendo apenas a vermiculita, apresentam uma maior área de cobertura do que as argamassas A1 e A2 que contém agregados de borracha reciclada de pneu além da vermiculita.

Com estes dados do rendimento pode-se inferir que, apesar do menor custo evidente das argamassas tradicional e industrializada, a quantidade de trabalho envolvido e a sua aplicação pode ser mais elevada do que as das argamassas leves desenvolvidos.

Este fato indica a viabilidade econômica destas argamassas leves, considerando que o seu custo nominal mais elevado, é parcialmente compensado pelo rendimento de cobertura maior e menor trabalho de preparação e aplicação da argamassa, além do menor peso transferido para estruturas dos edifícios.

4.1.2 Argamassas no Estado Endurecido

Densidade de massa aparente

Os resultados médios dos ensaios de densidade aparente já foram apresentados na Tabela 4.2, juntamente com as demais densidades. Na Tabela 4.4 são mostrados os intervalos de variação destes resultados.

Tabela 4.4 Médias das densidades de massa aparente

Argamassa	Densidade de massa aparente (g/cm ³)
A 1	0,750-0,850
A 2	1,037-1,095
A 3	0,590-0,690
A 4	0,760-0,800
Arg. Tradicional	1,810-1,980
Arg. Industrial	1,780-1,900

Absorção de água por capilaridade

Os resultados de absorção de água por capilaridade estão na Tabela 4.5, que aponta o coeficiente de capilaridade conforme estabelecido pela NBR 15259 [108].

Tabela 4.5 Absorção de água

Argamassa	Coeficiente (g/cm ²)
A 1	2,03
A 2	1,80
A 3	4,61
A 4	3,37
Arg. Tradicional	0,97
Arg. Industrial	1,23

A Figura 4.6 mostra a relação entre a absorção de água por capilaridade e o percentual de água/sólido.

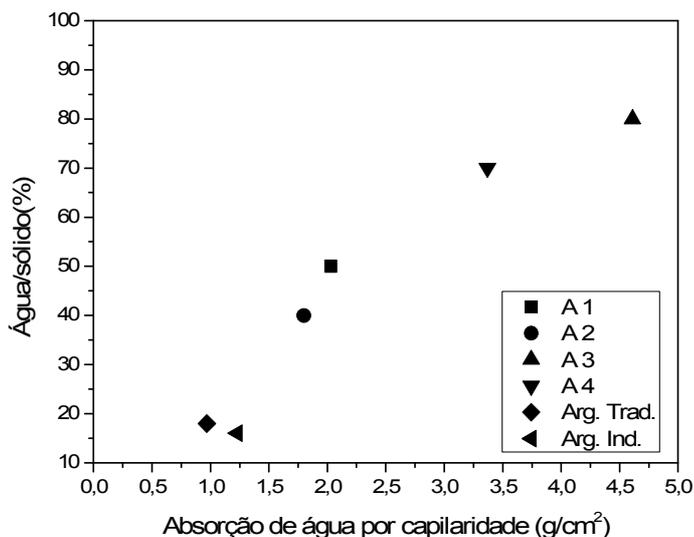


Figura 4.6 Absorção de Água por Capilaridade e Percentual de Água/Sólido

Com base na Tabela 4.5 e na Figura 4.6, observa-se que as argamassas com vermiculita possuem uma absorção de água maior do que as argamassas de comparação (tradicional e industrial), fato explicado pela alta taxa de absorção de água da vermiculita.

As argamassas com borracha reciclada de pneu são as que têm menor percentual de vermiculita (A1=20% e A2 =12%) e tem absorção por capilaridade menor, pois a borracha tem a tendência de repelir água, não absorvendo [50].

Retração por secagem

Os resultados dos ensaios de variação dimensional (altura e diâmetro) realizados seguindo a NBR 15261) [110] estão na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Retração por secagem

Argamassa	Varição dimensional(h) (mm)	Varição dimensional(Ø) (mm)
A 1	-0,04	-0,06
A 2	-0,06	-0,04
A 3	-0,14	-0,11
A 4	-0,12	-0,10
Arg. Tradicional	-0,16	-0,18
Arg. Industrial	-0,05	-0,04

Para melhor analisar estes ensaios, na Tabela 4.7 os percentuais de vermiculita, borracha reciclada de pneus, água das argamassas leves são colocados lado a lado.

Pode-se notar na Tabela 4.6 que as argamassas com a borracha reciclada de pneus (A1 e A2) tem menor percentual de retração por secagem, similar ao da argamassa industrial. Já as demais argamassa leves (A3 e A4) têm percentual de retração dimensional maiores, devido ao maior percentual de água, pelo maior percentual de vermiculita expandida.

Tabela 4.7 Percentuais de alguns componentes das argamassas

	Vermiculita (%)	Borracha reciclada de pneus (%)	Água (%)
A 1	20	10	50
A 2	12	33	40
A 3	40	-	80
A 4	34	-	70

Observando-se os resultados expressos nas Tabelas 4.6 e 4.7 as argamassas leves, A1 e A2, com percentuais variados de pneus, tem menor variação dimensional do que as que não contem este agregado, isto é positivo, pois comprova que a borracha segura a retração o que é benéfico para uma argamassa de revestimento [57].

4.2 Ensaio Mecânicos

A Tabela 4.8 mostra os resultados dos ensaios mecânicos de resistência às compressões uniaxial, compressão diametral e de aderência à tração, realizados nas 6 (seis) composições estudadas.

Tabela 4.8 Propriedades mecânicas das argamassas.

Argamassa	Resistência à compressão uniaxial(MPa)	Resistência por compressão diametral (MPa)	Resistência de aderência à tração(MPa)
A1	1,34	0,392	0,24 (b)
A2	1,44	0,368	0,26(b)
A3	1,36	0,365	0,18(b)
A4	1,25	0,312	0,21(b)
Arg. Tradicional	3,53	0,274	0,20(b)
Arg. Industrial	5,01	1,193	0,21(b)

(b) Ruptura na argamassa segundo a NBR 13528[116]

Resistência à Compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, exprimem o que era esperado, as argamassas de comparação por serem densas e com agregados resistentes, são inerentemente mais fortes do que as argamassas desenvolvidas. Porém, esses valores de resistência à compressão uniaxial das argamassas leves satisfazem plenamente os requisitos da NBR 13281 para a classe de argamassa do Tipo I [122]. Para o tipo I a norma estabelece como aceitável valores entre de $0,1 < \sigma_c < 4\text{MPa}$. Além disso, a inclusão de agregados de borracha nas argamassas do tipo leve foi benéfica para aumentar a resistência à compressão das argamassas em comparação com as sem borracha. Isto se deve a dois fatores: a maior resistência mecânica da borracha comparada à da vermiculita e ao menor teor de água de mistura utilizada nas argamassas com borracha reciclada de pneus.

As composições A3, A4, A1 e A2, respectivamente, contêm 40%, 34%, 20% e 12% de vermiculita. Como resultado, a quantidade de espaços vazios é proporcional a estes espaços vazios deste material. É notório que a porosidade nos sólidos afeta negativamente resistência mecânica. Isto aconteceu de modo esperado [105].

Nas Figuras 4.7 e 4.8, são apresentados os gráficos da densidade aparente e o teor de ar incorporado versus resistência à compressão uniaxial das argamassas leves.

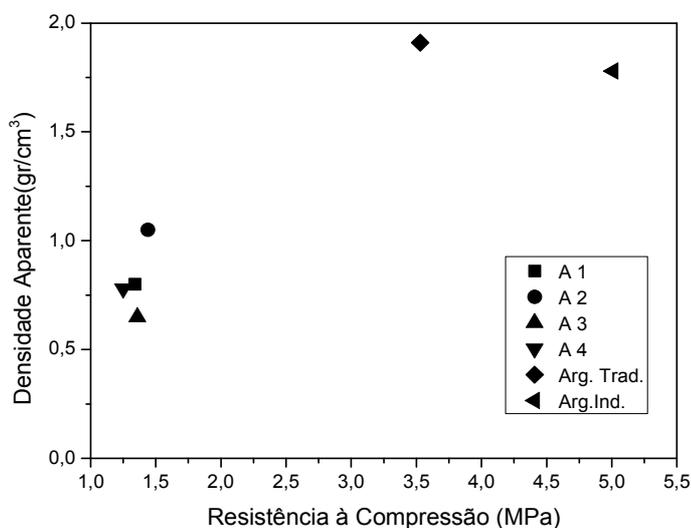


Figura 4.7 Ensaio de Resistência à Compressão e Densidade Aparente

Quando se analisa a relação resistência à compressão versus densidade aparente, Figura 4.7, nas argamassas sem borracha, nota-se A3 tem menor densidade aparente, mas apresenta uma boa resistência à compressão. Por sua vez a argamassa A4 com maior densidade aparente do que a A3, tem a menor resistência à compressão. Esse fato pode ser explicado pela maior quantidade de componentes cimentantes (cimento+cal+micosílica) utilizados na argamassa A3.

Entre às argamassas com borracha, verifica-se que a argamassa A2, com maior teor de borracha, tem a maior densidade dentre todas as argamassas leves, mas também foi a de maior resistência à compressão.

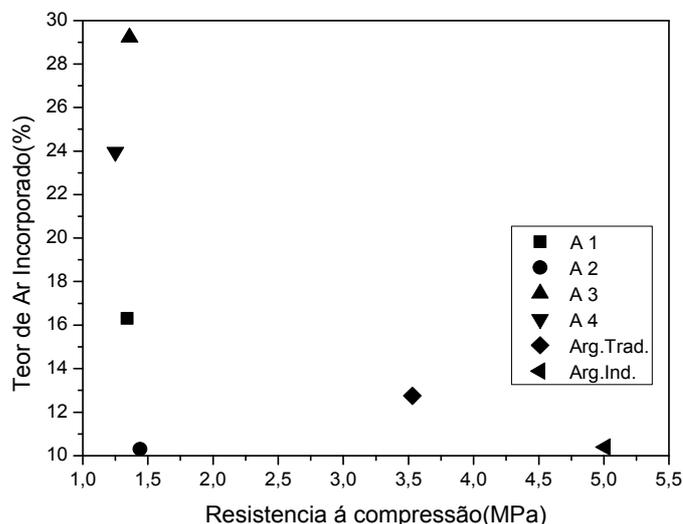


Figura 4.8 Ensaio de Resistência à Compressão e Teor de Ar Incorporado

Outro aspecto interessante a se destacar diz respeito aos resultados de ar incorporado, Figura 4.8, vis a vis com os de resistência mecânica e densidade aparente. Eles poderiam indicar uma contradição, uma vez que seria esperada uma menor resistência mecânica para quem tivesse menor densidade de massa e maior teor de ar incorporado. Essa contradição é apenas aparente, pois ao analisar a Tabela 3.1 do Capítulo 3 das composições, percebe-se que as argamassas foram formuladas com quantidades de agentes ligantes (cimento+ cal) em teores propositalmente diferenciados e ajustados para compensar perda de resistência mecânica, quando da substituição do teor de areia por vermiculita e/ ou borracha reciclada de pneus.

Em vista disso, a resistência mecânica das argamassas contendo vermiculita e / ou de borracha reciclada não alterou significativamente, e embora tenham diferido nos níveis de resistência mecânica à compressão, apresentaram todos os valores acima dos exigidos pela NBR 13281[122].

Nas Figuras 4.9 e 4.10, são apresentados os gráficos de retenção de água e relação água/sólido versus resistência à compressão simples.

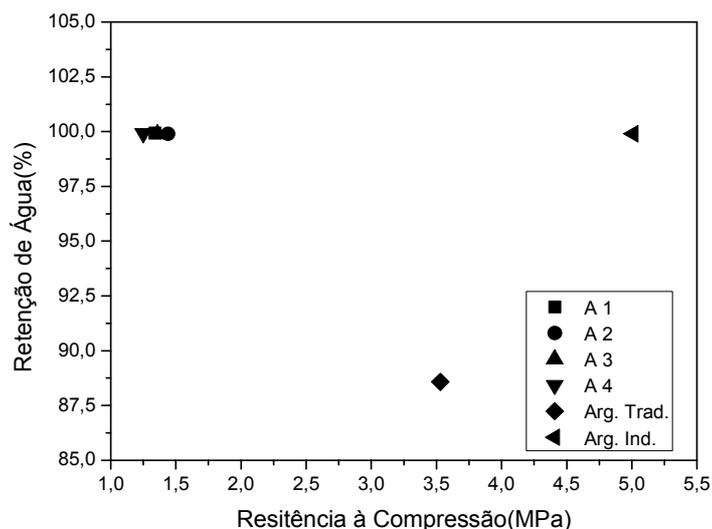


Figura 4.9 Ensaio de Resistência à Compressão e Retenção de Água

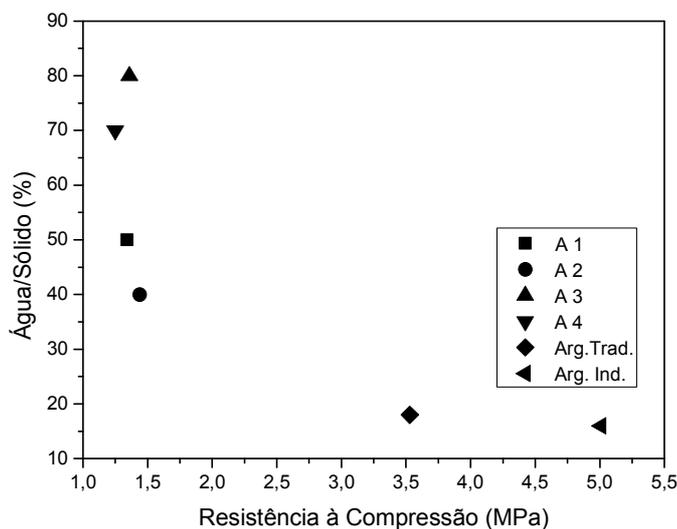


Figura 4.10 Ensaio de Resistência à Compressão e Percentual Água/Sólido

Pelas figuras 4.9 e 4.10, não se nota nenhuma relação de dependência clara da resistência à compressão com as variáveis de retenção de água e a relação água/sólido.

Resistência à Compressão Diametral

Os resultados de resistência à compressão diametral das seis composições estudadas estão mostrados na Tabela 4.8 e a relação entre as resistências a compressão diametral e uniaxial resulta a Figura 4.11.

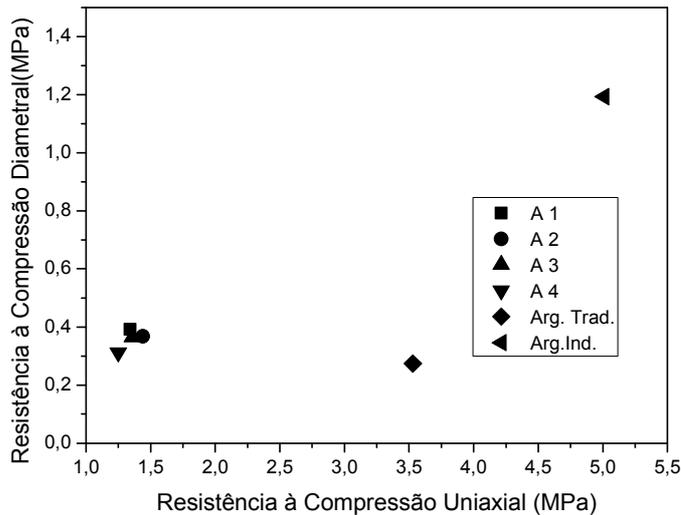


Figura 4.11 Ensaio de Resistências à Compressão Uniaxial e Diametral

Ao analisar os resultados de compressão diametral das argamassas leves (Tabela 4.8), pode-se concluir que eles são no mínimo 15 % maiores do que traço da argamassa tradicional ensaiada, mas menores do que os resultados da argamassa industrial. Por outro lado, é importante observar que a resistência à compressão diametral das argamassas leves, é basicamente a mesma da argamassa tradicional densa. É sabido que o teste de resistência à compressão diametral, em função das tensões geradas no corpo de prova, exprime uma avaliação indireta da resistência à tração do material. Assim podemos concluir que embora as argamassas leves apresentem baixa resistência à compressão simples (uniaxial), sua resistência à tração é comparável à das argamassas densas. Isto sugere uma boa resistência ao trincamento quando instaladas.

Resistência de aderência à tração

Como a argamassa de revestimento não tem função estrutural, a resistência mecânica em si, poderia ser um parâmetro secundário no comportamento do revestimento, porém a resistência de aderência sob tração da argamassa é um componente muito significativo [124].

Os resultados dos ensaios de aderência são mostrados na Tabela 4.8 que indica também o modo de rompimento dos corpos de prova. Pode-se notar que todos romperam na própria argamassa (Figura 4.12), onde deve preferencialmente ocorrer.

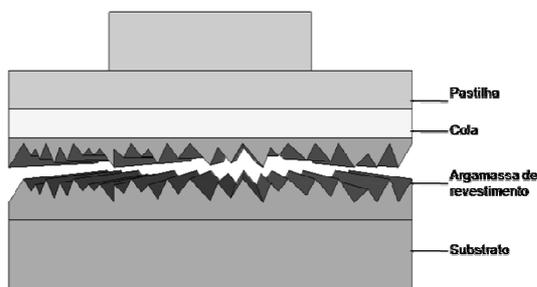


Figura 4.12 Modo de ruptura no ensaio de Aderência à Tração

Analisando os resultados pode-se concluir que os valores apresentados pelas argamassas contendo borracha, satisfazem melhor as exigências da NBR 13749[117], que especifica o mínimo de 0,20 MPa de aderência sob tração, para revestimentos internos e tetos. Por sua vez as resistências de aderência, apresentadas pelas argamassas que não contem borracha ficaram próximas ao limite mínimo exigido pela norma. Por sua vez a composição que tem o maior percentual de vermiculita (A 3 = 40%) apresentou valor abaixo da norma, isto já era esperado em vista do teor e das propriedades da vermiculita.

A resistência á aderência pode estar indiretamente relacionada com outras propriedades da argamassa tais como densidade aparente, teor de ar e resistência à compressão. Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 que representam procura-se graficamente estas relações.

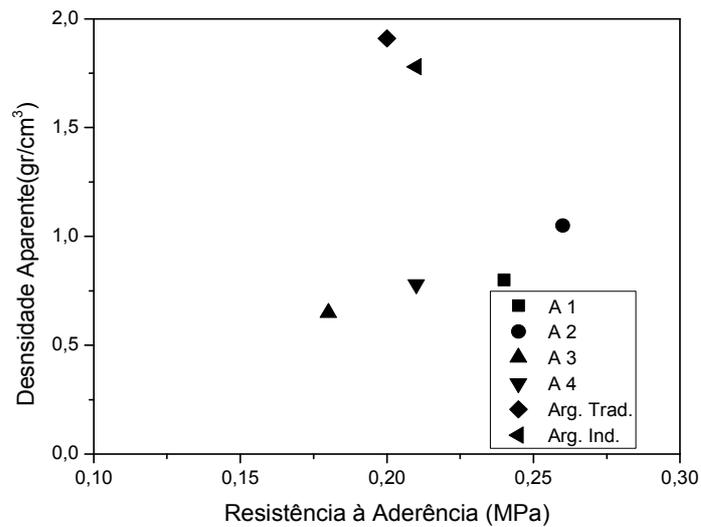


Figura 4.13 Ensaio de Resistência à Aderência e Densidade Aparente

Através da Figura 4.13, nota-se que a argamassa A2, com maior teor de borracha (33%) e maior densidade, foi ligeiramente mais aderente do que a argamassa A1 de menor teor de borracha (10%). Pode-se então inferir, que a borracha contribui significativamente para a aderência através de um mecanismo ainda a ser estudado. Por sua vez, fica claro que as argamassas só com vermiculita são menos aderentes.

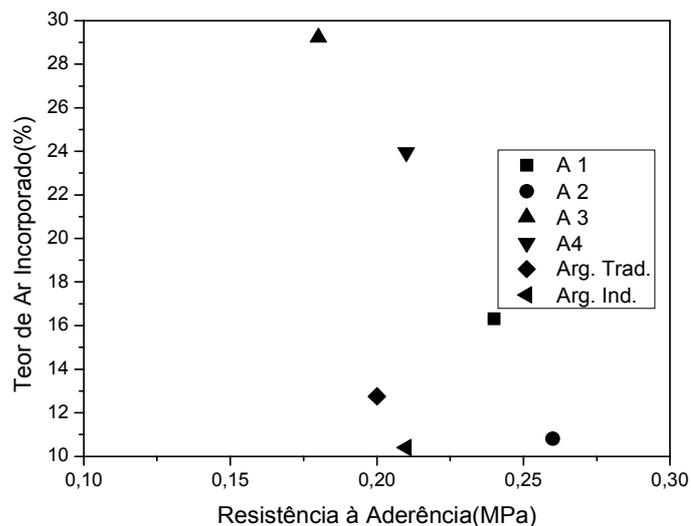


Figura 4.14 Ensaio de Resistência à Aderência e Teor de Ar Incorporado

Pode-se perceber através da Figura 4.14 que a inclusão de agregados de borracha diminui sensivelmente o teor de ar incorporado e melhora a aderência. Este fato, no entanto, não impede que nas argamassas sem borracha a aderência possa ser boa, mesmo com elevado teor de ar incorporado, devendo para isto fazer reforço na matriz.

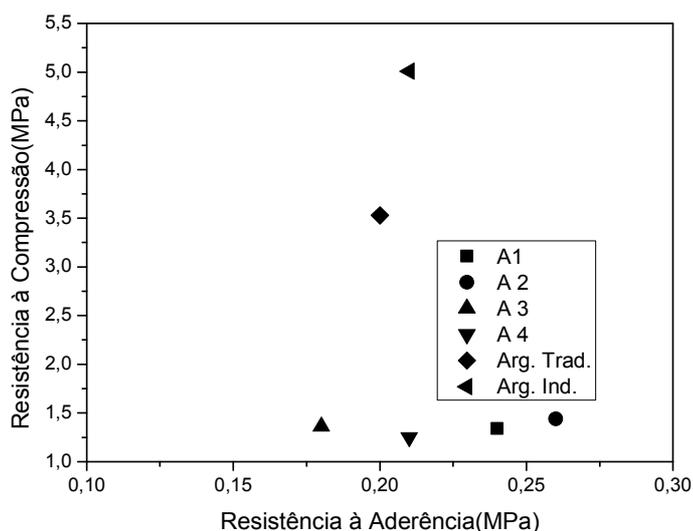


Figura 4.15 Ensaio de Resistências à Aderência e Compressão Uniaxial

Nota-se pela Figura 4.15, a mesma relação entre a resistência à compressão e à aderência, que foi encontrada para a densidade e aderência, ou seja, as argamassas contendo borracha (A1 e A2) apresentaram uma relação de que quanto maior o teor de borracha, maiores foram à aderência e resistência à compressão, já nas argamassas só com vermiculita isto não ocorreu. Este fato é interessante, pois a borracha não apresenta qualquer interação com a matriz cementante, uma vez que os agregados reciclados de borracha ficam apenas sob constrição mecânica.

A diminuição da resistência de aderência à tração nas argamassas sem a borracha reciclada de pneus pode ser explicada pela teoria dos poros ativos (poros que possuem força capilar suficiente para exercer a ação da sucção de água), discutida por Carasek, Scartezini e Paes, que afirmam que para existir uma adequada aderência é importante que ocorra a sucção da água da argamassa pelo substrato. Nesta pesquisa, a vermiculita por ter alto

teor de absorção e retenção de água pode ter diminuído o fluxo de água para o substrato, prejudicando esta ancoragem mecânica [125,126,127].

O limite mínimo de resistência de aderência à tração para revestimentos internos de camada única para pintura ou base para reboco estabelecido pela norma NBR 13749 [117] em $> 0,20$ MPa, já foi questionado por alguns autores com por exemplo Scartezini. Este estudioso destaca a trabalhabilidade e a qualidade da mão-de-obra, como elementos diretamente relacionados à qualidade final do revestimento [126].

O traço da argamassa tradicional ensaiada nesta pesquisa é muito utilizado nas edificações, e não há relatos de comprometimento da aderência quando é utilizada como revestimento, muito embora seu valor nesta pesquisa tenha ficado no limite estabelecido pela NBR 13749 em $> 0,20$ Mpa [117].

Apesar dos valores obtidos na resistência de aderência à tração nos revestimentos estudados estarem em patamares reduzidos, tais valores são maiores dos que os encontrados nas pesquisas de Pessato que estudou traços de argamassa com vermiculita, mas sem a borracha reciclada de pneus [3].

Os ensaios deste estudo foram realizados em substratos padrão, pois estudos com revestimentos similares demonstram que os melhores valores foram no substrato de concreto, deixando clara a influência do tipo de substrato na resistência de aderência à tração. Scartezini afirma que isto ocorre devido à superfície do bloco de concreto ser mais rugoso superficialmente e ter uma textura diferenciada, o que facilita a penetração da argamassa no interior do bloco, proporcionando uma melhor aderência, pois a estrutura porosa do bloco de concreto explica a maior sucção da água da argamassa, favorecendo o intertravamento da argamassa [126].

Scartezini e Paes também constataram que os blocos cerâmicos absorvem mais água da argamassa ainda fresca do que blocos de concreto, muito embora o bloco de concreto absorva uma grande quantidade de água nos momentos iniciais logo após a aplicação. Esta perda menor de água da argamassa para o substrato de concreto provoca alterações das propriedades da argamassa e conseqüente melhor resistência das argamassas de revestimento aplicadas sobre este tipo de substrato [126, 127]

4.3 Classificações das argamassas estudadas

A Tabela 4.9 traz a identificação, limites e métodos das propriedades de resistência à compressão, capacidade de retenção de água e teor de ar incorporado das argamassas para revestimento, e a tabela 4.10 traz a classificação das argamassas estudadas nesta pesquisa.

Tabela 4.9 Características, identificação e limites das argamassas [122]

Características	Identificação	Limites	Método
-Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$	NBR 13279
	II	$\geq 4,1$ e $\leq 8,0$	
-Capacidade de retenção de água (%)	II	$> 8,0$	NBR 13277
	Normal	≥ 80 e ≤ 90	
-Teor de ar incorporado (%)	Alta	> 90	NBR 13278
	A	< 8	
	B	≥ 8 e ≤ 18	
	C	> 18	

Tabela 4.10 Classificações das argamassas estudadas

Propriedades	A 1	A 2	A 3	A 4	Arg. Trad.	Arg. Ind.
-Resistência a Compressão	Tipo I	Tipo I				
-Capacidade de Retenção de Água	Alta	Alta	Alta	Alta	Normal	Alta
-Teor de Ar incorporado	B	B	C	C	B	B

4.4 Ensaio Térmico – Condutividade

Os resultados do desempenho das argamassas em relação à condutividade térmica estão na Tabela 4.11 e serão discutido a luz da NBR 15220-2 [66].

Tabela 4.11 Densidade aparente e condutividade térmica

Argamassa	Densidade Aparente (g/cm ³)	Condutividade Térmica (W/mK)
A 1	0,80	0,338
A 2	1,05	0,388
A 3	0,65	0,383
A 4	0,78	0,349
Arg. Tradicional	1,91	2,137
Arg. Industrial	1,55	1,550

No que diz respeito aos dados da condutividade térmica, as composições das argamassas leves, com ou sem borracha reciclada de pneus, como já era esperado, apresentaram valores de condutividades térmicas muito mais baixas do que aquelas das argamassas de comparação.

Os resultados também indicam que os agregados de borracha, embora sendo quase cinco vezes mais densos do que a vermiculita (0.95g/cm^3), não causaram qualquer aumento notável na condutividade térmica das argamassas, comparativamente com aquelas que contêm apenas vermiculita, pois como pode se ver os resultados são similares.

Tomando como base esses resultados, pode-se concluir que estas argamassas leves apresentam um bom potencial de isolamento térmico quando aplicadas como elemento revestimento.

Sabe-se que a borracha tem, por si só baixa condutividade térmica ($\sim 0.25\text{W/mK}$). Além disso, foi relatado que em argamassas contendo borracha de pneus usados, as bolhas de ar se acumulam na superfície das partículas de borracha, levando a baixas condições de transferência de calor e um aumento na capacidade de isolamento térmico [10,11].

Na Tabela 4.12 estão os valores da condutividade térmica e densidade aparente, citados na NBR 15220-2, de alguns materiais utilizados na construção civil, alguns já conhecidos como bons isolantes térmicos, como por exemplo, a lã de rocha e o poliestireno expandido [66].

Tabela 4.12 – Condutividade térmica de alguns materiais

Material	Densidade de Aparente (g/cm^3)	Condutividade térmica (W/mK)
Concreto normal	2,20 – 2,40	1,75
Argamassa comum	1,80 – 2,10	1,15
Tijolos cerâmicos	1,30 – 1,60	0,90
Argamassa celular	0,60 – 1,00	0,40
Concreto com vermiculita	0,60 – 0,80	0,31
Madeiras	0,60 – 0,75	0,23
Lã de rocha	0,02 – 0,20	0,045
Poliestireno expandido	0,015 – 0,035	0,040
Aço, ferro fundido	7,80	55
Vidro Comum	2,50	1,0
Pedra - granito	2,30- 2,90	3,0

Com base nos resultados dos ensaios e na NBR 15220-2, confirma-se que a variação da condutividade térmica está diretamente relacionada com a densidade de massa do material, quanto menor a densidade de massa menor a condutividade térmica [66] .

Segundo a Tabela 4.12, os valores da densidade aparente e condutividade da argamassa celular e o concreto com vermiculita estão entre 0,60 e 1,00 (g/cm³) e 0,40 W/mK, e entre 0,60 e 0,80 (g/cm³) e 0,31W/mK, respectivamente. Pode-se dizer que comparativamente, os resultados encontrados para as argamassas leves ($\cong 0,35$ W/mk) foram até melhores, uma vez que as argamassas se encontram dentro da mesma faixa de densidade de massa.

O valor encontrado para a condutividade térmica da argamassa tradicional não foi o esperado, pois enquanto a norma cita uma condutividade térmica de 1,15 W/mK o método empregado nesta tese obteve um resultado de 2,13 W/mK.

A partir dos resultados dos ensaios realizados foram construídos os gráficos das Figuras 4.16 e 4.17. Eles relacionam a condutividade térmica com a consistência da massa e a retenção de água das argamassas. Ao analisar estas figuras observa-se que a condutividade térmica não sofre influencia destas propriedades no estado fresco.

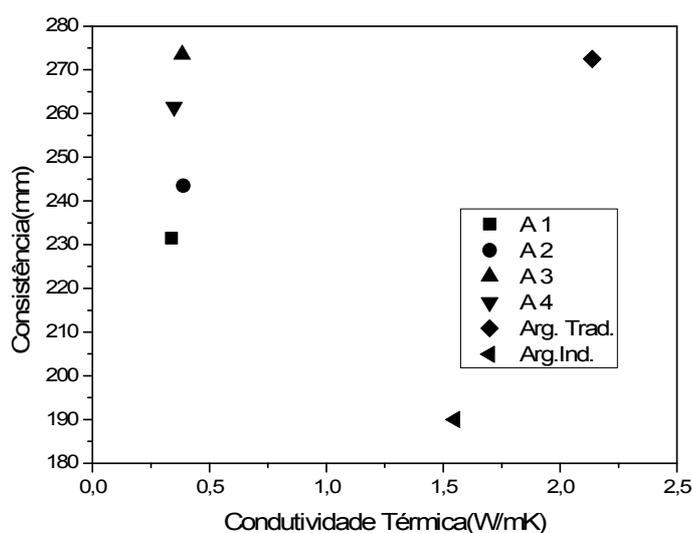


Figura 4.16 Ensaio de Condutividade Térmica e Consistência

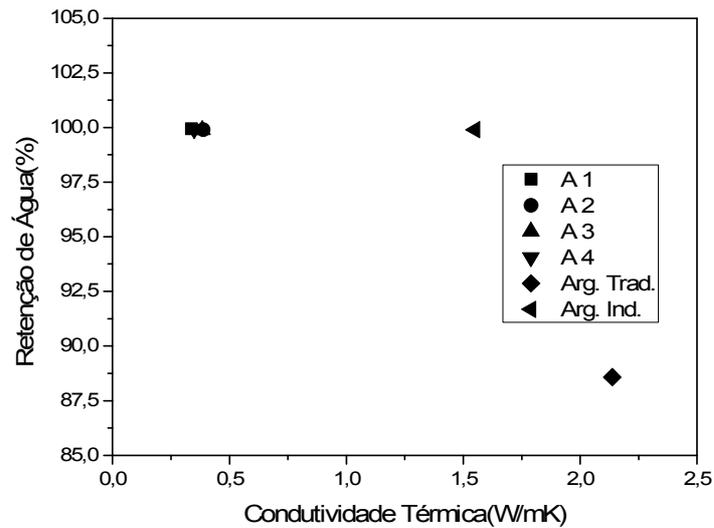


Figura 4.17 Ensaio de Condutividade Térmica e Retenção de Água

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 mostram as relações entre a Condutividade Térmica, o teor de ar incorporado, a densidade teórica e a aparente.

A partir destas 3 (três) figuras pode ser notado que, para as argamassas leves, curiosamente, existe um tipo de relação controversa, entre a densidade aparente, a densidade teórica e o teor de ar, relacionados com a condutividade térmica. Por exemplo, a argamassa A2, apresentou a maior densidade aparente e condutividade térmica e o teor de ar menor. Tem menos vermiculita e conteúdo de areia, mas a mesma quantidade de ligante (cimento + cal) em relação a A1 e A4. O seu conteúdo de borracha é o mais alto (33 %), e a sua condutibilidade térmica é de apenas 15 % maior do que a mais baixa condutividade térmica encontrada nos ensaios.

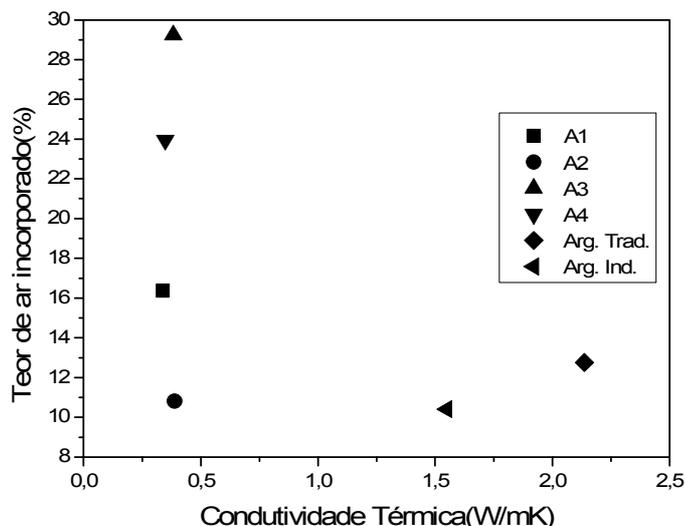


Figura 4.18 Ensaio de Condutividade Térmica e Teor de Ar Incorporado

Como pode ser notado na Figura 4.18 apesar de a quantidade de ar incorporado variar com a quantidade de vermiculita, pode dizer-se que a condutividade térmica resultante permaneceu praticamente inalterada para argamassas A1 e A4, mas mostraram um ligeiro aumento ($\cong 12-15\%$) para A2 e A3. Em geral, o aumento da condutividade térmica observada para estas 2 (duas) argamassas pode ser por causado por duas variáveis:

- Por um lado, o alto teor de ligante (cimento + cal) de A3, criando uma matriz com componentes de condutividade térmica mais elevada, embora esta argamassa seja menos denso por causa de seu maior teor de vermiculita. Também existe, comparativamente, um excesso evidente de cal, o qual destina-se a dar uma melhor plasticidade da argamassa no estado fresco, devido ao seu teor de vermiculita muito grande. Durante a cura e o endurecimento da argamassa, a cal passa por carbonatação, o que contribui para densificar a microestrutura da argamassa e melhorar as condições de transferência de calor (condutividade térmica mais elevada).

- Por outro lado, o aumento na condutividade térmica para a argamassa A2, pode ser devido à sua maior quantidade de agregados de borracha e menor quantidade de água de mistura. A borracha tem uma condutividade térmica inerente maior do que a da vermiculita que é de

0.12w/mK. Além disso, o teor de cimento da composição A2 é o maior de todas as argamassas, o que pode ter contribuído para uma matriz mais densa.

As relações entre a condutividade térmica e as densidades teóricas e aparentes estão representadas nas Figuras 4.19 e 4.20.

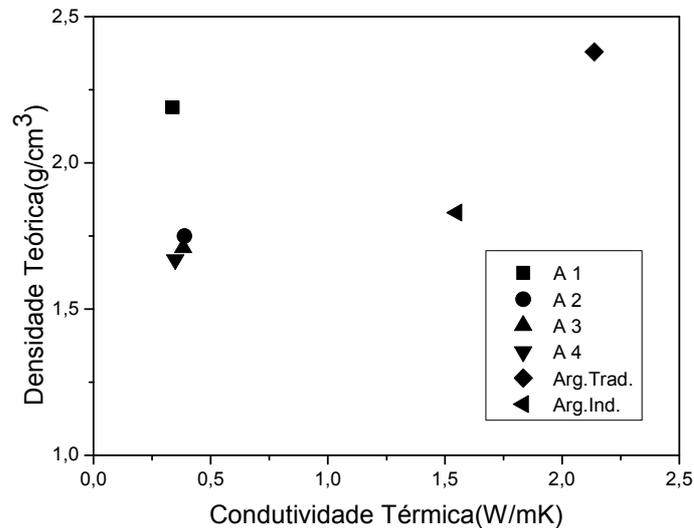


Figura 4.19 Ensaio de Condutividade Térmica e Densidade Teórica

A argamassa A1 apresenta a densidade teórica 10% maior que as demais, mas pode-se constatar que isto em nada influencia a condutividade térmica, pois as argamassas leves apresentam valores similares de condutividade térmica.

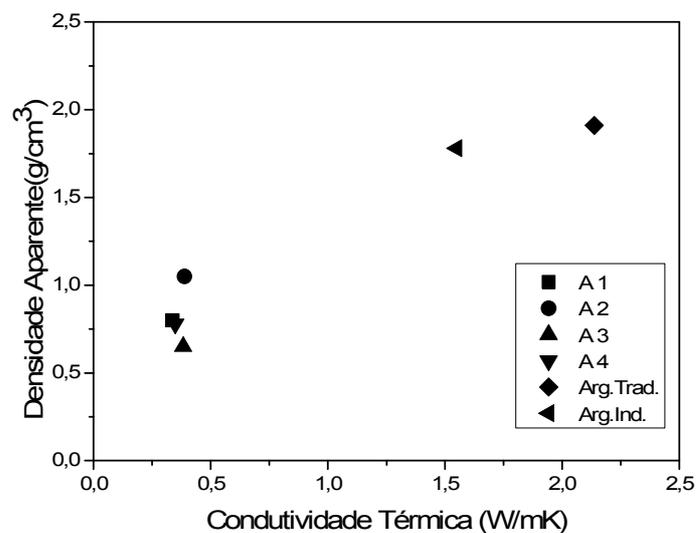


Figura 4.20 Ensaio de Condutividade Térmica e Densidade Aparente

Ao avaliar os resultados pode-se concluir que, no caso de argamassa A2, o papel desempenhado pelos agregados de borracha foi de promover uma maior densidade e menor teor de ar, contribuindo para o aumento da condutividade térmica, embora pouco significativa comparada à da A1 e A4.

A Figura 4.20 comprova a relação existente entre a densidade de massa das argamassas estudadas com suas respectivas condutividades térmicas. A argamassa tradicional que tem a maior densidade aparente entre as argamassas estudadas, cujo valor é igual a $1,91 \text{ g/cm}^3$, também teve a maior condutividade térmica ($2,137 \text{ W/mK}$).

A Figura 4.21 traz o gráfico da relação entre a condutividade térmica e a absorção de água por capilaridade.

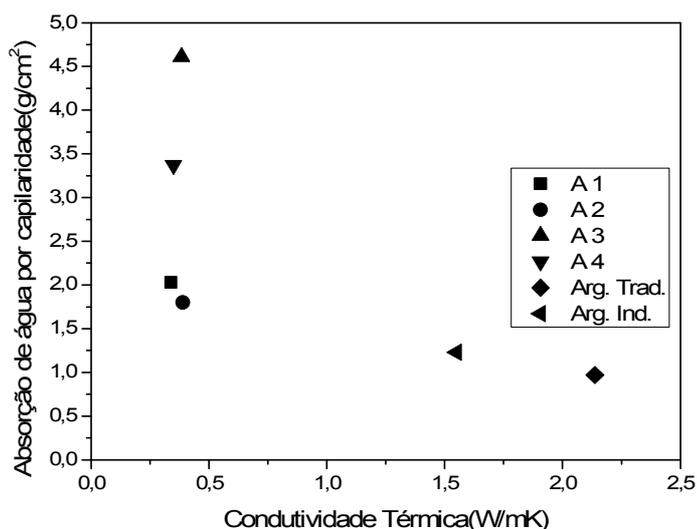


Figura 4.21 Ensaios de Condutividade Térmica e Absorção de Água

Aparentemente a absorção capilar não tem influência direta na condutividade térmica. Ela teria influência se os poros fossem realmente capilares o que ao que tudo indica não são.

As Figuras de 4.22, 4.23 e 4.24 mostram as relações entre as propriedades mecânicas (resistência à compressão uniaxial, diametral e a aderência) e a condutividade térmica.

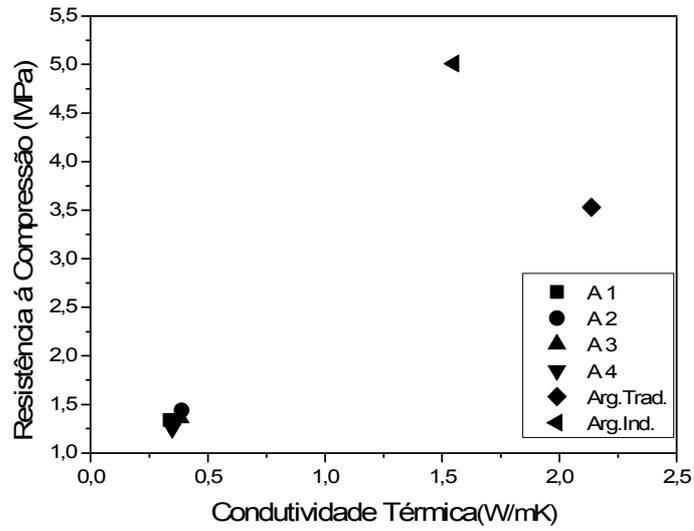


Figura 4.22 Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Compressão Uniaxial

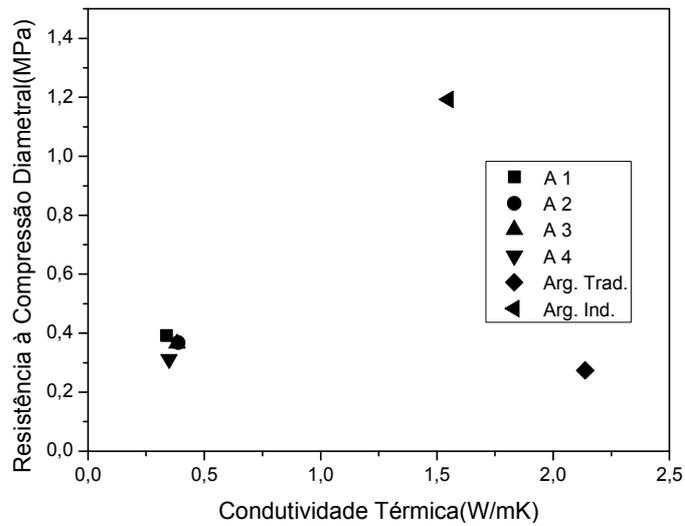


Figura 4.23 Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Compressão Diametral

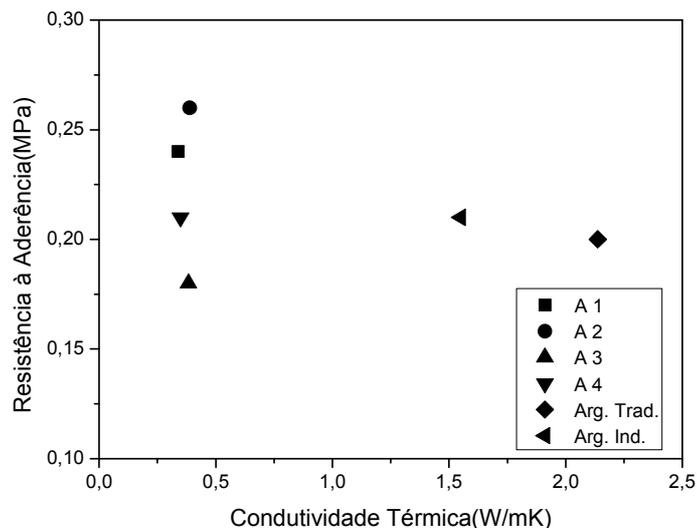


Figura 4.24 Ensaio de Condutividade Térmica e Resistência à Aderência

Como era de esperar, as argamassas A1, A2, A3 e A4 apresentaram resistências à compressão uniaxial mais baixa do que as argamassas de referência. Embora as resistências à compressão diametral fossem similares. Considerando-se que as diferenças em ambas as propriedades (resistências e condutividade térmica) entre as argamassas não são superior a 15%, não foi encontrada nenhuma relação direta estas propriedades mecânicas e a condutividade térmica para as argamassas de leves estudadas.

Com relação à aderência também não se nota uma relação entre esta propriedade e a condutividade térmica.

4.5 Ensaio Acústico

4.5.1 Absorção sonora – tubo de impedância

Os índices de absorção acústica medidos pelo método do tubo de impedância, descrito no capítulo 3 (três), são apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26. Nestas figuras o eixo horizontal é composto pelas bandas de terço de oitava de frequência de 315 a 1000 e o eixo vertical do percentual de absorção sonora com variação de 0 a 2%. Esta faixa de frequência foi escolhida levando-se em conta que é nesta faixa que se encontram os sons ambientais mais comuns nos meios urbanos.

Nestas figuras pode-se ler os resultados do percentual de absorção sonora das 6 (seis) composições estudadas. As medidas foram feitas tanto na face lisa como na face rugosa do corpo de prova. A face lisa é aquela que ficou em contato direto com o fundo do molde durante seu processamento. A face rugosa é a que ficou exposta ao ar.

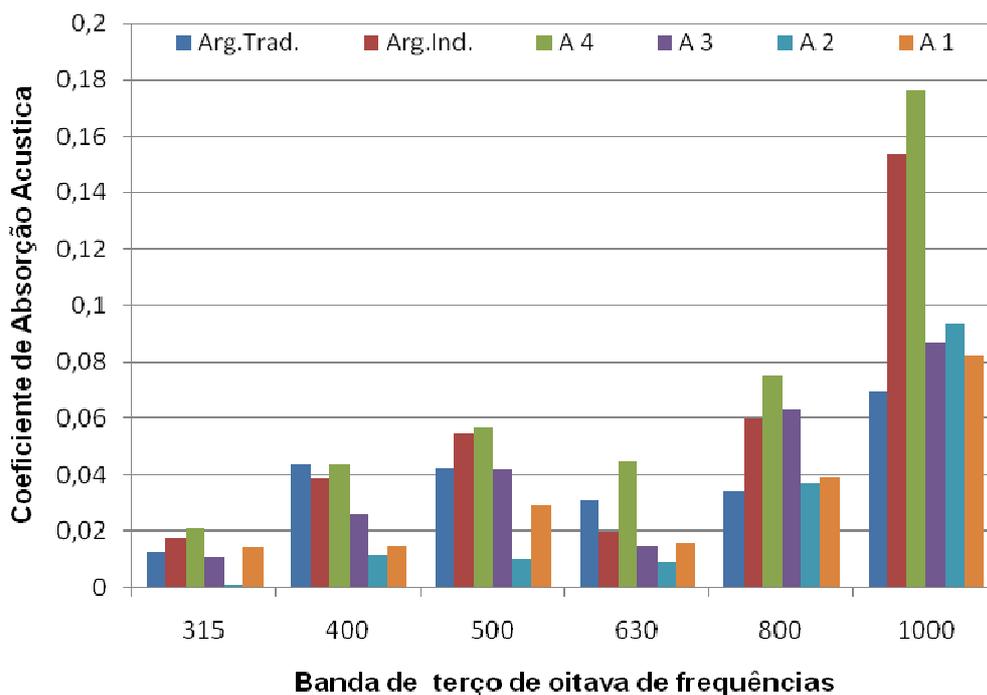


Figura 4.25 Coeficiente de Absorção Acústica – face lisa das argamassas

Através da Figura 4.25, pode ser observado que até a banda de terço de oitava estudada (1.000 Hertz) para a exposição da face lisa, a maior eficiência de absorção (dentre as argamassas leves), foi apresentada pela argamassa A4, contendo 34% de vermiculita e sem borracha reciclada de pneu. Por sua vez, dentre as argamassas contendo agregados de borracha (A1 e A2). A argamassa A1 (10% de borracha e 20% vermiculita), absorveu mais do que a argamassa A2 (34% de borracha e 12% de vermiculita). Este fato é coerente, e permite concluir que a vermiculita contribui mais para a absorção sonora do que a borracha.

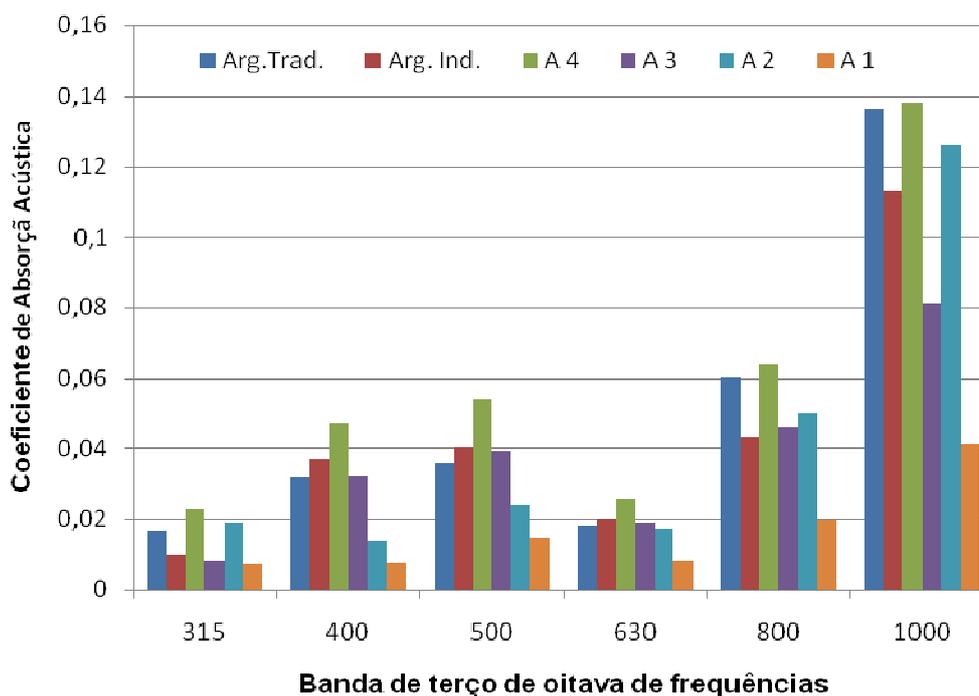


Figura 4.26 Coeficiente de Absorção Acústico – face rugosa das argamassas

Através da Figura 4.26, agora com exposição da face rugosa, percebe-se que até a banda de oitava de 1000 Hz, novamente dentre as argamassas leves, a argamassa com maior poder de absorção sonora foi a argamassa A4 (34% de vermiculita e sem agregados de borracha reciclada de pneu). Porém, no caso de exposição da face rugosa, dentre as argamassas contendo borracha, a de maior absorção sonora foi a A2 (33% de borracha e 12% vermiculita). Este é um resultado inverso ao que se encontrou quando da exposição da face lisa, onde foi encontrado que a argamassa A1 (10% de borracha e 20% de vermiculita) foi mais absorvente. Tal comportamento se mostrou comum a todas as argamassas. Isto é, a rugosidade (porosidade aberta superficial) desempenha papel relevante na absorção sonora. Este fato sugere que as superfícies expostas ao som devam ser porosas.

Para finalizar, não se pode deixar de notar que ao contrário do que se esperavam, as argamassas densas (tradicional e industrializada) apresentaram absorções da mesma ordem de grandeza das argamassas leves. Este fato poderia sugerir uma inutilidade em se usar argamassas leves com finalidade de isolamento acústico. Esta incoerência é apenas aparente, podendo ser creditada ao menor ajuste da superfície de contato entre as

extremidades diametrais das argamassas leves com as paredes do tubo de impedância, do que as argamassas densas. O desajuste superficial leva a vazamentos sonoros parasitários, o que falseia os resultados de absorção. A falta de ajuste infelizmente não pôde ser corrigida pela moldagem, pois as argamassas com vermiculita apenas ou com vermiculita e borracha formavam superfícies irregulares de difícil correção.

Para contornar essa incoerência foram realizados ensaios dos módulos elásticos. Os resultados desse ensaio mostraram claramente que as argamassas leves tem um efeito drástico de amortecimento sonoro, traduzido na diminuição acentuada da velocidade do som nas mesmas.

4.5.2 Velocidade da onda sonora – módulo elástico

Os resultados dos ensaios do módulo elástico, conforme descrito no item 3.3.5.2 do Capítulo estão na Tabela 4.13 juntamente com a densidade, o teor de ar e a velocidade de propagação do som em cada composição.

Tabela 4.13 Módulo elástico, velocidade do som e demais propriedades

Argamassa	Teor de ar (%)	Densidade de Massa (kg/m ³)	Módulo elástico (módulo Young) (10 ⁹ N/m ²)	Velocidade do som (m/s)
A1	16,31	800	1,89	1537,043
A2	10,81	1050	1,60	1234,427
A3	29,23	650	1,31	1419,642
A4	23,95	780	1,27	1276,011
Arg.Tradicional	12,75	1910	9,75	2259,361
Arg.Industrial	10,40	1550	10,56	2610,154

Pode-se observar que as composições sem a borracha (A3 e A4) tem menor módulo elástico, mas como a velocidade relaciona módulo elástico e densidade, nota-se que a argamassa com mais borracha reciclada de pneu é a que tem a menor velocidade (A2= 33%).

As figuras 4.27, 4.28 e 4.29 trazem as relações entre a velocidade das ondas sonoras e o módulo elástico de Young, a densidade de massa e o teor de ar incorporado respectivamente, nas argamassas.

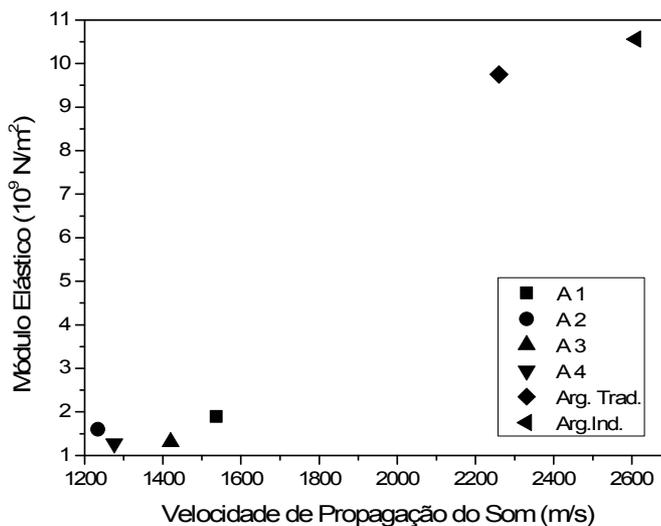


Figura 4.27 Velocidade de Propagação do Som e o Módulo Elástico

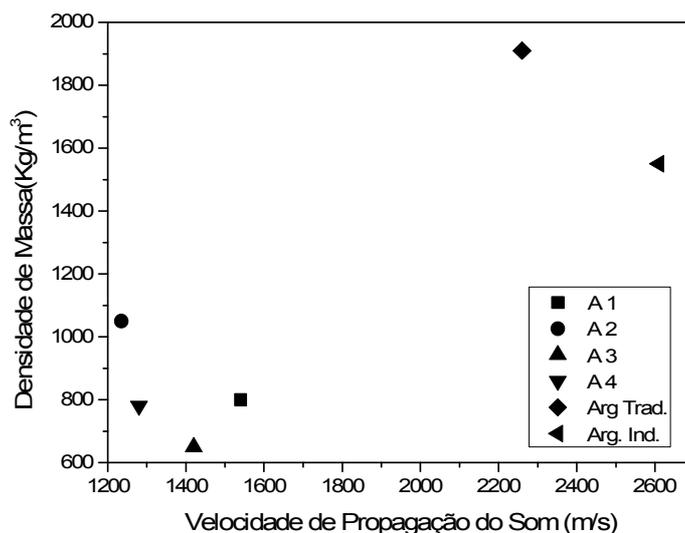


Figura 4.28 Velocidade de Propagação do Som e a Densidade de Massa

A argamassa A2 (33 % de borracha e 12 % de vermiculita) tem a menor velocidade, acompanhada de perto da composição A4(34% de vermiculita e sem a borracha). Entre as argamassas leves A1 (10% de borracha e 20 % de vermiculita) tem a maior velocidade. As argamassas densas como eram esperado, tem os maiores módulos elásticos, maiores densidade e consequentemente maiores velocidades de propagação do som.

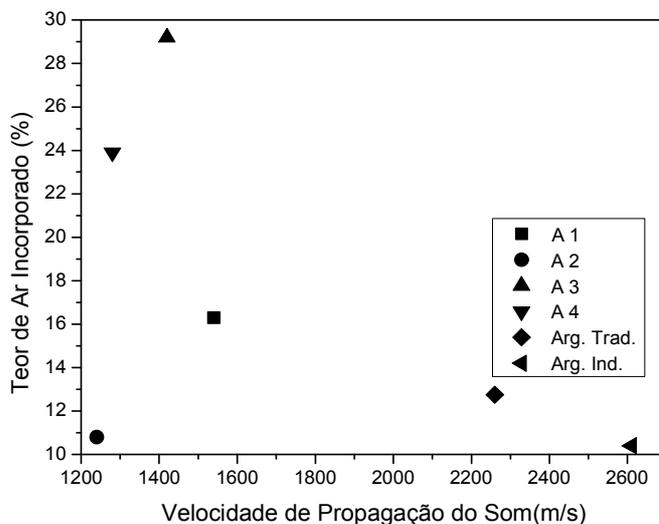


Figura 4.29 Velocidade de Propagação do Som e o Teor de Ar Incorporado

Pode se observar a relação entre a velocidade, o módulo elástico e a densidade de massa, mas quanto ao teor de ar, nota-se que não existe uma relação direta, pois apesar das argamassas densas terem teor de ar semelhantes às argamassas A1 e A2, ambas com vermiculita e borracha, o módulo elástico e a velocidade de propagação do som, chegam a ser respectivamente 6 (seis) vezes e 40 % maiores nas argamassas densas.

Pelos resultados dos testes acústicos concluem-se que o tubo de impedância, por razões de transmissão parasitária do som, não ofereceram resultados realistas. Por outro lado, os dados de velocidade de propagação do som se mostram mais precisos e coerentes, mostrando um evidente efeito de amortecimento que se traduz em absorção sonora.

Desse modo, os resultados da Tabela 4.13 permitem concluir que: a inclusão da borracha reciclada, não altera as propriedades de absorção acústica comparativamente as argamassas leves sem esses agregados e que, aparentemente, quanto maior o teor de borracha maior será o amortecimento.

4.6 Ensaio de Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade foi realizado na amostra da composição A2, com percentual de 33% de borracha reciclada de pneu. Com este ensaio fica evidente que a chama não se propaga, não libera gases, permanecendo a queima apenas na superfície externa da amostra estudada, não atingindo a segunda camada das argamassas com vermiculita e borracha reciclada de pneus, Figura 4.30.



Figura 4.30 Ensaio de flamabilidade com maçarico

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos para propriedades especificadas por norma para argamassas e tendo em vista o objetivo principal desta Tese focado na investigação dos efeitos da inclusão de agregados de borracha reciclada de pneus, com vistas à proteção de recursos naturais e diminuição do impacto ambiental pela reciclagem, pode-se concluir que:

1 – A inclusão conjunta de vermiculita e borracha reciclada de pneus, aliada a uma dosagem adequada de fase ligante (cimento+cal), não alterou as propriedades relevantes das argamassas estudadas no estado a fresco. Constatou-se que a presença de agregados de borracha reciclada de pneus nas argamassas leves promove uma diminuição do ar incorporado, mas não afeta negativamente a trabalhabilidade, aplicabilidade e o poder de cobertura das argamassas, satisfazendo os níveis dessas propriedades requeridos por norma.

2 – Os agregados de borracha reciclada podem ser adicionados em quantidades apreciáveis (10 a 35% em massa) nas argamassas, o que garante sua adequabilidade e importância para fins de proteção de recursos naturais e diminuição do impacto ambiental.

3 – Ademais os resultados de propriedades no estado endurecido indicaram que:

3.1 – A inclusão de agregados de borracha reciclada de pneu (reciclado de um produto com impacto ambiental) em argamassas leves em substituição de parte da areia e de vermiculita (dois recursos naturais) aumenta marginalmente a densidade aparente, mas melhora a resistência à compressão uniaxial e diametral e notadamente a resistência à aderência das argamassas leves, colocando-as com sobras dentro das exigências das normas.

3.2 – A inclusão de agregados de borracha reciclada em conjunto com a vermiculita não provocou alterações significativas na retração de secagem e na capilaridade, comparativamente às argamassas leves contendo vermiculita apenas.

3.3 – Com relação aos efeitos na capacidade de isolamento térmico, as argamassas contendo vermiculita e agregados de borracha reciclada apresentaram valores de condutividade térmica similares aos encontrados nas argamassas só com vermiculita. Este fato indica que, embora a densidade aparente tenha se elevado (com a inclusão de borracha) e o teor de ar incorporado diminuído, isso não foi suficiente para alterar de modo negativo a capacidade de isolamento térmico, fator importante para o conforto dos ambientes construídos.

3.4 – Com relação à capacidade de absorção acústica, a inclusão de agregados de borracha não alterou essa capacidade, comparativamente às argamassas que continham apenas vermiculita. Como pressuposto, uma argamassa com alta porosidade e baixa densidade, proporcionada pela vermiculita, combinadas com a alta elasticidade da borracha de pneus, é um revestimento com bom desempenho quanto à absorção sonora, fato este comprovado nos ensaios de amortecimento e do tubo de impedância (na faixa de frequência de 500 até 1.000 Hz). Assim, pode-se afirmar que as argamassas com vermiculita e borracha reciclada de pneus possuem um bom potencial como isolante acústico.

3.5 – Com relação à flamabilidade, embora o teste realizado não tenha seguido a normalização (que exige uma escala avantajada de material), pode-se dizer que a inclusão de agregados de borracha não alterou a capacidade de suportar o fogo, comparativamente ao material que não continha agregados de borracha reciclada (só com vermiculita). A emissão de fumos foi mínima e apenas superficial.

Para finalizar, é importante reiterar que, neste trabalho, foram investigadas composições de argamassas para revestimentos contendo agregados de borracha reciclada de pneus que combinassem principalmente leveza (com vistas à diminuição de peso estrutural), sustentabilidade e proteção ambiental, mas que também atendessem às determinações das normas e, além disso, com base em resultados dos ensaios térmico e acústicos, pudessem indicar que as argamassas leves, aqui estudadas, satisfariam a um conjunto de propriedades exigíveis adequados para atender

às necessidades dos usuários e aos requisitos estruturais e de conforto habitacional. Neste sentido, considera-se que os objetivos foram alcançados, dando peso e justificativa à pesquisa, sobretudo pela importância técnico-econômica e ambiental.

Igualmente é oportuno lembrar que o governo tem incentivado a ampliação não só da cultura da arquitetura sustentável, mas também vem financiando edificações através de linhas de créditos especiais que viabilizem projetos voltados para essa arquitetura sustentável agreguem as exigências de conforto térmico, acústico, luminoso e eficiência energética.

Em face disso, os resultados permitem concluir-se que a combinação borracha e vermiculita em argamassas leves para alvenaria é uma alternativa viável e se enquadra nesta arquitetura sustentável, por aliar aspectos de proteção ambiental e recursos naturais.

6.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar de esta pesquisa estudar várias propriedades que uma argamassa de revestimento deve ter para cumprir as suas funções adequadamente, recomendam-se alguns estudos subsequentes para aprofundar um pouco mais o conhecimento dessas composições. Por esta razão, a partir desta TESE, sugere-se que em trabalhos futuros possa-se:

- ✓ fazer os mesmos ensaios físicos, mecânicos, térmicos e acústicos com composições com outros percentuais de vermiculita e borracha reciclada de pneus, para que sejam feitos estudos comparativos entre as argamassas;

- ✓ avaliar a influência da argamassa com vermiculita na redução do peso próprio de uma edificação horizontal e possíveis reduções de custo na estrutura;

- ✓ verificar mais detalhadamente o desempenho térmico das argamassas com vermiculita, efetuando-se os cálculos da resistência térmica, transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico;

- ✓ fazer estudos quanto a flamabilidade e toxicidade das composições com borracha reciclada de pneus;

- ✓ analisar a utilização de aditivos para melhorar o comportamento acústico das composições estudadas;

- ✓ realizar os ensaios acústicos em frequências acima de 1000 hz para verificar o comportamento das argamassas nestas novas frequências;

- ✓ calcular, com o auxílio de 2 (dois) microfones, o coeficiente de transmissão sonora, ao acoplar mais uma parte ao tubo de impedância ;

- ✓ avaliar o desempenho destas argamassas leves a partir do recebimento da camada de acabamento final;

- ✓ estudar novos aditivos com o objetivo de melhorar a adesão entre a borracha e o cimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARASEK, H. Argamassas. In: G. C. Isaia. (Org.), *Materiais de Construção Civil*, 1ª Ed., V. 1, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, SP. 863-904, 2007.
- [2] SILVA, F. G. S.. *Proposta de Metodologias Experimentais Auxiliares à Especificações e Controle de Propriedades Físico-Mecânicas do Revestimentos em Argamassa*. Tese (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília. 187p, 2006.
- [3] PESSATTO, V. G. M.. *Estudo das Argamassas e Revestimentos contendo Vermiculita*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Goiás. 212 p, 2005.
- [4] OLIVEIRA, O.J; CASTRO, R. *Estudo da Destinação e da Reciclagem de Pneus inservíveis no Brasil*. In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007
- [5] BERNHOEFT, L. F.; GUSMAO, A. D.; TAVARES, Y. V. P.. *Influência da adição de resíduo de gesso no calor de hidratação da argamassa de revestimento interno*. *Ambiente Construído*. (Online). vol.11, n.2, pp. 189-199. ISSN 1678-8621. 2011.
- [6] CIMINO, M.A. e ZANTA, V. M. *Minimização de resíduos sólidos urbanos – alternativas tecnológicas para pneumáticos inservíveis*. Seminário Nacional de Limpeza Urbana (SENALIMP), 2003
- [7] <http://www.ecopress.org.br/eco+watch/porto+seguro+recolhe+pneus+para+reciclagem>, acesso em 05/07/2011.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. *Resíduos sólidos. Classificação*. ABNT: Rio de Janeiro, 2004.
- [9] ODA, S.; FERNANDES, J. L. *Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação*. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.
- [10] MARQUES, M. L.; MARQUES A. C.; TRIGO, A. P. M.; AKASAKI, J. L. *Avaliação do comportamento da argamassa adicionada de diferentes*

granulometrias de borracha após o tratamento com NaOH. In: 47º Congresso Brasileiro de Concreto, Pernambuco. IBRACON, 2005.

[11] FERREIRA, O.P.; RODRIGUES, M.R.P.. Argamassa com partículas de borracha derivada da reciclagem de pneus inservíveis. Disponível pelo site www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%2074_2010.pdf, acessado em 04/04/2013.

[12] <http://www.braziltires.com.br/tudosobrepneus/pneus.html>, acesso dia 11/07/2013.

[13] CIRMA (Centro de Informações sobre Reciclagem e Meio Ambiente). A Borracha e o Pneu, reaproveitamento e reciclagem. Disponível na internet no endereço www.recicloteca.org.br. Acessado em 19 de março de 2013.

[14] LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S.. Reciclagem de pneus: discussão do impacto da política brasileira. ENGEVISTA, V. 11, n. 1. p. 32-49, 2009.

[15] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>, acesso em 13/05/2013.

[16] VILHENA, A.. Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2ª. ed., São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

[17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Requisitos. ABNT: Rio de Janeiro, 2001.

[18] SABBATINI, F. H.; SELMO, S.M.S. Diretrizes para a produção e controle de dosagem das argamassas de assentamento e revestimento. São Paulo, EPUSP/PCC, 1989.

[19] COIMBRA, M.A.; MORELLI, M.R. Desenvolvimento de argamassas microporosas para a construção civil. Cerâmica vol.45 n.296 São Paulo Nov./Dec. 1999, disponível <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69131999000600008>, acesso dia 25/03/2013.

[20] CARASEK, H., Materiais de Construção Civil, Capítulo 26 – Argamassas. Universidade Federal de Goiás. Disponível

http://aquarius.ime.eb.br/~moniz/matconst2/argamassa_ibracon_cap26_apresentacao.pdf. Acesso em 08/04/2012

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. ABNT: Rio de Janeiro, 1995.

[22] FIORITO, J.S.I. Manual de argamassas e revestimento: estudos e procedimentos de execução. São Paulo: PINI, 1994.

[23] CARASEK, H. . Patologia das argamassas de revestimento. In: Isaias, G.C.. (Org.). Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 1-11. 2007.

[24] SABBATINI, F.H.. Tecnologia de execução de revestimentos de argamassa. In: Simpósio de aplicação da tecnologia do concreto, 13o – SIMPATCON, 1994.

[25] CARASEK, H. (Org.); CASCUDO, O. (Org.) . I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. 1. ed. Goiânia: Centro Editorial e Gráfico da UFG, v. 1. 472p .1995.

[26] SABBATINI, F. H., BAÍÁ, L. L. M. Projeto e Execução de Revestimentos de Argamassa, 1ª Ed., O Nome da Rosa Editora Ltda., São Paulo. 2000.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578. Cimento Portland composto. Especificação. ABNT: Rio de Janeiro. 1991

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175. Cal hidratada para argamassas – Requisitos. ABNT: Rio de Janeiro. 2003

[29] RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Boletim Técnico n. 233. 1999.

[30] BAUER, ELTON(Editor). Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades. Brasília :LEN- UnB; SINDUSCON, 2005

[31] QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G DE R; DE CASTRO, A. L.; CINCOTTO, M. A.. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 175-187, out./dez. 2009.

- [32] SOUZA SANTOS, P. de. Ciência e tecnologia das argilas. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, Vol. 3. 1992.
- [33] NEVILLE, A. M.. Propriedades do concreto. 2.ed. São Paulo: Pini, 1997.
- [34] HINDMAN, J.R. Vermiculite. Disponível em <http://www.madehow.com/Volume-6/Vermiculite.html>. Acesso 08/05/2012.
- [35] CASTRO, O E. G. CT2002-189-00 Comunicação Técnica elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil. Centro de Tecnologia Mineral. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação de Inovação Tecnológica – CTEC: Rio de Janeiro, 2002. Disponível em <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-189-00.pdf>, acesso dia 08/05/2012.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9230. Vermiculita expandida: especificação. ABNT: Rio de Janeiro. 1986.
- [37] CATÁLOGO REFRÁTIL. Vermiculita. Disponível: <http://www.refratil.com.br> Acesso em: 19 ago. 2012.
- [38] FATTUHI ET AL., “Cement-based materials containing shredded scrap truck tire rubber”. *Construction and Building Materials*, Guildford, v.10, n.4, p.229-236, 1996.
- [39] ACCETTI, K. M., PINHEIRO, L.M., “Tipos de Fibras e Propriedades do Concreto cm Fibras”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 42, 2000, Fortaleza. Anais. Fortaleza: Arte Interativa, 2000.
- [40] RAGHAVAN, H. D. HUYNH E FERRARIS ,C.F.; “Workability, Mechanical Properties and Chemical Stability of a recycled Tyre Rubber-Filled Cementitious Composite”; *Journal of Material Science*, 33, 1745-1752. 1998.
- [41] Z. Li, F. Li e J. S. L. Li; “Properties of Concrete Incorporating Rubber Tyre Particles”; *Magazine of Concrete Research*, 50(4), 297-304. 1998.
- [42] LEE, B.I. ; BRURNETT, L. , MILLER, T. ; POSTAGE B. E CUNEO, J.. “Tyre Rubber/Cement Matrix Composites”; *Journal of Materials Scienc Letters*, 12(13), 967-968. 1993.
- [43] ELDIN, N.N. E SENOUCI, A.B. “Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate”; *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478-496. 1993.

- [44] ROSTAMI, H. ; LEPORE, J. ; SILVESTRIM , T. E ZANDI I. “Use of recycled Rubber Tyres in Concrete”; *Concrete 2000 – Economic and Durable Construction through Excellence*, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, 7-9 .vol2, 391-399. 1993.
- [45] ALI, N. A. ;AMOS, A. D E ROBERTS M. “Use of Ground Rubber Tyres in Portland Cement Concrete”; *Concrete 2000 - Economic and Durable Construction through Excellence*, Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, 7-9 vol 2, 379-390. 1993.
- [46] TOPÇU ,I.B. “The Properties of Rubberized Concretes”; *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304-310. 1995.
- [47] TOUTANJ, H.A. . “The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates”; *Cement & Concrete Composites*, 18, 135-139. 1996.
- [48] KHATIB Z. K., BAYOMY F. M. RUBBERIZED Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 11 (3): 206-213. 1999.
- [49] AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F. & NIRSCHL, G. C. Análise Experimental da Resistência à Compressão do Concreto com Borracha Vulcanizada; *Anais do 43o Congresso Brasileiro do Concreto*. 2002.
- [50] BENAZZOUK,A.O., DOUZANE, K. ,MEZGREB, B.,LAIDOUDI AND M. QUÉNEUDEC.- Thermal Conductivity of Cement Composites Containing Rubber Waste Particles - Experimental Study and Modelling”- *Construction and Building Materials – 22 -573-579 – 2008*.
- [51] SEGRE, N.; JOEKES, I., “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”. *Cement and Concrete Research*, Elmsford, n.30, p.1421-1425, 2000.
- [52]IRAJ,Z.,JOHN,L.,RADNOR,RH.Particulate rubber included concrete compositions. *Cement and Concrete Composites*. v.18,Issue:6.p460. 1996.
- [53] MAGANHA, MFB; KOMATSU, C E. Pneus como Alternativa Energética. In: *5º Congresso Brasileiro de Cimento (CBC)*. São Paulo,SP. 1999 .
- [54]TURATSINZE, A. BONNET, S. AND GRANJU, J. L. Mechanical Characterization of Cement Based Mortar Incorporating Rubber Aggregates from Recycled Worn Tires- *Building and Environment* 40- 221-226. 2005.

- [55] UYGUNOĞLU T., TOPÇU I. B. The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage e mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials* 24 (7): 1141-1150. 2009.
- [56] CORREIA S. L., PARTALA T., LOCH F. C., SEGADÃES A. M.. Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber. *Composite Structures* 92 (9): 2047-2051. 2010.
- [57]TURATSINZE A., BONNET S., GRANJU J. L. Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking shrinkage resistance. *Construction and Building Materials* .21 (1): 176-181. 2007.
- [58] CORREIA, S. L.; SOUZA, F. L.; DIENSTMANN, G.; SEGADÃES, A. M. Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. *Waste Management*, v. 29, 2886–2891, 2009.
- [59] SEGRE N. I, A. D. GALVESII, J. A. RODRIGUESII, I. JOEKESI *Cerâmica* 52 .283-292 Tire rubber-cement composites: effect of slag on properties .2006
- [60] IIDA, ITIRO. *Ergonomia – Projeto e Produção*. 2ª Ed.. Editora Edgard Blucher, 2005
- [61] FROTA, A. B.; SCHIFER, S. R.. *Manual de conforto térmico*. 6. Ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003.
- [62] PIEDADE, A.C.da. *Térmica de edifícios*. 3 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2000.
- [63] VECCHIA, F. . *Comportamento térmico de sistemas de cobertura*. 01. ed. São Paulo: Eternit S. A.,v. 01. 74p . 2003.
- [64] LUCAS, J. A. de C.. *Revestimentos para paramentos interiores de paredes de alvenaria de blocos de betão celular autoclavado*. Vol. 3. Publicação LNEC p.219-229.Lisboa, 1997.
- [65] AQUILINO, M. de M.; VITTORINO, BARREIRA,F . *Térmica*. *Téchne*, São Paulo, ed. 76, ano 11, p. 17, jul. 2003.
- [66] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220. *Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. ABNT: RJ, 2005.

- [67] CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CARASEK, H.. Argamassa de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio. Boletim 68. IPT, São Paulo, 1995.
- [68] VITTORINO, F.; SATO, N.M.N.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. Técnica, São Paulo, ed. 75, ano 11, p. 66-70, 2003.
- [69] BARROSO-KRAUSE, C.. Desempenho Térmico e Eficiência Energética em Edificações . PROCEL EDIFICA .Rio de Janeiro, 2011.
- [70] SANTOS, C. A. P.; PAIVA, J.A.V.. Coeficientes de transmissão térmica de elementos envolventes de edifícios. 10 ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2004.
- [71] SANTOS, W. N. dos ou DOS SANTOS, W. N.. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. Cerâmica, Brasil, vol.48 nº.306 São Paulo Apr./June 2002.
- [72] SANTOS, W. N. dos ou DOS SANTOS, W. N. . Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II- o método do fio quente. Cerâmica, Brasil, v. 51, nº 320, Oct./Dec. 2005.
- [73] SOUZA, L.C.L. .Bê-a-ba da acústica arquitetônica: ouvindo a Arquitetura. São Carlos: EdUFSCAR, 2006.
- [74] GERGES, S.N.Y. Ruído: Fundamentos e Controle. 2ª.ed. Revista e ampliada, Florianópolis, SC: NR Editora, 2000.
- [75] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12179. Tratamentos acústicos em recintos fechados. ABNT: Rio de Janeiro, 1992.
- [76] BISTAFA, S.R. Acústica aplicada ao controle de ruído. 2ª Edição. São Paulo, Edgard Blucher, 2011.
- [77] COSTA, E. C.. Acústica Técnica. São Paulo: Editora Edgard Blucher , 2003.
- [78] http://fisicamoderna.blog.uol.com.br/arch2007-11-18_2007-11-24.html, acesso dia 22/08/2013.
- [79] PIUBELLI, S.L.; ERROBIDART ,H. A.; TAKECO GOBARA,S; GUIMARÃES ERROBIDART ,N.C. .Simulador de propagação de ondas mecânicas em meios

sólidos para o ensino da física. www.sbfisica.org.br *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 32, n. 1, 1501,2010.

[80] JELLE, B. P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 15 p., article in press, 2011.

[81] <http://braconiso.tripod.com/> ,acesso em 19/06/2011.

[82]GUIMARÃES, L. E.; TUBINO, R. M. C.. Ambientação térmica de casas de madeira utilizando paredes externas recheadas com argamassa contendo cinza de casca de arroz, resíduo de borracha (pneu) ou garrafa PET triturada. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável – ICTR, 2004, Florianópolis. Anais. Florianópolis: 2004.

[83] VEIGA,M.do R.. Os “casacos” dos edifícios. **Arquitetura e vida**, Lisboa, nº 19,ano II, p. 71-75, set. 2001.

[84] <http://www.basaranrestorasyon.com>,acesso em 19/06/2011.

[85]<http://saudeambiental.net/2009/08/guia-da-eficiencia-energetica-isolamento.html>, acesso em 19/06/2011.

[86] <http://corticas.com/rolos-de-cortica>, acesso em 19/06/2011.

[87]<http://www.craigrom.com/insulation/polyurethane/>, acesso em 19/06/2011.

[88] CATAI,R.E. E OUTROS. Materiais, Técnicas e Processos para isolamento acústico. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, Paraná. 2006.

[89] http://www.flasan.com.br/drywall_componentes_isolamento.php,acesso em 22/06/2011.

[90] http://www.acusterm.com.br/la_rocha.html, acesso em 22/06/2011.

[91] ANGELIM, R.R.; ANGELIM, S.C.M. e CARASEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V. Anais. São Paulo, USP/ANTAC, p. 141-150.2003

[92] Ficha Técnica Brasil Minérios Ltda,2012

[93] Catalogo da Resinac Industrias Químicas Ltda,2012

[94] Catálogo da Elken do Brasil,2013.

[95] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. ABNT: Rio de Janeiro Cimento Portland-Determinação da resistência à compressão, 1996.

[96] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13529. ABNT: Rio de Janeiro. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. 1995.

[97] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279. ABNT: Rio de Janeiro. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, 2005.

[98] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738. ABNT: Rio de Janeiro. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. 2003 Emenda 2008.

[99] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14082. ABNT: Rio de Janeiro. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Execução do substrato-padrão e aplicação de argamassa para ensaios, 2004.

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

[101] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos -preparo da mistura e determinação do índice de consistência. ABNT: Rio de Janeiro. 2002.

[102] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. ABNT: Rio de Janeiro. 1995.

[103] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 43. Cimento Portland. Determinação da pasta de consistência normal. 2002.

[104] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 65. Cimento Portland. Determinação do tempo de pega. 2003.

- [105] MEHTA,PK;MONTEIRO,P..J.M. Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais. 1ª Ed. Editora PINI, São Paulo 573p. 1994.
- [106] CARASEK, H. . Argamassas.. (Org.). Materiais In: G. C. Isaias de Construção Civil. 1ed.São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 1, p. 863-904. 2007.
- [107]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS .NBR 13278. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, ABNT: Rio de Janeiro. 1995.
- [108] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, ABNT: Rio de Janeiro. 2005.
- [109] FIORITI, C.F.; INO,A.;AKASAKI, J.L.. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. Ambiente Construído (Online), v. 7, p. 43-54, 2007.
- [110] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). ABNT: Rio de Janeiro. 2005
- [111] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 13280. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, ABNT: Rio de Janeiro. 1995.
- [112] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR13279. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão, ABNT: Rio de Janeiro. 1995.
- [113] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 7222. Argamassa e concreto. Determinação da resistência, à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT: Rio de Janeiro, 1994.

[114] MACIEL, L. L. BARROS, M. M. S.B. SABBATINI, F.H. Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos. , EPUSP, São Paulo ,1998.

[115] SCARTEZINI, L.M.B.; JUCA, T.R.; TEIXEIRA, F.; ANTONELLI, G.; CASCUDO, O. e CARASEK, H.. Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa. Revista Ambiente Construído, 2:85-92. 2002

[116] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 13528. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração, ABNT: Rio de Janeiro, 2010.

[117] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR 13749 - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. ABNT: Rio de Janeiro, 1996

[118] ISO 10534-2 .Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube. Part 2: Transfer-function method. :1998

[119] PAIVA, A.E.M. Desenvolvimento de um equipamento para avaliar propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas pelo método de barras. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais. UFSCAR, 2002.

[120] ASTM E 1876-07, Standard test method for dynamics Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration, ASTM Standard approved June 1, 2007, published June 2007.

[121] SILVA, ROSIANY P.; BARROS, M. M.S.B.; PILEGGI, R. G. M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow .VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas-I International Symposium on Mortars Technology Florianópolis, 2005.

[122] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Requisitos. ABNT: Rio de Janeiro, 2005.

[123] MANSUR, A.A.P. Avaliação do teor de ar incorporado em argamassas modificadas com poli (álcool vinílico), 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná. 2006.

[124] KAZMIERCZAK, C. S. ; BREZEZINSKI, D. E. ; COLLATTO, D. Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa, Estudos Tecnológicos, V. 3, n° 1 47-58. 2007.

[125] CARASEK, H. Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação. São Paulo – SP, 1996. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1996.

[126] SCARTEZINI, L. M. B. Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: Estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca. Goiânia – GO. 262 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2002.

[127] PAES, Isaura Nazaré Lobato. Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassas nos momentos iniciais pós-aplicação. Distrito Federal. 242f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2004.