



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

MARCOS YAÑES PALMIERI

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ARGAMASSA COM
AREIA DE BASALTO E ADIÇÃO DE FIBRAS DE ALUMÍNIO**

Londrina
2015

MARCOS YAÑES PALMIERI

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ARGAMASSA COM
AREIA DE BASALTO E ADIÇÃO DE FIBRAS DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Morales.

Londrina
2015

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P179t Palmieri, Marcos Yañes.

Transferência de calor em argamassa com adição de fibras de alumínio / Marcos Yañes Palmieri. – Londrina, 2015.

180 f. : il.

Orientador: Gilson Morales.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Argamassa – Teses. 2. Construção civil – Teses. 3. Engenharia sanitária – Teses. I. Morales, Gilson. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 69.01

MARCOS YAÑES PALMIERI

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ARGAMASSA COM AREIA DE
BASALTO E ADIÇÃO DE FIBRAS DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Gilson Morales
Universidade Estadual de Londrina – UEL.

Prof. Dr. Paulo José dos Reis
Universidade Estadual de Londrina – UEL.

Prof. Dr. Racine Tadeu Araujo Prado
Universidade de São Paulo – USP.

Londrina, 09 de fevereiro de 2015.

O Universo é uma harmonia de contrários.

Pitágoras

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.

Winston Churchill

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual de Londrina/UEL

Aos professores do ENGES – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento

Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. GILSON MORALES

Aos Departamentos de Física e de Engenharia Elétrica da UEL

Ao Prof. MAURICIO MANCIO, Phd., – UNISINOS - (PPGEC)

Aos FUNCIONÁRIOS participativos

A minha FAMÍLIA

Ao solidário POVO do Paraná

A CAPES, pela bolsa de estudos

A DEUS por sua infinita Bondade e eterna Misericórdia

PALMIERI, Marcos Yañes. **Transferência de calor em argamassa com adição de fibras de alumínio**. 180 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento - ENGES) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2014.

RESUMO

O incentivo pela redução no consumo de energias convencionais resulta da impossibilidade em atender sua crescente demanda. O planeta, não conseguindo suprir sustentavelmente esta necessidade imediata, é degradado em vastas áreas consideradas vitais ao suporte da vida. Diante desses fatos, busca-se captar fontes inesgotáveis e limpas de energia, desenvolvendo tecnologias para produção de novos compósitos com o propósito de captar e utilizar energias sustentáveis. A radiação solar incidente em nossa atmosfera transmite energia térmica por radiação eletromagnética através do espectro de luz e possibilita o princípio físico da absorvidade e emissividade em materiais. Estas características estão energeticamente sendo empregadas em sistemas que ofereçam a parcela de autonomia necessária na utilização das edificações. Porém, os modelos existentes têm alto custo, reduzida durabilidade e frequentemente contrapõem valores estéticos de arquitetura. O presente estudo busca desenvolver uma argamassa, utilizando a capacidade calorífica do basalto e a condutividade térmica do alumínio. O estudo foi desenvolvido utilizando matriz de cimento combinada com areia de basalto, com granulometria caracterizada, seguindo traço simples de 1:3, à qual foram adicionadas fibras de alumínio nos teores; 0, 10, e 20% em relação à massa total. Utilizaram-se corpos de prova cilíndricos: $\varnothing = 25$ e $l = 50$ mm para determinar a condutividade térmica, pelo método da placa quente protegida e de micro tomografia, para analisar a disposição dos agregados e das fibras. Nos ensaios de resistência mecânica e resistividade elétrica, os corpos de prova tinham dimensões: $\varnothing = 50$ mm e $l = 100$ mm. Os resultados demonstraram que os desempenhos na transferência de calor e capacidade calorífica em relação aos diferentes teores de fibras de alumínio. A interação dos materiais favoreceu a aceleração da condução na argamassa, permitindo ainda o armazenamento prolongado de calor devido a sua capacidade calorífica. Os teores de fibras próximos a 10% indicaram melhor capacidade de mistura, menor incorporação de ar e índices de hidratação com o aumento da condutividade térmica em até três vezes, sendo que o fator de forma das fibras não influenciou na capacidade de transferência de calor, sendo o fator de forma menor, mais adequado para que as fibras e partículas de alumínio se distribuam uniformemente na argamassa no que se refere as capacidades reológicas e de trabalhabilidade.

Palavras-chave: Argamassa com fibras de alumínio reciclado. Condutividade térmica. Areia artificial. Resíduos de basalto.

PALMIERI, Marcos Yañes. **Heat transfer in mortar with addition of aluminum fibers**. 2014. 180 p. Dissertation (Master in Buildings Engineering and Sanitation) - State University of Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

The incentive for the reduced consumption of conventional energy results from the inability to meet its growing demand. The planet, failing to sustainably to meet this immediate need, is degraded vast areas considered vital to support life. Given these facts, we seek to capture inexhaustible and clean energy sources, developing new technologies for the production of composites for the purpose of taking and using sustainable energy. The incident solar radiation into our atmosphere transmits thermal energy through magnetism of the light spectrum and allows the physical principle of absorptivity and emissivity of materials. These features are being to use in energy systems that provide the necessary amount of autonomy in the use of buildings. However, existing models have high cost, low durability and aesthetic values often contradict architecture. This study seeks to develop a mortar, using the heat capacity of the basalt and the thermal conductivity of aluminum. The study was conducted using cement matrix combined with basalt sand with a particle size characterized by following simple line of 1: 3, to which aluminum fibers were added in concentrations; 0, 10, and 20% in relation to total mass. We used Cylindrical specimens: $\varnothing = 25$ mm and $l = 50$ mm to determine the thermal conductivity by the guarded hot plate and micro tomography method to analyze the arrangement of aggregates and fibers. In tests of mechanical strength and electrical resistivity, the specimens had dimensions: $\varnothing = 50$ mm $l = 100$ mm. The results demonstrated that the performance in heat transfer and heat capacity in relation to the different amounts of aluminum fibers. The interaction of the materials favored in the acceleration of the driving mortar, even allowing prolonged storage of heat due to heat capacity. The fiber contents near 10% indicating better mixing capacity, lower incorporation rates of air and moisture with increased thermal conductivity up to three times, and the form factor of the fibers do not influence the ability of heat transfer, being more suitable for the fibers and aluminum particles distributed uniformly in the mortar smaller form factor as regards workability and rheological capabilities.

Keywords: Mortar. Thermal conductivity. Aluminum fibers. Basalt sand.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Parâmetros para construção de placa quente protegida.....	26
Tabela 2 -	Os valores molares das principais substâncias utilizadas na argamassa	29
Tabela 3 -	Valores de calor específico para as principais substâncias utilizadas na argamassa.....	29
Tabela 4 -	Relação entre condutividade térmica e elétrica.....	31
Tabela 5 -	Energias de ionização sucessivas em kJ/mol	38
Tabela 6 -	Tipos de células atômicas na rede cristalina dos metais.....	46
Tabela 7 -	Conceitos físico-químicos em agregados de basalto	48
Tabela 8 -	Estrutura física e química do alumínio e do silício	56
Tabela 9 -	Número máximo de elétrons por camada	59
Tabela 10 -	Configuração eletrônica de elementos do grupo 13 (IIIA)	59
Tabela 11 -	Configuração eletrônica de elementos do grupo 15 (VA).....	60
Tabela 12 -	Energia embutida na produção em materiais da construção civil (Índice Brasileiro)	66
Tabela 13 -	A passivação do alumínio encontra-se em um intervalo específico	86
Tabela 14 -	O uso dos diversos tipos de cimento e suas características físicas e químicas	90
Tabela 15 -	Abertura das peneiras em relação ao diâmetro dos agregados.....	105
Tabela 16 -	Ensaio 01 em peneiras de areia basalto grossa	107
Tabela 17 -	Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto grossa	107
Tabela 18 -	Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto grossa	107
Tabela 19 -	Ensaio 02 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto grossa	108
Tabela 20 -	Ensaio 01 em peneiras de areia de basalto fina	108
Tabela 21 -	Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto fina	109
Tabela 22 -	Ensaio 02 em peneiras de areia.....	109
Tabela 23 -	Ensaio 01 – Módulo de finura da areia de basalto fina.....	109
Tabela 24 -	Ensaio 01 em peneiras de areia de basalto compensada.....	110
Tabela 25 -	Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto compensada.....	110
Tabela 26 -	Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto compensada.....	111
Tabela 27 -	Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto compensada.....	111
Tabela 28 -	Resultados dos ensaios de caracterização	111
Tabela 29 -	Teor de adição, tamanho e forma das fibras ou partículas	120
Tabela 30 -	Índices de dilatação entre os materiais	124
Tabela 31 -	Classificação das argamassas quanto a massa específica no estado fresco.....	125
Tabela 32 -	Traços ensaiados dos agregados e pasta de cimento	126
Tabela 33 -	Parâmetros de tratamento nos CP para os ensaios de transferência de calor na argamassa	133

Tabela 34 - Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa	137
Tabela 35 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica em argamassa com diferentes teores de fibras de alumínio (DDP em A)	148
Tabela 36 - Parâmetros estabelecidos para análise da condutividade térmica	149
Tabela 37 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 0,0% de fibras de alumínio.....	150
Tabela 38 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 5,0% de fibras de alumínio.....	150
Tabela 39 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 10,0% e fibras de alumínio.....	151
Tabela 40 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 15,0% de fibras de alumínio.....	151
Tabela 41 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 20,0% de fibras de alumínio.....	151
Tabela 42 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 100,0% de fibras de alumínio.....	151
Tabela 43 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 5,0% com serragem de alumínio, sem material pulverulento	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação das bandas de energia em diferentes tipos de materiais.....	40
Figura 2 - Bandas de energia em materiais condutores, semicondutores e isolantes	42
Figura 3 - Estrutura de ligações do silício com dopagem de alumínio.....	52
Figura 4 – Fluxograma industrial para refinaria transformar a bauxita em alumina.....	54
Figura 5 – Estrutura de ordenamento cristalina de átomos ou íons de curto ou longo alcance	57
Figura 6 – Estrutura de ordenamento amorfo de átomos ou íons de curto alcance	58
Figura 7 - Esquema do átomo de alumínio (13) e seus elétrons trivalentes que formam as camadas externas de valência e criam lacunas	58
Figura 8 - Bloco representativo do elemento P.....	60
Figura 9 - Dopagem com elementos doadores ou aceitadores na estrutura cúbica do átomo de silício	62
Figura 10 - Conjunto de átomos de silício com quatro elétrons na última camada	63
Figura 11 - Conjunto de átomos de silício trivalente gerando uma lacuna na rede cristalina	63
Figura 12 - Conjunto de átomos de silício trivalente e uma impureza pentavalente que gera um elétron livre	64
Figura 13 - Formato das partículas (agregados)	71
Figura 14 - Agregado alongado lamelar (indesejável) e agregado arredondado (desejável)	71
Figura 15 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso, (b) máxima densidade de empacotamento teórico, (c) deficiência de partículas pequenas, (d) deficiência de partículas grandes, (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas	73
Figura 16 - Representação esquemática da retração química da pasta de cimento com: (a) baixo grau de hidratação; (b) alto grau de hidratação.....	78
Figura 17 - Esquematização dos mecanismos da retração plástica em pasta de cimento.....	79
Figura 18 - Formação de cristais nos cimentos ARI CP V.....	91
Figura 19 - Ensaio de granulometria para caracterização dos agregados da areia de basalto.....	106
Figura 20 - Torneamento do Tarugo de alumínio	114

Figura 21 - Mechas de cavaco produzidas em torno mecânico considerado resíduo.	115
Figura 22 - Separação e enfardamento das mechas de cavaco em torno mecânico	115
Figura 23 - Produção de fibras de alumínio em moinho de facas.....	115
Figura 24 - Enxágue e centrifugação das fibras aparadas para retirada do fluido refrigerante	115
Figura 25 - Fibras de alumínio e prontas para adição na argamassa.....	116
Figura 26 - Fator de forma das fibras de alumínio.....	116
Figura 27 - Topo de corte das fibras.....	117
Figura 28 - Arestas no topo de corte das fibras indica o rompimento das moléculas	117
Figura 29 - Superfície das fibras.....	117
Figura 30 - Superfície das fibras com impurezas da usinagem	117
Figura 31 - Escamas na superfície das fibras de alumínio com impureza.....	117
Figura 32 – Argamassa durante a mistura, parcialmente hidratada para o controle de suspensão do pó de pedra, potencialmente nocivo devido à silicose	128
Figura 33 - Prensagem da argamassa para moldagem do corpo de prova, em câmara de aço para suportar 50 MPa de pressão	129
Figura 34 - Corpo de prova com dimensões de 25 x 50 mm, prensado e pronto para regularização da superfície dos topos.....	129
Figura 35 - Castanhas de aço que envolvem o corpo de prova durante a moldagem.....	129
Figura 36 - O corpo de prova moldado sob pressão pode ser imediatamente manipulado para início da cura	129
Figura 37 - Peças que compõem o molde destinado à moldagem de corpos de prova	130
Figura 38 - Corpo de prova produzido sobre o molde	130
Figura 39 - Bancada para medição de transferência de calor, utilizando termopares conectados ao multímetro (ET-1400 – Minipa)	134
Figura 40 - Bancada para medição de transferência de calor, utilizando termopares conectados ao multímetro (ET-1400 – Minipa)	134
Figura 41 - Equipamento de microtomografia utilizado na análise de posicionamento tridimensional das fibras de alumínio e dos agregados e porosidade da argamassa – Laboratório de Física Nuclear – Departamento de Física – UEL.....	138
Figura 42 - Disposição das fibras e fragmentos de alumínio em corpo de prova cilíndrico medindo 2,5X5,0 com teor 10%	142
140	
Figura 43 - Disposição das fibras e fragmentos de alumínio em corpo de prova cilíndrico medindo 2,5X5,0 com teor 20%	143

Figura 44 - Secção do corpo de prova com teor 0% de fibras de alumínio, apresenta fibras de alumínio analisado por microtomografia	145
Figura 45 - Secção do corpo de prova com teor 10% de fibras de alumínio, apresenta sensível aumento de vazios devido a incorporação de ar durante a mistura, analisado por microtomografia.	145
Figura 46 - Secção do corpo de prova com teor 20% de fibras de alumínio, apresenta fibras de alumínio analisado por microtomografia.	146
Figura 47 - Contraste na concentração de cálcio e potássio na argamassa	154
Figura 48 - Contraste na concentração de óxidos e potássio na argamassa.	154
Figura 49 - Contraste na concentração de Silício e potássio na argamassa	155
Figura 50 - Contraste na concentração de Sódio e potássio na argamassa	155
Figura 51 - Agregado de basalto envolto em matriz de cimento.....	156
Figura 52 - Concentração de Silício- Si sobre pasta de cimento	157
Figura 53 - Concentração de Silício – Si sobre pasta de cimento (teor 0,01%).....	158
Formação de cristais na matriz de cimento	
Figura 54 - Formação de cristais na matriz de cimento	159
Figura 55 - Partículas de alumínio reciclado, produzidas a partir da serragem do corte de tarugos de alumínio, transpassadas na peneira com abertura 1,2 mm.	159
Figura 56 - Fibras de alumínio reciclado, produzidas a partir da usinagem de tarugos de alumínio, com fator de forma lamelar, o comprimento varia de 6,0 a 25,0 mm.....	159
Figura 57 - A medição da condutividade térmica da argamassa pelo princípio clássico proposto por Fourier.....	160
Figura 58 - Coleta de dados, com dispositivo refrigerado. utilizando Termopares do tipo K, nas placas quente e fria	160
Figura 59 - Bancada utilizada na medição da condutividade térmica da argamassa, através do método da placa quente protegida.....	161

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Faixa de passivação e imunidade do alumínio	86
Gráfico 2 -	A passivação alcançada com a formação do óxido de alumínio com hidratação resulta na composição de $Al^3 + 3e = Al$ com potencial do eletrodo padrão $E^0 (V) = - 1,67$	87
Gráfico 3 -	Areia de basalto grossa com alta concentração de agregados, permanecendo dentro da zona utilizável superior	106
Gráfico 4 -	Filer de basalto em alta concentração de agregados permanecendo dentro da zona utilizável superior	108
Gráfico 5 -	Agregados de basalto da argamassa com areia compensada....	110
Gráfico 6 -	Teor 10% de alumínio em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm	142
Gráfico 7 -	Porosidade em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm	143
Gráfico 8 -	Teor 10% de alumínio em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm	144
Gráfico 9 -	Porosidade em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm	144
Gráfico 10 -	A resistividade nas argamassas permaneceu próxima com exceção do teor 5%.....	149
Gráfico 11 -	Sobreposição dos resultados obtidos em ensaios de transferência de calor realizados no Laboratório de Telecomunicações – DEE – CTU – UEL, utilizando a média de três corpos de prova por traço com teor de fibras diferentes, com 1200 segundos.....	152
Gráfico 12 -	Componentes presentes na argamassa.....	154

LISTA DE SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio.
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEPAC	Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil.
ANSI	American National Standards Institute.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CIMM	Centro de Informações Metal Mecânica.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica.
DEMa/UFSCar	Departamento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral.
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental – RS.
FITESA	Fiberweb
IAP	Instituto Ambiental do Paraná.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
NBR	Norma Brasileira.
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.
UEL	Universidade Estadual de Londrina.
UNIOESTE	Universidade do Oeste do Paraná.
USP	Universidade de São Paulo.
ISO	Internacional Standard Organization.
NPC	Negative Temperature Coefficient.
PTC	Positive Temperature Coefficient.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	área da seção transversal do corpo-de-prova (mm ²).
f _c	resistência à compressão axial (MPa);
f _{ct}	resistência à tração por compressão diametral (MPa);
f	força máxima obtida no ensaio (N);
d	diâmetro do corpo-de-prova (mm);
L	altura do corpo-de-prova (mm).
E _{ci}	módulo de elasticidade (GPa);
σ _b	tensão maior, 0,3f _c (MPa);
σ _a	tensão básica, 0,5MPa (MPa);
L _{xΔ}	leitura do comprimento com o corpo-de-prova na idade x (mm);
L _{iΔ}	leitura inicial (mm);
L _g	é a base de medida, em função do tipo de comparador utilizado (mm).
P	carga de ruptura, em N;
A _c	absorção de água por capilaridade (%);
B	massa do corpo-de-prova seco (g);
S	área da seção transversal (cm ²).
V	velocidade de propagação (km/s);
L	distância entre os pontos de acoplamento dos centros das faces dos CP (mm);
t	tempo decorrido no ensaio (s).
A _i	absorção de água por imersão (%);
M _{sat}	massa do corpo-de-prova que ficou imerso em água (g) com superfície seca;
M _{seca}	massa do corpo-de-prova seco (g);
a	Largura (m)
A ₁	Parâmetro de ajuste
A	Área (mm ²)
B	altura (mm)
C _p	Calor específico J / kg ^o C
C ₁	Parâmetro de ajuste
C	Capacidade calorífica volumétrica (<u>1/m³ - °C</u>)
C	Capacidade de transferência de calor por unidade de volume
E _z	Energia do Sol no Zenite – Watt (W/m ²)
I	Quantidade de radiação (W/m ²)
J (p [→])	Matriz jacobiana
K	Coefficiente de condutibilidade térmica - (cal/s.cm.°C)
K	Condutividade térmica (W / m.°C)
L	Espessura do CP (mm)
m	Massa (kg)
Q	Fluxo térmico de calor
Q _c	Quantidade de calor

Q	Taxa de energia transferida Watt (W) S(i):
S _i	Temperatura corrigida registrada pelo sensor S _{j(i)}
S _j ⁽¹⁾	Temperatura inicial e final obtida pelo sensor
T	Temperatura (°C)
t	Tempo (s)
T [*] (1)	Temperatura registrada pelo sensor TC _j
TC _j	Temperatura inicial e final registrada pelo termômetro
t _m	Temperatura máxima
V	Volume (mm ³)
X	Variável espacial (mm)
x _m e x _z	Valor de (x e z) nos centros das faces do CP (m)
z	Variável espacial (mm)
Φ	Fluxo de calor (cal/s);
α	Difusividade térmica (m ² / s)
θ	Temperatura (°C)
P	Densidade ou massa específica (kg /m ³)
ΔT	Diferença de temperatura entre as faces extremas dos CP (°C)
∇	Operador de gradiente espacial
(dQ/Δx)	Menor temperatura
(J/mol.K)	Unidade para Calor específico molar
(cal/g °C)	Unidade para Calor específico
f	grau de liberdade
(T ₁ – T ₂)	Diferença de temperatura (°C)
D _x	Diferença entre duas partes (mm)
Ω - Ohm -	Um condutor que tenha uma resistência elétrica de 1 ohm, causará uma queda de tensão de 1 volt a cada 1 ampère de corrente que passar por ele.
ddp	Diferença de potencial - diferença de potencial elétrico entre dois pontos (J) e (C) ou Δ _v = Tensão elétrica
R _e .	Resistividade elétrica – Ohms/cm ³
U	Transferir
MF	Módulo de finura
u	unidade de massa atômica
υ	Transmitância Térmica
α	Difusidade térmica (m ² /s)
ρ	Densidade
mm	milímetro
e	Espessura
Rpm	Rotações por minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	SUSTENTABILIDADE	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	22
1.3	OBJETIVO GERAL.....	23
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.5	HIPÓTESES.....	23
1.6	CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	24
2.1.1	CONCEITOS GERAIS SOBRE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	28
2.1.2	Energia de Ativação dos Elétrons.....	34
2.1.3	Escala Nanométrica.....	36
2.1.4	Condutividade Térmica em Sólidos	39
2.1.5	Condutividade Térmica em Rochas.....	44
2.1.6	Condutividade Térmica em Metais	45
2.2	Rocha de Basalto	47
2.2.1	Microestrutura Petrográfica das Rochas Basálticas	50
2.2.2	Condutividade Térmica do Basalto	52
2.2.3	Produção e Resíduos da Indústria do Alumínio.....	53
2.2.4	Ligação Atômica do Alumínio	56
2.3	PRODUÇÃO DE MATERIAIS E CONSUMO DE ENERGIA.....	65
2.3.1	Características Físicas dos Agregados para Construção Civil	68
2.3.2	Empacotamento de Partículas.....	72
2.4	ARGAMASSAS	73
2.4.1	Definição.....	73
2.4.2	Tipos.....	75
2.4.3	Adição aos Materiais Constituintes.....	77
2.4.4	Condutividade Térmica em Argamassas	80
2.4.5	Oxidação e passivação do alumínio em meios básico e ácido	80
2.4.5.1	Diagrama de Pourbaix	85
2.4.5.2	Agentes Quelantes	87
3	MATERIAIS E MÉTODO	89
3.1	MATERIAIS.....	89
3.1.1	Cimento <i>Portland</i>	89
3.1.2	Areia de Basalto	91
3.1.3	Resíduos de Pedreiras de Basalto	93
3.1.4	Resíduos da Usinagem de Alumínio	98
3.2	COLETA DE AMOSTRAS.....	100

3.2.1	Coleta de Areia de Basalto.....	102
3.2.2	Coleta de Resíduos de Alumínio.....	103
3.2.3	Resíduos de Alumínio.....	103
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	104
3.1	Areia de Basalto	111
3.3.2	Resíduos de Basalto.....	112
3.4	PRODUÇÃO DE FIBRAS DE ALUMÍNIO	112
3.4.1	Definição do Fator de Forma das Fibras	118
3.4.2	Definição do Teor de adição de Fibras	121
3.5	Produção da Argamassa	124
3.5.1	Traços.....	124
3.5.2	Mistura.....	126
3.5.3	Procedimentos para Mistura da Argamassa	127
3.6	MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA	128
3.6.1	Cura dos Corpos de Prova	130
3.6.2	Método Utilizado para Medição da Condutividade Térmica da Argamassa	131
3.6.3	Equipamentos Utilizados nas Medições	135
4	RESULTADOS	137
4.1	MICROTOMOGRÁFIA.....	138
4.2	ANÁLISE DA DISPOSIÇÃO DAS FIBRAS NA ARGAMASSA	141
4.3	ANÁLISE DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DA ARGAMASSA	146
4.4	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO FLUXO DE CALOR.....	149
4.5	ANÁLISE DOS COMPONENTES QUÍMICOS DA ARGAMASSA.....	153
4.6	ANÁLISE DO ÍNDICE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA NA ARGAMASSA EM RELAÇÃO AOS TEORES ADICIONADOS DE FIBRAS DE ALUMÍNIO (MEV)	160
4.7	ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	162
5	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	164
6	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	166
	REFERENCIAS	167
	ANEXOS	179

1 INTRODUÇÃO

O incentivo pela redução no consumo de energias convencionais resulta da impossibilidade em atender a crescente demanda do planeta. O planeta, não conseguindo suprir sustentavelmente esta necessidade imediata, é degradado em vastas áreas consideradas vitais ao suporte da vida. Diante desses fatos, busca-se captar fontes de energia removíveis e limpas, desenvolvendo tecnologias para produção de novos compósitos com o propósito de captar e utilizar energias sustentáveis. A radiação eletromagnética solar tem densidade média no fluxo energético de 1.367 W/m^2 , e quando transmitida através de nossa atmosfera, pode ser captada pelo princípio físico da absortividade e emissividade em materiais. Essas características favoráveis estão energeticamente sendo empregadas em sistemas que possibilitem a autonomia energética necessária para a utilização das edificações. Porém, os modelos existentes têm alto custo, durabilidade reduzida e, frequentemente, contrapõem valores estéticos de arquitetura.

Este estudo busca desenvolver uma argamassa utilizando areia de basalto com adição de fibras de alumínio, para adquirir melhor desempenho em condutividade térmica, permitindo adequar-se as formas definidas no projeto arquitetônico, bem como sistemas destinados a captação e transferência de energia solar na forma de calor. Nos materiais condutores e semicondutores se destaca o fenômeno físico característico das ligações moleculares com afinidade entre as camadas de valência e bandas proibidas. Com o tratamento para controle de impurezas do pó de basalto encontrado como resíduos em pedreiras, através da manipulação da sílica (SiO_2), presente neste tipo de resíduos, o mesmo, poderá ser utilizado como agregado na argamassa com adição de fibras e partículas de alumínio, localizadas entre a pasta de cimento e os agregados.

O calor é definido como forma de transferência de energia através de um material, por um período de tempo, a um outro sistema ou meio que se encontra em temperatura inferior.

A captação de radiação solar eletromagnética na construção civil está inevitavelmente associada com trocadores de calor alternativos destinados ao aquecimento de água ou a painéis fotovoltaicos utilizados na geração de energia elétrica ou refletivos.

Outro aspecto de definição de calor é a de que um corpo ou sistema nunca contém calor, pois o calor somente pode ser identificado quando atravessa a fronteira. Assim o calor é um fenômeno transitório e nenhum sistema conterá calor ao fim do processo ou armazenará energia sem que haja transferência de massa.

Considerou-se ainda que mais da metade de toda energia gerada, destina-se à produção e uso de edificações. Atividades antrópicas, realizadas em espaços construídos, preenchem 80% da vida das pessoas no interior das edificações (EDWARDS, 2008; HALLIDAY, 1997) na busca de proteção e sensação de conforto.

Da energia utilizada em edificações, cerca da metade é consumida para estabilizar alterações climáticas. Considera-se a necessidade de redução em 60% nas emissões globais de gás carbônico gerado pelas edificações residenciais conforme um estudo feito pela comissão sobre poluição ambiental no Reino Unido (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Com o agravante da crise energética, tem-se dado maior importância a este fato, fazendo com que arquitetos e engenheiros busquem soluções para reduzir a demanda por energias convencionais e atendam padrões de desempenho na qualidade e conforto das edificações.

A matriz de geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente renovável, sendo 70% de sua oferta interna gerada por hidrelétricas onde, aproximadamente 80% da eletricidade originam-se de fontes renováveis. Esse índice nacional contrasta com a média mundial de 15,6% de geração de eletricidade por fontes renováveis (GRAF, 2011).

Considerando que a utilização de energias renováveis em sistemas autônomos envolve questões relativas à viabilidade técnica e econômica, o alto custo muitas vezes inibe o usuário a escolher sistemas alternativos para suprir necessidades de abastecimento de energias. Isso se deve em parte ao elevado custo inicial relacionado ao longo tempo de operação, necessário para que o sistema se torne economicamente viável.

Porém, esta tendência pode mudar, à medida que venham a ser disponibilizados sistemas com menor custo, maior eficiência e durabilidade. Quando incentivados por programas institucionais e quando o usuário recebe incentivos fiscais para adotá-la cotidianamente, sua implantação aumenta.

Nos padrões de sobrevivência e conforto humano, a energia divide com a água a primazia na escala de importância dos insumos requeridos de um sistema residencial ou

de produção, devendo ser aproveitados e utilizados na íntegra para geração da maior quantidade de bens e serviços e menor volume de resíduos.

A maior parte dos subsistemas residenciais necessita de energia para o seu funcionamento, sendo que a energia total requerida é apresentada sob duas formas básicas: energia térmica e energia elétrica (OLIVEIRA, 2009).

Menkes (2004), comparando tecnologias disponíveis, identificou a capacidade de economizar duas vezes e meia mais energias do que há cinco anos, dispondo apenas um terço do que antes era necessário para obter melhores resultados em cada unidade de energia, dotando-se sistemas com tecnologia básica.

Na construção civil existem variedades e volume de resíduos que necessitam destinação mais apropriada com o desenvolvimento de tecnologias para inserir qualitativamente suas características físicas na cadeia produtiva de novos materiais.

Dentre as alternativas utilizadas com resultados satisfatórios, destaca-se o uso de insumos mais simples, porém com maior eficiência, devido à energia investida em processos anteriores para produção e padronização de materiais ou produtos.

A reutilização desses resíduos elimina ou reduz sobras, que imediatamente retornam ao ciclo produtivo, agregando valor com menor consumo de energia.

Buest Neto (2006) cita Cucchierato (2000), afirma que os agregados são os materiais de construção mais utilizados em todo o mundo. Em vários países europeus é registrado o consumo médio de 510,0 ton/hab/ano em toda a sua vida e entre 6 a 10 ton/hab/ano. Nos EUA a taxa é de 8,0 t/hab/ano. No Brasil o consumo é de 2,10 t/hab/ano. Apesar o seu baixo valor unitário, o setor de agregados contribui com parcela importante do movimento financeiro da indústria mineral do país.

A Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para a Construção Civil – ANEPAC tem registrado significativo crescimento da produção dos agregados miúdos (LA SERNA; REZENDE, 2009).

Nolasco e Agnesini (1993) destacam a necessidade de inibir pelo menos três fatores degradantes do meio ambiente: a variedade de produtos descartáveis, a quantidade de elementos associados a cada objeto produzido e a aglomeração de certas operações que possam sobrecarregar processos biológicos ou desagregadores no tratamento de resíduos.

Quando há controle da variabilidade os resíduos são transformados em subprodutos e facilmente poderão ser utilizados na composição de novos materiais construtivos (CINCOTTO, 1988).

Assim, reduzindo a demanda na extração de novos insumos através da classificação e reutilização de subprodutos, se iniciaria um ciclo de reserva nos grandes extrativistas, que por sua vez destinariam essa reserva de matéria prima e energia para produção de bens e serviços.

Desta forma, as edificações que receberem resíduos em seus processos construtivos, devolveriam energia ao sistema gerador, ao longo de sua vida útil e contribuiriam para produção de novas edificações, e produziriam energia com o conceito sustentável e autônomo, aliadas a logística reversa e utilizando a infraestrutura existente.

Esse modelo integrado à previsibilidade na redução de reservas de energia convencionais estaria vinculado a medidas de preservação do meio ambiente, contribuindo para preservar vastas áreas naturais que necessitariam ser inundadas para instalação de usinas hidrelétricas de grande porte.

A implantação de unidades geradoras comercialmente viáveis envolve falhas de preservação ambiental desde a etapa de extração da matéria prima (materiais), construção (ação de homens e máquinas) e operação (criação de obstáculos para biota), que permanecerão como grande passivo ambiental.

Como exemplo, autores citam o desenvolvimento de energias limpas e renováveis em substituição às convencionais, reutilizando de resíduos da construção civil (LIBRELOTTO, 2005).

1.1 SUSTENTABILIDADE

O escopo do estudo considerou a importância em desenvolver novas tecnologias para o reaproveitamento de resíduos de agregados da construção civil, utilizando-se amostras geradas em processos de britagem de agregados em pedreira com jazida de basalto na região de Londrina/PR com vistas à captação de energia limpa e sustentável proveniente da radiação solar na forma de calor.

O desenvolvimento de produtos sustentáveis, direcionados à aplicação mais simples da nanotecnologia na construção civil, cria elementos interativos com sistemas necessários ao conforto e suporte para habitabilidade nas edificações.

Exemplos como a criação de um material escuro que absorve mais de 99,9% de toda a luz que recebe, pode permitir um novo patamar na captação da radiação solar para geração de energia termoelétrica. Outra área de desenvolvimento promissor da nanotecnologia é a geração de eletricidade em termopar, utilizando os princípios do “*Efeito Seebeck*” num semiconductor.

Os semicondutores não são indicados para um termopar de energia elétrica através do calor na escala macroscópica. Sabe-se, contudo, que junções semicondutoras podem gerar energia elétrica através da luz recebida em células fotovoltaicas e, nesse sentido, estuda-se converter calor diretamente em energia elétrica com semicondutores na escala da nanotecnologia.

Na mesma linha estuda-se refrigerar um ambiente através de termopares da nanotecnologia em efeito análogo: “*Efeito Peltier*”.

Esperando contribuir com o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao conceito do uso sustentável de energias sustentáveis, observando o desenvolvimento de tecnologias para novos materiais voltados à construção civil, foi proposta uma argamassa alternativa com características físicas favoráveis à captação da radiação solar e transferência desta energia na forma de calor a sistemas voltados ao aquecimento solar de água em edificações.

1.2 JUSTIFICATIVA

O aumento do consumo de energias convencionais e o passivo ambiental na produção de agregados de basalto no Estado do Paraná é resultado da intensa atividade na indústria da construção civil.

Sabe-se que, para cada quilograma de brita produzido, tem-se um valor proporcional de 20% de resíduo de basalto, que depositado na pedreira, torna-se um passivo poluidor ao meio-ambiente, agravando o problema de contaminação dos mananciais por lixiviação. Desta forma, utilizar estes resíduos em processos básicos de padronização resultaria de diminuição de custos na produção de captadores da radiação solar, por condução, devido à pequena quantidade de energia empregada para transformar esses resíduos em subproduto.

Com a estimativa de aumento na geração de grandes volumes de resíduos de britagem (RB), torna-se essencial o desenvolvimento de tecnologias para transformação desses resíduos em subprodutos, utilizáveis na produção de bens ou serviços.

O presente estudo busca classificar estes resíduos como agregados e desenvolver uma argamassa com elevada condutividade térmica, utilizando as capacidades semicondutoras do basalto com adição de fibras de alumínio.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma argamassa de elevada condutividade térmica utilizando areia de basalto e adição de fibras de alumínio reciclado.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir os teores adequados de resíduos da usinagem de alumínio e da britagem de basalto para a produção de argamassa destinada à captação e transferência de energia térmica.

Avaliar o desempenho em condutividade térmica e a esforços de resistência mecânica em argamassa com adição de fibras de alumínio reciclado e resíduos de britagem de basalto.

1.5 HIPÓTESE

A adição das fibras de alumínio favorece a transferência de calor por condução, aumentando a condutividade térmica da argamassa.

1.6 CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

Espera-se que este estudo contribua para a gestão dos resíduos da construção civil e favoreça a redução no consumo de energias convencionais com a captação de energias limpas através de coletores de energia eletromagnética na forma de calor em argamassa de elevada condutividade térmica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As capacidades termofísicas dos materiais, condutividade térmica, difusidade e calor específico, são exaustivamente estudados em diversas áreas ligadas à engenharia: química, de materiais, mecânica, civil e arquitetura. Cálculos requerem conhecimentos sobre propriedades dos materiais, o que tem incentivado diversas pesquisas e concentração de esforços para medir estas propriedades.

A condutividade térmica (λ com a unidade $W/(m.K)$) descreve o transporte de energia – na forma de calor – através de um corpo, como resultado da direção do gradiente de temperatura. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, calor sempre flui na direção da maior para a menor temperatura.

A relação entre calor transportado por unidade de tempo ($dQ/\Delta x$) ou fluxo de calor Q e o gradiente de temperatura ($\Delta T/\Delta x$) através da Área A (área através da qual o calor flui perpendicularmente a uma taxa constante) é descrita pela equação de Fourier.

Nas últimas décadas foram desenvolvidos vários métodos de medições, como o da Placa Quente Protegida (Guarded Hot-Plate Method), Sonda linear (Hot-Probe Method), Fio Quente (Transient Hot-Strip Method), Decaimento da temperatura da Superfície da Sonda (Decaying Temperature Surface Probe). Contudo, dificuldades experimentais impedem que os métodos de determinação sejam rápidos e convenientes, podendo resultar em erros nos valores obtidos.

Essas dificuldades experimentais são devidas aos equipamentos complexos e às condições específicas de medições. Embora existam diversos métodos, somente uma característica é medida por vez.

Um dos métodos, o da Placa Quente Protegida (Guarded Hot Plate), tem sido estudado e usado nos últimos sessenta anos para medir a condutividade e a resistência térmica. Uma descrição deste método e suas dificuldades são tratadas por JAKOB, 1949.

Chapetta (2002) cita vários precursores que desenvolveram técnicas e método para a medição da condutividade térmica, como Sommers e Cyphers (1951), Woodside (1957), os quais tratam da análise de erros na medição da condutividade térmica por este método e apresenta uma solução analítica, através de uma análise teórica do erro da condutividade térmica resultante da diferença de temperatura ou desbalanceamento,

entre a área do teste e o anel de proteção, o que tornou possível calcular o desbalanceamento máximo tolerável e assim alcançar a precisão necessária na medição pelo método da placa quente protegida.

Antes dos anos setenta, quando o fenômeno da conservação de energia começou a ser estudado em maior escala, as amostras dos materiais eram submetidas a teste com várias dimensões e espessuras. Com o advento da crise energética, em 1973, maior atenção foi dada à espessura dos materiais submetidos a testes, sendo que, maior atenção culminou com a observação de alguns outros problemas, como o de materiais isolantes térmicos que variam muito em densidade e condutividade térmica ao longo de sua espessura. Outro foi decorrente do “fenômeno espessura” (VISCANTA et al., 1965 apud CHAPETTA, 2002), que ocorre com isolantes de baixa densidade e que possuem relevantes taxas de transferência de calor por radiação. Esse efeito pode causar o aumento percentual de resistência térmica por unidade de comprimento para amostras de materiais finos (entre 25 e 50 mm de espessura), pois valores de medições obtidas de grandes espessuras envolvem maiores incertezas devido a efeitos de bordas. As normas ANSI/ASTM-C-177-76 e ISO DIS 8302:1990 descrevem seu princípio de operação e procedimentos de teste, e listam referências.

A ISO 8302 DIS 8302:1990, novo Padrão internacional, foi escrita por projetistas e usuários de aparelhos de placa quente protegida, visando oferecer os requisitos necessários para o projeto e construção de equipamentos como uma função da performance desejada, utilizando o método para avaliar experimentos e performance.

De Ponte et al. (1999), que utilizaram-se desta norma internacional, propõem o desenvolvimento de um instrumento de determinação da condutividade térmica, permanente baseado neste novo padrão para projetar instrumentos, seguindo estritamente as orientações para alcançar alta performance e estabilidade, com reprodutibilidade melhor que 1% e custo relativamente baixo, usando tecnologia avançada e meios de medida mais precisos. As dimensões do instrumento são reduzidas e faixa de temperatura para operação entre -23C a 62C.

Para medição com maior precisão da condutividade térmica em materiais sólidos faz-se necessário observar:

- i. O projeto de um instrumento de referência absoluta seguindo regras aceitas;
- ii. O uso de um ou mais padrões de referência nacional ou internacional para abrir a performance do equipamento.

O documento ISO DIS 8302:1990 não especifica um tipo particular de equipamento de placa quente protegida e sim dimensões em faixas de temperaturas e geometrias, dando ao projetista de novos equipamentos várias formas de comparar os resultados, sendo recomendado tomar decisões preliminares sobre os parâmetros descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros para construção de placa quente protegida

	Parâmetros	Especificações
1.	Espessura mínima e máxima do espécime a ser testado	25 e 50 mm
2.	Resistência térmica mínima e máxima do espécime	3,5 a 237 W/m
3.	Diferença mínima e máxima de temperatura do espécime	108 ^o C – 23 ^o C
4.	Sensibilidade do sistema de equilíbrio da guarda de proteção	3 ^o C
5.	Temperatura mínima da unidade de resfriamento	Ambiente
6.	Temperatura máxima da unidade de aquecimento	108 ^o C
7.	Precisão total do aparelho com erro máximo aceitável na propriedade medida definida como aceitável na pior condição	3%
8.	Temperatura ambiente	23 ^o C

Fonte: ISO DIS 8302:1990 – for Standardization.

Os objetivos dessas diretrizes elaboradas pelos autores é verificar o procedimento proposto na ISO DIS 8320:1990, para o projeto do aparelho de placa quente protegida, com desempenho verificado pelo material padrão europeu de referência e mostrou que:

- i. Os erros dos testes não foram contrários aos previstos pelos resultados teóricos simples;
- ii. A verificação através do material padrão de referência foi melhor que o nível de confiança pretendido;
- iii. Estabilidade e reprodutibilidade foram melhores que 1%;
- iv. Precisão total melhor que 1,5% da especificação do projeto.

Nas edificações, existem inúmeros tipos de materiais que tem características termofísicas que vão além do que podemos ver. Porém, para construí-las, deve-se observar três princípios básicos de projeto:

- i. Para um clima específico;
- ii. Para o meio ambiente social e físico;
- iii. Para o tempo, seja o dia e a noite, uma estação ou a vida útil de um edifício;
- iv. Para edificação que se adaptará ao longo dos anos (ROAF, 2009).

Materiais na construção civil armazenam radiação solar, tornando-se mais quentes, e reemitem essa radiação na forma de calor.

O acúmulo do calor acontece durante o dia devido às propriedades de absorção dos materiais utilizados comprometem a durabilidade e desgaste dos mesmos, reduzindo a vida útil da edificação (MASCARENHAS, 2012).

Quando o clima externo é frio, a edificação deve reter o calor e quando o clima é quente deve rejeitar o calor. Para controlar esses fatores, a edificação depende de aberturas, além de soluções e especificações dos materiais para controlar o fluxo térmico, de modo a alcançar o conforto necessário e a durabilidade nas edificações.

A durabilidade, já que o consumo energético durante a fase de processamento dos materiais é elevado, desponta como condição para que um material tenha longa permanência como componente da edificação, requerendo menor manutenção. Irá certamente contribuir para o uso racional dos recursos energéticos e na diminuição dos problemas relacionados à geração de resíduos sólidos.

Tecnologias para captação de energias limpas e renováveis despertam maior interesse à medida que a demanda se intensifica e tende a evoluir para um sistema híbrido, onde no mesmo coletor ficariam instaladas células fotovoltaicas para geração de energia elétrica como alternativa para atingir a tão desejável autonomia sustentável nas edificações (MARQUES, 2008).

No caso específico da condutividade térmica nos materiais da construção civil derivados das rochas, torna-se um tema complexo, pois depende de vários fatores. Dentre eles se destacam a mineralogia, composição química, porosidade, tipo fluido no espaço poroso, densidade, pressão, temperatura, textura, estrutura, grau de consolidação, grau de alteração, etc. Como se sabe, as rochas são constituídas de minerais utilizados como agregados em partes vitais da edificação, cada um com valores característicos (ou intervalo) de condutividade térmica, e, portanto é de se esperar que ao se variar as proporções de traços entre os minerais ou a orientação dos cristais, mesmo que minimamente, a condutividade também sofrerá modificações, mostrando uma complexa interação de variáveis, exigindo para tanto, não só o estudo de tais propriedades, mas também o entendimento das leis que regem a termodinâmica.

2.1.1 Conceitos Gerais sobre Transferência de Calor

Transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura em um meio ou meios diferentes.

Quando existe gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido usa-se o termo condução, segundo Incropera e Witt (2003).

A capacidade de um material ser condutor ou isolante está relacionada ao arranjo e afinidade das ligações atômicas de seus elétrons. Esses elétrons podem se deslocar entre camadas e estabelecer condições favoráveis a ligações e transferência de energia.

A diferença de capacidade de armazenamento de calor entre materiais é revelada quando se analisa sua capacidade calorífica, que é a capacidade térmica por unidade de massa da substância e, ocasionalmente, pode ser usado o calor específico volumétrico por unidade de volume (YANNAS; MALDONADO, 1995).

O calor específico da rede, na maioria dos sólidos, é a forma principal de assimilação de energia térmica pelo incremento de energia vibracional de rede. Assim, a energia térmica presente em forma de vibrações de rede se considera teoricamente como uma série de ondas superpostas, com um espectro de frequência determinado pelas propriedades elásticas do cristal. Um quantum de energia elástica recebe o nome de fônon, análogo ao fóton, que é um quantum de energia eletromagnética. A teoria clássica sobre o calor específico está baseada na Lei de *Dulong e Petit* (1819). Segundo essa lei “O calor específico é o mesmo para todas as substâncias sólidas elementares e este valor é de aproximadamente 6,0 cal/mol.K” ou 25,0 J/mol.K (MORA, 2010).

O calor específico molar é resultante da relação entre a capacidade térmica e o número de *mols* presentes. Ocasionalmente, pode ser usado o calor específico volumétrico (por unidade de volume) demonstrado na Tabela 2. Como exemplo de massa, temos que uma colher de chá contendo 5 ml de água (aproximadamente 0,3 mol de água), sendo que, mol é a quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quanto são os átomos contidos em 0,012 quilograma de carbono - 12. A Tabela 2 mostra os valores molares das principais substâncias utilizadas na argamassa.

Tabela 2 – Os valores molares das principais substâncias utilizadas na argamassa

Valores à temperatura ambiente	
Substância	Calor Específico Molar (J/mol.K)
Água	10,0
Alumínio	24,4
Ar	12,6
Rochas basálticas	21,0

Fonte: Adaptado de UNIOESTE (2014).

Todo tipo de molécula possui um número (f) de graus de liberdade, que são maneiras independentes de guardar energia. A temperatura reflete a energia cinética média das partículas na matéria, enquanto calor é a energia térmica em trânsito das regiões de maior para aquelas com menor temperatura. A energia térmica transmitida como calor é armazenada como energia cinética translacional em átomos e rotacional em moléculas.

No caso de ligas, existem certas condições em que as pequenas impurezas podem alterar grandemente o calor específico medido. As ligas podem mostrar uma diferença marcada no seu comportamento, mesmo que a impureza em questão seja um dos elementos que formam a liga, tais como ligas impuras em semicondutores ferromagnéticos que podem conduzir a medições muito diferentes. A Tabela 3 apresenta o calor específico de algumas substâncias à pressão constante de 1 atm.

Tabela 3 – Valores de calor específico para as principais substâncias utilizadas na argamassa

Valores à temperatura ambiente	
Substância	Calor Específico (cal/g.°C)
Água	1,0
Alumínio	0,22
Ar	0,24
Rochas basálticas	0,21

Fonte: Adaptado de UNIOESTE (2014).

A massa molar é a razão pela qual o calor específico tem valores diferentes para diferentes substâncias. Essa diferença de massas molares equivale a massa de um mol em qualquer elemento, é diretamente proporcional à massa molecular do elemento, ou a

soma dos valores das massas atômicas da molécula em questão. A energia térmica é, portanto, armazenada pela existência de átomos ou moléculas de com maior ou menor capacidade de vibração (TIPLER; MOSCA, 2009).

O desempenho em condutividade térmica (k) e a eficiência térmica dos materiais utilizados para conduzir energia térmica são mensuráveis pela quantidade de energia que estes são capazes de absorverem e transferirem (U).

Existem três formas de interação de calor: a condução, a radiação e a convecção. A condução pode ser considerada como a transferência de energia de partículas mais energéticas de uma fonte de calor ou substância para partículas menos energéticas, devido às interações ou afinidade das ligações atômicas entre as partículas em materiais condutores, conforme a Lei de *Fourier*.

Genericamente, a propagação de calor por condução ocorre sem transporte da substância formadora do sistema, ou seja, através de choques entre suas partículas integrantes ou intercâmbios energéticos dos átomos, moléculas e elétrons.

A condução de calor, definida pela lei de *Fourier*, indica que o fluxo de calor é determinado por uma diferença de temperatura. O fluxo de calor sempre ocorre a partir de uma região de maior temperatura para uma região de baixa temperatura, e atua no sentido de minimizar as diferenças de temperatura.

A condução ou difusão é o fenômeno físico responsável pela transferência da energia pela ativação de elétrons livres de valência (YUNUS; AFSHIN, 2012).

A taxa de transferência de calor (Q) entre dois pontos, em um meio sólido ou não, é proporcional à diferença de temperatura entre estes pontos ($T_1 - T_2$), dividida pela distância entre os pontos (Dx) e a área da seção (A) entre o fluxo de calor, ou seja, o fluxo de calor por condução é a quantidade de energia que flui através de um material, por uma unidade de área e uma unidade de tempo.

A constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente do material (k) ou de condutividade térmica do material. Entre duas substâncias, a que tiver condutividade maior conseguirá transferir uma quantidade maior de calor, para uma mesma diferença de temperatura e pode ser calculada pela Equação de Fourier:

$$Q = - k \cdot A (T_1 - T_2) / dx \quad (1)$$

Onde:

Q é a taxa de transferência de calor em Watts (W).

- k é o coeficiente de condutividade térmica do material

A é a secção do sentido da corrente
 $(T_1 - T_2)$ diferença de temperatura
 dx espessura do material

Há outras disposições de variáveis:

$$Q = -k A dT/dx \quad (1.1)$$

$$Q = -k A C \quad (1.2)$$

$$Q = -k A (T_2 - T_1)/L \quad (1.3)$$

Por outro lado, para estabelecer um paralelo com o fluxo da corrente elétrica ou tensão, que é determinada pela lei de *Ohm* (Ω), a corrente elétrica (I) que flui entre dois pontos em um condutor é (denotada por ΔV) conhecida como diferença de potencial (ddp). É a diferença de potencial de corrente elétrica entre dois pontos ou a diferença em energia elétrica potencial por unidade de carga elétrica entre os dois pontos ($V_1 - V_2$) dividida pela resistência elétrica entre eles, conforme equação a seguir:

$$I = (V_1 - V_2)/R \quad (2)$$

Onde:

I = tensão (V)
 $(V_1 - V_2)$ = diferença de potencial
 R = Resistência elétrica

A tabela 4 estabelece a relação entre as condutividades térmica e elétrica.

Tabela 4 – Relação entre condutividade térmica e elétrica

Condução Térmica	Condução Elétrica
Taxa de fluxo térmico: Q	Corrente elétrica: I
Diferença de temperatura: $DT = T_1 - T_2$	Diferença de potencial: $DV = V_1 - V_2$
Resistência térmica: $R_{\text{térmica}} = Dx/(kA)$	Resistência elétrica = R

Fonte: DASSAULT SYSTÈMES (2014).

Na termoeletricidade, se considera a migração de elétrons, quando um fio condutor em que uma extremidade é mantida fria, em uma temperatura T_1 , e a outra é mantida

quente, em uma temperatura T_2 , resultando em uma diferença de potencial em escala de milivolts.

Na extremidade aquecida, os elétrons serão excitados para níveis mais altos de energia, isto é, existirão mais elétrons com energia superior à energia do nível de *Fermi*, que é a energia do nível ocupado mais energético em um sistema quântico à temperatura de zero absoluto. A definição estende-se também a sistemas acima do zero absoluto, caso em que a energia corresponda à energia obtida mediante uma média das energias dos níveis quânticos com probabilidade de ocupação, devido à agitação térmica.

Os elétrons de maior energia diminuem sua energia difundindo-se para a extremidade fria, tornando-a carregada negativamente, o que provoca uma diferença de potencial ao longo do fio. Esta diferença de potencial está associada a uma corrente elétrica, que é a diferença de potência dividida pela resistência do fio. Este efeito, denominado, “*Efeito Seebeck*”, foi descoberto em 1822. Se um único fio for utilizado, a diferença de potencial não pode ser medida.

Em relação ao significado físico da transferência de calor, deve haver um intervalo de tempo de acumulação finito para então se estabelecer o início da corrente térmica, uma vez que a diferença de temperatura tenha sido imposta à superfície. Dessa forma, o fluxo de calor não se inicia instantaneamente, mas se eleva gradualmente com o tempo de relaxação, que é definido como o tempo necessário para a acumulação da energia térmica requerida para a transferência propagativa para um elemento adjacente da estrutura interna (CHIWIACOWSKY, 2002).

Por outro lado, quando uma fonte de calor é repentinamente removida, haverá atraso no desaparecimento da corrente de calor, fenômeno que caracteriza a histerese. Histerese, de forma geral, tanto magnética, quanto térmica, é um fenômeno complexo, não linear e não local, que reflete a existência de uma energia mínima metaestável de anisotropia separada por uma barreira de energia dependente do campo.

O tempo de atraso e o amortecimento do calor transmitido estão relacionados às características físicas do material, espessura de propagação da energia e massa específica.

Por outro lado, se as extremidades de dois fios de materiais diferentes forem soldados, aparecerão entre as duas pontas não soldadas, uma diferença de potencial da ordem de milivolts.

A diferença de potencial depende dos materiais dos dois fios e da diferença de temperatura entre a junta soldada (geralmente a extremidade quente) e a junta fria. *Le Chatelier* foi o primeiro a usar um *termopar* como instrumento de medição de temperatura. Os pares mais utilizados são Cu/Cu-40%Ni (constantan), para medição de temperaturas até 315°C, Fe/Cu-40%Ni, para medições de temperaturas até 950°C, Ni-10%Cr (cromel)/Ni-2%Al3%Mn-1%Si, para medição de temperaturas até 1200 e Pt/Pt/-Rh, para medições de temperaturas até 1500°C (PIRES; AFONSO; CHAVES, 2006).

Oliveira (2010) propõe a utilização de termopares tipo T, devido à sua sensibilidade na faixa de temperatura de interesse, intervalo de 10 a 80° C, e também pela sua velocidade de resposta. Baseados na Norma ASTM E230, segundo a I.T.S.-90 e IEC 584, na faixa de -180 a 370°C, a classe *standard* destes termopares apresenta um limite de erro de $\pm 1^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$ e, aqueles da classe especial de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,4\%$. A compensação de temperatura da junção fria é realizada automaticamente pela eletrônica de aquisição de sinal, através do módulo de cFP-2000 e do software.

A radiação térmica, segundo a Lei de Stefan – Boltzmann é a energia emitida pela matéria que estiver em uma temperatura finita. A energia do campo de radiação é transportada pelas ondas eletromagnéticas (fótons). Enquanto a condução necessita de material, a radiação tem maior eficiência no vácuo. Na convecção, conforme a Lei de Resfriamento de *Newton*, a transferência de calor é sustentada pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento macroscópico do fluido no interior da camada de fronteira (INCROPERA; WITT, 2003).

A condução térmica em sólidos se dá principalmente por vibração da rede cristalina e/ou pelos elétrons de condução (INCROPERA; WITT, 2003). Algumas propriedades dos elementos variam periodicamente em função de suas massas atômicas, potencial de ionização, afinidade eletrônica, eletronegatividade, etc. (FONSECA, 1992).

Entende-se como potencial de ionização a energia necessária para remoção de um elétron de sua camada de valência, o que equivale dizer, retirar o último elétron do átomo. Esta energia varia em função das características de cada elemento.

Os pouco mais de 110 elementos da tabela periódica estão divididos em cinco categorias, levando-se em conta suas propriedades químicas e características físicas. São eles: metais, semimetais, ametais, gases nobres e o hidrogênio, que possui comportamento diferenciado em relação aos demais grupos.

Esses fenômenos físicos, enquanto princípios na transferência de energia determinam todos os meios ou sistemas geradores ou consumidores de energia, sejam construídos em conformidade com um ou o conjunto desses princípios.

A condução térmica pode ser interpretada como a transmissão passo a passo de agitação térmica: um átomo (ou uma molécula) transfere parte de sua energia cinética ao átomo vizinho, o que caracteriza como um fenômeno de transporte de energia interna provocado pela heterogeneidade da agitação molecular, sendo assim um fenômeno termodinamicamente irreversível.

Destacam-se as substâncias metálicas com maior número de elétrons livres que tenderão a potencializar a condução térmica como o caso dos metais que, associado ao tipo de ligação, justificaria sua alta condutividade térmica (FIGUEIREDO, 2006).

A energia é transmitida pela movimentação dos elétrons que orbitam em torno do núcleo das moléculas, agrupados em camadas. As bandas externas de determinados elementos químicos permitem a troca desses elétrons, chamados livres, com camadas externas de outras moléculas, transmitindo assim energia elétrica ou térmica. A condutividade térmica, por sua vez, está associada à periodicidade do potencial criado pelas bandas externas incompletas em sólidos.

As bandas de energia mais profundas, completamente ocupadas por elétrons, são inertes devido as suas ligações estarem completas, sendo que a banda parcialmente preenchida é chamada de banda de condução.

Para um sólido em que o nível de energia mais alto ocupado está localizado dentro de uma banda permitida (incompleta), os elétrons podem ser acelerados livremente, desde que os níveis de energia mais altos sejam acessíveis, o que torna este material um condutor. Em um condutor, os elétrons com mais altas energias se comportam aproximadamente como se fossem partículas livres, criando uma afinidade na troca entre elétrons na molécula (CALLISTER, 1991).

2.1.2 Energia de Ativação dos Elétrons

Um material condutor é caracterizado por apresentar os elétrons de valência de seus átomos fracamente ligados ao núcleo e, devido a esta ligação não ser muito forte, estes elétrons podem ser considerados livres.

Uma ligação covalente é uma combinação química em que os elétrons são compartilhados entre os átomos. Dos materiais semicondutores existentes o germânio e o silício são atualmente os mais empregados. Apesar das ligações covalentes entre os átomos de cristais puros de silício e de germânio serem rígidas, quando o cristal é submetido a qualquer tipo de energia algumas delas chegam a se romper. O rompimento entre as uniões ocorre quando o elétron de valência que pertence aos dois átomos adquire energia suficiente para se liberar.

Ligações covalentes são interrompidas quando submetidas a certos campos de energia como: calor, luz, raios - x, raios cósmicos etc. O número de rompimentos é diretamente proporcional à intensidade do campo de energia aplicado ao cristal. Cada rompimento gera um portador de carga elétrica negativa e uma carga elétrica positiva. Com o rompimento da ligação covalente ocorre a liberação do elétron, ficando no lugar deste um buraco ou lacuna. Esta lacuna tem característica positiva, porque qualquer elétron próximo poderá ser atraído por ela, o que criaria uma nova lacuna fazendo com que a migração dos elétrons na substância estabeleça um diferencial de potência, mesmo que em baixas concentrações.

Vários fatores podem contribuir para a geração de portadores em cristais de silício, porém, a variação de temperatura é o fator que mais afeta sua condutividade térmica. À temperatura de 0° absoluto, o silício se apresenta como isolante, porém, na temperatura ambiente, em torno de 25°C, em sua estrutura existirão milhares de rompimentos entre as ligações, criando portadores positivos e negativos, lacunas e elétrons, respectivamente. Nesta situação o silício tem características de semicondutor intrínseco, isto é, possui característica própria. Na temperatura ambiente de 25°C, um cristal puro de silício apresenta aproximadamente 1010 lacunas e 1010 elétrons por cm³ e uma resistividade de $2,4 \times 10^4$ ohms/cm³.

As energias, elétrica ou térmica, quando responsáveis pela ativação dos elétrons está diretamente associada à temperatura absoluta como grandeza física que mensura a energia cinética média ou grau de liberdade de cada partícula de um sistema em desequilíbrio térmico e corresponde classicamente à soma das energias necessárias aos movimentos de translação, vibração ou rotação destas partículas.

Em sistemas onde há radiação térmica confinada, a energia de tal radiação também integra a energia térmica, assumindo como referencial inercial o centro de massa do sistema.

Enquanto a radiação ocorre sendo favorecida pela ausência de matéria (vácuo), a condução de energia pela troca de calor somente ocorre enquanto há material com características condutoras, favoráveis à transferência dos elétrons livres entre as moléculas (ORDENES; LAMBERTS; GUTHS, 2008).

2.1.3 Escala Nanométrica

Na escala atômica, as barreiras são facilmente superadas por flutuações térmicas, no entanto, nessa escala é necessário estabelecer ou compor “engrenagens” de moléculas para criar afinidade entre as ligações por íons ou camadas de valências entre os elementos em uma determinada substância em estado líquido ou sólido. A teoria da repulsão dos pares de elétrons da camada de valência é um modelo químico que busca prever a geometria molecular por meio da repulsão eletrostática dos elétrons nas camadas externas dos átomos.

Segundo Chapetta (2002) estudos entre a geometria molecular e o número de elétrons da camada de valência (ligantes e não ligantes) foram apresentados pela primeira vez na Universidade de Oxford por Sidgwick e Powell em 1940. Em 1957, na University College London elaboraram uma teoria mais detalhada capaz de abranger as mais diversas geometrias moleculares.

Para Rosa (2012), Richard P. Feynman foi o precursor do conceito da Nanotecnologia, embora não tenha utilizado este termo em sua palestra para a *Sociedade Americana de Física*, em 29 de dezembro de 1959, onde apresentou o assunto pela primeira vez. A palavra "Nanotecnologia", adotada para manipular estruturas com medidas entre 1 a 100 nanômetros em ao menos uma dimensão, inclui o desenvolvimento de materiais ou componentes, está associada a diversas áreas e foi utilizada pela primeira vez pelo Professor Norio Taniguchi em 1974 para descrever as tecnologias que permitam a construção de materiais a uma escala de até um (1) nano.

O princípio básico da nanotecnologia é a construção de estruturas para novos materiais a partir dos átomos (os tijolos básicos da natureza). É uma área promissora, mas que dá apenas seus primeiros passos, mostrando resultados surpreendentes, na produção de semicondutores, nanocompósitos, biomateriais, Chips, etc.

Criada no Japão, a nanotecnologia busca inovações. O objetivo principal dessa tecnologia, não é chegar a um controle preciso e individual dos átomos, mas elaborar estruturas estáveis entre as moléculas em novos materiais.

Atualmente, existem três abordagens distintas à nanotecnologia: uma abordagem de cima para baixo, que consiste na construção de dispositivos por desgaste de materiais macroscópicos, a construção de dispositivos que se formam espontaneamente a partir de componentes moleculares e a de materiais átomo a átomo.

A primeira abordagem é a utilizada em microeletrônica para produzir chips de computadores e mais recentemente para produzir testes clínicos em miniatura. A segunda recorre às técnicas tradicionais de química e das ciências dos materiais e a terceira, é aquela que levará mais tempo a produzir resultados significativos porque requer um controle fino da matéria só possível com o aperfeiçoamento da tecnologia.

No caso específico da transmissão de energia, seria construir estruturas moleculares onde excitações atômicas, geralmente fracas, possam superar as barreiras entre as camadas de valência, e permitir que os elétrons livres sejam ativados num tempo menor, possibilitando seu deslocamento por uma distância maior. Uma das formas de realizar esta ativação é denominada ionização, que é o processo químico mediante ao qual se produzem íons, que são espécies químicas eletricamente carregadas, pela perda ou ganho de elétrons a partir de átomos ou moléculas neutras.

Existem várias maneiras de se ativar a ionização dentre elas:

- i. Num ácido, a molécula de água é responsável por capturar um hidrogênio que está polarizado positivamente no ácido, formando o íon hidroxônio e um ânion.
- ii. No que se refere à radiação, há uma forma de ionização produzida pelas radiações ionizantes que transferem muita energia ao átomo atingido deixando-o instável, podendo gerar a fissão nuclear.
- iii. Fornecimento de energia para um átomo a fim de liberar seus elétrons. Inclui-se aqui a propriedade periódica (energia de ionização mínima necessária para retirar um ou mais elétrons de um átomo) ou potencial de ionização, que diz quanta energia é necessária para retirar um elétron do átomo.

Morse e Feshbach (1953) observaram ao assumirem a equação da difusão como correta somente quando decorrido um tempo suficientemente longo. Este tempo depende

naturalmente da transferência na propagação do calor, o qual, por sua vez, depende da afinidade das moléculas.

Desta forma, para se estabelecer a propagação de calor, pode-se recorrer à ionização do material. Em física, núcleos atômicos (provenientes de átomos completamente ionizados) são designados como partículas carregadas. A ionização é geralmente alcançada pela aplicação de elevadas energias aos átomos, seja através de uma alta tensão elétrica ou por via de radiação de alta energia. Um gás ionizado é chamado plasma. Para átomos isolados no vácuo, existem constantes físicas associadas ao processo de ionização.

A energia necessária para remover elétrons de um átomo é chamada energia de ionização, ou potencial de ionização. Estes termos são também usados para descrever a ionização de moléculas em sólidos, mas os valores não são constantes, porque a ionização pode ser afetada pela química, geometria e temperatura. As energias de ionização decrescem ao longo de um grupo da Tabela Periódica, e aumentam da esquerda para a direita ao longo de um período. Estas tendências são o exato oposto das tendências para o raio atômico. Elétrons em átomos menores são atraídos mais fortemente para o núcleo, e a energia para ionização, deve ser mais elevada.

Em átomos maiores, os elétrons não estão ligados com tanta força, necessitando de energia de ionização mais baixa, como demonstra Tabela 5.

Tabela 5 – Energias de ionização sucessivas em kJ/mol

Elemento	Primeira	Segunda	Terceira	Quarta	Quinta	Sexta	Sétima
Na	496	4560					
Mg	738	738	7730				
Al	577	1816	2744				
Si	786	1577	3228	4354	16100		
P	1060	1890	2905	4950	6270	21200	
S	999	2260	3375	4565	6950	8490	11000
Cl	1256	2295	3850	5160	6560	9360	11000
Ar	1520	2665	3945	5770	7230	8780	12000

Fonte: Chang e Goldsby (2012).

A primeira energia de ionização é a energia necessária para remover um elétron, a segunda para remover dois elétrons, etc. As energias de ionização sucessivas são sempre maiores que a anterior, e há uma “n-ésima” energia de ionização que é

significativamente mais elevada que as demais. Por esta razão, os íons tendem a se formar. O sódio geralmente se encontra na forma Na^+ , mas não na forma Na^{2+} devido à grande quantidade de energia de ionização que seria necessária. Do mesmo modo, o magnésio encontra-se como Mg^{2+} , mas não como Mg^{3+} .

2.1.4 Condutividade Térmica em Sólidos

A condução de calor nos sólidos em muitos aspectos é semelhante à condução de eletricidade em elementos condutores, sendo que o fluxo de eletricidade é determinado por uma diferença de potencial.

O fenômeno da condutividade térmica para a maioria dos sólidos apresenta a entalpia e a energia interna como fenômenos muito similares. Sua principal maneira de assimilação de energia é pelo aumento de energia vibracional dos seus átomos. Os átomos nos sólidos acima da temperatura 0 K estão sempre vibrando com frequências muito altas e pequenas amplitudes e não vibram independentes uns dos outros, pois estão acoplados entre si por ligações. Essas ligações são coordenadas de tal maneira que tudo se passa como se ondas atravessassem o material. Essas ondas podem ser interpretadas como ondas elásticas ou ondas sonoras, que se propagam em redes cristalinas com altas frequências e comprimento de ondas curtas na velocidade do som.

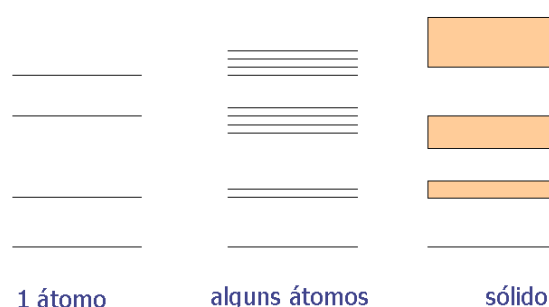
A energia térmica vibracional consiste num conjunto de ondas elásticas, numa faixa de frequências. Somente certas energias são permitidas: a energia é quantizada. Um quantum (pacote) de energia vibracional é chamado *fônon*, que é análogo ao de conceito de radiação eletromagnética.

Na teoria das bandas, a energia dos elétrons é quantizada. Portanto, há níveis discretos de energia que um elétron pode absorver ou emitir, ou ainda, níveis discretos de energia contidos num átomo. Para excitá-lo, uma quantidade de energia suficiente deve ser dada a um elétron de modo que ele "salte" de um nível quântico para outro. Do mesmo modo, ao descer um nível quântico, um elétron emite uma quantidade discreta ou quântica de energia: um *fóton* de energia.

Num retículo cristalino de sólido, a interação entre elétrons dos átomos próximos cria outros níveis possíveis de energia para cada elétron. A soma destes vários níveis possíveis resulta em *bandas* amplas, no interior das quais um elétron pode assumir vários valores de energia. Entre as bandas possíveis, há as bandas proibidas, região onde um

elétron não pode estar (ou nível energético impossível, pela teoria quântica). Assim sendo, num retículo cristalino de sólido, não há camadas de valência, mas sim bandas de valência. Ao excitar elétrons da banda de valência, estes podem ganhar energia e passar para a *banda de condução*. A Figura 1 ilustra o processo de formação de bandas de energia, devido à interação de elétrons próximos num sólido e destaca as bandas para os três tipos de material.

Figura 1 - Formação das bandas de energia em diferentes tipos de materiais



Fonte: Rezende (2004).

A contribuição eletrônica para a capacidade térmica é muito menor que a contribuição da vibração da rede (*fônons*), sendo significativa apenas nos materiais que apresentam elétrons livres.

Nos materiais condutores, somente os elétrons com energia próxima do nível de *Fermi*, podem ser excitados e superá-lo.

A energia de Fermi corresponde ao potencial eletroquímico do sistema na temperatura de zero absoluto. Uma extensão a temperaturas maiores é evidente, e a energia de Fermi corresponde assim ao potencial eletroquímico do sistema na temperatura considerada.

Na teoria de Fermi, elétrons são férmions, ou seja, são partículas regidas pela estatística de Fermi. Esta ocupação é possível devido à agitação térmica, diferente em cada unidade, sendo cada qual ponderada pela respectiva probabilidade de ocupação. Nesta estatística, um dado estado quântico pode ser ocupado por no máximo um e não mais que um férmion, e, portanto, a máxima probabilidade de ocupação de um dado estado quântico é um, para as quais é verificado pelo princípio da exclusão de *Pauli*, que

dita, que dois férmions idênticos não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico.

Os elétrons situados dentro da amostra estão confinados por um potencial atrativo exercido pelos íons positivos da rede. Conforme mostrado pela mecânica quântica, potenciais confinantes apresentam níveis de energias discretos.

Quando dois materiais diferentes são colocados em contato, a condição de equilíbrio termodinâmico exige que as suas “*energias de Fermi*” sejam iguais. Se as energias de *Fermi* fossem diferentes, a passagem de um elétron do sólido com maior energia de Fermi para o sólido com menor energia de *Fermi* resultaria em uma diminuição da energia total do sistema e o sistema composto não estaria, então, em sua configuração de equilíbrio, a de mínima energia, conforme exigido pelas leis da termodinâmica. Este fato dá origem a um fenômeno conhecido por diferença de potencial de contato que encontra diversas aplicações práticas, na eletrônica de estado sólido (junção PN) e no uso do metal de sacrifício em navios.

Isto se estende também a sistemas acima do zero absoluto, caso em que a energia, corresponde à energia obtida mediante uma média das energias dos níveis quânticos com probabilidade de ocupação das lacunas (ALCÁCER, 2013).

Nos materiais semicondutores, somente os elétrons com energia próxima do nível de *Fermi*, estende-se também a sistemas acima do zero absoluto, caso em que a energia, corresponde à energia obtida mediante uma média das energias dos níveis quânticos com probabilidade de ocupação, devido à agitação térmica, diferentes em cada unidade e cada qual ponderada pela respectiva probabilidade de ocupação, podem ser excitados e superá-lo (ARMANGE, 2007).

A contribuição eletrônica se dá através da absorção de energia pelos elétrons, aumentando sua energia cinética. Na Figura 2 se observar as bandas de energias em materiais condutores, semicondutores e isolantes.

Figura 2 - Bandas de energia em materiais condutores, semicondutores e isolantes.



Fonte: Rezende (2004).

Cientistas com *A. Einstein* e *P. Debye* desenvolveram modelos onde os átomos estavam ligados por molas, representando as ligações químicas, os quais podiam oscilar ou vibrar e armazenar energia, permitindo calcular a variação de calor específico com a temperatura. Os cálculos mostraram que o calor específico aumenta até certa temperatura, denominada temperatura de *Debye*, e após, torna-se praticamente constante. Este valor constante é $3R$ ou 6 cal/mol K .

Alguns cristais não metálicos muito puros e contendo baixa densidade de defeitos cristalinos apresentam em algumas faixas de temperaturas, condutividade térmica comparável ou até melhor que alguns materiais metálicos (PADILHA, 2000).

Os metais estão incluídos na categoria de condutores e as rochas na categoria de semicondutores. No caso das argamassas, por serem constituídas em sua maior parte por agregados miúdos de origem mineral, se enquadram na classificação de semicondutores não puros.

Como a mesma se caracteriza como um compósito, pelo fato de ter em sua constituição a pasta de cimento *Portland*, acaba apresentando teores de impurezas que interferem em suas características físicas, em se tratando de sua estrutura molecular.

Como a condução térmica se dá principalmente por vibração dos elétrons na rede cristalina e/ou pelos elétrons de vibração, como enfatizam Incropera e Witt (2003), destaca-se ainda que substâncias com maior número de elétrons livres tendem a ter maior capacidade de transferir calor e, associado a este tipo de ligação (metálica), resultam em suas altas condutividades térmicas.

Sendo que, massa específica e a porosidade de um material quantificam somente o volume de sólidos e de poros fechados que o mesmo apresenta. Já a massa unitária e a porosidade total quantificam também os poros abertos, que influenciam diretamente nos resultados de condutividade.

Um bom parâmetro para analisar o desempenho térmico de um material sólido é a sua transmitância térmica (T_a) que é entendida como sendo a propriedade que caracteriza a habilidade de um material em transferir calor. A condutividade térmica é diretamente proporcional (1) à densidade dos elétrons livres ou de fônons, (2) à velocidade média das partículas, (3) ao calor específico e (4) a distância média das colisões, considerando os efeitos acentuados da temperatura na maioria dos materiais. No caso específico dos metais e sílicas, a condutividade térmica aumenta com a temperatura (PADILHA, 2000).

O calor específico define a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de um componente, por unidade de massa. Sua unidade é o J/kg K ou Wh/kg K. Segundo Yannas e Maldonado (1995), a diferença de capacidade de armazenamento de calor entre materiais é revelada quando se analisa a capacidade calorífica volumétrica.

A capacidade calorífica volumétrica, ou seja, a capacidade do material de armazenar energia térmica é, segundo Incropera e Witt (2003), o produto entre a densidade e o calor específico sob pressão constante (C_p), sendo sua unidade J/m³. K .

As variáveis que favorecem ou dificultam o princípio físico da condutividade térmica em materiais sólidos são: diferença de temperatura no meio ($T_1 > T_2$), índice de (α) = difusividade térmica (m²/s), (k) = índice de condutividade térmica (W/(mK)), (ρ) = densidade (kg/m³), (C) = calor específico (J/kg), (e) = espessura (mm).

Dessa forma, a condutividade térmica de um material é diretamente proporcional à sua massa específica. Ao se variar a massa específica de um material, como, por exemplo, empregando-se um aditivo incorporador de ar, ocorre uma redução de sua condutividade térmica. Este princípio é válido para vários materiais, tais como: gesso, madeira, EPS, etc., nos quais se podem observar variações importantes na perda da capacidade de condutividade térmica em relação a sua massa específica. No entanto, existem na construção civil materiais de baixa massa específica, como o alumínio, com alta condutividade térmica.

As ligações entre o silício e o alumínio, possibilitam melhor desempenho na transferência de calor em relação aos teores adicionados de fibras devido à maior

concentração de alumínio, que tem maior afinidade em sua rede de ligações metálicas. Porém, existe uma grande perda de condutividade entre as interfaces dos dois materiais, por terem características físicas de ligações cristalinas no alumínio e arranjo amorfo da sílica com impurezas do basalto.

2.1.5 Condutividade Térmica em Rochas

Os principais elementos presentes na crosta terrestre são Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na e Ti. Os dois elementos mais abundantes, Si e Al, apresentam condutividades térmicas elevadas, ou seja, 148 e 237 Wm/K, respectivamente. Os outros elementos de condutividade térmica considerável são: Ca, Mg, Na, K e Fe, com 200, 156, 141, 102 e 80 W/m K, respectivamente. Em comparação com os elementos citados, o Ti apresenta a menor condutividade, 21,9 W/mK (FIGUEIREDO, 2006).

Os principais elementos formadores de rochas básicas ($\text{SiO}_2 < 52\%$) são: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 , CaO , Na_2O , K_2O , MgO e TiO_2 .

Aspectos macroscópicos permitem avaliar e correlacionar com bom grau de precisão o efeito da mineralogia, das alterações (oxidações, etc), as quais interferem com o aumento ou queda da condutividade térmica. Os litotipos com mais de 20% de quartzo, por exemplo, apresentam condutividades térmicas superiores a 2,5 W/m K.

Os máficos, magmas ou rochas ígneas (extrusivas ou intrusivas), ricas em elementos químicos pesados, nomeadamente em compostos ferro magnesianos e relativamente pobres em sílica, apresentam menor condutividade térmica em relação a todos as demais categorias de rochas.

A sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), é formada pela fusão do silício e oxigênio, sendo os dois elementos mais comuns na crosta da Terra. Trata-se de um polímero inorgânico, consistindo de grupos siloxanos (Si-O-Si) em seu interior, e de grupos silanóis (Si-OH), que forma uma das classes de substâncias inorgânicas mais utilizadas como suporte de uma variedade de sistemas com diferentes ramos de aplicação. A principal propriedade estudada na sílica está relacionada a sua superfície, a qual possui um considerável interesse quanto à adsorção de moléculas.

Figueiredo (2006) demonstra que há excelentes correlações no teor de SiO_2 para se alcançar melhor desempenho em condutividade térmica e a relação entre óxidos máficos e félsicos evidenciam altas condutividades para as rochas ricas em

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$. Rochas com mais de 62% de SiO_2 (ácidas) tendem a apresentar valores de condutividade térmica acima de 2,5 W/m K e rochas com menos de 62% de SiO_2 (intermediárias e básicas) tendem a apresentar valores menores que 2,5 W/m K.

O silício tem orbitais tetragonais como o carbono e quando ele se liga ao oxigênio formando o óxido de silício, forma uma rede tridimensional, pois os oxigênios estão dispostos entre os orbitais eletrônicos do silício, formando um tipo de rede, onde os átomos de oxigênio se entrelaçam com os de silício e os de silício com os de oxigênio respectivamente.

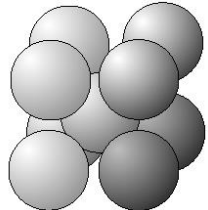
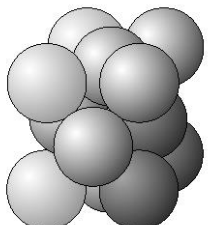
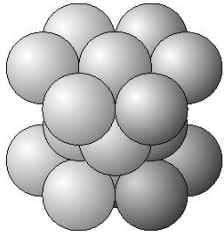
Todos os não metais sólidos têm imperfeições e impurezas, o que pode alterar sua característica de ligação nas camadas eletrônicas, sendo classificados de extrínsecos. Isto interfere diretamente na condutividade térmica, pois as impurezas desempenham uma função importante nos semicondutores. Quando contém pequenas concentrações e controladas de impurezas diz-se que estão dopados. Tais impurezas quebram a regularidade da rede cristalina, afetando os níveis de energia e fornecendo novos portadores de corrente.

2.1.6 Condutividade Térmica em Metais

Os elementos metálicos são bons condutores. Todos os metais possuem geralmente estrutura cristalina e, como tal, apresentam uma disposição regular e ordenada dos seus átomos.

A estrutura interna dos metais pode ser explicada pela teoria dos elétrons livres, Lorentz (1923 apud CORRADE et al., 2010), nessa teoria, a estrutura interna dos metais é formada por cátions em posições fixas interagindo eletrostaticamente com os elétrons. Esses cátions foram formados porque os elementos metálicos necessitam baixas energias de ionização. Devido a isso, os elétrons da camada de valência são ativados e ficam deslocados por todo o retículo, sendo que na maior parte dos elementos metálicos, cerca de 90% resultam em cristalização ao se solidificarem em três estruturas cristalinas compactas, sendo as mais comuns entre os metais demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Tipos de células atômicas na rede cristalina dos metais

Estruturas das células unitárias dos metais					
Sigla	Tipo	Total de átomos por célula	Vol. ocupado pelos átomos na célula	Posicionamento dos átomos na célula	
1.	CCC	Cúbico de Corpo Centrado	$1 \text{ (centro)} + 8 \times 1/8 \text{ (vértices)}$ $= 2 \text{ átomos por célula}$	0,68	
2.	CFC	Cúbico de Face Centrada	$8 \times 1/8 \text{ (vértices)} + 6 \times 1/2 \text{ (faces)}$ $= 4 \text{ átomos por Célula}$	0,68	
3.	HC	Hexagonal Centrado	$2 \times 6 \times 1/6 = 2 \text{ (superior)} + 3 \times 1 = 3 \text{ (intermediária)} + 2 \times 1/5 = 1 \text{ (centro)}$ $= 6 \text{ átomos por célula}$	0,74	

Fonte: UNIOESTE (2014).

A distância entre os átomos ou distância interatômica nas estruturas cristalinas, podem ser determinadas experimentalmente por difração de raios-X. Em uma peça de alumínio puro a 20°C, a distância entre dois átomos de alumínio é 0,2862 nm. Considera-se que o raio do átomo de Alumínio, no Alumínio metálico, é metade da distância interatômica, ou seja, 0,143 nm. Na estrutura da célula unitária CCC, quando 68 % do volume está ocupado pelos átomos, os restantes 32 % é espaço vazio.

Com essa rede cristalina os metais apresentam elevada condutividade elétrica e térmica, quando comparados com os metaloides (semimetais) que possuem características intermediárias entre os metais e os não metais e conduzem, parcialmente, a corrente elétrica. Todos os metais são bons condutores de calor e de corrente elétrica.

Além disso, os metais com condutividades elétricas elevadas, como a prata, o cobre e o alumínio, apresentam também condutividades térmicas elevadas.

As ligações metálicas possuem de um a três elétrons de valência não ligados a um único átomo e têm baixa capacidade de se sustentarem em suas camadas, devido à pequena quantidade de energia necessária para sua ativação nos respectivos níveis deslocáveis da “nuvem eletrônica”. Os metais possuem poucos elétrons na sua camada de valência. Essa camada se estabelece distante do núcleo e, portanto, os elétrons ficam pouco atraídos a ele, o que facilita que esses elétrons da última camada “saltem” entre os átomos, tornando-se elétrons livres transitem no reticulado. Os átomos que perdem os elétrons se tornam cátions, mas logo podem receber elétrons e voltar a se tornar átomos neutros.

Em um metal cada átomo exerce apenas uma fraca atração nos elétrons mais externos da camada de valência, que podem então fluir livremente, proporcionando a formação de íons positivos ou cátions e o estabelecimento de ligações iônicas.

Na condução elétrica, a carga elétrica é transportada de um ponto em um condutor para outro, pela movimentação dos elétrons; na condução térmica, o calor é transportado de um ponto do sólido para outro pela vibração das moléculas do sólido em função do aumento de energia.

Um material condutor é constituído por um elemento, substância ou liga metálica, caracterizado e pode apresentar boa condutividade elétrica ou térmica, alto ponto de fusão e elevada dureza ou maleabilidade. Em geral os metais são os principais condutores térmicos, podendo ser definidos como elementos químicos formados por átomos dispostos geometricamente, que lhe atribui características relativas ao seu caráter metálico.

2.2 A ROCHA DE BASALTO

A análise dos parâmetros físicos de rochas é recente quando comparada com o tempo de utilização destes materiais pelo homem. Em toda história do homem é possível reconhecer grandes obras arquitetônicas, peças de arte, esculturas, materiais de revestimento ou adornos confeccionados por civilizações antigas que procuravam expressar e/ou registrar traços de sua cultura.

As rochas são divididas em três grupos: rochas magmáticas ou ígneas rochas sedimentares e rochas metamórficas.

O basalto – do francês *basaltes*, é uma rocha ígnea eruptiva diretamente derivada da consolidação e esfriamento, relativamente rápido, do magma vulcânico derretido, de granulação fina, formada por pequenos cristais, óxidos de silício, alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio e potássio, com mostra a Tabela 7, usualmente na cor acinzentada escura.

Tabela 7 – Conceitos físico-químicos em agregados de basalto

Componentes	%	C. Térmica	Descrição
SiO ₂	51,38	1,48	Dióxido de Silício
Al ₂ O ₃	16,30	30	Óxido de Alumínio/Alumina
K ₂ O	0,78	102,5	Óxido de Potássio
Na ₂ O	2,53	3,08	Óxido de Sódio
Fe ₂ O ₃	3,23	80,0	Óxido de Ferro (III)/Hematita
CaO	9,75	200,0	Óxido de Cálcio
TiO ₂	1,55	21,09	Dióxido de Titânio
MgO	5,60	156,0	Óxido de Magnésio
MnO	0,17	9,25	Óxido de Manganês

Fonte: Figueiredo (2006).

Quando o resfriamento ocorreu no basalto, a cristalização foi quase completa, sendo constituído de *plagioclásico*, ou clivagem que é forma pela qual, muitos minerais se fragmentam ao longo de dois planos paralelos bem definidos, com *piroxênio (feldspatos)* e em alguns casos por *olivina (peridoto)*, de cor verde-oliva). Os basaltos são abundantes no planeta e formam derrames extensos em muitas regiões (MILITKÝ et al., 2007).

Sua área de ocorrência abrange principalmente o centro-sul do Brasil, desde o Estado do Mato Grosso até o Estado do Rio Grande do Sul, perfazendo 75% de sua distribuição real. Além do Brasil ela se estende ao nordeste da Argentina, leste do Paraguai e norte do Uruguai. É uma depressão, com o eixo maior quase norte-sul, e possui uma área de cerca de 1,5 milhão de km² (GUERRA, 2013).

A simplicidade da tecnologia de processamento do basalto transforma esse insumo em produtos com custo relativamente baixos.

A produção de agregados basálticos apresenta alto desempenho como agregado para o concreto de cimento *Portland*. Complementa esta qualificação a sua refratariedade, resistência a meios agressivos e resistência à abrasão (ÇOPUROGLU et al., 2009).

A mineração de agregados junto a áreas urbanizadas fornece matérias-primas para execução e manutenção das atividades urbanas. A mineração é uma atividade de base para o desenvolvimento econômico e social de um país, pois, nessa atividade são obtidas as matérias-primas para as indústrias e os agregados para a construção civil. Porém, a implantação de tipo de empreendimento implica não só em benefícios, mas também em impactos adversos ao meio ambiente, provocados por resíduos de britagem (RODRIGUES et al., 2005).

Segundo o DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral (BRASIL, 2001), a produção nacional de pedras britadas é a terceira mais importante na produção mineral brasileira, representando 4,22% em valor, sendo superada apenas pela de petróleo (56,30%) e pelo minério de ferro (13,26%).

A produção de pedra britada no Estado do Paraná concentra-se na Região Metropolitana de Curitiba e nas cidades de Cascavel, Guarapuava, Ponta Grossa, Londrina, Arapongas, Maringá, e Campo Mourão, com 60% da produção estadual. O consumo de brita no estado está em torno de 500 kg/hab./ano.

A brita é empregada em grandes volumes de concreto ou artefatos de peças pré-moldadas estruturais, lajes, tubos, placas, obras de arte e em pisos que requerem alta resistência à compressão e a abrasão, altas amplitudes em relação a intempéries climáticas ou ambientes químicos drásticos. Possui alta resistência química com a vantagem de as peças produzidas terem propriedades termo físicas para suportar temperaturas entre - 200 a 900 °C, grandes esforços mecânicos de compressão e na alta resistência à corrosão com pH >7 (BASTOS, 2006).

São livres de efeitos carcinogênicos, não poluem o meio ambiente, e no caso dos resíduos, desde que estejam acondicionadas em locais estanques. Uma das vantagens da aplicação do basalto nas paredes, principalmente nas regiões mais frias do país é a grande inércia térmica das rochas, pois conseguem absorver o calor durante o dia, e liberá-lo durante a noite, evitando assim dias muito quentes e noites muito frias.

O estudo das propriedades térmicas dos minerais e rochas coincide com os primeiros estudos mineralógicos realizados. Entretanto só a partir do século XX ganhou notoriedade e importância com estudos e pesquisas patrocinados em especial pela indústria do petróleo.

A área de geofísica, incentivada por todo esse contexto, desenvolveu-se enormemente mostrando grandes avanços nos métodos diagnósticos das propriedades entre eles a termometria.

No que diz respeito à avaliação da condutividade térmica, Clauser e Huenges (1995), descreveram o comportamento dos quatro grupos de rochas: sedimentares, vulcânicas, plutônicas e metamórficas. A partir de uma análise estatística foram investigadas a variação da condutividade térmica e os principais fatores que influenciam cada grupo de rocha.

No caso específico de rochas sedimentares os fatores determinantes seriam a porosidade e origem da partícula sedimentar, nas vulcânicas seria a porosidade, nas plutônicas a fase mineral dominante e nas rochas metamórficas seriam influenciadas pela anisotropia e pela fase mineral predominante. Estes autores tratam ainda da influência da temperatura e pressão sobre a condutividade térmica para vários tipos de rochas. Para a variável temperatura notou-se uma queda da condutividade térmica com o incremento de temperatura entre 0 e 1000 °C, entretanto, as variações são muito pequenas entre (0 a 100 °C), mostrando que neste intervalo a condutividade térmica sofre insignificante variação.

Outro fenômeno físico analisado foi a organização da rede cristalina e a predominância de cristais, que tende a facilitar a condução de calor. A vibração da rede cristalina e dos elétrons livres são os processos básicos para explicar a condução térmica em sólidos cristalinos e/ou metálicos, portanto aqueles materiais com maior organização cristalina e maior quantidade de elétrons livres, de modo geral, tenderão a possuir maiores valores de condutividade térmica. Assim é fácil perceber que com o aumento da temperatura a organização da rede cristalina ficará comprometida a ponto de prejudicar o fluxo de calor. Portanto em grande parte dos sólidos, inclusive as rochas, quanto maior a temperatura menor será a capacidade de transferir calor.

2.2.1 Microestrutura Petrográfica das Rochas Basálticas

O levantamento efetuado por Rüegg e Amaral (1976) identificou variações regionais da composição química das rochas basálticas da Bacia do Paraná. Foram realizadas cerca de duzentas e trinta e seis análises, quantificando oito tipos diferentes de espécies químicas (SiO_2 , TiO_2 , Fe-total, MgO, CaO, K_2O , Al_2O_3 , Na_2O).

Algumas propriedades dos elementos variam periodicamente em função de suas massas atômicas, raio atômico, potencial de ionização, afinidade eletrônica, eletronegatividade, etc. (FONSECA, 1992). Os elementos químicos estão divididos em cinco categorias, levando-se em conta suas propriedades e características físicas, são elas: metais, semimetais, ametais, gases nobres e hidrogênios, que possui comportamento diferenciado em relações aos demais grupos.

Como não poderia ser diferente, a condutividade térmica dos elementos também varia de acordo com sua característica dentro de um mesmo grupo ou período da tabela periódica.

A concentração de dióxido de silício, SiO_2 (51,38%) contido no basalto é o segundo elemento mais abundante na Terra, depois do oxigênio, constitui aproximadamente 28% da crosta terrestre.

Em seu estado natural, a sílica, pode ser encontrada em diversas formas diferentes. Possui 17 formas cristalinas distintas, dentre elas; o quartzo, o topázio e a ametista. O Silício (do latim *silex*, sílica) foi identificado pela primeira vez por *Antoine Lavoisier* em 1787 e posteriormente considerado como elemento químico por *Humphry Davy* em 1800. Em 1811 *Joseph-Louis Gay-Lussac* e *Louis Jacques Thénard*, que prepararam silício amorfo impuro aquecendo potássio com tetracloreto de silício.

O silício foi isolado pela primeira vez em 1823, pelo químico sueco *Baron Jöns Jakob Berzelius* (1779 - 1848), que desenvolveu a técnica de extrair o silício amorfo empregando um método similar ao de *Gay-Lussac*, purificando depois o produto obtido com lavagens sucessivas até isolar o elemento. Atualmente, o silício é usado frequentemente na área dos semicondutores, pois é termicamente mais estável do que o germânio, em temperaturas ambiente ou de até 150°C. Tal característica reduz perdas de corrente e energia, elevando o rendimento e simplificando os métodos de arrefecimento nos dispositivos construídos com esse material.

Juntamente com sua abundância, o baixo custo justifica o amplo uso da sílica como matéria prima, desde a construção civil, até a produção de componentes semicondutores, apesar de existir outros componentes mais eficientes destinados à condutividade elétrica ou térmica.

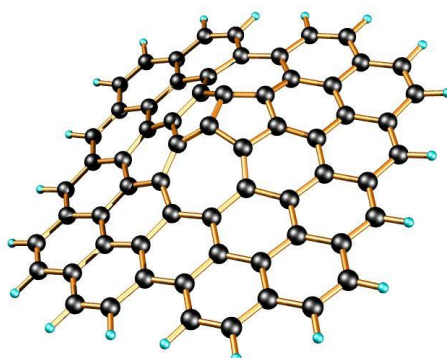
O silício produzido para uso da indústria assume a forma de tarugos, que são então fatiados para produzir finas lâminas em sua forma natural, é encontrado em rochas ou minérios. A areia é composta em parte por silício, entrando também na composição de

diversos isolantes, como o vidro. A areia não é própria para a obtenção do silício como insumo, devido ao alto índice de impurezas.

O processo de purificação do silício, necessário a fim de se obter alta pureza para produção de componentes semicondutores, é bastante complexo, utilizando seu composto mais característico que é o dióxido de silício (SiO_2). Sendo encontrado livre na natureza deve atravessar processos de isolamento a fim de resultar em rede cristalina ou amorfa, dependendo do processo usado para seu uso como produto de base em diversos tipos de dispositivos semicondutores.

O silício amorfo é um pó de cor marrom e o cristalino é uma substância de cor negra, frágil, quebradiço, de brilho metálico e quimicamente bastante inerte sua estrutura ou rede molecular com dopagem de alumínio esta demonstrada (Figura 3).

Figura 3 - Estrutura de ligações do silício com dopagem de alumínio



Fonte: Portnoi (2014).

2.2.2 Condutividade Térmica do Basalto

O semicondutor é basicamente um material de condutividade intermediária entre isolantes e condutores. Em baixas temperaturas, semicondutores (puros) comportam-se como isolantes. Em altas temperaturas, por exposição à luz ou ainda com adição de impurezas, sua condutividade pode ser aumentada dramaticamente, alcançando valores próximos aos dos metais. Isto é devido ao aumento no número de elétrons de condução, que são portadores da corrente elétrica.

Para a produção de qualquer dispositivo que atue como semicondutor, a interação entre materiais semicondutores deve ser em escala molecular, absolutamente precisa.

São utilizados, elementos tais como: germânio, silício, selênio ou arseneto de gálio, com o nível de pureza condizente com o nível técnico adotado durante sua manipulação.

Nos minerais, a condutividade térmica está relacionada às características físicas naturais e na composição química de seus elementos, sendo alguns minerais mais favoráveis a condução de calor do que outros. Ela é uma propriedade vetorial e depende da composição e estrutura interna do cristal (CLAUSER; HUEGES, 1995).

Todos os sistemas cristalográficos, exceto o sistema cúbico, são anisotrópicos, ou seja: o calor propaga-se diferentemente nas diversas direções, ou quanto maior o valor da condutividade térmica de um mineral maior será sua habilidade em conduzir calor, estando sempre relacionada às suas características físicas, químicas e cristalográficas.

Segundo Clauser e Hueges (1995), os minerais são melhor analisados quando se usam rochas como amostras em temperatura ambiente. Outros autores, Guéguem e Pauciauskas (1992) mostram ainda a correlação da condutividade térmica com outros parâmetros físicos como: massa atômica, densidade e pressão, etc.

Os dois elementos da tabela periódica que exibem os valores extremos de condutividade são a Prata (Ag) com 429 W/mK e o Radônio (Rn) com 0,00364 W/mK, mostrando assim uma diferença de comportamento de aproximadamente 120.000 vezes entre ambos. É importante destacar que estas condutividades térmicas são referentes às condições normais de temperatura e pressão (CNTP), obviamente deve ser considerando o estado físico dos elementos nestas condições.

Dessa forma a condução térmica em sólidos se dá principalmente por vibração da rede cristalina e/ou pelos elétrons de condução (INCROPERA; WITT, 2003). Destaca-se ainda que aquelas substâncias com maiores números de elétrons livres tenderão a potencializar a condução térmica como o caso dos metais que, associado ao tipo de ligação (metálica), justificaria suas altas condutividades térmicas.

2.2.3 Produção e Resíduos da Indústria do Alumínio

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais recentemente usado em escala industrial. Necessita de intenso processo de refinamento, pois não é extraído diretamente em estado metálico na crosta terrestre.

Inicialmente obtido em laboratório, a produção de alumínio em escala industrial somente foi possível a partir de 1886 quando o norte americano, *Charles Martin Hall* -

(1863 – 1914), e o francês, *Paul Louis Toussaint Héroult* (1863 – 1914), obtiveram o metal puro a partir da dissolução eletrolítica de óxido de alumínio (alumina), imerso em “criolita”.

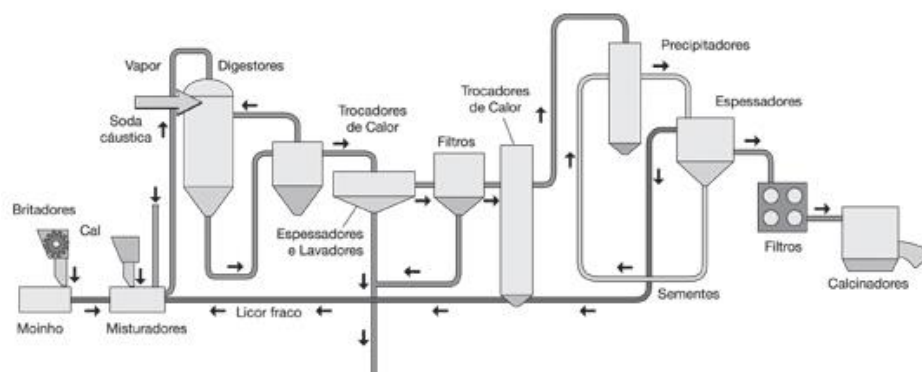
O processo *Hall-Héroult*, como é conhecido, ainda é o principal processo de produção de alumínio. Sua obtenção se inicia com a mineração de bauxita, que pode ser encontrada em três principais grupos climáticos: o Mediterrâneo, o Tropical e o Subtropical.

Para que seja economicamente viável, a bauxita extraída deve conter o mínimo de 30% em óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), sendo que, as reservas brasileiras além de apresentarem alta qualidade do minério nas jazidas, estão entre as maiores do mundo.

No Brasil, a produção do alumínio, teve início com a instalação da Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio em 1917, ano em que a produção mundial do alumínio atingiu seu primeiro milhão de toneladas. Já a instalação das primeiras fábricas de alumínio primário no País ocorreu a partir dos anos 1950.

As etapas de produção do alumínio envolvem a mineração nas jazidas, processamento e refinaria, demonstrada na Figura 4, da bauxita para obtenção do alumínio primário (alumina – óxido de alumínio – Al_2O_3) que tem diversas aplicações e a redução da alumina calcinada que ocorre em cubas eletrolíticas, a altas temperaturas, sendo necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de metal primário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO 2012).

Figura 4 – Fluxograma industrial para refinaria transformar a bauxita em alumina



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2012).

Dentre os processos de refinamento, a têmpera altera uma condição aplicada ao metal ou liga, por meio de deformação plástica a frio ou tratamento térmico, propiciando-lhe estrutura e propriedades mecânicas características. A expressão não tem qualquer

ligação com a usada nos produtos de aço, material tratado termicamente para aumentar suas propriedades mecânicas.

Ainda que a resistência original possa ser aumentada agregando-se certos elementos, as propriedades mecânicas das ligas, com exceção de algumas para fundição, não dependem apenas da sua composição química. Semelhante a outros metais, o alumínio e suas ligas endurecem e aumentam sua resistência quando trabalhadas a frio, como uma chapa laminada. Existem ligas de alumínio, que possuem a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas apenas no trabalho a frio.

O alumínio pode sofrer vários tipos de processamento devido a sua maleabilidade, usinagem de tarugos ou placas em torno mecânico, podendo ser cortado por diversos tipos de serra ou ferramentas, estampagem em prensas, embalagens utilizando o estiramento para diminuir sua espessura e transformá-lo em folhas de flandres.

Assim, as ligas de alumínio são divididas convenientemente em dois grupos: as ligas "*tratáveis*" termicamente, propiciando-lhes maior resistência, e as ligas "*não tratáveis*" termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio.

As ligas tratáveis termicamente podem ser trabalhadas a frio e, posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica. As ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos de estabilização com recozimentos plenos ou parciais.

As características físicas e químicas do alumínio possibilitam diversos usos quando entrelaçados quimicamente com outros elementos no estado natural ou modificado. Suas propriedades físicas comparativamente as do silício estão demonstradas na Tabela 8, possibilitando diversas combinações atômicas com outros materiais inertes.

Tabela 8 – Estrutura física e química do silício e do alumínio

Propriedades Físico-químicas dos: Silício e Alumínio			
	Propriedades	Silício	Alumínio
1.	Classificação	Mineral	Metal
2.	Número atômico Z	Z =14	Z = 13
3.	Peso Atômico	28,1	26,98
4.	Massa Específica (g/cm ³)	2,33	2,70
5.	Constante dielétrica relativa, ϵ_r	12	1,70
6.	Átomos/cm ²	5,0.10 ²²	6,0.10 ²³
7.	E_{G0} a 0 K (eV)	0.7437eV a 4.774×10^{-4} eV/K	
8.	E_G a 300 K (eV)	8.61×10^{-5} eV/K	
9.	Conc. de portadores intrínsecos, n_i (cm ⁻³)	1,5.10 ¹⁰	1,0-10 ¹⁰
10.	Resistividade intrínseca a 300k (ohm.cm)	2,3.10 ⁵	1.21 x 10 ²
11.	Mobilidade de elétrons, μ_n (cm ² /V-s)	1300	1350
12.	Difusidade de elétrons, $D_n = \mu_n V_T$ (cm ² /s)	0,785 eV	1,21 eV
13.	Difusidade de lacunas, $D_p = \mu_p V_T$ (cm ² /s)	1,010 ¹³ m ² /s	1,300 ¹³ m ² /s
14.	Massa molar	M = g/mol	M=26,9815g/mol
15.	Isótopo natural	10Si (100%)	27 Al (100%)
16.	Calor específico	0,712 kcal/kg °C	0,214 kcal/kg °C
17.	Ponto de fusão	2.355°C	$T_f = 660$ °C
18.	Ponto de ebulição	3.538 °C	$T_e = 2467$ °C

Fonte: UFSCAR (2014).

2.2.4 Ligação Atômica do Alumínio

O átomo do alumínio, demonstrado na Figura 5, em 13 prótons e 13 elétrons, cria afinidade devido as ligações trivalentes criando lacunas que serão com elementos o átomo.

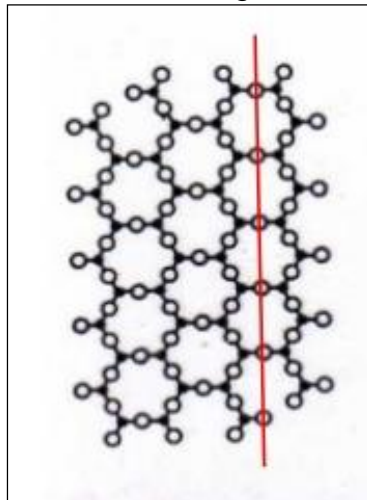
O ordenamento dos átomos amorfos em um sólido amorfo aparentemente são átomos que não possuem ordenamento de átomos ou íons de curto alcance.

Desconsiderando as imperfeições que um material possui, existem três tipos de arranjos atômicos:

- Os átomos sem ordem preenchem aleatoriamente o espaço no qual o material está confinado se dando principalmente nas substâncias gasosas.
- Os átomos de curto alcance exibem ordenamento se estende até os átomos vizinhos, ou mais próximos como nos vidros e polímeros.
- Os átomos de longo alcance se estendem através de todo material e formam um padrão regular, repetitivo, como grades ou redes.

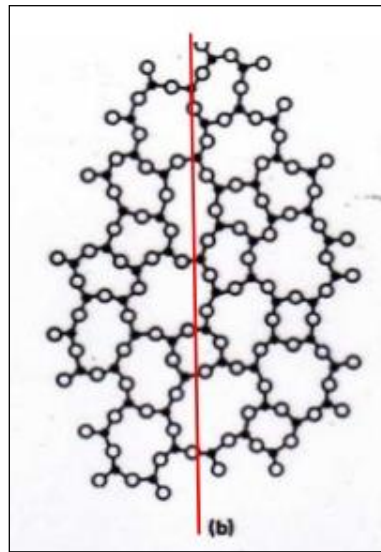
As evidências de que os metais possuem estrutura cristalina vão desde a observação de metais nativos, com formas geométricas peculiares, passando por espectrômetros obtidos por difração de raios-X, até a observação direta da própria estrutura em microscópio. A lapidação das gemas ou rearranjo da estrutura molecular pode ser listada entre as consequências da existência da rede cristalina em minerais ou a deformação plástica em metais. Tanto a clivagem quanto a deformação plástica se dão em certos planos da rede. As Figuras 5 e 6 demonstram a estrutura cristalina dos átomos existentes nos metais:

Figura 5 – Estrutura de ordenamento cristalina de átomos ou íons de curto ou longo alcance



Fonte: Silva (2006).

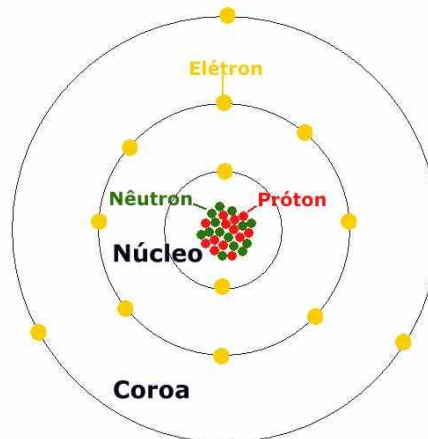
Figura 6 – Estrutura de ordenamento amorfo de átomos ou íons de curto alcance



Fonte: Silva (2006).

Para avaliar o grau de repetição de uma estrutura cristalina é necessário definir a unidade estrutural que está sendo repetida, que é chamada de célula unitária. A principal característica da célula unitária é que esta apresenta a descrição completa da estrutura como um todo, incluindo a estequiometria. O arranjo dos átomos do alumínio (Figura 7) é mais estável por ser um metal, porque minimiza a energia livre por unidade de volume ou, em outras palavras preserva a neutralidade elétrica da ligação, favorece o caráter direcional das ligações covalentes, minimiza as repulsões íon-íon e, além disso, agrupa os átomos do modo mais compacto possível (MOREIRA, 2005).

Figura 7 - Esquema do átomo de alumínio (13) e seus elétrons trivalentes que formam as camadas externas de valência e criam lacunas



Fonte: Piropo (2005).

Um íon pode ser de dois tipos: íon positivo (P - trivalente) quando o átomo perdeu um ou mais elétrons e íon negativo (N - pentavalente) quando o átomo ganhou um ou mais elétrons. No átomo, os prótons e nêutrons estão concentrados formando o núcleo, porém os elétrons agrupam-se ao redor do núcleo em forma de camadas. Estas camadas têm um número máximo de sete, e são designadas pelas letras K, L, M, N, O, P, Q.

Cada camada pode ter um número máximo de elétrons e esses são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Número máximo de elétrons por camada

Nº da camada	Designação	Nº máximo de elétrons	Energ. de ionização (KJ/mol)
1º	K	2	577,5
2º	L	8	1816,5
3º	M	18	2744,8
4º	N	32	11577,0
5º	O	32	14842,0
6º	P	18	18379,0
7º	Q	8	23326,0

Fonte: UNIOESTE (2014).

Se a dopagem do silício for feita com um elemento do grupo 13, contidos na Tabela 10, veremos que são elementos com três elétrons na camada de valência. Sendo assim, a presença de um elemento desses num cristal de Si criará uma lacuna ou buraco na camada de valência do material. Como o buraco tem carga positiva, o material resultante será um semicondutor tipo P.

Tabela 10 – Configuração eletrônica de elementos do grupo 13 (IIIA)

Elemento	Tipo	N. atômico	Configuração
B – Boro	semimetal	5	$1s^2 2s^2 2p^1$
Al – Alumínio	metal	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Ga – Gálio	metal	31	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 4p^1$
In – Índio	metal	49	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^1$

Fonte: UFSCAR (2014).

Na Tabela 11 vemos que os elementos do grupo 15 apresentam cinco elétrons na camada de valência. Se um elemento deste grupo, como o fósforo, for introduzido em diminuta quantidade num cristal de Si, o quinto elétron de P não estará na camada de valência por esta já estar completamente preenchida. Sendo assim, esse elétron estará

livre para se mover sob a ação de um campo elétrico aplicado, através de corrente elétrica ou energia térmica.

O Silício dopado com elemento do tipo P terá comportamento semicondutor mesmo em baixas temperaturas. Como o elétron possui carga negativa, esse semicondutor dopado será um semicondutor do tipo N.

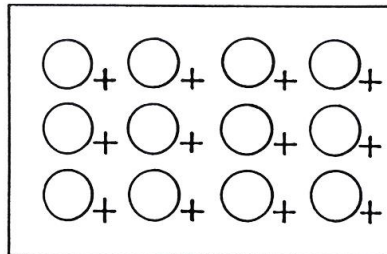
Tabela 11 – Configuração eletrônica de elementos do grupo 15 (VA)

Elemento	Tipo	N. atômico	Configuração
N – Nitrogênio	Não-metal	7	$1s^2 2s^2 2p^3$
P – Fósforo	Não-metal	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
As – Arsênio	semimetal	33	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 4p^3$
Sb – Antimônio	semimetal	51	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^3$

Fonte: UFSCAR (2014).

Para a criação de um cristal tipo P em semicondutores, uma das impurezas utilizadas é o alumínio. A Figura 8 mostra um bloco representativo do elemento P.

Figura 8 - Bloco representativo do elemento P



Fonte: PERIODICIDADE... (2014).

Os pequenos círculos representam os átomos trivalentes e os sinais positivos fora dos círculos são as lacunas criadas por eles. Facilmente, a dopagem criará no cristal, tantos elétrons livres ou lacunas quantos forem os átomos de impurezas doadoras ou aceitadoras introduzidas.

Assim, quanto menor for a energia de ligação, mais facilmente serão removidos os átomos ligados de suas posições de equilíbrio e mais facilmente serão afastados do que aproximados, representando a força total em função da distância interatômica para alta e baixa energia de ligação.

Porém, quando a energia térmica é incorporada, os átomos não estão parados em suas posições de equilíbrio. Eles vibram e quanto maior a temperatura maior a amplitude

da vibração, sendo que a amplitude da vibração também depende da energia de ligação. Quanto maior a energia de ligação menor é a amplitude de vibração.

Em baixas temperaturas os átomos permanecem parados, tornando alguns materiais isolantes, pois os átomos permanecem em seus pontos de equilíbrio, criando lacunas que permitam a transferência de elétrons e conseqüentemente de energia.

Quando um átomo de alumínio se liga com um cristal de silício (Si), rodeado por quatro átomos, cede parte dos elétrons para preencher a camada (M) e o átomo de alumínio forma quatro ligações covalentes para preencher o seu nível de valência, quanto menor for a diferença de eletronegatividade maior será a intensidade das ligações covalentes.

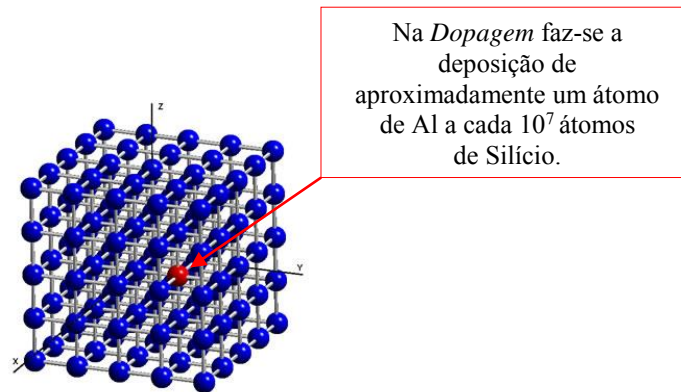
O principal processo que dá características aos semicondutores de se tornarem a principal matéria prima da eletrônica em larga escala é a *dopagem*.

O processo consiste primeiramente em purificar os átomos de silício e posteriormente recolocar impurezas em baixíssimas proporções e, quimicamente, introduzir no retículo cristalino do semicondutor um átomo de outra substância, que virá a substituir o átomo original da substância semicondutora.

A diferença no número de elétrons de valência entre o material dopante (sejam doadores ou receptores de elétrons) e o material semicondutor resultará em portadores negativos (semicondutor tipo *n*) os elétrons são maioria e as lacunas (buracos) são minoria, nos semicondutores positivos (semicondutor tipo *p*) os elétrons serão minoria e as lacunas (buracos) serão a maioria.

A Figura 9 demonstra a dopagem com elementos doadores ou aceitadores na estrutura cúbica do átomo de silício.

Figura 9 - Dopagem com elementos doadores ou aceitadores na estrutura cúbica do átomo de silício



Fonte: Silva (2006).

A dopagem pode ser feita durante o crescimento do cristal, por liga, por implantação iônica, ou difusão.

Durante o *crescimento do cristal*, o material de base sofre um aquecimento até se transformar em massa cristalina fundente, estado em que se efetua o acréscimo do material de dopagem. Durante esse processo térmico, o cristal cresce, posicionando-se os átomos da dopagem na própria cadeia cristalina que se forma.

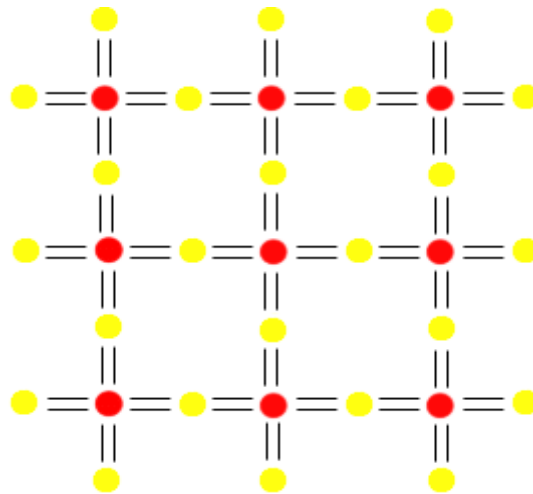
Por *liga*, o material de base é levado à fusão conjuntamente com o de acréscimo, formando-se assim uma liga. Após essa formação e esfriamento, os dois materiais estarão agregados.

Por *implantação iônica* os átomos eletricamente carregados com íons de material dopante em estado gasoso são acelerados por um campo elétrico e injetados na cadeia cristalina do semiconductor. O método da implantação iônica é o mais preciso e o mais sofisticado entre os mencionados, permitindo um ótimo controle tanto de posicionamento quanto de concentração da dopagem feita.

Por *difusão*, vários discos do semiconductor tetravalente básico, como o silício, são elevados a temperaturas da ordem de $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, nessas condições, colocados na presença de metais em estado gasoso, como o boro. Os átomos do metal em estado gasoso difundem-se no cristal sólido. Sendo o material sólido do tipo *n*, cria-se, assim, uma zona *p*. Este conceito é demonstrado na Figura 10 de um cristal de silício dopado. Cada cristal de silício tem quatro elétrons de valência. Dois são necessários para formar

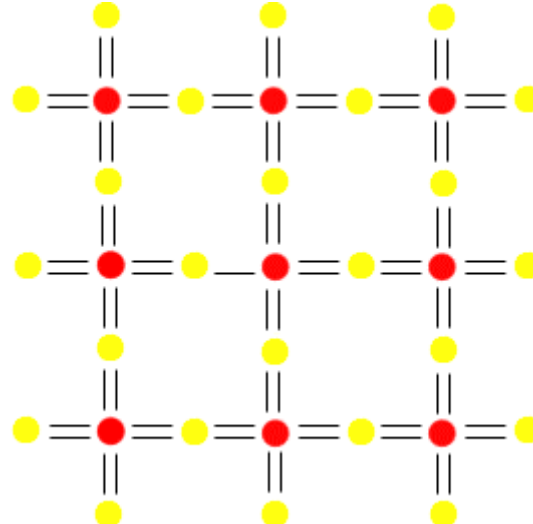
uma ligação covalente. No silício tipo n, um átomo de fósforo com cinco elétrons de valência substitui alguns átomos de silício e provê elétrons extras (Figura 11). Num silício tipo p, o alumínio, com três elétrons de valência, substitui um átomo de silício, resultando numa deficiência de elétrons ou lacuna, que atuam como cargas positivas ou portadores de carga positiva (Figura 12).

Figura 10 - Conjunto de átomos de silício com quatro elétrons na última camada



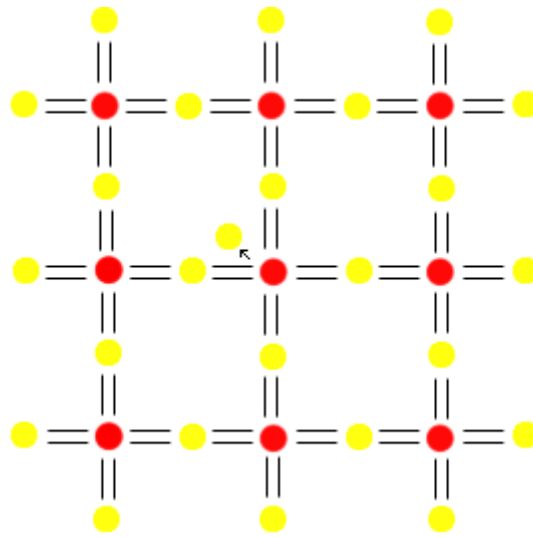
Fonte: USP (2014).

Figura 11 - Conjunto de átomos de silício trivalente gerando uma lacuna na rede cristalina



Fonte: USP (2014).

Figura 12 - Conjunto de átomos de silício trivalente e uma impureza pentavalente que gera um elétron livre



Fonte: USP (2014).

Outra forma de tornar o Si semiconductor é através do aumento de temperatura, que tende a reduzir o *gap* de energia da banda proibida, pelo qual através da adição de calor são produzidos portadores de carga. Os portadores de carga tanto podem ser os elétrons livres como os buracos deixados por eles na camada de valência. Neste caso, como a ausência de uma carga negativa cria um desequilíbrio de cargas na camada de valência, passando o buraco a ser tratado como carga positiva.

A condutividade elétrica aumenta com a temperatura, devido a criação de pares elétrons livres/lacunas e estes materiais são chamados semicondutores intrínsecos.

O mecanismo de ativação térmica para criação de portadores de carga ocorre à medida que a temperatura aumenta, quando alguns elétrons de valência adquirem energia térmica maior do que o *gap* de energia, move-se para a banda de condução, ficando livres pelo fato de se moverem sob a ação de um campo elétrico aplicado, mesmo que em pequena intensidade.

A ausência de um elétron na banda de valência resulta em lacuna que serve como portador de carga comparável em efetividade ao elétron livre. Como o *gap* de energia da banda proibida é uma função do espaçamento interatômico, também não é surpreendente que E_G dependa da temperatura, pois o aumento de temperatura faz com que o espaçamento interatômico aumente. A relação de E_G com a temperatura para o Si foi proposta por Millman e Halkias (1967) e pode ser descrita na equação abaixo:

$$E_g = 121 - 360 \cdot 10^{-4} T \quad (3)$$

de modo que na temperatura ambiente ($T = 300 \text{ K}$), $E_G = 1,1 \text{ eV}$.

Da Equação acima se pode observar que o coeficiente de temperatura do silício é negativo (material NTC – negative temperature coefficient), sendo que este efeito é utilizado para medição de temperatura.

A condutividade do silício aumenta aproximadamente 8% a cada grau de aumento na temperatura. Devido a esta grande variação da condutividade com a temperatura, impõe-se um limite no uso de semicondutores em alguns circuitos sujeitos a altas temperaturas. Por outro lado, para algumas aplicações esta propriedade é utilizada para medição de temperatura. Um dispositivo semicondutor utilizado desta maneira é denominado *termistor* de resistência que pode assumir duas características: NTC - Negative Temperature Coefficient e PTC - Positive Temperature Coefficient.

O germânio e o silício não são utilizados como *termistores* por causa da sensibilidade de suas propriedades com as impurezas. Os *termistores* comerciais utilizam misturas sintetizadas de óxidos de metais de transição, tais como, NiO, Mn₂O₃ e Co₂O₃.

2.3 PRODUÇÃO DE MATERIAIS E CONSUMO DE ENERGIA

Todos os materiais de construção recebem algum tipo de processamento que demanda energia e de alguma maneira impacta o meio ambiente.

O termo “Energia incorporada” é utilizado para mensurar o impacto ambiental das construções. É fator considerado quando se tomam decisões referentes à escolha de materiais (ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2009), e característica importante na busca da eficiência energética.

Essa energia é considerada como toda aquela usada para a fabricação dos materiais usados no espaço construído, o que inclui desde a extração até seu destino e uso final no sítio da obra. Inclui ainda, a energia usada para extrair a matéria prima para o processo de fabricação, e para o transporte da matéria prima para a fábrica e o produto final para o consumidor (MENEZES, 2000 apud ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2009; TAVARES, 2006).

Materiais de fontes locais reduzem a energia incorporada e as emissões pelo transporte. Porém, materiais transportados de grandes distâncias só se justificam por serem mais duráveis ou que se utilize de sistemas logísticos, voltados a produtos de maior valor. Este parâmetro faz diferença ao se avaliar a energia compensada durante a vida útil na produção do insumo ou produto (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Comparativamente o consumo de energia necessário para a produção entre o cimento (1.500 Kg/m³/6,5 a 11,7 GJ/m³), Agregados naturais (1500 Kg/m³/0,05 a 0,93 GJ/m³), argamassa (~1.200 Kg/m³/1,3 a 8 GJ/m³), Aço (7800 Kg/m³/190 a 460 GJ/m³), aponta para o fato de que a quantidade de energia incorporada necessária ao processamento do material determina seu custo final (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Tabela 12 – Energia embutida na produção em materiais da construção civil (Índice Brasileiro).

	Materiais	EE (MJ/Kg)	EE (MJ/m ³)
1	Aço – laminado CA 50 ^a	30,00	235.500,00
2	Alumínio – lingote	98,20	265.140,00
3	Alumínio - anodizado	210,00	567.000,00
4	Alumínio reciclado - extrusado	17,30	46.700,00
5	Basalto – britado	2,00	5.400,00
6	Cimento <i>Portland</i>	4,20	8.190,00

Fonte: Tavares (2006).

O tempo de vida energético de uma edificação é dividido em produção – incluindo todos os processos desde a extração de matéria prima, produção de componentes na fábrica, construção, operação, manutenção e demolição (THORMARK, 2001), sendo que a energia incorporada pode chegar a 40% de toda aquela que é consumida durante a vida da edificação, tomando por base um ciclo de vida de 50 anos.

Como exemplos, a fabricação de cimento gera grandes quantidades de dióxido de carbono, o alumínio consome grandes quantidades de energia elétrica, as cerâmicas vermelhas utilizam madeira, e aços e ferros fundidos consomem carvão mineral e também emitem gás carbônico. A energia incorporada é usada como um indicador de sustentabilidade das edificações, já que a fabricação de materiais de construção é frequentemente a principal fonte de emissões de gases poluentes (TAVARES, 2006).

Essa energia empreendida nos materiais para caracterizá-lo, faz com que determinadas configurações sejam incorporadas a sua estrutura física.

Como exemplo, a produção do alumínio envolve composições e agrupamentos a nível molecular durante sua produção que sua matéria prima anteriormente não possuía, atribuindo-lhe características vantajosas de condutividade em suas ligações metálicas.

Atualmente, com a produção de britas se acentua a produção de agregados miúdos pela moagem de rochas, tanto basálticas quanto graníticas.

Segundo Bauer (1979), por se produzir um material menos homogêneo em relação ao tamanho dos agregados, torna-se necessária sua caracterização granulométrica para fabricação de concreto ou argamassas e determinar as proporções ideais dos agregados, e alcançar as características físicas desejadas nos resultados finais durante a mistura.

D'Agostino e Soares (2001), originalmente analisaram agregados miúdos obtidos pela moagem de rocha, então denominados finos de britagem, com granulometrias inferiores a 4,8 milímetros, eram derivados dos processos de perfuração, detonação e moagem de rochas. A sua principal origem está ligada as areias de basalto, geradas em pedreiras e englobam agregados com essas granulometrias.

Esses agregados são definidos como agregados miúdos ou pó de pedra e são normatizados. Nos últimos anos, diversas alternativas tecnicamente viáveis foram desenvolvidas para sua utilização econômica na construção civil.

A NBR 7211:2009 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009a) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. No seu texto original, define a máxima quantidade de material que passa pela peneira #200 (abertura 75 μm) em 3% (para concreto submetido a desgaste superficial) e 5 % (para concreto protegido do desgaste superficial). Em sua versão mais atual, estes limites foram ampliados para 10% e 12%, respectivamente (GUERRA, 2013).

Nesta conjuntura, profissionais da construção civil e usuários utilizando equipamentos com maior eficiência e adequação de projetos com elementos naturais de conforto e materiais certificados, adotariam práticas construtivas que preservem jazidas naturais com o reaproveitamento de resíduos gerados em seu próprio ciclo de produção.

O Alumínio, da palavra latina *alumen*, nome dado a um dos seus sais, o sulfato de alumínio, é conhecido a mais de 7.000 anos. Os egípcios e babilônios usavam compostos de alumínio como ingrediente no preparo de vários produtos químicos e medicinais.

Em 1807, *Humphry Davy*, pesquisador inglês, tentou isolar este metal utilizando o Óxido de Alumínio (Al_2O_3), convencido que havia neste composto “base metálica” e não

tendo sido capaz de isolar o alumínio metálico, ele o chamou de *aluminium*, tornando-se depois *aluminum*.

Somente em 1825, o alumínio metálico foi isolado em laboratório. Ørsted, estudando a ação da corrente elétrica, tentou isolar o alumínio a partir da alumina ou óxido de alumínio, preparando o cloreto de alumínio ($AlCl_3$). Este cloreto foi tratado com uma amálgama de potássio (liga de potássio com mercúrio). Desta forma ele obteve uma amálgama de alumínio. Por aquecimento, esta liga foi decomposta nos seus constituintes: mercúrio e alumínio. Sendo o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, seus compostos acham-se concentrados nos 15,0 km mais externos da crosta e corresponde a cerca de 8% em massa da mesma e menos abundante do que o oxigênio e o silício.

Seu minério mais importante é a bauxita. Muitos dos seus compostos encontrados na natureza têm valor de pedras preciosas: rubis, safiras, topázios, crisoberilos, etc.

Como metal não ferroso o alumínio é um bom condutor térmico e elétrico, levando em consideração a sua baixa densidade quando comparado a outros materiais condutores. Quando puro, com teores de 99,996%, é maleável e pouco resistente à ruptura. No entanto, grande parte do alumínio produzido tem ordem de pureza entre 90,0 e 99,0%, formando ligas com pequenas quantidades de ferro e silício. Estas ligas são duras e fortes. Esse processo exige grandes quantidades de energia tanto na mineração quanto na refinação.

Como metal bastante reativo, não só o alumínio puro como suas ligas são resistentes à corrosão, formando-se uma película protetora sobre sua superfície de óxido que o protege, sendo muito utilizado na construção civil.

O Brasil possui importantes jazidas de bauxita e vários outros compostos necessários a produção de alumínio, sendo os Estados Unidos da América do Norte seu maior produtor.

2.3.1 Características Físicas dos Agregados para Construção Civil

O termo britagem se aplica quando a redução de tamanho envolvida visa a obtenção de produtos com granulometria superior a 10 milímetros. A britagem se desenvolve em estágios subsequentes denominados britagem primária, secundária, terciária e eventualmente quaternária. Em cada estágio obtém-se uma determinada

relação de redução, definida pelo quociente da dimensão da alimentação pela dimensão do produto. A relação ideal é de 4:1.

Os mecanismos envolvidos compreendem basicamente impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são os britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de rolos e de impacto horizontal e vertical. Já a moagem se aplica quando a redução de tamanho envolvida visa a obtenção de produtos com granulometria inferior a 10 milímetros. A moagem também se desenvolve em estágios subsequentes, considerando-se as relações de redução pertinentes. Os mecanismos envolvidos compreendem basicamente impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos mais usados são os moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolos e de impacto.

O peneiramento é um processo mecânico de separação de partículas que se utiliza de uma superfície perfurada para tal. As partículas com dimensões superiores à da abertura considerada tendem a ficar retidas na superfície, e as com dimensões inferiores tendem a atravessar a mesma. Os mecanismos envolvidos compreendem basicamente estratificação e segregação. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são as peneiras vibratórias, rotativas e estáticas.

A avaliação das características das partículas é de vital importância no tratamento dos agregados. Em alguns casos torna-se simples quando se busca uma adequação de tamanho. Em outras situações torna-se mais complexo quando representa uma variável de controle nos processos de cominuição, classificação ou concentração.

A redução de tamanho é de vital importância no processamento mineral. Um minério deve ser cominuído até que os minerais úteis contidos sejam fisicamente liberados dos minerais indesejáveis. Por vezes, a redução de tamanho visa apenas a adequação às especificações granulométricas estabelecidas pelo mercado. Em todos os casos, a cominuição é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional. Desta forma, a compreensão dos mecanismos de fratura, quer de uma partícula isolada, quer de uma distribuição de partículas permitirá se atingir a granulometria desejada.

Na maioria das solicitações a cominuição tem por meta a liberação física dos diferentes minerais presentes no minério, de forma a permitir sua concentração. O tamanho da partícula é usualmente utilizado para medir a extensão ou grau de liberação. As partículas obtidas nos processos de redução de tamanho de cada partícula, o tamanho

médio das partículas, o formato, a distribuição de tamanhos, os minerais e as associações minerais presentes nas mesmas.

A liberação é um pré-requisito para uma perfeita separação, embora em muitos casos o propósito de uma liberação completa não seja praticável. A separação depende de três fatores: propriedades do material, características do separador, nível de produção e grau de recuperação. O tratamento dos minerais se preocupa basicamente com a separação de partículas, baseando-se nas variações relativas de tamanho e composição. Essa separação é obtida pela passagem de fluxo de partículas através de uma peça apropriada de um equipamento denominado separador. Nesse processo, uma força adequada é aplicada nas partículas e, devido as diferentes propriedades apresentadas como: tamanho, formato, densidade, etc., elas são afetadas de forma e intensidade diferenciadas, resultando na separação pretendida.

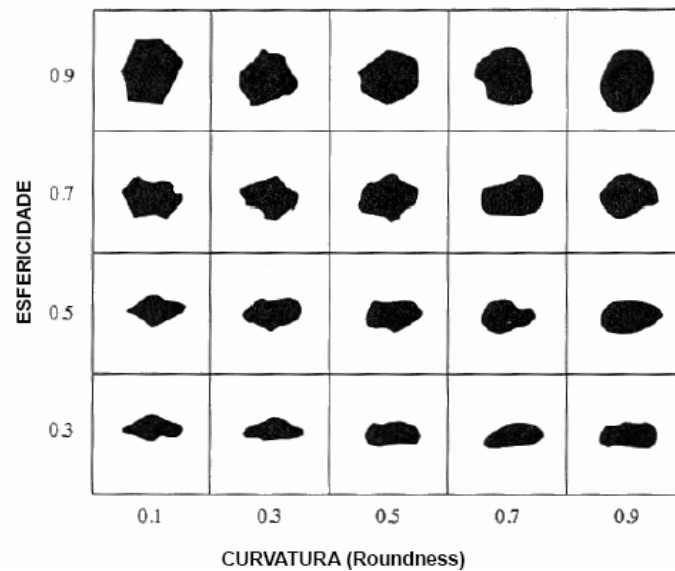
A concentração é um processo que tem a recuperação dos minerais úteis contidos num minério na forma mais concentrada possível. A seleção do método de concentração depende da natureza do minério, bem como das diferentes propriedades dos elementos a ser separados. Dentre essas propriedades se destacam o tamanho relativo das partículas, cor, densidade, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, permeabilidade superficial e solubilidade.

O processo de britagem de basalto na produção de agregado para construção civil produz enorme quantidade de resíduos com granulometria próximas ao pó de pedra.

A forma das partículas dos agregados afeta o comportamento dos materiais aglutinados com matriz de cimento, altera a trabalhabilidade, ângulo de atrito interno em estado fresco, compacidade, resistência, etc. Essas propriedades estão relacionadas à hidratação de amassamento (NIEBEL, 2008).

A forma das partículas do agregado pode ser descrita pelo uso de dois parâmetros designados por esfericidade e curvatura que tem sido usado para caracterização dos grãos, conforme demonstra a Figura 13.

Figura 13 - Formato das partículas (agregados)

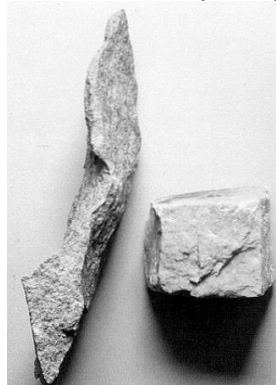


Fonte: St John; Poople; Sims (1998).

A esfericidade é dada pelo diâmetro da partícula e pela DMC – Dimensão Máxima Característica, corresponde à abertura nominal (mm) da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. A curvatura é o raio médio das extremidades e limites pelo raio de circunferência máxima inscrita de cada partícula.

Genericamente, considera-se que as partículas com elevada esfericidade e menor angulosidade (com baixo valor do parâmetro curvatura) são as ideais para produção de concreto e argamassa em comparação as partículas lamelares e alongadas (ST JOHN; POOPLE; SIMS, 1998), conforme a Figura 14.

Figura 14 - Agregado alongado lamelar (indesejável) e agregado arredondado (desejável)



Fonte: St John; Poople; Sims (1998).

A lamelaridade de um agregado, segundo a Norma BSI 812 Section 105.1/89 Determination of particle shape - Flakiness index e EN 933-3/97 Tests for Flakiness properties of aggregates, é que uma partícula é considerada lamelar quando a sua espessura é menor que 0,6 mm da sua dimensão nominal (média das aberturas das peneiras limites da fração da partícula). O índice corresponde à relação da massa das partículas lamelares pela massa da amostra.

Uma partícula é considerada alongada quando o comprimento (maior dimensão) é igual ou superior a 1.8 da sua dimensão nominal. O índice corresponde ao quociente da massa das partículas alongadas pela massa da amostra (BSI 812 Section 105.2/90 Elongation index of coarse aggregate).

O índice de Forma de uma partícula é considerado não cúbico se a razão entre o seu comprimento e largura (menor dimensão) for superior a três. O índice corresponde ao quociente da massa das partículas não cúbicas pela massa da amostra (Final Draft EN 933-4/99 Test for geometrical properties of aggregates – part 4: Determination of particle shape).

Agregados angulosos possuem arestas bem definidas formadas pela interseção de faces relativamente planas em partículas britadas por martelo ou mandíbulas.

2.3.2 Empacotamento de Partículas

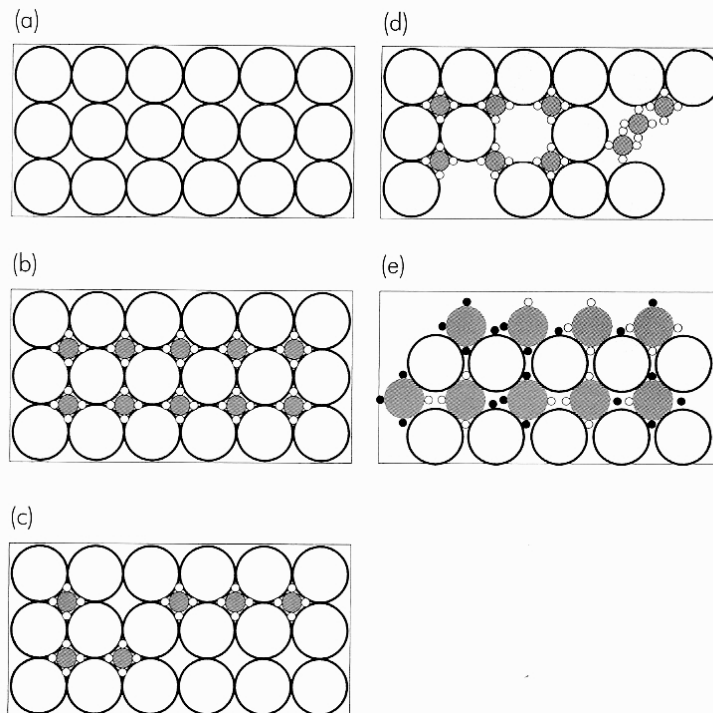
Muitas propriedades dos materiais estão associadas ao empacotamento de partículas que os constituem.

Segundo Mcgeary o estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como:

O critério da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (apud PANDOLFELLI et al., 2000).

Esta afirmação do autor pode ser demonstrada na Figura 15.

Figura 15 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento: (a) sistema monodisperso, (b) máxima densidade de empacotamento teórico, (c) deficiência de partículas pequenas, (d) deficiência de partícula grandes, (e) distribuição inadequada de tamanhos de partículas.



Fonte: Pandolfelli et al. (2000).

A morfologia é um fator que pode alterar a condição de empacotamento das partículas de uma mistura, pois quanto mais distante estiver do formato esférico da partícula, menor será o grau de empacotamento de uma distribuição e, a quantidade de superfícies irregulares de partículas, leva a uma fricção interparticular (PANDOLFELLI et al., 2000).

Através do controle da distribuição granulométrica é possível adensar materiais aglomerados com cimento, pelo empacotamento dos agregados em sistemas compostos por partículas não esféricas.

Os agregados miúdos têm grande capacidade de retenção de água. A água absorvida provoca afastamento dos grãos, influenciando na massa unitária do material. O inchamento varia com a composição granulométrica, sendo maior para areias mais finas.

2.4 ARGAMASSAS

2.4.1 Definição

As argamassas constituem-se da mistura de aglomerantes, agregados miúdos, água, podendo conter elementos ativos e diversos tipos de adições a fim de melhorar determinadas propriedades, devendo ser misturadas até se obter uma massa homogênea com propriedades de aderência e endurecimento. A proporção dos materiais constituintes da argamassa é medida em massa, tomando-se como referência o cimento.

O desempenho de uma argamassa depende de suas características no estado fresco e no estado endurecido. No estado fresco, a argamassa deve apresentar boa trabalhabilidade e capacidade de retenção de água adequada para garantir a hidratação do cimento. As características para o estado endurecido são: resistência à compressão adequada, boa resistência de aderência ou ao cisalhamento, boa resiliência.

A qualificação das argamassas deve satisfazer fatores como: resistência mecânica, compacidade, impermeabilidade, aderência, constância de volume, durabilidade.

A maior ou menor importância de uma dessas condições depende da finalidade de uso da argamassa. Estas propriedades dependem de fatores como a qualidade e quantidade de água, os aglomerantes, aditivos e agregados.

A Associação Brasileira das Normas Técnicas (ABNT), através de um conjunto de ensaios normatizados, estabelece os requisitos necessários para cada característica que deve ser controlada através de procedimentos normativos, dentre os quais os seguintes:

- A trabalhabilidade deve ter consistência padrão de 255 ± 10 mm, segundo (NBR 13276:2005), sendo que a propriedade mais importante da argamassa no estado fresco é essencial, pois o ensaio de consistência fixa limites para garantir as características previstas no estado endurecido, sendo uma propriedade de complexa definição e de difícil mensuração, que depende dos materiais, da composição, do tipo de preparo, da umidade relativa e de temperatura (ABNT, 2005a).
- Para resistência à compressão (NBR 13279:2005), a argamassa deve suportar 70% do esforço do elemento ao qual irá unir para acomodar deformações e concentrar microfissuras nas juntas (ABNT, 2005d).
- Para resistência de aderência (ASTM E518) - Standard Test Methods For Flexural Bond Strength of Masonry, argamassa deve conter aditivos, ou maior concentração de cimento a fim de obter maior capacidade de ancoragem no substrato.

A aderência pode ser medida através de ensaios de tração direta, tração na flexão, cisalhamento direto, flexão simples e compressão diagonal.

- A retenção de água na argamassa (NBR 13277:2005) deve ser alta, sobretudo se o índice de absorção inicial for elevado, se houver baixa umidade relativa do ar, alta temperatura ou adições que aumentem consideravelmente a superfície dos materiais que farão parte da argamassa (ABNT, 2005b).
- O teor de ar incorporado (NBR 13278:2005) pode causar perda de aderência. Em geral, recomendam-se teores inferiores a 8%. É importante descobrir o teor incorporado à argamassa antes de propor seu uso (ABNT, 2005c).

2.4.2 Tipos

A classificação das argamassas se dá segundo o tipo de aglomerante utilizado. Nas argamassas simples são adicionados cimento, cal ou gesso, sendo as de gesso, usadas exclusivamente em elementos de decoração.

Nas hidráulicas simples, adiciona-se de cal hidráulica ou cimento. Nas mistas ou compostas, são utilizadas dosagens de cal aérea e cimento.

Segundo o teor da dosagem de aglomerantes, podem ser pobres ou magras, quando o volume de pasta é insuficiente para preencher os vazios entre os grãos do agregado; e cheias quando os vazios são preenchidos exatamente no ponto de saturação pela pasta e pelo aglomerante; e ricas ou gordas, quando há excesso de pasta. Segundo a consistência, poderão ser secas, plásticas, fluidas.

A escolha de um determinado tipo de argamassa está condicionada às exigências do uso o qual será submetida, dentre as quais, destacam-se a características de resistência mecânica, impermeabilidade, porosidade, custo e durabilidade.

As argamassas de cimento constituem a base de funcionamento de quase todos os materiais mais comumente usados na construção civil. Cada uma tem sua aplicação determinada vinculada a sua resistência, como também a união de materiais e específicas para sua aplicação.

As argamassas de cimento são chamadas de argamassas hidráulicas porque se diferenciam bastante das aéreas, pois iniciam o processo de pega e endurecem inclusive

imersas em água, sendo caracterizadas por sua alta resistência mecânicas e impermeabilidade e resistência à abrasão, o que lhes confere alta durabilidade.

Para as argamassas de cimento é válida a Lei de Abrams, onde a resistência mecânica varia na razão inversa da relação A/C, para material plenamente adensado e dentro dos limites práticos de aplicação.

Para a previsão da resistência, pode ser usada a Equação descrita de Bolomey.

$$R = A. (1/x + 0,5) \quad (4)$$

Onde

R = resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos, em MPa;

A é um fator para aglomerante de cimento *Portland* aos 28 dias de idade, onde A está entre 15 e 20.

Quanto ao tipo de aglomerante, as hidráulicas endurecem pela ação química exclusiva da água, as aéreas endurecem pela ação química do CO₂ do ar e as mistas são compostas por um aglomerante hidráulico e um aéreo.

Argamassa de cal é uma mistura de areia e cal que preenche os vazios entre os blocos ou tijolos, cimentando-os. A cal pode ser de dois tipos: a cal virgem e a cal hidratada. A cal dá à argamassa uma boa trabalhabilidade e capacidade de reter água, entretanto, quando endurecida, apresenta baixa resistência.

A função do cimento é dar resistência mecânica e aumentar a velocidade de endurecimento. Esse tipo de argamassa se adapta a diversos usos, sendo indicada para aplicação em alvenaria estrutural ou não.

Na escolha da argamassa, deve-se considerar sua função, condições de exposição, tipo de superfície de aderência, equipamentos utilizados para aplicação ou moldagem. Seu comportamento em relação ao calor, quando condutora, tem massa específica elevada e, quando isolante, adquire características de elevada aeração ou com uso de agregado leve que confere menor condutividade térmica em relação à argamassa comum.

A argamassa de cimento e areia é indicada para suportar maiores cargas, pois possui alta resistência. Quando rica em cimento têm boa trabalhabilidade e custo mais elevado.

2.4.3 Adição aos Materiais Constituintes

Adições de materiais inorgânicos, microscopicamente divididos, podem ser utilizadas para modificar algumas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração à proporção do traço.

Aditivos adicionados à argamassa em pequena quantidade têm a função de melhorar alguma das suas propriedades no estado fresco ou endurecido. Sua quantidade não é levada em consideração na proporção do traço. Em função de sua finura, as adições podem interferir nos fenômenos de exsudação e retração das argamassas.

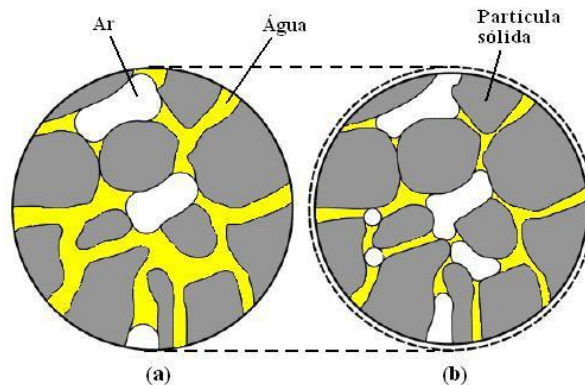
Hua, Acker e Ehelacher (1995) demonstraram que a pressão capilar criada pelo menisco da água pode qualitativamente explicar a retração autógena das argamassas no estado endurecido. Este mecanismo explica o fato de que a retração autógena depende principalmente da retração provocada pelas reações químicas dos elementos constituintes do cimento e, também, da distribuição da rede porosa. A Figura 16 mostra a representação esquemática que ilustra a consequência no processo de hidratação na pasta de cimento (JENSEN; HANSEN, 2001):

- Redução da quantidade de água nos poros devido à hidratação do cimento resulta em expansão do material sólido, refinamento da estrutura dos poros, aumento do volume de poros vazios devido à retração química;
- Diminuição do raio de curvatura dos meniscos, aumento da retração devido ao incremento da tensão superficial da água nos poros.

Uma situação importante na hidratação do cimento, particularmente em argamassas com adições e agregados com alto módulo de finura e grandes consumos é o uso de aditivos super plastificantes e relações água/cimento, baixas, fazem com que a quantidade de água do traço seja pequena, muitas vezes, já na quantidade mínima apenas para a hidratação, uma vez que a trabalhabilidade está garantida pelo aditivo. Neste caso, o cuidado a ser tomado é que a cura seja prolongada e evite a perda rápida de água, necessária à hidratação. Desta forma, não se corre o risco de ter parte do cimento apenas como material inerte, embora o não aparecimento de fissuras esteja garantido pela alta resistência já nas primeiras idades, a Figura 18, apresenta formação e entrelaçamento dos cristais por cura prolongada (TOKUDOME, 2008).

A umidade presente nas argamassas possibilita o fenômeno da carbonatação. A Figura 16 mostra a retração esquemática da retração química da pasta de cimento com baixo e alto grau de hidratação.

Figura 16 - Representação esquemática da retração química da pasta de cimento com (a) baixo grau de hidratação e (b) alto grau de hidratação



Fonte: Jensen e Hansen (2001).

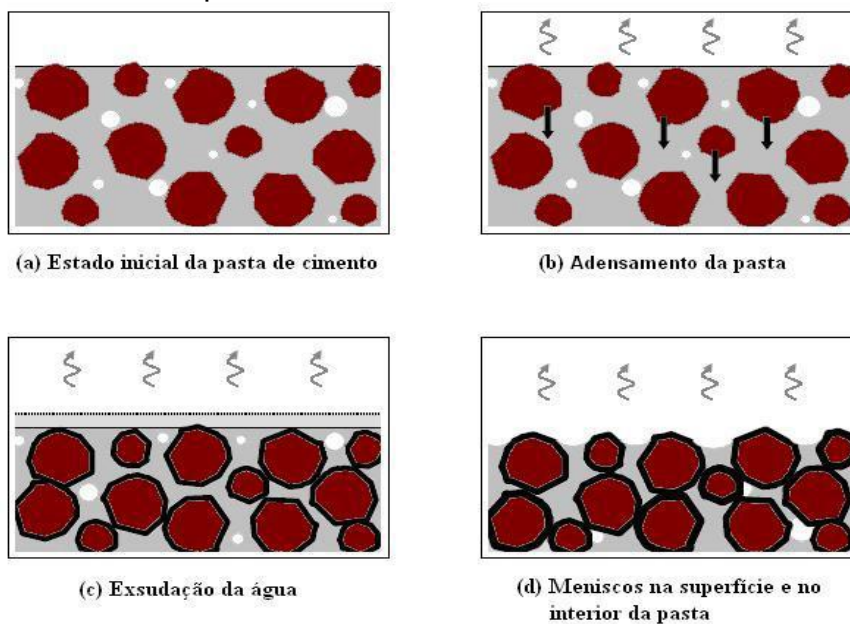
A carbonatação ocorre quando os produtos de hidratação do cimento reagem na presença de umidade, com o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. A velocidade da carbonatação depende do teor de umidade do compósito e da umidade relativa do ambiente, sendo que sua quantidade depende do tipo e consumo dos aglomerantes, principalmente do cimento. A espessura do revestimento de argamassa é um fator determinante na carbonatação, pois a umidade liberada pela reação do CO_2 com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deve sofrer difusão a fim de manter o equilíbrio higroscópico entre o interior do compósito e a atmosfera. Se a difusão for muito lenta, a pressão de vapor dentro do compósito se eleva até a saturação, e a difusão do CO_2 dentro da pasta é praticamente paralisada (NEVILLE, 1982).

A Figura 17 apresenta os principais mecanismos da retração plástica em pasta de cimento (TURCRY, 2004). Logo após a aplicação de uma pasta de cimento, os grãos de cimento e o ar incorporado estão em suspensão na água. Sob o efeito da gravidade, as partículas sólidas sedimentam, enquanto que as bolhas de ar sobem para a atmosfera e, com isso, a massa de cimento compacta-se, conforme mostra a Figura 16(b). Durante este adensamento da massa sólida, a água é obrigada a fluir para a superfície, formando uma camada de água, chamada de água exsudada.

A espessura da camada de água exsudada depende da velocidade de adensamento e também da taxa de evaporação da água. Se a taxa de evaporação da água for maior que a taxa de exsudação, não se formará a lâmina de água na superfície, criando-se, assim, um complexo sistema de meniscos entre as partículas sólidas (BENTZ, 2008).

Wittmann (1976) salienta que se a taxa de evaporação exceder a taxa de exsudação, a superfície do concreto seca e forma meniscos próximo à superfície. Este fenômeno provoca tensões capilares nos poros, produzindo forças de contrações entre as partículas. Salienta ainda que tensões capilares, mesmo baixas, influenciam significativamente na retração plástica.

Figura 17 - Esquematisação dos mecanismos da retração plástica em pasta de cimento



Fonte: Turcry (2004).

Impurezas orgânicas ou matéria orgânica interferem sensivelmente na aderência entre a pasta e o agregado, bem como na pega e no endurecimento do cimento.

Solos com húmus, partículas de vegetais, raízes, produtos animais, podem contaminar os agregados, principalmente o agregado miúdo, pelos ácidos orgânicos que contêm.

O ensaio colorimétrico, apesar de suas imperfeições, é ainda o mais usado para indicar esses materiais nocivos (NBR 7220:2000) (ABNT, 2000).

Sais solúveis são impurezas que reagem com os componentes da argamassa, afetando a pega e o endurecimento.

2.4.4 Condutividade Térmica em Argamassas

Em materiais com maior massa específica, como em alguns tipos de concreto ou argamassas, podem ocorrer variações significativas na condutividade térmica. Quando a massa específica do material é da ordem de $2,40 \text{ g/cm}^3$, eles apresentam condutividade térmica em torno de $1,30 \text{ W/m K}$. Já o concreto celular, cuja massa específica varia de $0,40$ a $1,8 \text{ g/cm}^3$, apresenta valores em torno de $0,30 \text{ W/m K}$ de condutividade térmica. Estes dados confirmam a dependência entre a condutividade térmica, a porosidade e a massa específica dos materiais, uma vez que estas duas últimas características interferem diretamente na movimentação dos elétrons pretendida pelo processo de dopagem com a adição de alumínio, resultando numa maior transferência de calor.

Considerando que a radiação solar, quando transformada em energia, tem previsibilidade de rendimento e periodicidade, deve-se considerar a variação na intensidade de incidência e a temperatura do meio ambiente como condicionantes que influem diretamente na eficiência do princípio físico de condutividade material. Assim, não bastaria haver apenas um captador eficiente de energia, mas também instalações e tecnologias análogas em sistemas empregados, que utilizem eficientemente energias sustentáveis, mesmo que geradas autonomamente em menores intensidades (MARTINS; SANTOS, 2005).

Um traço de argamassa com adição de materiais com rede de ligação cristalina, que resultasse em elevado coeficiente de transferência de energia, poderia ser utilizado como dispositivo de captação que converteria a radiação solar incidente em troca de energia na forma de calor, para diminuição no consumo de energias convencionais.

2.4.5 Oxidação e passivação do alumínio em meios básico e ácido

O alumínio é um metal não ferroso que forma naturalmente uma barreira de oxidação auto protetora (GUTFREIND, et al, 2013). Neste sentido, técnicas como de eletrodeposição isenta de íons de cianeto em meio alcalino têm se apresentado como alternativa às novas exigências ambientais (CUNHA et. al. 2014). Esta técnica, quando

aplicada em materiais semicondutores, faz com que finas camadas sejam formadas em metais como o alumínio, permanecendo aderidas a sua superfície em camadas extremamente finas, criando assim, uma barreira de proteção.

Em processos de eletrodeposição em meio alcalino é necessária a presença de um agente complexante para a estabilização dos íons metálicos, o qual também impede a redução espontânea dos íons sobre o material, o que poderá originar uma camada de proteção com baixa aderência, devido à formação simultânea de elementos de oxidação do substrato.

Os agentes complexantes (técnica de análise volumétrica que visa a formação de um complexo de coloração), podem também conferir características físicas e morfológicas desejáveis à deposição de elementos na superfície de alumínio através da diminuição do tamanho das partículas, o que melhora sua aderência e torna a peça mais adequada para receber aplicação de tratamentos posteriores.

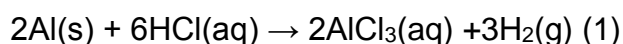
Assim, quando o alumínio entra em contato com o meio ambiente ou com determinados materiais, forma um sistema termo dinamicamente instável. A única exceção é a utilização de metais nobres (ouro, prata e platina). Todos os demais metais, em contato com o ar, devem reagir e transformarem-se em óxidos, hidróxidos ou outras formas semelhantes.

Para alguns metais, tais como alumínio, magnésio, cromo, etc., tal transformação implica numa grande redução da energia livre. Entretanto, apesar da termodinâmica indicar a possibilidade de uma reação, não se diz nada a respeito da velocidade com que esta reação ocorre. E devido ao fato de que certas reações ocorrem em velocidades extremamente lentas em alguns metais, é que se podem utilizar os metais no cotidiano em diversos tipos de exposição às intempéries.

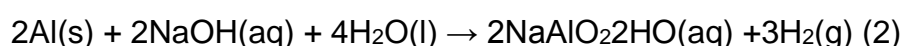
Gentil (1996) define a corrosão como sendo a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não e esforços mecânicos. Ação esta que se inicia na superfície resultando na passagem de seus componentes ao estado de combinação com as substâncias do meio à que estão expostos. Exemplos típicos são os processos de corrosão eletroquímica e oxidação química.

A corrosão implica em significativo volume de perda, sendo necessário entender os mecanismos de corrosão de forma a minimizar tais perdas.

As ligações metálicas, quando expostas a algum meio corrosivo, tendem a se corroer, mas em alguns destes materiais a oxidação poderá ser benéfica quando houver transferência de massa. Como exemplo, a oxidação do cromo e do alumínio, fenômeno conhecido como passivação, que ocorre na presença de oxigênio, permite a formação de óxido de cromo e de alumínio. Em ambos os materiais forma-se um filme de óxido de excelente resistência a alguns meios corrosivos. Suas propriedades químicas reagem espontaneamente com o oxigênio do ar, formando uma película de proteção sobre sua superfície. Entretanto, essa camada apassivadora não impede sua oxidação por ácidos e bases fortes, mesmo quando diluídos, ocasionando a corrosão do material. O processo de passivação na maioria dos metais e ligas ocorre na presença de meio anfótero, básico (1) ou ácido (2), que é um fenômeno superficial bastante complexo e as tentativas de explicá-lo estão relacionadas às seguintes reações químicas:



e



Como pode ser previsível, as velocidades dessas reações são controladas como as que ocorrem entre espécies metálicas e as substâncias com $\text{pH} > -2,0$ e $< 8,0$ contidas no meio que as envolvem. Quando os meios se encontram neste intervalo, as reações de passivação, que se baseiam na cinética eletroquímica, resultam na formação de películas protetoras sobre a superfície de metais por imposição de correntes.

Essa passivação presta-se para assegurar a resistência à corrosão e ocorre à temperatura ambiente. Este processo ocorre naturalmente ou pode ser induzido através da ação de ácidos fortemente oxidantes. Ácido nítrico é um dos reagentes mais utilizados para este fim em tratamentos para formação das películas protetoras contra os elementos de oxidação, tornando a superfície do alumínio mais estável.

As superfícies de alumínio possuem uma elevada afinidade para reagir com o oxigênio. Logo, o metal é recoberto sempre com uma fina camada de óxido, fato este que identifica basicamente sua estabilidade química (THOMAS & SHERWOOD, 1992). Isto o torna um dos materiais mais utilizados para proteção contra a corrosão em diversos meios, entre eles o mais agressivo que é o meio salino. O processo de passivação do alumínio é espontâneo como ânodo de sacrifício. Há poucos estudos descritos na

literatura que considerem a formação dos óxidos de alumínio a elevadas temperaturas (máx. 550°C), porém não existem informações nas temperaturas que ocorrem nos processos de aspersão térmica.

Entre as linhas de pesquisas direcionadas para minimizar os problemas da corrosão em meio alcalino é destacada a proteção por barreiras dos materiais através de revestimentos depositados pelos processos de aspersão térmica (AT), com temperaturas > 3000°C, (SCHIEFLER et al., 2003).

Estes estudos abordam o processo corrosivo de materiais e relacionam como os revestimentos podem ser depositados sobre o alumínio por aspersão térmica em diferentes condições de deposição, utilizando diferentes ligas ou composições.

Os revestimentos depositados por aspersão térmica são aplicados tipicamente para a proteção contra a corrosão, especialmente o alumínio, pois este confere à superfície do aço, proteção por barreira, impedindo o contato do aço com o meio corrosivo. Também pode oferecer proteção catódica em condições em que seu potencial de corrosão seja mais ativo (mais negativo) que o aço. E em condições em que haja a exposição do substrato com proteção anódica pelos depósitos calcários (efeito anódico) (FISHER et al., 1987; VREIJILING, 1998). Nesse processo, os metais podem corroer-se promovendo a dissolução contínua, acarretando em perda de massa. Diz-se que neste estado o metal encontra-se ativo.

Assim, para alcançar passivação de um metal num dado meio, é necessário equilibrar seu comportamento eletroquímico. Através da utilização da técnica de polarização anódica, é possível analisar o comportamento eletroquímico de um metal, através de curvas de potencial *versus* corrente.

Vale considerar que neste tipo de avaliação aparecem reações instantâneas. Logo, ensaios mais longos de exposição permitem avaliar o comportamento dos revestimentos em situações com maior tempo de exposição aos meios a que estão submetidos.

A formação de junção eletroquímica entre materiais com número atômico que possibilite a criação de lacunas na camada de valência faz com que se tornem semicondutores impuros receptores de elétrons, aos quais materiais metálicos ou não metálicos, finamente divididos, são agregados sobre um substrato preparado, formando um depósito aspergido (LIMA; TREVISAN, 2001).

Nesse processo, os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada e, imediatamente após a fusão, o

material finamente dividido é acelerado por gás comprimido contra a superfície a ser revestida (SAMPSON, 1997). Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se, resfriam-se e aderem às irregularidades da superfície, originando-se assim uma camada de estrutura típica lamelar (DORFMAN, 2002a).

Nessa estrutura, se apresentam inclusões de óxidos, vazios e porosidade. Basicamente, o processo de aspensão térmica está classificado pelo tipo de fonte de calor utilizada na pistola de aspensão, podendo a fonte de calor ser gerada através de combustão, ou através de energia elétrica. No processo por combustão destaca-se o mais antigo que utiliza o gás acetileno, conhecido como processo a chama. Se utilizado o material na forma de arame, FS- “flame spray”. No processo por energia elétrica essa energia pode ser gerada através de plasma ou por arco elétrico (ASP - “arc spray process”).

O alumínio apresenta um comportamento dual quando exposto ao sódio ou meios alcalinos, podendo se apresentar como um material ativo ou passivo. A sua resistência à corrosão está estritamente relacionada às qualidades mais ou menos protetoras da camada ou filme de óxido de alumínio formado na sua superfície (passivação). A qualidade da proteção depende das condições e do tipo em que é formado este filme de óxido (POURBAIX, 1987).

Já nos processos a arco elétrico (ASP) e da chama (FS), utilizados para revestir o aço com alumínio, é necessário identificar as diferenças entre as técnicas existentes nos processos de aspensão utilizados, pois as temperaturas influenciam diretamente o processo no meio ao qual o óxido de alumínio – Al_2O_3 será gerado.

Dados da literatura (BRITTON, 1988) apresentam que na atmosfera do processo ASP há apenas oxigênio e nitrogênio, dissociados, enquanto no processo FS a atmosfera é distinta e encontram-se presentes: água, gás carbônico, monóxido de carbono e nitrogênio, considerando que o gás de transporte seja o mesmo ar comprimido.

Estudos sobre revestimentos de alumínio depositados por diferentes processos de aspensão térmica para a proteção contra a corrosão foram realizados por Paredes (1998), o qual identificou através de ensaios eletroquímicos (potenciostáticos e resistência à polarização) e de névoa salina, comportamentos diferentes nos processos a chama e arco elétrico.

O estudo afirma que a resistência à corrosão superficial das camadas de alumínio depende do tipo de óxido formado na superfície que fica exposta ao meio corrosivo. Já a

propagação da corrosão para o interior da camada de Al é dependente, principalmente, da coesão do filme e não só do teor de óxido.

2.4.5.1 Diagrama de Pourbaix

O diagrama de *Pourbaix* para avaliar as condições favoráveis à oxidação do alumínio, inventado pelo químico Marcel Pourbaix (1904- 1998), é um gráfico que leva em conta a variável potencial de eletrodo de um material – geralmente metal – e o pH do meio (potencial hidrogeônico) num ambiente isotérmico, onde são calculados de acordo com a equação de Nerst. Esse gráfico cria a possibilidade de se prever se o material seria resistente ou não a um estado de corrosão.

O diagrama de *Pourbaix* permite observar os níveis de pH, onde ocorre oxidação, suas formas de oxidação e o ambiente de passivação. Com isso, possibilita formular composições de preservação do alumínio contra corrosão ou do material que estiver em contato com os diferentes níveis de pH.

Cada zona apresenta um composto metálico que será mais estável em relação ao nível de pH. A zona de corrosão corresponde às zonas do gráfico em que as condições de pH e de potencial do eletrodo são favoráveis à corrosão, que provocaria destruição do material. Nestas áreas, as formas mais estáveis são iônicas (no caso: Zn^{2+} e ZnO_{2-2}) A zona de passivação corresponde às condições em que o material formaria óxidos, ou hidróxidos metálicos, estáveis e protetoras (no caso ZnO), a corrosão pode ser praticamente nula.

A zona da imunidade corresponde às condições em que as reações seriam impossíveis, ou seja, não ocorreria corrosão, o metal apresenta um comportamento inerte mantendo-se em sua forma metálica (no caso Zn).

A Tabela 13 demonstra as reações positivas e negativas relacionadas à geração de óxido de alumínio na faixa de passivação descrita por *Pourbaix*.

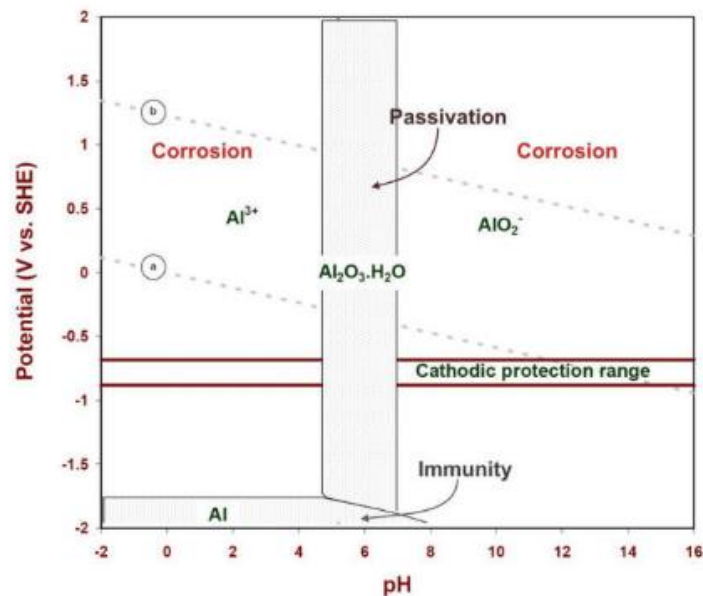
Tabela 13 – A passivação do alumínio encontra-se em um intervalo específico

Causas para oxidação do alumínio em relação ao pH da argamassa			
pH	Concentração	Reações negativas	Reações positivas
0 a 7	Ácido	Inerte	3,0 > pH < 8,0 Passivação
7	Neutro	Inerte	
8 a 13	Básico	Oxidação	Oxidação
Próx. 14	Alcalino	Oxidação	Transferência de massa

Fonte: O Autor

O Gráfico 1 demonstra a faixa de passivação do alumínio em relação ao pH do meio e o potencial do eletrodo que se encontra em contato com o mesmo.

Gráfico 1 – Faixa de passivação e imunidade do alumínio

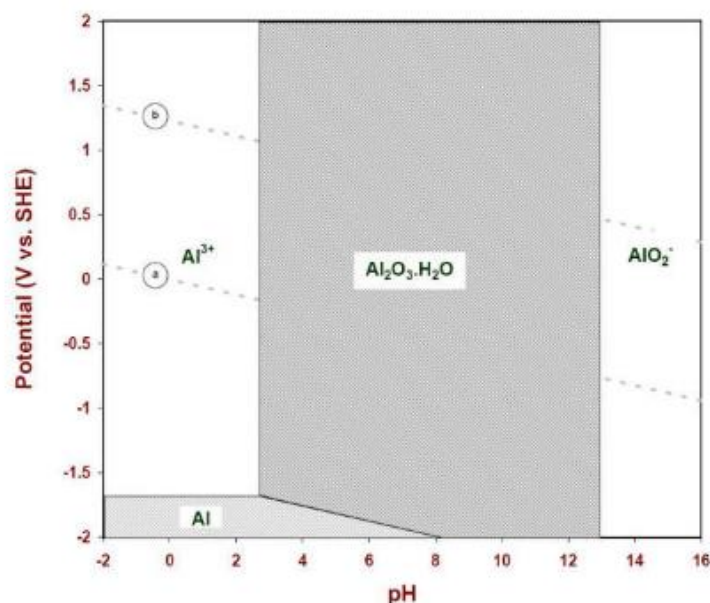


E-pH corrosion diagram of aluminum at 25°C

Fonte: Rodriguez, 2003.

O Gráfico 2 apresenta a faixa de passivação alcançada com a formação do óxido de alumínio com hidratação, resulta na composição de $Al^{3+} + 3e = Al$ com potencial do eletrodo padrão $E^0 (V) = -1,67$.

Gráfico 2 – Faixa de passivação com a formação do óxido de alumínio



E-pH diagram of solid species of aluminum when the soluble species are at one molar concentration (25°C)

Fonte: Rodriguez, 2003.

2.4.5.2 Agentes Quelantes

Agentes quelantes são complexantes de metais para formulações diversas que agem como inibidores dos metais presentes. Sob determinada exposição em meios insalubres, a corrosão do Al é acelerada, ocorrendo à produção de gás hidrogênio que pode causar deformação ou ruptura da peça, tornando necessária a adição de inibidores de reação de hidratação de óxido, Patermarakis, 1992;

Por sua vez, os processos corrosivos que ocorrem nas folhas de Al estão intimamente relacionados com a natureza da camada de anodização formada, sua estrutura, composição do eletrólito, temperatura e pH do meio de exposição.

Os inibidores tradicionalmente usados são os ácidos carboxílicos, à base de fosfatos e boratos, absorvedores de gases e também agentes quelantes. A combinação adequada destes componentes deve levar a um eletrólito de impregnação estável na faixa de temperatura ambiente para qual o sistema opera. Como a mobilidade dos elétrons, a condutividade do eletrólito é diretamente responsável pela reconstrução da camada de óxido deteriorada durante o processo de corte e estocagem. Por outro lado, a concentração das espécies iônicas dissolvidas no eletrólito também influencia significativamente a quantidade de energia armazenada e, como inibidores de corrosão,

para uma ampla de composição e de valores de pH relacionados ao comportamento corrosivo do alumínio (HOLZLE, 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODO

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland

Os cimentos *Portland* normatizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo CP acrescido do algarismo romano I ou II, III, IV e V, sendo as classes de resistência indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão (expressos em megapascal – MPa), garantidos pelos fabricantes, após 28 dias de cura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002).

Existem no Brasil vários tipos de cimento *Portland*, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são: cimento *Portland* comum, cimento *Portland* composto, cimento *Portland* de alto-forno, cimento *Portland* pozolânico.

Em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, ou pelas características especiais de aplicação, os seguintes tipos de cimento: cimento *Portland* de alta resistência inicial, cimento *Portland* resistente aos sulfatos, cimento *Portland* branco, cimento *Portland* de baixo calor de hidratação, cimento para poços petrolíferos. Todos os tipos de cimento mencionados são regidos por normas da ABNT. A Tabela 14 demonstra as principais utilizações em relação às funções, as quais a matriz será submetida.

Tabela 14 – Tipos e usos dos cimentos Portland brasileiros

Tipos de Cimento e Usos	
CPI	Concreto em geral sem exposição ao sulfato.
CPZII Z – pozo- lânico	Obras em geral, subterrâneas, marítimas e industriais.
CP II E - escória	Baixo calor de hidratação. Resistente a sulfatos.
CP II F – Filer, material, carbo- nático	Aplicações gerais
CP III AF – Alto Forno	Baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfato, obras de concreto massa.
CP IV AF – 32 Pozolânico	Obras expostas a água corrente e ambientes agressivos, baixo calor de hidratação.
CP V ARI	Resistência inicial elevada e desforma rápida
CP RS	Redes de esgotos e águas servidas
CP BC	Baixo calor de hidratação, obras de concreto massa.
CP B	Branco: Estrutural, de 25 a 40 MPa – Não estrutural – rejunte e aplicações sem responsabilidade estrutural

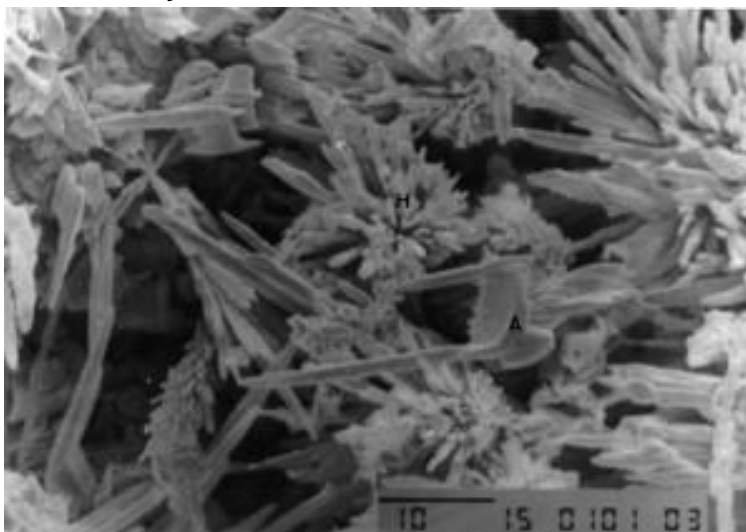
Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2002).

O cimento CP - V, utilizado neste estudo, contém adições de até 5% em massa de material carbonático. Sua alta resistência inicial é conseguida pela baixa porcentagem de calcário na produção e pela moagem mais fina de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade. NBR 5733 CP V ARI:1991 – Cimento *Portland* de Alta Resistência Inicial. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência em suas primeiras idades, podendo atingir 26 MPa de resistência à compressão em apenas um dia de idade (ABNT, 1991b) e 40 Mpa aos 28 dias.

Desta forma, o cimento continua ganhando resistência atingindo valores mais elevados que os demais, proporcionando maior rendimento a matriz, sendo largamente utilizado em produção industrial de artefatos de cimento, onde se exige desforma rápida, protendidos, previamente ou posteriormente tensionados, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para grandes volumes de mistura.

Nos cimentos ARI V CP, a formação dos cristais acontece com grande intensidade nas primeiras horas, sendo necessário manter a cura de forma mais intensa na primeira semana. Cimentos com pozolana exigem a cura mais prolongada. A Figura 18 mostra a formação de cristais nos cimentos ARI V CP.

Figura 18 - Formação de cristais nos cimentos ARI V CP



Fonte: Itambé (2014).

3.1.2 Areia de Basalto

Os agregados podem ser classificados segundo sua origem: São denominados naturais àqueles que são extraídos da natureza na forma de fragmentos como areia e pedregulho. Os artificiais são os que passam por processo de fragmentação, como a britagem de rochas.

A NBR 9935:2005 define agregado, como o material granular pétreo, sem forma ou volume definido, a maioria das vezes quimicamente inerte, obtido por britagem de maciços rochosos ou da exploração de ocorrências de material particulado natural: areia, seixo rolado ou pedregulho, ou por fragmentação artificial, com dimensões e propriedades, adequadas a produção de concretos e argamassas à serem empregados em obras ou artefatos de engenharia (ABNT, 2005e).

Quanto à densidade, existem agregados leves como pedras pomes, vermiculita, argila expandida, e agregados pesados como barita, magnetita, limonita e agregados normais como areia, pedregulhos e pedra britada.

Quanto ao tamanho dos fragmentos: agregados graúdos tem diâmetro superior a 4,8 mm e agregados miúdos inferiores a 4,8 mm ou areia britada.

A extração da areia natural em rios chega a aproximadamente 320 milhões de m³ por ano, volume suficiente para construir 7.100 estádios como o do Maracanã (KUCK, 2004).

Em determinadas regiões do país, além das restrições ambientais à exploração do produto e ao alto custo da areia natural, existem dificuldades em se obter areia natural de boa qualidade, o que justifica a busca por soluções tecnológicas alternativas. A dificuldade de obtenção de areia natural de qualidade e à proibição da sua retirada em algumas áreas geram a necessidade de extração da areia em locais distantes dos principais centros de consumo, elevando gastos com transporte, que correspondem a cerca de 70% do custo final da areia (Site Ministério da Ciência e Tecnologia. Dezembro de 2004). Areia de basalto obtida pelo processo de moagem da rocha basáltica da região de Londrina/PR.

Enquanto os agregados com dimensões comerciais têm aplicação nobre, sendo que, a brita zero e o pó de pedra encontram aplicações secundárias como matéria prima para produção de massa asfáltica, com utilização limitada destes finos, sendo estocados em montes nas áreas das pedreiras.

Esse material, conhecido como agregado miúdo de pedra britada, pó-de-pedra, areia artificial ou areia de britagem é considerado de difícil utilização em obras correntes, mas tem sido intensivamente utilizado pelas indústrias fornecedoras de argamassas industrializadas e dosadas em central. Em regiões metropolitanas, já se utiliza em 5 a 10% do mercado a areia artificial. Além disso, a comunidade científica (ALMEIDA; PEREIRA, 2004; BASTOS, 2002; BUEST NETO, 2006; LODI; PRUDÊNCIO JUNIOR, 2006; PEREIRA, 2008; entre outros) tem desenvolvido uma série de estudos que visam avaliar o uso da areia de britagem em concretos e argamassas, em substituição completa ou parcial da areia natural, e a identificar eventuais características dos agregados, de natureza física e ou química, que possam prejudicar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (DRAGO; VERNEY; PEREIRA, 2009).

A areia de basalto, também denominada como artificial, ou industrial, é obtida em instalações de britagem. Geralmente as usinas de produção estão localizadas próximas às centrais de mistura nas grandes obras ou as margens das cidades. Também são aproveitados parte do material de descarte das minerações. Isso se deve ao aumento da demanda, o que fez com que os fabricantes de equipamentos de britagem aprimorem tecnologias para obter materiais regulares, utilizando a compensação e distribuição granulométrica dos agregados buscando a diminuição do teor de material fino (pulverulento).

Para se adotar técnicas de ensaios granulométricos existentes, é necessário reproduzir características físicas da areia natural, o que permitiria substituição em percentuais elevados a areia de rio por índices integrais da areia convencional. Atualmente, vem sendo adotadas misturas parciais destes agregados embora em determinados processos, devido ao alto custo da areia natural, a substituição seja em índices totais.

3.1.3 Resíduos de Pedreiras de Basalto

Fonseca (2007) demonstra que todos os materiais inorgânicos utilizados no suprimento de nossa civilização são oriundos da crosta terrestre, esta fina camada de material silicático que recobre nosso planeta com uma espessura média de 13,0 km.

Os vários elementos que constituem não estão regularmente distribuídos na mesma espessura, mas ocorrem na forma de uma mistura de minerais com a predominância de alguns elementos na sua estrutura.

As irregularidades na distribuição elementar são geradas por processos geológicos e climáticos, resultando em alguns casos em uma grande concentração de minerais em locais privilegiados. Essas concentrações são definidas como jazidas minerais quando apresentam dimensões e características que permitam sua exploração econômica, pois, poucos minérios são passíveis de utilização direta como produto final.

Na maioria dos casos necessitam de um determinado tratamento, utilizando-se essencialmente de processos físicos sem alterar a estrutura química dos minerais presentes. Os materiais assim obtidos são usualmente denominados concentrados.

No Brasil, os minerais industriais propriamente ditos respondem por cerca de 70% em peso de toda a produção. No entanto, o aproveitamento desses recursos naturais ainda é feito, em grande parte, por empresas de pequeno e médio porte, com pouco ou nenhum planejamento, e se utilizando de poucos insumos tecnológicos. Desta forma, é necessário racionalizar a exploração dos minerais industriais, aprimorando sua qualidade e dando-lhe maior valor como produto, bem como compatibilizar atividades de mineração com a preservação do meio ambiente.

Os minerais são elementos ou compostos químicos formados, em geral, por processos inorgânicos, os quais têm uma composição química definida e ocorrem naturalmente na crosta terrestre. A partir da exploração, os minerais deixam de serem

apenas simples minerais, transformando-se em produtos de alta importância para a sociedade, através de processos industriais, o que torna a exploração mineral, uma atividade indispensável (RESENDE; MORAIS; PACHECO, 2008).

A tecnologia mineral constitui o único arsenal de informações e metodologias ao qual se pode recorrer para promover o fortalecimento da indústria da mineração principalmente as de pequeno e médio porte, visando sua sobrevivência e crescimento num mercado globalizado altamente competitivo.

O tratamento de minérios pode ser conceituado basicamente como sendo a ciência que transforma “pedras” em matérias primas para suprir os mais diversos ramos industriais. Na realidade, compreende um universo amplo e multidisciplinar, envolvendo diversos campos das engenharias.

Segundo Petrakis et al. (2010), junto com a brita, a areia é um material indispensável para construção civil. Considera-se que a maior parte da areia natural seja extraída a partir de depósitos fluviais ou sedimentos não consolidados do Pleistoceno e Holoceno.

Desta forma, as indústrias de construção civil nas regiões urbanas vêm sendo obrigadas a buscar os materiais em distância cada vez maior, tornando o custo operacional mais elevado devido ao aumento de consumo de energia necessário para o transporte.

Durante o processo de fabricação de britas, gera-se um resíduo denominado “fração fina”. Esta é constituída por fragmentos de rochas com tamanho inferior a 3 mm, ou seja, mais fina do que a brita zero. Devido a pouca utilidade, a fração fina vem sendo acumulada nas pedreiras. Este material pode ser utilizado como substituto de areia natural, ou seja, como areia artificial. Com a aplicação da tecnologia de separação pneumática, a fração fina é separada em duas partes: de 3 mm a 0.075 mm como areia para concreto e menor do que 0.075 mm como filer para argamassa.

A resistência mecânica da rocha e dos minerais constituintes de areia artificial é considerada um fator importante. Entretanto, este fator não foi estudado pelos grupos de engenharia do ramo. Os trabalhos anteriores sobre areia artificial vêm se dedicando a técnicas para fabricação de concretos com base na areia artificial, porém não tratam as respectivas rochas mãe (ALMEIDA, 2000; ALMEIDA; SAMPAIO, 2002; COSTA, 2005).

A areia natural é composta principalmente de grãos de quartzo. Este mineral não apresenta clivagem e possui alta resistência mecânica. Além disso, tem imunidade ao

intemperismo químico em ambientes natural e urbano. Por outro lado, a fração fina de ortognaisse granodiorítico é composta principalmente de feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo e biotita. Diferentemente do quartzo, os demais minerais possuem clivagem desenvolvida, portanto, apresentam relativa fraqueza mecânica. Além disso, esses minerais são vulneráveis ao intemperismo químico. A biotita é vulnerável tanto física, quanto quimicamente devido à clivagem altamente desenvolvida. Souza et al (2006), utilizaram resíduo de concreto como matéria prima de areia artificial. Este material tem resistência mecânica significativamente inferior às rochas e minerais naturais.

Os grãos de quartzo que constituem areia natural são geralmente arredondados. Entretanto, os fragmentos finos produzidos por britagem têm forma angulosa. Quando os corpos com pasta de cimento são submetidos a esforços, as pontas angulosas dos grãos podem se romper com facilidade. Recentemente, surgiram equipamentos que ajusta a forma dos grãos por processos mecânicos. Contudo, considera-se que este sistema não é eficiente em rochas com forte clivagem.

O tamanho de grãos de quartzo de areia natural é relativamente homogêneo devido à seleção granulométrica que ocorre durante o processo de transporte e sedimentação. Os grãos rochosos constituintes de areia artificial têm tamanho muito variável. O tamanho heterogêneo dos grãos pode dificultar a adesão entre agregado e matriz. A tecnologia de separação pneumática oferece efetiva solução para separação dos grãos.

O tratamento de resíduos rochosos gerados nas pedreiras é um grande desafio, nas regiões onde é gerado, tanto em termos ambientais quanto econômicos. Em vista da firmeza física do basalto, considera-se que o resíduo rochoso gerado durante a produção de peças e agregados, seja um excelente material para geração de agregado miúdo. Atualmente, os retalhos rochosos estão sendo triturados para produção de britas, suprimindo a demanda em diversas regiões.

Motoki et al (2006), demonstram que quando existe a compatibilidade entre a fabricação dos produtos ornamentais de rochas e das britas realiza-se elevado aproveitamento dos materiais minerados, com rendimento extraordinariamente alto, em torno de 60%. Existem pedreiras com rendimento próximo a 90%. O alto índice de aproveitamento representa alta produtividade com baixa geração de resíduos, bem como alto rendimento econômico com baixo impacto ambiental. A taxa acima citada é muito

relevante em relação às pedreiras convencionais em regiões, onde o índice de resíduos pode chegar em torno de 30%.

A fração fina do Basalto pode ser um excelente material para areia artificial, devido à alta firmeza mecânica e alta resistência ao intemperismo, sendo livre dos problemas observados em areia artificial originada do ortognaisse granodiorítico, pode constituir corpos de concreto capazes de sustentar grandes esforços. Entretanto, esta vantagem não é conhecida nem mesmo nas regiões produtoras e, a fração fina vem sendo acumulada nas pedreiras. Existem algumas, porém poucas pesquisas sobre o aproveitamento da fração fina (BUSANELLO; GARLET; REGINATO, 2007).

Segundo Gehlen (2008), a mineração é conceituada como sendo a ação de descobrir, avaliar e extrair as substâncias minerais úteis existentes no interior ou na superfície do nosso solo.

A história do Brasil tem íntima relação com a busca e o aproveitamento dos seus minerais, que sempre contribuíram com importantes insumos para a economia nacional, fazendo parte da ocupação e história nacional (FARIAS, 2002).

Na região do Sul do Brasil, entre os Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul há uma família de rochas que é muito utilizada como material de construção, denominada comercialmente “Basalto”.

Basicamente, a produção de uma pedreira se divide em cinco produtos, ou seja, brita 3 (25,0mm a 38,0mm), brita 2 (19,0mm a 25,0mm), brita 1 (9,5mm a 19,0mm), brita 0 (4,8mm a 9,5mm), e finos de britagem (material de dimensões inferiores a 4,8mm), anteriormente denominados de areia artificial ou areia industrial, dentre outros nomes.

Algumas pedreiras produzem produtos de diferentes granulometrias, conforme o projeto da planta de produção, como a *granilha* (material produzido por encomenda), e o pó de pedra (material com dimensões inferiores a 6,3 mm).

Dados obtidos junto às pedreiras da região de Londrina revelam que o pó de pedra e os finos de britagem correspondem a 10% de toda a produção. Em função da dificuldade em se comercializar toda a produção deste material, devido à pequena procura, este acaba sendo estocado em grandes pilhas em áreas adjacentes às pedreiras, trazendo impactos ambientais como os já citados e a ocupação de um espaço desnecessário.

A exploração desses minérios é realizada com o emprego de explosivos e gera grande quantidade de materiais considerados resíduos, os quais, normalmente, são abandonados em áreas adjacentes, afetando a vegetação ao redor da pedreira.

Estes materiais são: finos de britagem, pó de pedra e materiais pulverulentos resultantes da cominuição e peneiramento das pedras britadas.

Para viabilizar o aproveitamento destes resíduos, é necessário agregar valor com possibilidades de uso, o que é possível, através de sucessivos peneiramentos, lavagem e desenvolvimento de tecnologias que adicionem pó de pedra aos finos de britagem mesmo com a presença do material pulverulento.

Algumas pedreiras comercializam finos de britagem lavados, eliminando desta forma entre 10 a 20% de materiais com dimensões inferiores a 0,075 mm presentes originalmente, o que representa um diferencial importante, pois agregam valor ao material (FAGANELLO, 2006).

A necessidade de diminuir o teor de material pulverulento nos finos de britagem deve-se a problemas relacionados com excessiva quantidade desse material na superfície dos agregados.

Resultados de ensaios de resistência, durabilidade, controle de reações químicas, retração excessiva e superfície específica, demonstraram haver alteração e o consumo de cimento e a perda de trabalhabilidade durante a mistura no estado fresco.

Segundo Sampaio (2013), os materiais pulverulentos existentes nos resíduos de basalto, devem permanecer na faixa de pH correspondente à 3,25 e 4,50, pois as reações de hidrólise são desprezíveis. Provavelmente os íons H^+ ocuparão os sítios de adsorção do material pulverulento, tornando o pH dessa solução maior que o da água à 20°C.

Observou-se também, a redução em torno de 73% na condutância da solução do material pulverulento comparado ao da água, para a adição de 3,0 ml do ácido, indicando diminuição na condução de corrente na solução, provavelmente por mecanismos de adsorção de íons H^+ pelo material. Os valores de pH e condutância evidenciam o possível processo de adsorção realizado pelo material pulverulento. Os íons H^+ , adsorvidos pelo material pulverulento, resultam em valores de pH mais altos e valores de condutância mais baixos.

Muitos pesquisadores já desenvolveram estudos, como os de Takashima, Bauer e Curti (1998), Mendes (1999), Almeida (2000) e Menossi (2004), para que os finos de britagem tenham outra destinação, como em substituição da areia natural em concretos, e

argamassas, para moldagem de peças pré-moldadas e outras aplicações. Este tipo de agregado é amplamente aplicado nas indústrias de pré-moldados da construção civil.

3.1.4 Resíduos da Usinagem de Alumínio

A usinagem pode ser entendida como uma operação que confere à peça, formas, acabamentos e dimensões apropriadas. Essas combinações de resultado de qualquer um desses três itens produzem o cavaco. O cavaco produzido pode ser definido como a porção de material de forma geométrica irregular, retirada pela ferramenta das peças a serem usinadas.

O Centro de Informações Metal Mecânica – CIMM define que “Cavaco é todo material que é removido das peças com auxílio de uma ferramenta. Essa ferramenta entra em contato com as peças, provocando o aumento do atrito e do cisalhamento do instrumento, ocorrendo o desgaste do utensílio”.

No alumínio que tem densidade média de $2,7 \text{ g/cm}^3$, quando comparado a outros metais ferrosos tem suas ligas mais facilmente usinadas, com pressão específica de corte mais baixa e mais altas velocidades de corte, avanço e grande produção de cavacos. Devido ao seu alto coeficiente de dilatação térmica, o alumínio em usinagem deverá ser mantido sempre frio se se pretende que suas dimensões sejam controladas corretamente (FEPAM, 2003).

Materiais dúcteis tendem a produzir cavacos longos e contínuos que são os mais prejudiciais. Materiais frágeis produzem cavacos em forma de pequenas partículas. De acordo com as formas são classificados os cavacos em fita ou filamento, helicoidal, espiral, em lascas ou pedaços.

Os cavacos são gerados nos processos de usinagem e são intrínsecos a estes e não podem ser eliminados. Existem dois materiais que são trabalhados, o ferro e o alumínio. Por consequência, dois cavacos de materiais diferentes são gerados e estes não devem ser misturados nas centrais de filtragem, para não haver contaminação.

Os cavacos analisados neste trabalho, quanto ao tipo, podem ser classificados como cavacos de ruptura e quanto à forma, podem ser classificados como cavacos em filamentos, lascas ou pedaços.

Atualmente as empresas buscam sustentabilidade devido à legislação estarem mais rígidas com relação ao setor produtivo, responsabilizando-o pela geração dos

resíduos e sua correta destinação. É interessante e econômico minimizar ao máximo a geração de resíduos, mas nem sempre é possível eliminá-los. Neste sentido, a busca pela utilização de tecnologias limpas faz o diferencial para as empresas.

Existe a necessidade de planejar e implantar ações para minimizar os impactos causados pela atividade industrial. Investir na qualidade é uma das formas de reduzir custos de reprocesso e de impactos ambientais, além de melhorar a imagem ambiental da empresa. Incorporando a tendência “eco amigável”, muitas indústrias têm procurado obter certificações ISO – International Organization for Standardization que regulamenta padrões de qualidade na produção em todo o mundo.

O setor metal mecânico realiza uma atividade impactante uma vez que produz resíduos de classe I.

Um dos processos mais utilizados na manufatura, em geral, é a usinagem. O uso de ferramentas de corte neste processo é comum. O emprego de fluido de corte aumenta a vida da ferramenta, minimiza a geração de calor durante o processo, auxilia na remoção dos cavacos e, geralmente, melhora a eficiência do sistema produtivo.

Estes fluidos, quando se tornam resíduos, são classificados como perigosos (classe I).

Os cavacos são resíduos intrínsecos ao processo de usinagem dos metais. Eles podem ser reciclados quando são vendidos como sucata. Porém, se eles estiverem impregnados de fluido de corte terão baixo valor agregado.

Nas atividades de gerenciamento de resíduos, a NBR 10.004:2004 – Resíduos Sólidos é uma ferramenta imprescindível, sendo aplicada por instituições e órgãos fiscalizadores. Esta Norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente (ABNT, 2004a).

Esta nova versão classifica os resíduos em três classes distintas: classe I (perigosos), classe IIA (não inertes) e classe IIB (inertes).

Classe I - Resíduos perigosos: são aqueles que apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamento e disposição especiais em função de suas características, inflamáveis, corrosivas, reativas, tóxicas e patogênicas.

Classe IIA - Resíduos não inertes: são os resíduos que não apresentam periculosidade, porém não são inertes; podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

Classe IIB - Resíduos inertes: são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização (NBR 10.007:2004), não têm nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Isto significa que a água permanecerá potável quando em contato com o resíduo. Muitos destes resíduos são recicláveis. Estes resíduos não se degradam ou não se decompõem quando dispostos no solo (se degradam muito lentamente) (ABNT, 2004b).

Andrade (2002) classifica as empresas e seus respectivos impactos ambientais e ecológicos, da seguinte forma: as organizações que mais geram impactos ambientais são do ramo industrial, por sua característica de serem transformadoras de insumos produtivos em produtos finais. Como as empresas do ramo comercial realizam a intermediação dos bens produzidos pelas companhias industriais, os impactos ambientais e ecológicos são de moderada intensidade.

Uma forma de minimizar os impactos ambientais causados por tais organizações é o reaproveitamento dos resíduos gerados, pois isto pode proporcionar a diminuição da utilização dos recursos naturais, da necessidade de tratamento, do armazenamento e da disposição dos rejeitos gerados.

Os resíduos, que em algumas ocasiões são rejeitados e considerados custos da qualidade e custos ambientais, são classificados como passivos.

Após a mudança de parâmetro, quando estes passam à utilização, podem ser contabilizados como ativo imobilizado, agregando valor para a organização e, conseqüentemente, para o resultado final da empresa. O meio ambiente também é favorecido quando as sucatas metálicas são recicladas, pois, na teoria, a indústria siderúrgica diminui a exploração de jazidas e minas para obter matéria-prima.

Os resíduos de alumínio utilizados no estudo foram gerados em metalúrgicas, após usinagem de tarugos de alumínio para a produção de peças mecânicas no parque das indústrias leves em Londrina/PR.

3.2 COLETA DE AMOSTRAS

Para que os resultados dos métodos de análise expressem valores representativos de quantidade dos resíduos disponíveis, é imprescindível recorrer à técnica de coleta definida e uniforme.

i. Procedimentos adotados para coleta de cavacos de alumínio

O primeiro controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O segundo preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia. O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, etc. Procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros. Pode ser: Macrográfico ou Micrográfico, ou ainda, físico, químico, metalográfico e especial.

Para análise das fibras de alumínio, adotou-se a prática *Metalografia* das fibras no que diz respeito à preparação das amostras, através de ensaios Macrográficos, ou Macrografia.

Examina-se a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) o aspecto de uma superfície após ser limpa por reagente e devidamente polida. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza resultante do processo de fabricação, controle de qualidade, de tratamentos térmicos entre outras características.

As amostras coletadas receberam identificação antes da análise, limpeza e processamento do material:

- a) Nome e endereço da empresa solicitante do serviço: Preservado.
- b) Descrição completa da amostra: Mechas de cavaco mecânico de alumínio.
- c) Quantidade: 60,0 Kg.
- d) Lote: Único com material compactado e não compactado.
- e) Fornecedor: Indústria metal mecânica
- e) Data e hora da coleta: julho de /2013

ii. Procedimentos adotados para coleta dos Finos de Basalto

Para os agregados de basalto, a amostragem em jazidas ou depósitos naturais necessita de uma prévia inspeção visual, para identificação nas variações no material. As extrações devem ser feitas em diferentes locais e profundidades, a cada 20 m, aproximadamente.

A amostragem em pilhas quando não houver equipamento mecânico, as amostras devem ser formadas por pelo menos três amostras parciais, obtidas no topo, meio e base da pilha, tanto na superfície quanto no seu interior, aproximadamente 30 cm da camada exterior devem ser removidos para a coleta de amostra abaixo dessa camada. Podem ser introduzidos nas pilhas tubos de amostragem de aproximadamente 30 mm de diâmetro por dois metros de comprimento, no mínimo, a fim de extrair cinco ou mais amostras parciais para formar a amostra composta. Posteriormente o quarteamento pode ser manual ou mecânico.

- a) Nome e endereço da empresa solicitante do serviço: Preservado
- b) Descrição completa da amostra: 06 amostras em pontos diferentes do monte
- c) Quantidade: 150,0 Kg
- d) Lote: Retirado da mesma pedreira de britagem
- e) Fornecedor: jazida de basalto
- e) Data e hora da coleta: junho/2013

3.2.1 Coleta de Areia de Basalto

Os resíduos de basalto foram coletados diretamente nos montes gerado ao longo do processo de produção de agregados, que compreende britagem, moagem e peneiramento, os quais são estocados em baias a céu aberto.

Foram coletadas amostras de areia de basalto e resíduos ou pó de pedra em pedreira localizada na marginal direita da PR 445, saída para Curitiba, com extração em jazida de basalto.

A pedreira onde foram recolhidas as amostras tem jazida de basalto, possui 27 funcionários e apresenta uma produção média mensal de 3.000 m³/mês.

Sua capacidade instalada é de 4.500 m³/mês com os seguintes equipamentos: 01 - Britador primário de mandíbula, FAÇO 62x40 → 01 - Rebritador de mandíbula, FAÇO 90x26 → 01 - Britador cônico 90 FAÇO, intercalados por três pontos de peneiramento. O controle da poeira é efetuado de forma "primitiva", com apenas um ponto de umidificação na transferência da correia.

Após vistoria dos tipos de agregados produzidos, fez-se a opção pela análise de agregados com proporções miúdas ($< 4,8$ mm) e os resíduos descartados com concentração em dimensões próximas ao pó de pedra com $\pm 1,5$ mm a fundo.

Iniciando a coleta da amostragem em quatro pontos distintos com 50 Kg cada, da areia de basalto e em quatro pontos distintos de resíduos ou de pó de pedra, coletou-se 25 kg, em cada, diretamente nas baias de estocagem a céu aberto, sendo as amostras, ensacadas separadamente e estocadas no Laboratório de Aglomerantes, DCCi da UEL.

Posteriormente, procedeu-se por tipo de amostra, o quarteamento mecânico, para realização dos ensaios granulométricos e determinação da proporcionalidade do traço da argamassa.

3.2.2 Coleta de Resíduos de Alumínio

Na região de Londrina existe intensa atividade de produção e usinagem em tarugos, placas e perfis de alumínio. A diversidade de atividades ligadas às atividades industriais e artesanais na transformação do alumínio gera grande volume de aparas, como resultados dessas atividades.

Durante o processo de torneamento os cavacos são acondicionados em *bags* para que não se misturem com materiais ferrosos e posteriormente são prensados para transporte.

Esses resíduos decorrentes do processo de usinagem ou corte, tem valor agregado, devido à baixa variabilidade do produto na origem. O alumínio por ser novamente envolvido em processos siderúrgicos controlado adquire características físicas precisas em suas novas composições e ligas.

3.2.3 Resíduos de Alumínio

Os resíduos de alumínio foram coletados no leito do torno mecânico para que não houvesse contaminação com outros resíduos metálicos ou orgânicos.

A geração destes resíduos se dá em mechas e possibilitam ser divididas em volumes compatíveis para prensagem e enfardamento ou serem ensacados sem prensagem para posterior processamento.

Os resíduos de alumínio, em forma de filamentos contínuos, com seção de 2,0 por 1,00 mm, foram coletados diretamente no berço do torno mecânico. Na usinagem são adotados procedimentos para que esses resíduos não sofram contaminação por filamentos de aço ou outros resíduos.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A NBR 7225:1993 especifica que agregado é o material natural, de propriedades adequadas ou obtido por fragmentação artificial de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100 mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075mm. Inclui, portanto, agregado graúdo e agregado miúdo (ABNT, 1993).

A NBR 7211:2009 fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Dessa forma, define agregado miúdo como os agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m. Define ainda agregado graúdo, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm (ABNT, 2009a).

Agregado é todo material granular sem forma e volume definidos, geralmente inerte de dimensões e propriedades adequadas para a engenharia. Os agregados conjuntamente com os aglomerados, especificamente o cimento, formam o principal material de construção: o concreto. Eles desempenham um importante papel nas argamassas e concretos, quer do ponto de vista econômico, quer do ponto de vista técnico, e exercem influência benéfica sobre algumas características importantes, como: retração, aumento da resistência ao desgaste, pois os agregados de boa qualidade têm resistência superior à da pasta do aglomerante (PETRUCCI, 1982). Outros aspectos importantes a serem considerados são o módulo de finura, a área específica, massa unitária, absorção, a forma dos grãos e a composição granulométrica (HANAI, 1992 apud ARMANGE, 2005).

Composição granulométrica é a distribuição das partículas dos materiais granulares entre várias dimensões, e é usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas maiores ou menores do que cada uma das aberturas de uma série de

peneiras, ou de porcentagens entre certos intervalos de abertura das peneiras (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A composição granulométrica, isto é, a proporção relativa expressa em forma de porcentagem (%) em que se encontram os grãos de certos agregados, tem importante influência sobre a qualidade dos concretos, agindo na compacidade e resistência (HELENE; TERZIAN, 1992).

A areia, conforme sua distribuição granulométrica e seu módulo de finura (MF), de acordo com a NBR 7211:2009, pode ser classificada como demonstra a Tabela 15.

Tabela 15 - Abertura das peneiras em relação ao diâmetro dos agregados

Classificação granulométrica do Agregados miúdos em (mm) - NBR 7211/1983	
Muito finos	1,35 < MF < 2,25
Finos	1,71 < MF < 2,78
Médios	2,11 < MF < 3,28
Grossos	2,71 < MF < 4,02

Fonte: ABNT (2009a).

O resultado de uma análise granulométrica é interpretado facilmente quando representado graficamente. Com a curva granulométrica é possível ver, se a granulometria da amostra se enquadra em uma especificação, ou se é muito grossa ou muito fina, ou deficiente em um determinado tamanho.

Nas curvas granulométricas normalmente usadas, as ordenadas representam as porcentagens acumuladas passantes e as abscissas, as aberturas das peneiras em escala logarítmica. Como as aberturas das peneiras, em uma série padrão, estão em uma razão constante 1:2, um gráfico logarítmico mostra estas aberturas com espaçamentos iguais (NEVILLE, 1982).

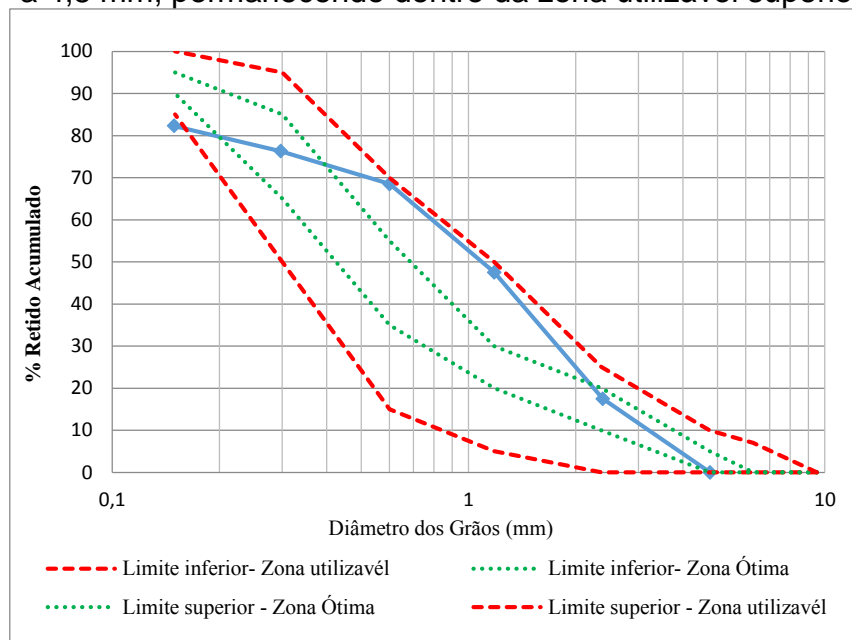
A areia de basalto foi caracterizada por ensaios granulométricos em peneiras de 4,8 a 0,075 mm demonstrados na Figura 19 e resultados demonstrados nas Tabelas 16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27 e Gráficos: 03,04,05.

Figura 19 - Ensaio de granulometria para caracterização dos agregados da areia de basalto.



Fonte: O autor.

Gráfico 3 – Areia de basalto grossa com alta concentração de agregados, próximo a 4,8 mm, permanecendo dentro da zona utilizável superior.



Fonte: O autor.

Tabela 16 – Ensaio 01 em peneiras de areia de basalto grossa

Caracterização de Granulometria Areia Fina – Ensaio 01				
Peneira	Peso Retido	Peso Retido Acumul. (gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %
4,8	0	0	0	0
2,4	185	185	18,5	18,5
1,2	360	545	36	54,5
0,6	194	739	19,4	73,9
0,3	60	799	6	79,9
0,15	20	819	2	81,9
0,075	75	894	7,5	89,4
FUNDO	105	999	10,5	99,9
Σ	999	Σ	99,9	

Fonte: O autor.

Tabela 17 – Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto grossa

Dimensão máxima característica	4,8	
Verificação peneira 4.8 mm	OK	
Módulo de finura	4,086	Areia Grossa

Fonte: O autor.

Tabela 18 – Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto grossa

Caracterização de Granulometria Areia Fina – Ensaio 02				
Peneira	Peso Retido	Peso Retido Acumul. (gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %
4,8	0	0	0	0
2,4	175	175	17,5	17,5
1,2	300	475	30	47,5
0,6	210	685	21	68,5
0,3	78	763	7,8	76,3
0,15	60	823	6	82,3
0,075	75	898	7,5	89,8
FUNDO	102	1000	10,2	100
Σ	1000	Σ	100	

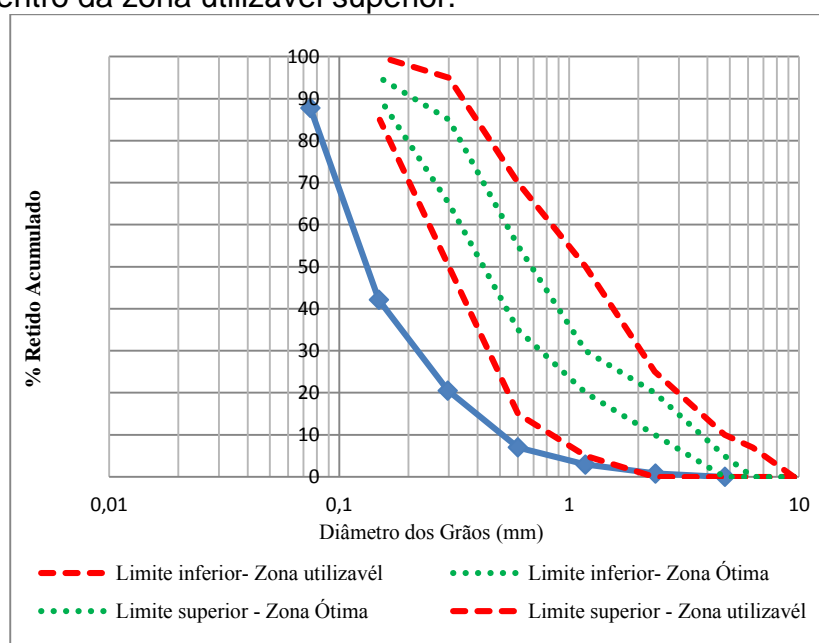
Fonte: O autor.

Tabela 19 – Ensaio 02 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto grossa

Dimensão máxima característica	2,38	
Verificação peneira 4,8 mm	OK	
Módulo de finura	3,918	Areia grossa

Fonte: O autor.

Gráfico 4 – Filer de basalto em alta concentração de agregados, permanecendo dentro da zona utilizável superior.



Fonte: O autor.

Tabela 20 – Ensaio 01 em peneiras de areia de basalto fina

Caracterização de Granulometria Areia Fina – Ensaio 01				
Peneira	Peso Retido	Peso Retido Acumul. (gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %
4,8	0	0	0	0
2,4	7	7	0,7	0,7
1,2	20	27	2	2,7
0,6	35	62	3,5	6,2
0,3	154	216	15,4	21,6
0,15	179	395	17,9	39,5
0,075	456	851	45,6	
FUNDO	149	1000	14,9	100
Σ	1000	Σ	100	

Fonte: O autor.

Tabela 21 – Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto fina

Dimensão máxima característica	4,8	
Verificação peneira 4,8 mm	OK	
Módulo de finura	0,707	Areia fina

Fonte: O autor.

Tabela 22 – Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto fina

Caracterização de Granulometria Areia Fina – Ensaio 02

<i>Peneira</i>	Peso Retido	Peso Retido Acumul. (gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %
4,8	0	0	0	0
2,4	8	8	0,8	0,8
1,2	21	29	2,1	2,9
0,6	36	65	3,6	6,5
0,3	135	200	13,5	20
0,15	216	416	21,6	41,6
0,075	457	873	45,7	87,3
FUNDO	127	1000	12,7	100
	1000	Σ	100	

Fonte: O autor.

Tabela 23 – Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto fina

Dimensão máxima característica	4,8	
Verificação peneira 4,8 mm	OK	
Módulo de finura	0,718	Areia fina

Fonte: O autor.

O basalto compõe 100% dos agregados utilizados na argamassa e os ensaios com os corpos de prova foram realizados aos 28 dias e curados em câmara úmida com temperatura controlada em 24°C. Foram ensaiadas as principais características físicas dos materiais e da “argamassa pouco hidratada”, cuja umidade varia entre 6% e 18% (FRASSON JUNIOR, 2000), o que faz com que ela possua abatimento zero. Após a análise dos dois tipos de agregados utilizados na argamassa foram misturados em proporções adequadas para que permanecessem dentro da zona utilizável, possibilitando o empacotamento das partículas na pasta de cimento com baixa hidratação. Foram utilizados agregados de basalto compensados com 70% de areia grossa e 30% de areia fina para que permanecessem dentro dos limites das zonas utilizáveis, superior e inferior, resultando em areia com módulos de finura médio.

Gráfico 5 - Agregados de basalto da argamassa com areia compensada

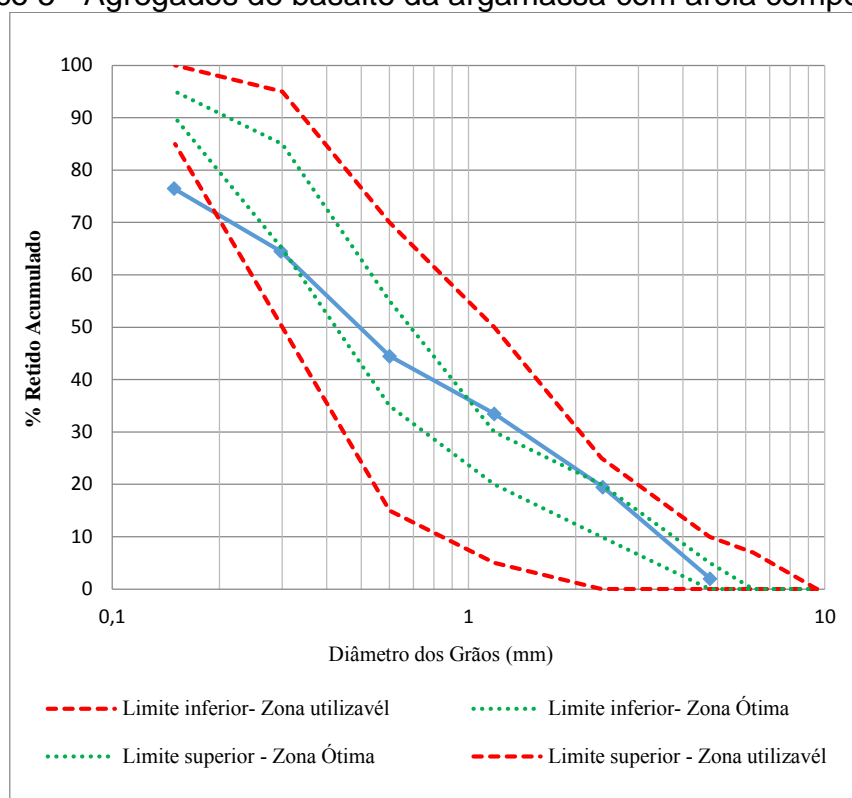


Tabela 24 – Ensaio 01 em peneiras de areia de basalto compensada

Caracterização de Granulometria Areia Média – Ensaio 01					
Peneira	Peso Retido	Peso Retido Acumulado (gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %	
4,8	0	0	0	0	
2,4	141	141	14,1	14,1	
1,2	270	411	27	41,1	
0,6	163	574	16,3	57,4	
0,3	75	649	7,5	64,9	
0,15	89	738	8,9	73,8	
0,075	157	895	15,7	89,5	
FUNDO	103	841	10,3	84,1	
Σ	998	Σ	99,8		

Fonte: O autor.

Tabela 25 – Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto compensada

Dimensão máxima característica	2,40	
Verificação peneira 4,8 mm	OK	
Módulo de finura	2,513	Areia média

Fonte: O autor.

Tabela 26 – Ensaio 01 – Módulo de finura (MFa) da areia de basalto compensada

Peneira	Peso Retido	Peso Retido Acumulado (Gr)	% peso retido por peneira	Retido Acumulado %
4,8	0	0	0	0
2,4	134	134	13,4	13,4
1,2	265	399	26,5	39,9
0,6	169	568	16,9	56,8
0,3	76	644	7,6	64,4
0,15	76	720	7,6	72
0,075	181	901	18,1	90,1
FUNDO	98	818	9,8	81,8
Σ	999	Σ	99,9	

Fonte: O autor

Tabela 27 – Ensaio 02 em peneiras de areia de basalto compensada

Dimensão máxima característica	2,4	
Verificação peneira 4,8 mm	OK	
Módulo de finura	2,465	Areia média

Fonte: O autor

Tabela 28 - Resultados dos ensaios de caracterização

Ensaio dos agregados miúdos de basalto		
Tipos de ensaio		Resultados
Caracterização dos agregados de basalto		Gráficos: 01, 02 e 03
Tipo de areia	% de adição	Módulo de finura (média)
Areia fina	30%	(0,707;0,718) = 0,712
Areia Grossa	70%	(3,918;4,086) = 4,002
Areia média (Compensada)	100%	(2,513;2,465) = 2,489

Fonte: O autor

3.3.1 Areia de Basalto

Os agregados utilizados para o desenvolvimento do traço da argamassa foram coletados em pedreiras da região de Londrina, onde existem jazidas de basalto.

Primeiramente foi feita a coleta de areia de basalto, misturada na própria pedreira, destinada ao uso comercial para fabricação de pisos, blocos, pré-moldados e artefatos de cimento.

A coleta foi feita em quatro pontos diferentes do monte de agregados finos, retirando 50 Kg em cada amostra sendo a coleta feita com umidade relativa do ar bastante baixa e as amostras transportadas em sacos plásticos.

No laboratório de materiais de construção civil da Universidade Estadual de Londrina, as amostras foram quarteadas mecanicamente para ensaios de composição granulométrica seguindo NBR MN 26:2009 (ABNT, 2009b).

3.3.2 Resíduos de Basalto

No estudo, priorizou-se a utilização de finos e pó da britagem de basalto nos traços da argamassa em substituição parcial. Nas porcentagens utilizadas na pesquisa não apresentou diferença significativa nos resultados de resistência à compressão obtida em relação ao uso da areia natural.

As misturas entre partículas apresentaram curvas granulométricas próximas da zona utilizável ou ótima, muito similares à areia natural, como demonstram os Gráficos 3,4,5.

Os segmentos das curvas granulométricas situadas na zona ótima são curvas contínuas ou bem graduadas, ou seja, as frações menores existem em quantidade suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores, propiciando o menor volume de vazios possível.

A forma da curva granulométrica do pó de basalto não é ótima e apresenta uma grande quantidade de material menor que 0,3 mm o que dificulta seu uso em substituição total à areia natural, apresentando forma lamelar mais acentuada.

Uma das maiores dificuldades para a utilização do pó de basalto como agregado miúdo em 100% é a quantidade de materiais pulverulentos (material passante na peneira 75 μ m), que têm concentração em torno de 18,0 %.

3.4 PRODUÇÃO DAS FIBRAS DE ALUMÍNIO

Os resíduos de alumínio foram processados mecanicamente em moinho de facas alternadas para serem transformados em fibras de dimensões entre 0,5 e 20,0 mm.

O alumínio utilizado no estudo foi triado para evitar contaminação por graxas, resinas ou resíduos de varrição do piso e finamente dividido.

Considerado como subproduto para ser reutilizado, o alumínio necessita apenas de um processo simplificado de padronização. Inicialmente as fibras foram geradas através da usinagem de tarugos de alumínio resultando em cavado em torno mecânico.

Posteriormente ao corte para padronização da forma, as fibras foram enxaguadas em sistema fechado de água para eliminação do fluido refrigerante utilizado durante a usinagem da peça. As fibras foram trituradas em moinho de facas alternadas com 300,00mm de largura a velocidade de 4.750 Rpm e espaçamento entre facas de 4,0mm.

As fibras e os fragmentos de alumínio foram produzidos com fatores de forma diferenciados, buscando-se a melhor distribuição que favoreça sua dispersão na mistura. A forma inicial da fibra, obtida a partir de cavacos com espessura de 1 mm, foi inicialmente de 2x25 mm, evoluindo para dimensões e formatos, ainda mais favoráveis à dispersão e deposição dos fragmentos de alumínio na pasta de cimento.

Após a ocorrência o fenômeno da formação de “ouriços”, ou seja, o entrelaçamento das fibras após o corte dos resíduos, formando um emaranhado que impossibilita sua dispersão homogênea na argamassa, aplicou-se a solução encontrada para este problema, que foi utilizar um moinho de facas alternadas, com aumento da velocidade de corte para 3.750 rpm, diminuir o espaçamento entre facas para 4 mm e utilizar peneira com abertura de malha com 10 mm. Desta forma, as fibras atenderam aos requisitos de trabalhabilidade na mistura e distribuição homogênea para favorecer o aumento do coeficiente de condutividade térmica da argamassa.

As fibras produzidas para adição na argamassa têm dimensões que variam entre 5,0 a 20,00 mm.

O início do processo de produção das fibras de alumínio consiste da usinagem de tarugos de alumínio o que resulta em até 50% de resíduos em relação ao insumo original. O processo de usinagem geralmente se inicia no torno mecânico.

A Figura 20 mostra a usinagem do Tarugo de alumínio produzido com alto controle de qualidade por torneamento mecânico e oferece matéria prima para produção de fibras de alumínio utilizadas como adição na argamassa.

Figura 20 - Torneamento do Tarugo de alumínio



Fonte: O autor.

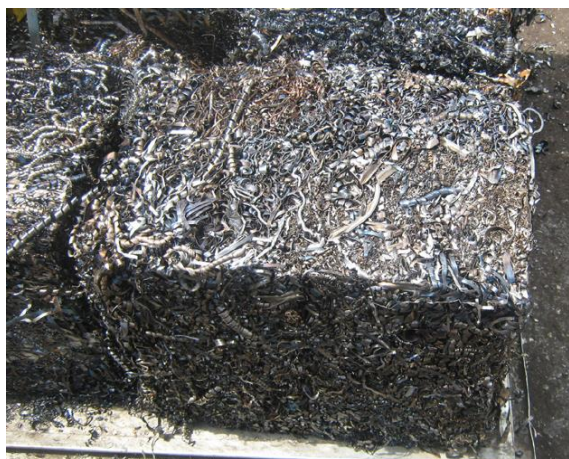
As Figuras 21,22,23,24,25,26 demonstram as fases de produção e tratamento das fibras de alumínio adicionadas à argamassa, as quais se referem a matéria prima para confecção das fibras (2); a matéria prima enfardada (22); o corte (23); a lavagem centrífuga (24); a secagem (25) e a caracterização.

Figura 21 - Mechas de cavaco de torno mecânico considerado resíduo.



Fonte: O autor.

Figura 22 - Separação e enfardamento das mechas de cavaco de torno mecânico



Fonte: O autor.

Figura 23 - Produção de fibras de alumínio em moinho de facas



Fonte: O autor.

Figura 24 - Enxágue e centrifugação das fibras aparadas para retirada do fluido refrigerante



Fonte: O autor.

Figura 25 - Fibras de alumínio e prontas para adição na argamassa



Fonte: O autor.

Figura 26 - Fator de forma das fibras de alumínio

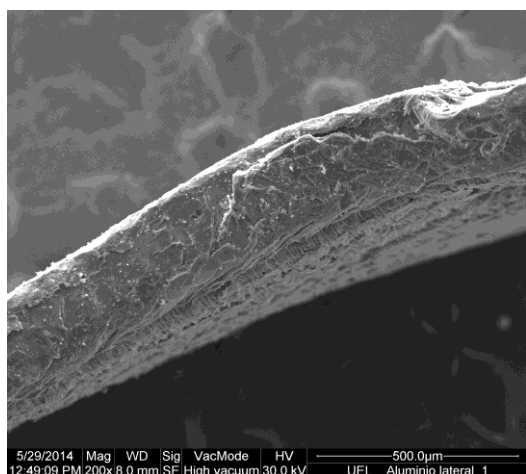


Fonte: O autor.

Os micros fragmentos estão aglutinados nas fibras demonstradas nas Figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

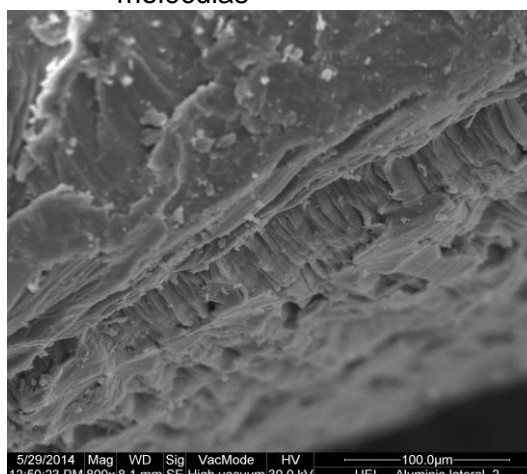
O enxágue em sistema fechado possibilita a reutilização de água por decantação para enxague das fibras de alumínio.

Figura 27 - Topo de corte das fibras



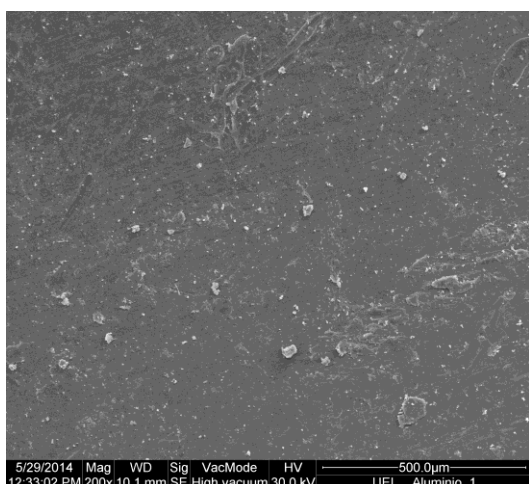
Fonte: O autor.

Figura 28 - Arestas no topo de corte das fibras indica o rompimento das moléculas



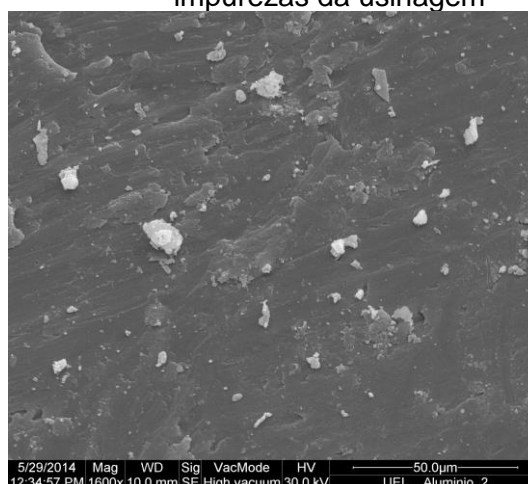
Fonte: O autor.

Figura 29 - Superfície das fibras



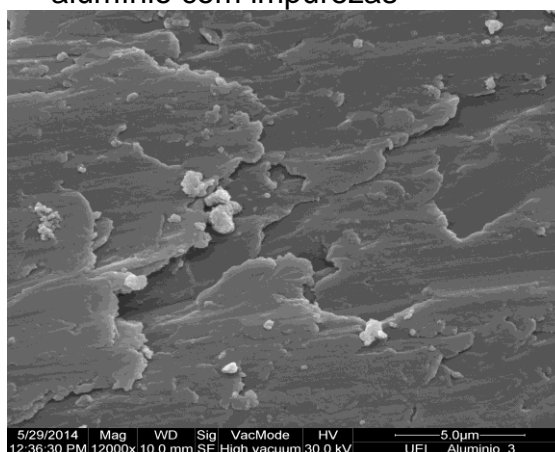
Fonte: O autor.

Figura 30 - Superfície das fibras com impurezas da usinagem



Fonte: O autor.

Figura 31 - Escamas na superfície das fibras de alumínio com impurezas



Fonte: O autor.

A técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X – XFR é um método de determinação precisa, rápida e não destrutiva de análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medidas dos comprimentos de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos. Os elementos que compõem a amostra são excitados por uma fonte primária de radiação, que assim passam a emitir uma radiação com comprimento de onda característico de cada elemento denominado raios X fluorescentes.

Através de um detector apropriado é possível medir o comprimento de onda, e consequentemente identificar os elementos presentes na amostra (amostra qualitativa). Como a análise dos raios X fluorescentes é proporcional à concentração de cada um destes elementos, torna-se possível quantificar os elementos presentes.

Esta técnica destina-se a analisar amostras sólidas, líquidas e gasosas, detectando elementos com número atômico superior a 11 até o urânio (último elemento natural existente na tabela periódica), em concentração variando de traços até a sua máxima concentração na amostra analisada.

3.4.1 Definição do Fator de Forma das Fibras

A adição de fibras na argamassa tem como uma das principais funções o controle de fissuração por retração restringida, que comumente surge durante a hidratação inicial do cimento. Este ganho de desempenho é tão maior quanto maior for o fator de forma da fibra, o qual é dado pela relação entre o comprimento da mesma e o diâmetro da circunferência com área equivalente à seção transversal da fibra.

No entanto, quanto maior for o fator de forma, maior será também a influência da fibra na perda de fluidez do material. Isto ocorre pelo fato de se ter uma elevada área específica, que demanda uma grande quantidade de água de mistura aumentando o atrito interno da argamassa e reduzindo sua mobilidade. Por outro lado, isto pode até ser positivo em determinadas aplicações onde se exige um elevado nível de coesão do material (FIGUEIREDO, 2006).

As fibras precisam ter correlação entre o tamanho e a caracterização da forma. Na construção civil, desenvolver um tipo de argamassa que tenha função de captar e armazenar energia como baterias, pode parecer um objetivo quase impossível de se atingir. No entanto, as características e proporcionalidades dos agregados e a forma e o

tamanho das partículas, fazem com que a composição de alguns materiais passe a adquirir importantes propriedades físicas que lhes confirmam funções sobressalentes às que já possuem.

Embora todos os materiais interajam com o ambiente, eles possuem a capacidade de alterar as suas características, como armazenar memória para atingir outras funções, as quais não tenham sido primariamente determinadas.

Nos nossos dias investiga-se a utilização na construção civil, materiais que possam modificar a temperatura do ambiente que os rodeia, através de interação com o meio: são materiais ativos que atuam quando o meio ambiente se altera, “Phase Change Materials” (PCM), fazendo com que tenham “memória” de características físicas originais. PCM são partículas de formas esféricas nas dimensões entre 0,020 μm e 2000 μm que atuam como microcontentores de substâncias inorgânicas em seu núcleo ou mesmo um metal, protegido por uma casca regente a substâncias externas que liberam seu ingrediente ativo do núcleo (MONTEIRO et al., 2005).

No caso das argamassas, a morfologia dos agregados com adição de partículas de metais ou elementos químicos pode influenciar em seus comportamentos referentes às propriedades de condução, resistência mecânica, durabilidade, capacidades reológicas e hidratação.

Já as fibras metálicas podem ser classificadas como fibras de alto módulo. E podem ser consideradas como fibras destinadas ao reforço primário da matriz, ou seja, não se destinam ao mero controle de fissuração.

O Brasil conta com fabricantes de fibras de aço desenvolvidas especialmente para o reforço do concreto e a produção mensal dos mesmos já ultrapassa a centena de toneladas (MINDESS, 1995). Com isto, cresceu muito a importância econômica deste material, o qual não será objeto principal de análise neste trabalho.

As vantagens do emprego da argamassa reforçada com fibras de alumínio são bem conhecidas do meio técnico internacional e começam a ser nacionalmente.

O objetivo dos ensaios foi encontrar o melhor teor de adição, tamanho e forma das fibras ou partículas, demonstrada na Tabela 29 a fim de (1) melhorar a condutividade térmica (2) equilibrar as reações de oxidação das fibras de alumínio (3) aumentar a vida útil da argamassa e (4) controlar a fissuração por retração.

Tabela 29 – Teor de adição, tamanho e forma das fibras ou partículas.

Parâmetro de forma das fibras e partículas		
	Fibras (mm)	Fragmentos (mm)
Perímetro	2 a 104	2 a 4
Superfície (mm ²)	8 a 208	8 a 14
Diâmetro equivalente	2 a 8	2 a 4
Fator de forma	0,08 a 0,4	1 a 0,5
Diâmetro Feret Mín.	25	2,5
Diâmetro Feret Máx.	27	3,5
Razão de aspecto	lamelar	esférica
Orientação	longitudinal	pontual
Largura da fibra	0,5 a 2	0,5 a 1,0
Ondulação da fibra	0,35	0,01

Fonte: O autor.

O tamanho das partículas elementares dos materiais utilizados na argamassa é extremamente menor em relação aos agregados, ou mesmo em relação à granulometria de pó de cimento. Sua distribuição estatística tem enorme importância no processamento dos compósitos e, também um grande efeito nas diversas propriedades requeridas na argamassa.

No caso das argamassas, foi constatada significativa redução no quadro geral de fissuração dada à ausência de agregado graúdo e menor módulo de elasticidade do material (FIGUEIREDO, 1998).

Em muitas situações não é fácil definir a dimensão das fibras, devido à sua forma muito irregular. Quando as adições assumem forma de partícula têm a forma esférica ou muito aproximadamente esférica, sendo relativamente simples definir os seus diâmetros. Quando as partículas apresentam formas muito irregulares – por exemplo, no caso de partículas de aspecto circular ou mesmo fibroso, a aplicação do termo “diâmetro” é praticamente impossível.

A esfera é a única forma geométrica que pode ser definida apenas por um parâmetro. Coloca-se, pois a questão de como definir a dimensão de uma partícula de forma irregular, existindo vários critérios, cada um dos quais apresentam as suas vantagens e desvantagens.

Muito deve ser estudado ainda no sentido da obtenção de uma metodologia de dosagem e controle das fibras de alumínio na argamassa para que seja possível o melhor desempenho de condutividade térmica. Isto se deve ao fato de que não existem métodos de ensaio consensuais, sendo utilizada hoje uma grande variedade deles que vão desde

placas e fios, ora possibilitando o uso de agregados graúdos ora não, com diferentes níveis de restrição e de condições de cura, etc.

Tal fato origina uma grande variação nos resultados e dificuldades na obtenção de correlações confiáveis com as condições práticas onde, mais uma vez, a temperatura, a área superficial, o nível de ventilação, etc., têm uma fortíssima influência e cuja parametrização nem sempre é facilitada (TANESI, 1999).

3.4.2 Definição do Teor de Adição de Fibras

A utilização de compósitos cresceu em diversidade, podendo ser encontrados em várias aplicações na construção civil como telhas, painéis de vedação vertical e estruturas de concreto como túneis e pavimentos, onde a matriz reforçada com fibras vem progressivamente ampliando sua aplicação entre as duas fases: a matriz e as fibras. As fibras podem atuar com funções diferenciadas na matriz de acordo com as propriedades desta e das próprias fibras (FIGUEIREDO, 2006).

Tendo em vista a grande variedade de fibras naturais e sintéticas com potencial para reforço de compósitos usados na produção de componentes para construção civil, torna-se imprescindível a caracterização destes materiais para melhor aplicá-los. Os ensaios devem ser precisos, ter repetitividade de resultados e serem simples e de fácil execução quanto possível. Existem métodos normalizados para a caracterização geométrica e ensaios de tração em fibras, mas que utilizam equipamentos e unidades características da indústria têxtil (ASTM D 1577-96; ASTM D3822-96) sendo, portanto, pouco usuais em laboratórios de materiais de construção. Além disso, as fibras a serem ensaiadas segundo estes métodos devem ser longas (comprimentos acima de 50 mm), o que nem sempre é possível para fibras utilizadas como reforço dos compósitos estudados como materiais de construção. Como exemplo pode-se citar o estudo de fibras residuais como a fibra do bagaço de cana-de-açúcar, que podem apresentar comprimentos abaixo de 10 mm (MOTTA; JOHN; AGOPYAN, 2003).

Dados encontrados na bibliografia e de fabricantes mostram expressivas variações das propriedades físicas e mecânicas das fibras sintéticas o que reforça a importância de sua caracterização. Bentur e Mindess (1990) destacam a necessidade de melhorar propriedades como módulo de elasticidade e aderência à matriz cimentícia, sendo que para atender essa necessidade as fibras sintéticas têm sofrido uma série de modificações

e tratamentos, que resultam em grandes diferenças de comportamento e propriedades para atenderem solicitações específicas de desempenho. Características como módulo de elasticidade, dispersão e geometria podem não ser as mesmas para fibras classificadas para uma mesma função. Como exemplo, para aumentar a resistência e rigidez dos compósitos, as fibras de reforço deveriam ter módulos de elasticidade maiores do que a matriz, que varia conforme o traço adotado.

A utilização das fibras produzidas com diversos tipos de materiais possui capacidades que vão além de aumento da tenacidade em compósitos, tornando o grau de exsudação menor nesses materiais. Há vários fatores que provocam este processo, sendo que os mesmos, sempre estão diretamente ligados aos teores e tamanho dos agregados, a matriz de cimento, grau de hidratação, mesmo quando combinados com aditivos (FITESA, 2002).

A trabalhabilidade pouco é influenciada com a adição de fibras em baixos teores. Bentur e Mindess (1990) apontam a diminuição de fluidez e aumento da coesão do concreto com fibras como um problema. No entanto, quando submetidos à vibração ou prensagem, os baixos teores de fibras apresentam trabalhabilidade adequada nos processos convencionais ou industriais de manipulação. O aumento do teor de fibras ou a utilização de fibras mais finas, com maior área superficial, reduzem a fluidez da mistura e aumentam a coesão. No entanto, isso pode ser favorável a algumas aplicações, como projetado, pré-moldado, por exemplo, uma vez que minimiza riscos de esfoliação e aumenta a estabilidade dimensional da peça fresca recém-desformada.

O aumento do teor de fibras reduz as características de fragilidade das matrizes de cimento. O maior número de fibras que servirão de ponte de transferência de tensão na seção de ruptura aumenta a energia de fratura do material (TANESI; TORNARI; FIGUEIREDO, 1997), devido à deformação plástica das fibras e do seu arrancamento da matriz. Da mesma forma, o teor de fibras influencia na eficiência do controle da fissuração por retração, pois terá melhores condições para restringir a propagação das fissuras ou mesmo o surgimento das mesmas.

Tanesi (1999) estudou os resultados da adição de fibras na fissuração por retração plástica e verificou-se uma redução na fissuração por retração com a adição de fibras no teor de 0,1%. A diminuição da fissuração atingiu 99% nas placas menores e 43% nas placas maiores. Isso demonstra que as dimensões das placas e a metodologia de dosagem interferem nos resultados da avaliação de ação das fibras.

A influência das fibras sobre as resistências à compressão e tração do compósito é pouco pronunciada ou mesmo inexistente, quando o teor de fibras é baixo (TANESI; TORNERI; FIGUEIREDO, 1997). O pequeno aumento de resistência que poderá ocorrer se deve à redução da relação a/c efetiva da matriz, pois uma parcela da água de mistura pode ficar adsorvida na superfície das fibras. Essa adsorção pode ser comprovada pela diminuição significativa da exsudação. A formação dessa zona de transição não compromete a resistência como ocorre com o agregado. Além disso, baixos teores de fibras dificilmente comprometem a compactação do material. No caso do emprego de teores superiores a 0,5% em volume, poderá haver uma diminuição da resistência do material, devido a um mau adensamento do mesmo e incorporação de ar. Apenas a adição de teores elevados promove incremento da resistência à tração, se os efeitos adversos citados anteriormente forem evitados. Esse aumento de resistência, no entanto, não ultrapassa 20% (BENTUR; MINDESS, 1990).

O alumínio é um material hidrofóbico e não absorve água. Com sua adição na argamassa haverá aumento de superfície e, necessariamente, maior hidratação relacionada à trabalhabilidade e espessura de aplicação, com inúmeros filamentos e fragmentos, que se comportam como verdadeiros obstáculos à exsudação da água. Desta forma, a água permanece por maior período, gerando melhores condições de hidratação e diminui patologias geradas pela exsudação elevada durante a pega.

Para obter maior desempenho, as fibras devem estar correlacionadas a fatores como: relação l/d, comprimento, módulo de elasticidade, dosagem, tipo e caracterização dos agregados, matriz de cimento e capacidades reológicas.

A adição de teores de fibras manifesta interferência na condutividade térmica da argamassa e melhora algumas de suas propriedades de resistência mecânica. São produtos ou subprodutos industriais e fazem com que seu custo seja reduzido quando comparado à produção com matérias primas virgem, obtida em processos que envolvam tratamento térmico com alto consumo de energia.

Estas fibras de alumínio e os materiais que compõem a argamassa apresentaram coeficientes de dilatação volumétrica e linear diferenciados, resultando em alterações de massa menores que 1,0 % em temperatura ambiente. A dilatação não é visível, variando de acordo com o material e a temperatura. A dilatação linear é apenas teórica, sendo que para que algo exista ele deve ser tridimensional. Numa dilatação o material irá dilatar em

três dimensões, mas como não é possível calcular essa dilatação, adota-se somente o cálculo da dilatação linear.

O coeficiente de dilatação linear (α) é constante em apenas alguns intervalos de temperaturas. Seus valores estão demonstrados na Tabela 30 e são obtidos por médias de temperaturas. Os índices de dilatação devem possibilitar a interação entre os materiais para que não haja deformações ou fissuras.

Tabela 30 – Índices de dilatação entre os materiais

		Índices de Dilatação		
	Material	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (Máx)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (Mín)	Temperatura
1.	Alumínio	25,0	21,0	100°C-390°C
2.	Cimento	6,8	11,9	ambiente
3.	Rocha de Basalto	9,7	3,3	ambiente
4.	Silício	2,6	2,1	ambiente

Fonte: UNIOESTE (2014).

As fibras de alumínio ensaiadas foram produzidas exclusivamente para este estudo, tendo como origem resíduos da indústria mecânica. São fibras não disponíveis no mercado com comprimentos de variam entre 6 e 25 mm, tendo como principal função a condutividade térmica em argamassa com matriz de pasta de cimento.

Buscou-se atingir características físicas para melhor desempenho da transferência de calor e índice de condutividade térmica, em ensaios com teores entre: 5, 10, 15 e 20 %.

3.5 PRODUÇÃO DA ARGAMASSA

3.5.1 Traços

Chama-se traço, a proporção em volume entre os componentes das argamassas, usualmente cimento, cal hidratada e areia. Os traços variam de acordo com a utilização que vai ser dada à argamassa (LAPA, 2011).

O processo de dosagem que define a composição da argamassa e a relação entre as proporções de cimento, areia, hidratação e aditivos é denominado traço simples quando apresenta um elemento ativo, ou apenas um aglomerante como o cimento e pode ser especificado em massa, em volume ou em peso.

As proporções de cimento e agregados definem se a argamassa terá maior ou menor resistência mecânica ou a agentes agressivos, em relação à finalidade de uso. A dosagem pode ser experimental ou não. A argamassa dosada sem ensaio em laboratório tem uma resistência à compressão esperada menor que 6,0 MPa.

Para argamassas com resistências maiores ou com características específicas, é necessário que se realizem estudos em laboratório para definir os traços mais adequados. A Tabela 31 apresenta algumas características para determinar traços básicos de argamassa, em relação à densidade de massa entre a massa e o volume de material, considerando o volume de vazios.

A massa específica da argamassa classificada no estado fresco tem parâmetros que devem ser seguidos como especifica a NBR NM 23:2000.

Tabela 31 – Classificação das argamassas quanto a massa específica no estado fresco
Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.

Argamassa	Massa específica da argamassa A (g/cm ³)	Principais agregados empregados	Usos
Leve	< 1,40	Vermiculita, Perlita, Argila Expandida	Isolamento térmico e acústico
Média	$2,30 \leq A \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) Calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	>2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001).

Foi ensaiado no laboratório de aglomerantes o traço unitário em massa 1:3 com adição de fibras de alumínio. A Tabela 32 proporciona o traço de referência, com diferentes percentuais na adição de fibras de alumínio. Os traços ensaiados mantiveram a mesma proporcionalidade dos agregados e pasta de cimento, variando-se apenas o teor de fibras.

Tabela 32 – Traços ensaiados dos agregados e pasta de cimento

PLANILHA DE ENSAIOS – LABORATÓRIO DE MATERIAIS – DCC – CTU – UEL							
Método Praticado: (1:3) - Modelagem de Argamassa com Fibras de alumínio em molde de aço cilíndrico.							
ENSAIO N° 003/Teor	Unid. de Massa: Gramas (g)			Dimensões: (mm)		DATA:18 /10 / 2013	
Agregado/Granulometria	# 4,80	# 2.40	# 1,20	Resíduos	Hidratação	% Parcial	% Total.
Cimento ARI CP - V				2.500		100,0	25,00
Basalto	5.250			2.250		70,0/30,0	75,00
Massa dos agregados							10.000,0g
Água (ml)					1.810		18,10
Massa total do traço							10.180,0g
Dimensões dos Corpos de Prova ($\varnothing = 50,0$ e $L = 100,0$ mm).							

Fonte: O autor.

3.5.2 Mistura

Os materiais da argamassa foram misturados utilizando-se uma mini-betoneira elétrica. Os materiais foram colocados no tambor da mini-betoneira seguindo procedimentos para se alcançar homogeneidade e menor incorporação de ar durante a mistura.

Neville (1982) estabeleceu três pontos para se conseguir uma mistura adequada;

- i. A primeira preocupação deve ser não a do tempo de mistura, mas do número de revoluções da betoneira. Geralmente são suficientes em torno de 20 revoluções. Como existe uma velocidade ótima de mistura, o número de revoluções e o tempo estão relacionados.
- ii. As experiências de Shalon e Reinitz mostram dados típicos obtidos em experiências, onde se nota que a mistura, quando executada em tempos inferiores a 1 minuto fornecem argamassas mais variáveis. No entanto, tempos superiores a 1 1/4 minutos não fornecem aumentos significativos na uniformidade.
- iii. O tempo prolongado de mistura pode comprometer algumas das características das amostras. Geralmente ocorre evaporação de água da mistura, o que pode diminuir a trabalhabilidade da argamassa e aumento da resistência mecânica. Além disso, o atrito entre as partículas produz um aumento de temperatura da mistura.

Os materiais que constituem a argamassa são: areia de basalto nas duas proporções, fibras de alumínio, cimento e água. A hidratação ocorreu logo após o lançamento dos agregados. Inicialmente, se deve adicionar apenas 10 % do total de água. Esse procedimento inibe a suspensão de pó e facilita a incorporação das fibras, durante o processo reológico entre as fibras e a pasta de cimento. Em seguida foram adicionadas as fibras, o cimento e o restante de água. Todo o processo não deve ultrapassar a 1 minuto para que não haja excessiva incorporação de ar durante a mistura.

Adotou-se o método de dosagem e controle de qualidade, onde a argamassa é considerada uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo aditivos ou adições, com no mínimo 1.900,00 Kg/m³ e propriedades de aderência e endurecimento determinantes na dosagem contidas na NBR 13529:2013 (ABNT, 2013).

A proporcionalidade dos materiais constituintes da argamassa é expressa em massa, tomando-se como referência o cimento.

A resistência da argamassa depende, essencialmente, do aglomerante usado, da densidade aparente da areia, do índice de hidratação do aglomerante. Para haver aumento de resistência mecânica devem-se criar condições para contrapor a diminuição da trabalhabilidade.

3.5.3 Procedimentos para Mistura da Argamassa

Na mistura da argamassa foram adotados vários procedimentos para melhor adequar a sequência de lançamento dos materiais e controle de pó.

Para a mistura dos materiais utilizados nos traços de ensaio, foi construída uma argamassadeira metálica com capacidade de 50 litros, com inversor elétrico para controle de rotações e mecanismo de articulação para ajuste da inclinação do ângulo durante o lançamento dos materiais e mistura como demonstra a Figura 32.

Figura 32 – Argamassa durante a mistura, parcialmente hidratada para o controle de suspensão do pó de pedra, potencialmente nocivo devido à silicose.



Fonte: O autor

3.6 MODELAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova têm altura igual ao dobro do diâmetro. As dimensões diametrais têm tolerância de 1% e a altura, 2%. Os planos das bordas circulares extremas do molde devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal.

Inicialmente os corpos de prova receberam adensamento manual com pilão e vibração. Posteriormente, foram prensados manualmente conforme demonstraram as Figuras 33,34, para que fossem desmoldados com a retirada das castanhas que os envolviam (Figuras 35,36). Esse processo foi desenvolvido para que possibilitasse a exsudação da água utilizada na mistura da argamassa e facilitasse o desmolde do corpo de prova demonstrado nas Figuras 37,38.

Figura 33 - Prensagem da argamassa para moldagem do corpo de prova, em câmara de aço para suportar 50 MPa de pressão



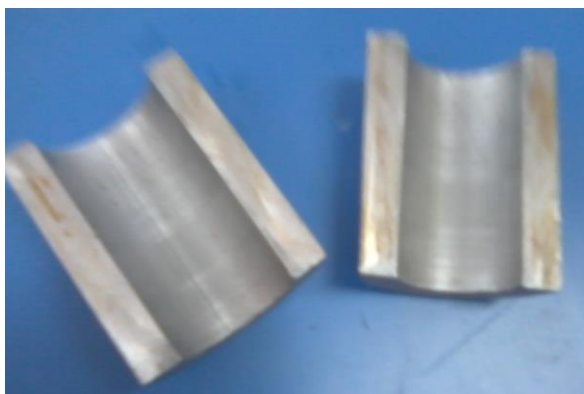
Fonte: O autor

Figura 34 - Corpo de prova com dimensões de 25 x 50 mm, prensado e pronto para regularização da superfície dos topos



Fonte: O autor

Figura 35 - Castanhas de aço que envolvem o corpo de prova durante a moldagem



Fonte: O autor

Figura 36 - O corpo de prova moldado sob pressão pode ser imediatamente manipulado para início da cura



Fonte: O autor

Figura 37 - Peças que compõem o molde destinado à moldagem de corpos de prova.



Fonte: O autor.

Figura 38 - Corpo de prova sobre o molde.



Fonte: O autor.

3.6.1 Cura dos Corpos de Prova

Cura – procedimentos a que se recorre para promover a hidratação do cimento e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade para os compósitos à base de cimento (NEVILLE, 1982).

A cura é realizada por duas razões: hidratar o cimento e reduzir ao máximo a retração do concreto – NBR 5738:2003 (ABNT, 2003a).

Decorridas 15 h do momento da moldagem, passou-se um abrasivo para aço sobre o topo do corpo de prova para remoção e retificação, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo do cilindro, antes de ser preparado para cura. Esta operação foi executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade, com a utilização de ferramentas abrasivas, para posteriormente ser acrescentado o capeamento com uma fina camada consistente de pasta de prata, com esp. $\leq 1,0$ mm.

A retificação deve ser feita para que se garanta a integridade estrutural das camadas adjacentes à camada removida, e proporcione uma superfície lisa e livre de ondulações ou falhas. Eventuais falhas em algum ponto da superfície do topo não deverão ultrapassar dimensões de 0,05 mm.

Durante as primeiras 24 h todos os corpos-de-prova foram armazenados em local protegido de intempéries, sendo devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda de água contida na argamassa.

Antes de serem armazenados, os corpos de prova devem ser identificados. Imediatamente após sua identificação, os corpos de prova foram armazenados sobre uma

superfície horizontal rígida com cavidade igual ao seu diâmetro, livres de vibrações ou de qualquer outra causa que possa perturbar o estado da argamassa, permanecendo imerso em água por 28 dias até o momento do ensaio ou em câmara úmida à temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%. Os corpos-de-prova não devem ficar expostos em ambiente seco, gotejamento e à ação de água em movimento.

Os corpos-de-prova foram ensaiados aos 28 dias de idade, e moldados com a finalidade de verificar a resistência e condutividade térmica da argamassa em relação aos teores de fibras adicionadas para ensaios.

3.6.2 Método Utilizado para Medição da Condutividade Térmica da Argamassa

Condução térmica ou difusão de calor é a transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas vizinhas em uma substância devido a um gradiente de temperatura. Este fenômeno é causado pela diferença de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio, ou entre dois meios em contato. Isso sempre ocorre a partir da região de maior temperatura para uma região de menor temperatura, atuando até que ocorra o equilíbrio térmico (THOMAZONI; TORRES; SANTOS, 2010).

Segundo Chapetta (2002), condução é o modo de transferência de calor em que a troca de energia, em forma de calor, flui de uma região de alta temperatura para uma baixa temperatura pelo movimento cinético ou pelo impacto direto de moléculas, no caso de fluídos em repouso, e pelo movimento de elétrons no caso dos metais.

Santos (2005), afirma que atualmente são conhecidos vários métodos para a determinação da condutividade térmica de um material. Esses métodos podem ser divididos em duas grandes classes: métodos diretos e métodos indiretos.

Os métodos diretos são aqueles que medem diretamente a condutividade térmica a partir dos resultados experimentais, e como exemplo pode ser citado o método calorimétrico de placa quente e placa fria. Os métodos indiretos são aqueles que medem experimentalmente uma determinada propriedade do material, e a partir dessa propriedade obtém-se o valor da condutividade térmica. O método de pulso de energia é determinado experimentalmente pelo valor da difusividade térmica, e a partir do conhecimento ou medida do calor específico e da densidade do material, determina-se a condutividade térmica.

Quanto à utilização ou não de padrões, os métodos experimentais podem ser classificados em duas categorias: comparativos e absolutos. Os métodos comparativos

requerem um ou mais corpos calibrados, que são tomados como referência. Como exemplo pode ser citado o método da coluna fracionada, que utiliza dois corpos padrão como referência. Os métodos absolutos determinam a medida da condutividade térmica diretamente, dispensando o uso de padrões de comparação. Como exemplo pode ser citado o método do fio quente. De acordo com o regime de troca de calor utilizado, os métodos existentes podem ainda ser classificados em dois grandes grupos: métodos estacionários e não estacionários.

Métodos estacionários são aqueles que medem a condutividade térmica num regime estacionário de troca de calor. Como exemplos podem ser citados todos os métodos calorimétricos. Já os métodos não estacionários medem a condutividade térmica durante um regime transiente de troca de calor. Os métodos não estacionários podem ainda ser divididos em duas categorias: métodos de fluxo de calor constante e métodos de fluxo de calor transiente.

Os métodos de fluxo de calor periódico transiente são aqueles onde as condições nas extremidades de uma barra ou de uma placa variam com um período conhecido. Quando o estado estacionário é atingido, as temperaturas em certos pontos pré-estabelecidos são registradas, e a difusividade térmica é calculada a partir dessas temperaturas. Como exemplo desse método, pode ser citado o método de Angstrom, onde a condutividade térmica pode ser calculada, desde que se conheça o calor específico e a densidade do material.

O método escolhido para as medições foi o direto, utilizando resultados experimentais comparativos em regime estacionário e a difusividade térmica calculada com a medição dessas temperaturas.

Foram selecionados três corpos de prova de uma série de seis, de cada traço com teores diferentes de fibras de alumínio, estimando que a condutividade térmica teria variação de aproximadamente 0,25 W/m K. Os corpos de prova utilizados são cilíndricos com as dimensões aproximadas de 25 x 50 mm, que serão designados por AF⁰⁻¹, AF⁵⁻², ..., AF¹⁰⁻³.

Para determinação do desempenho na transferência de calor na argamassa com teores de fibras; 0,0, 10,0, 20,0 %, o equipamento foi calibrado com um tarugo de alumínio nas mesmas dimensões dos corpos de prova para comparativamente serem analisadas as taxas de transferência de calor nos traços com diferentes teores de fibras de alumínio.

Os corpos de prova utilizados para coleta de dados, com forma cilíndrica, foram moldados em forma de aço usinado nas dimensões 25X50 mm.

Os termopares foram inseridos nas tampas de cobre das duas extremidades, sendo unidos nas tampas e nas faces redondas do cilindro com pasta dissipadora de calor (Thermal SILVER), eliminando eventuais vazios na superfície que eventualmente existam. Os corpos de prova foram estabilizados à temperatura de ambiente climatizado 20 °C com medições a cada segundo por um período de três mil e seiscentos segundos.

Analisando as linhas de tendência do gradiente de calor em relação ao tempo, foi possível determinar o traço com teor de fibra que alcançou melhor desempenho na aceleração da transferência de energia e acúmulo de calor na argamassa.

Para os ensaios de transferência de calor por condução foram utilizados equipamentos apresentados nas Figuras 39 e 40.

Durante o processo de ensaio térmico, os corpos de prova, inicialmente encontravam-se em temperatura ambiente, sendo envolvidos num receptáculo de material “TeflonTM” resistente a temperaturas de até 260,0°C, para que durante o período do ensaio se mantivessem isentos de variações externas de temperatura.

Os corpos de prova receberam tratamentos demonstrados na Tabela 33, e posicionados na câmara de ensaio para coleta de dados.

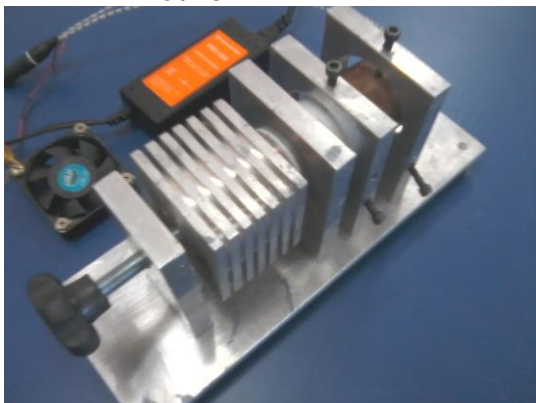
Tabela 33 – Parâmetros de tratamento nos CP para os ensaios de transferência de calor na argamassa

Parâmetros de tratamento nos CP para os ensaios de transferência de calor na argamassa	Tratamento		
	CP 01	CP 02	CP 03
Pressão do ensaio (torr)	CNTP	CNTP	CNTP
Temperatura inicial do CP (°C)	20	20	20
Tempo de aquecimento (segundos)	1200	1200	1200
Tempo de transferência (segundos)	1200	1200	1200
Tempo de desligamento (segundos)	1200	1200	1200
Área de contato dos termopares com o CP (mm ²)	490,87	490,87	490,87
Diâmetro do corpo de prova (mm)	25,00	25,00	25,00
Comprimento do CP (mm)	50,00	50,00	50,00

Fonte: O autor.

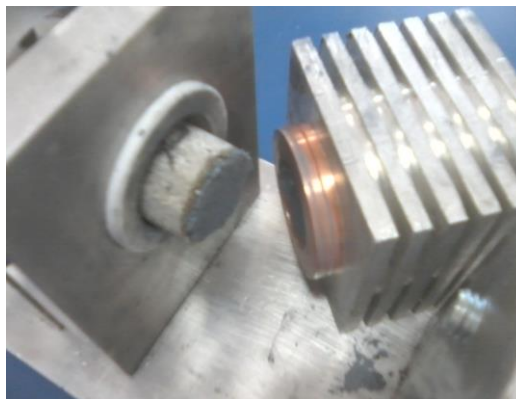
Para determinar a transferência de calor na argamassa os equipamentos foram dispostos em bancada como mostram as Figuras 39 e 40:

Figura 39 – Dispositivo desenvolvido para medição de transferência de calor, seguindo a Lei de Fourier



Fonte: O autor.

Figura 40 – Corpo de prova inserido no dispositivo para medição de transferência de calor.



Fonte: O autor

Segundo Santos (2005), a formulação matemática do método, o fio quente paralelo de superfície é assumido por ser uma fonte de calor ideal (massa = 0 e, portanto, capacidade térmica = 0), infinitamente longa e fina (diâmetro = 0), a qual é circundada até o infinito pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar.

Esta hipótese implica que o transiente de temperatura que é registrado pelos termopares, no ponto de medida, durante o experimento, não pode ser alterado pelo fato da amostra real ter dimensões finitas. Ao passar uma corrente elétrica constante através do fio, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pela fonte e vai se propagar através do material. Essa propagação de calor num meio infinito gera no material um campo transiente de temperaturas.

Na prática, a fonte teórica linear é aproximada por uma resistência elétrica e o sólido infinito é substituído por uma amostra finita. Assim sendo, a capacidade térmica do fio, a resistência de contato entre ele e a amostra e o tamanho finito da amostra são fatores que impõem um tempo mínimo e um tempo máximo a serem utilizados no cálculo da condutividade térmica.

A equação básica para transferência de calor, enunciada por Fourier, é:

Q_x , a taxa de transferência de calor é igual ao produto dos seguintes fatores:

k = constante de proporcionalidade, denominada *condutividade térmica* do material, em Watts/metro.graus Celsius (W/m^0C)

A = a área da seção através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente na direção do fluxo, em metros quadrados (m^2)

$\frac{dT_{(x)}}{dx}$ = é o gradiente de temperatura da seção ou variação da temperatura com a distância da taxa de calor, em graus Celsius/metro ($^{\circ}C/m$)

$$Q_x = -k.A \frac{dT_{(x)}}{dx} \quad (5)$$

A Equação de Fourier mostra que o fluxo de calor por condução, em uma determinada direção é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura na mesma direção.

3.6.3 Equipamentos Utilizados nas Medições

A energia é transmitida sempre que exista um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contato. O processo pelo qual a energia é transportada é chamado de transferência de calor. O que se desloca e é chamado de calor, não pode ser medido ou observado diretamente, mas o conceito tem significado físico porque é relacionado a uma grandeza mensurável, denominada temperatura. Assim, quando houver fluxo de calor, também ocorrerá um gradiente de temperatura em um sistema e, portanto, conhecer a distribuição de temperatura de um sistema é essencial para o estudo da transferência de calor.

Conhecendo-se a distribuição de temperatura e a grandeza do fluxo de calor, que é a quantidade de calor transferido por unidade de área e tempo, pode-se determinar a partir de fórmula empírica que relaciona o fluxo de calor ao gradiente de temperatura.

Para desenvolver novos materiais e outras utilizações para os já existentes, torna-se importante determinar e atribuir valores à condutividade térmica, quando aliado a densidade e resistência do material em baixas amplitudes térmicas.

A condutividade térmica representa a capacidade de um material conduzir maior ou menor quantidade de calor. Esta relação é descrita pela lei de Fourier e tem como principal condicionante a diferença de temperatura entre as duas fronteiras do sistema.

Condução de calor é a troca de energia entre corpos a diferentes temperaturas em contato, onde moléculas de maior nível energético transferem energia às outras circunvizinhas. Para sólidos não metálicos, o mecanismo básico de condução está

associado às vibrações das estruturas eletrônicas e para os metais, os elétrons livres que podem se mover na estrutura cristalina, aumentando a intensidade de condução da energia. Assim, materiais que forem bons condutores elétricos, provavelmente serão bons condutores térmicos.

Um dos métodos para medir a condutividade é da **placa quente compensada**. Nesse sistema uma placa plana é colocada entre uma placa aquecida e outra que é resfriada, mantendo uma temperatura menor do que a outra, causando uma diferença de temperatura e conseqüentemente fluxo de calor. Isto é feito de forma a tornar esse fluxo unidirecional para que a condutividade térmica possa ser calculada através da medição do fluxo de calor e do gradiente médio de temperatura da amostra.

Com o objetivo de montar uma bancada experimental para obter o valor provisório da condutividade térmica em argamassa com fibras de alumínio através no método clássico proposto pela da equação Fourier, foi identificado o regime permanente de transferência de calor através de corpos de prova moldados com argamassa em diferentes teores de fibras de alumínio.

A montagem do dispositivo para aquisição de dados se deu seguindo princípios contidos na NBR 12094:1991, e ofereceu condições para que o fluxo de calor atravesse a área central do corpo de prova em sentido unidirecional. Os termopares foram posicionados no centro dos topos dos corpos de prova (ABNT, 1991a).

Para a geração de calor utilizou-se uma resistência elétrica tubular com 10x50 mm, inserida numa placa cilíndrica de cobre, gerando um sistema permanente e controlado de calor. A placa quente circular é constituída por um anel de cobre, como núcleo, preso por parafusos com a função de evitar a dissipação de energia do núcleo para o equipamento. Na placa fria, foi instalado um dissipador de calor refrigerado com ar por ventilação. Os termopares foram posicionados nos centros das faces das placas, quente e fria, que possibilita coletar os dados de temperatura em cada extremidade do sistema unidirecional. Para manter as temperaturas adequadas, os ensaios foram realizados em ambiente climatizado.

4 RESULTADOS

Avaliaram-se fatores como traço, granulometria dos agregados, teores de adição das fibras de alumínio e fator de forma e sua relação com os resultados dos ensaios de resistência mecânica, resistividade elétrica e condutividade térmica da argamassa.

Para a mistura foi necessário adotar procedimentos específicos para que as fibras se distribuíssem homogeneamente entre os agregados e a pasta de cimento. A moldagem dos corpos de prova teve que ser feita em dimensões reduzidas, sob pressão de 50 MPa, permitindo a redução dos poros capilares provenientes da água de amassamento e dos poros incorporados em decorrência da adição de fibras.

A argamassa foi submetida a análises em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), por ensaios descritos em Normas Técnicas específicas para: Caracterização dos Agregados, Resistência Mecânica, Microtomografia, Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, Resistividade Elétrica e Medições de Condutividade Térmica utilizando o Método da Placa Quente Protegida. Os resultados posteriormente passaram por tratamento de média estatística.

Nos ensaios de condutividade térmica se avaliaram os diferentes teores de fibras de alumínio adicionados, a disposição das mesmas na argamassa de areia de basalto e sua capacidade de transferência de calor. Os ensaios foram realizados em sistema termodinâmico fechado, pois embora houvesse fluxo de calor, não havia fluxo de massa através das fronteiras do sistema. A Tabela 34 mostra os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa.

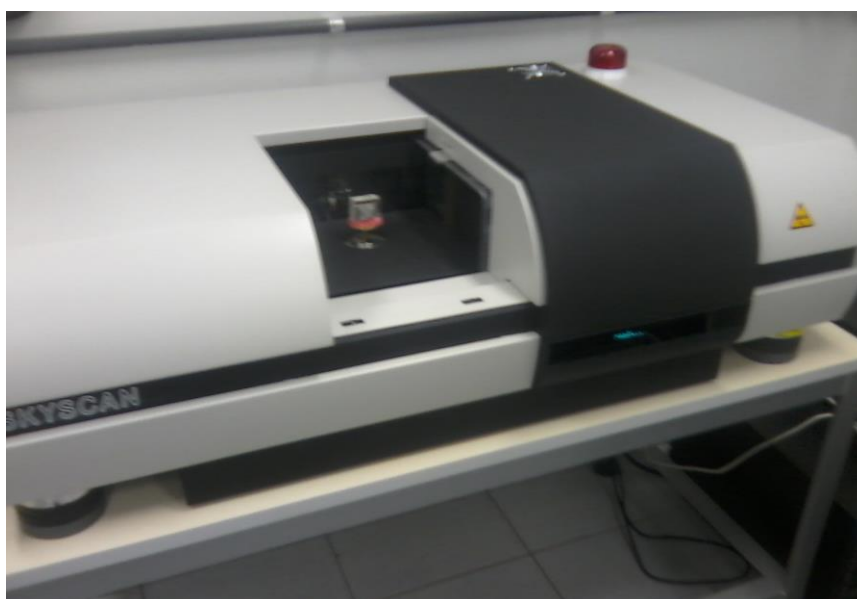
Tabela 34 – Resultados dos ensaios de caracterização da argamassa

Tipo de ensaio	Norma de referência	Resultados
Hidratação		18,1% Total da Massa
Granulometria	NBR NM 248:2003	Anexo I
Massa Específica	NBR NM 52:2009	2,94g/cm ³
Massa Unitária	NBR NM 45:2006	1,76g/cm ³
Absorção	NBR NM 30:2001	6,5%
Material Pulverulento	NBR NM 46:2003	19,9%
Argamassa no estado fresco com 10% de teor de fibras		
Consistência	NBR13528:2010	17±1,0 cm
Ensaio com corpos de prova aos 28,0 dias		
Res. Comp. Axial - (Teor: 20%) - (NBR 7222:2011)		3,80 MPa
Res. C. Diametral - (Teor: 20%) - (NBR 7222:2011)		4,20 MPa

Fonte: Adaptado da ABNT (2001, 2003b, 2003c, 2006, 2009c, 2010, 2011).

Os ensaios feitos por equipamento SKYCAN de microtomografia, demonstrado na Figura 41 fez sucessivas análises por difração a cada 13 μ m de espessura em fatias transversais no corpo de prova.

Figura 41 - Equipamento de microtomografia utilizado na análise de posicionamento tridimensional das fibras de alumínio e dos agregados e porosidade da argamassa – Laboratório de Física Nuclear – Departamento de Física – UEL.



Fonte: O autor

4.1 MICROTOMOGRAFIA

A microtomografia de raios-x computadorizada utilizada na medicina é menos conhecida na análise de imagens em materiais. Tal técnica fornece mapas ou gráficos precisos em relação à variação da absorção de raios-x em uma amostra, independente de sua subestrutura nos diferentes estágios do material com imagens e gradientes de densidade com pequena variação nos resultados em relação aos métodos convencionais.

Esse tipo de ensaio possibilita verificar parâmetros estruturais na argamassa como: porosidade, distribuição dos agregados e adições, envoltos na matriz que influenciam nas propriedades favoráveis a condutividade térmica em sólidos.

Para a realização das leituras no microtomógrafo SkyScan, foram selecionados um corpo de prova contendo diferentes teores de fibras na argamassa. Pelo fato desta técnica se basear na obtenção de projeções bidimensionais do objeto analisado enquanto é rotacionado, é conveniente modelar o corpo de prova na forma cilíndrica.

Cada corpo de prova foi posicionado no compartimento de amostras do equipamento e fixado com massa de modelar. As amostras investigadas foram rotacionadas em 360°, adotando-se um passo de 0,25°. A cada passo, são adquiridos vários quadros gerando-se, no final, uma imagem. Após a captura das imagens as mesmas são reconstruídas, para que possa ser possível sua visualização 3D. Através das projeções adquiridas e do software CTAn, foram obtidos parâmetros morfológicos, bem como representação tridimensional da estrutura da argamassa escaneada.

Para o cálculo da porosidade média dos materiais estudados, foram consideradas todas as seções bidimensionais ao longo do volume analisado.

Como técnica não destrutiva, que reconstrói e modela o interior das amostras em escala micrométrica (μ), possibilita resolução e contraste aplicáveis em diversas análises estruturais e químicas em materiais e torna possível avaliar modificações tridimensionais da estrutura porosa, o que não é possível analisar com técnicas tradicionais.

Na fase de aquisição de dados foram coletadas entre 1305 e 1229 seções transversais em cada corpo de prova com diferentes teores de fibras. Esta análise atingiu cerca de 13,4 μ m de resolução por fatia e o procedimento, durou em torno de seis horas para cada análise. Na segunda fase, as seções analisadas foram reconstruídas em imagens 2D e 3D. Na terceira fase, a partir da amostra reconstruída, foi realizada a parametrização (software CTAn) e geração de animações em 2D e 3D.

O volume de poros encontrados nos corpos de prova com diferentes teores foram 1,0% na argamassa com adição de fibras 0%, 1,10 % na argamassa com adição 10,0 % e 2,94 % na argamassa com adição 20,0 %.

As imagens demonstraram que a pasta de cimento utilizada entre os agregados, foi utilizada em sua maior parte, no preenchimento de vazios remanescentes do traço com maior teor de fibras e se deve ao aumento da área de contato das fibras. Quando utilizada, a técnica de binarização das seções transversais possibilita separar e quantificar o volume de cimento e porosidade. Outros softwares aplicados ao equipamento permitem a visualização por diferentes imagens em profundidade da microestrutura interna com a geração de imagens e vídeos em duas cores ou tons de cinza.

Determinar a porosidade total da argamassa estabelece um parâmetro, mas não é suficiente para avaliar o nível de porosidade localizado em pontos específicos da argamassa. Uma vez que a argamassa possui poros isolados, esses impedem a condutividade entre os materiais, os quais não contribuirão para transferência de calor

pela estimulação de agentes externos através das camadas até o interior da argamassa. Desta forma, é importante avaliar conjuntamente, o percentual de porosidade aberta, em toda a extensão do corpo de provas para se estimar sua presença em relação ao traço, adição e hidratação.

Como exemplo, a superfície das fibras de alumínio em contato com a argamassa no estado fresco, cria uma camada de vazios entre a fibra e a matriz de cimento e por isso todo e qualquer resíduo originário do corte da fibra deve ser removido, para que a porosidade entre a interface da fibra e da matriz de cimento apresente o menor percentual de vazios e venha resultar em maior aderência e conectividade.

Essa análise possibilita maior compreensão da estrutura entre agregados e a matriz de cimento da argamassa e a condutividade térmica em relação ao índice de porosidade nos diferentes teores de fibras, fissuração, capilaridades abertas ou fechadas no interior do corpo de prova que irão influenciar nos resultados dos ensaios de condutividade térmica.

No estudo da porosidade, esse tipo de análise forneceu dados qualitativos e quantitativos relacionados à forma, tamanho, distribuição, volume, área e conectividade dos poros, buscando investigar a aplicação dessa técnica para caracterização dos agregados micro estruturalmente e quantificar a porosidade causada pela adição de fibras.

A microtomografia como técnica complementar, é diferenciada na caracterização de materiais, com especial ênfase no aspecto não destrutivo, que permite obter imagens de seções transversais, cálculos morfológicos com boa precisão e modelos 3D da estrutura, deixando a amostra intacta para ensaios ou análises posteriores. Quando complementada com a microscopia eletrônica de varredura – MEV, atua em escala não acessível pela microtomografia, bem como, elucida questões como a presença de componentes e mapeamento de elementos na amostra através da espectroscopia de raios-X de energia dispersiva, facilitando elucidações sobre as interações dos agregados e a matriz de cimento.

O tempo das análises, como morfologia e modelagem, variam de acordo com o tipo da amostra e de análise.

A microtomografia mostrou-se valiosa para a caracterização porosimétrica da argamassa. Esta técnica destacou-se por determinar índices físicos e visualização interna

das amostras em 2D e 3D, além de possibilitar imagens sucessivas das diversas faces analisadas.

Foi confeccionado um total de 08 corpos de prova cilíndricos de (25 x 50) mm, para cada teor de fibras adicionado. Todos os corpos de prova foram produzidos com o mesmo traço e dosagem de cimento, sendo alterados os percentuais das adições de fibras, cujas respectivas desformas foram realizadas 04 horas após a moldagem.

Após a desforma, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, imersos em água, com temperatura controlada em 23 ± 2 °C, até o momento da realização dos ensaios por microtomografia e preservando os corpos de prova para os ensaios de transferência de Calor por análise comparativa.

O objetivo desta análise é o reconhecimento da interação entre as fibras de alumínio e a pasta de cimento. Posteriormente, foram analisados cinco traços de argamassa com areia de basalto com diferentes teores de fibras para confecção de lâminas delgadas, para análise química e análise dos minerais por microsonda eletrônica e difração de raios-X.

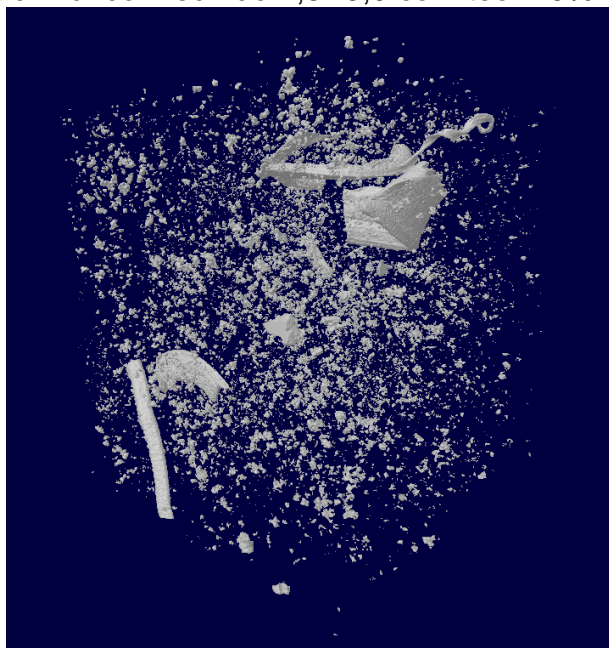
Posteriormente, na análise em microscópio eletrônico de varredura, observou-se a textura e estrutura da argamassa com a completa descrição dos principais minerais, os secundários e a adição, além das reações que ocorreram após a hidratação do cimento. Para melhor interpretação da interação entre as fibras, agregados e pasta de cimento foram feitas indicações esquemáticas nas fotografias dos principais componentes que formam a estrutura da argamassa.

4.2 ANÁLISE DA DISPOSIÇÃO E ARRANJO DAS FIBRAS NA ARGAMASSA

Os microtomógrafos computadorizados fazem a reconstrução completa da amostra na forma de uma imagem 3D a partir do empilhamento de sessões 2D. Estas, por sua vez, são obtidas através de um algoritmo de reconstrução aplicado às projeções tomadas da amostra. Para a reconstrução tridimensional e obtenção de dados sobre a microestrutura são utilizados softwares específicos de processamento de imagem, capazes de calcular diversos parâmetros morfométricos, tais como os apresentados nas Figuras 42 e 43. Nas referidas Figuras é apresentado a reconstrução tridimensional de uma das amostras da dispersão das fibras na argamassa.

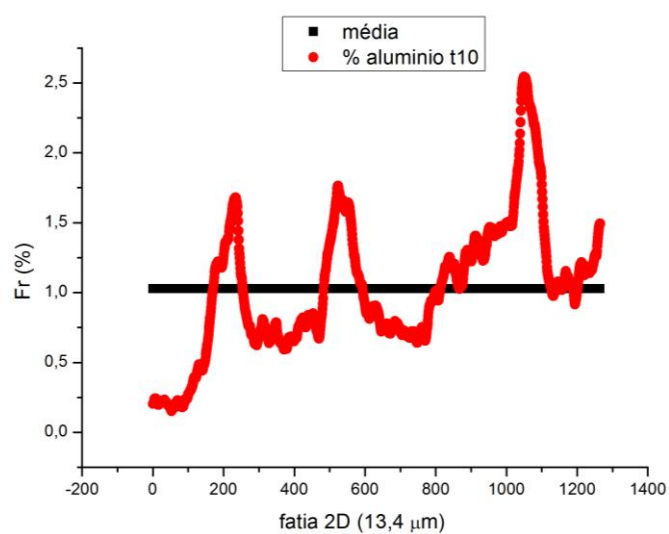
Os Gráficos 6,7,8,9 apresentam os resultados da caracterização granulométrica e a porosidade da argamassa.

Figura 42 - Disposição das fibras e fragmentos de alumínio em corpo de prova cilíndrico medindo 2,5X5,0 com teor 10%.



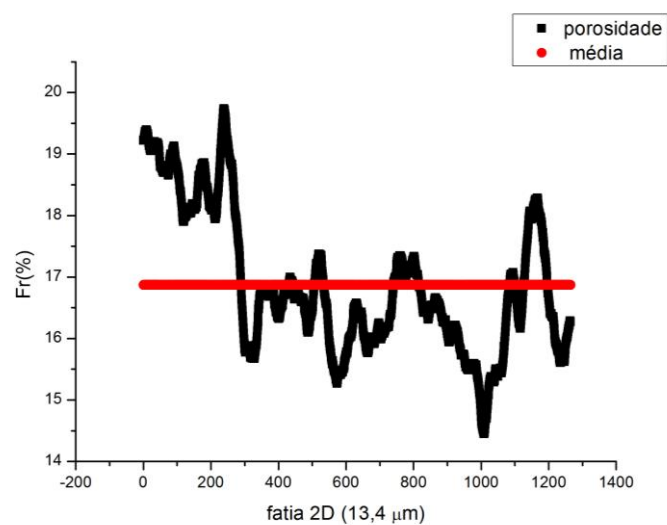
Fonte: O autor.

Gráfico 6 - Teor 10% de alumínio em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm . Porosidade média de 1,10%.



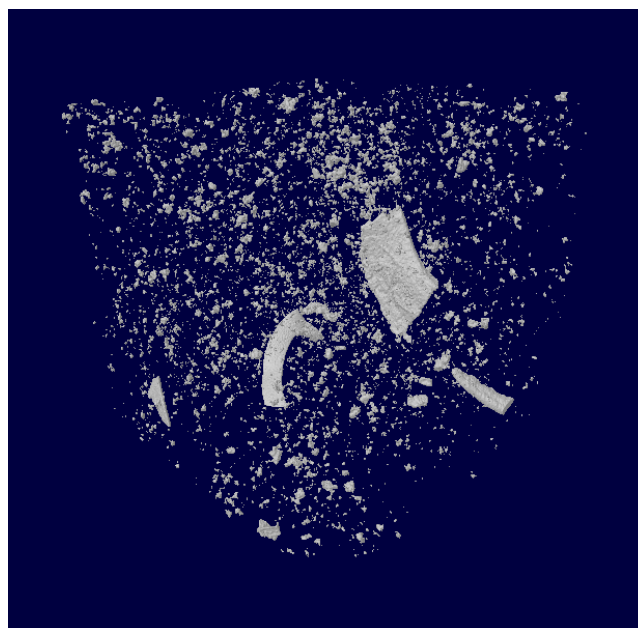
Fonte: O autor.

Gráfico 7 - Porosidade em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm .



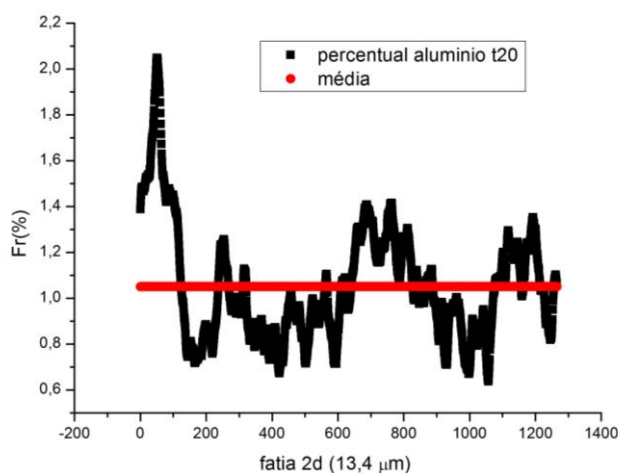
Fonte: O autor.

Figura 43 - Disposição das fibras e fragmentos de alumínio em corpo de prova cilíndrico medindo 2,5X5,0 com teor 20%.



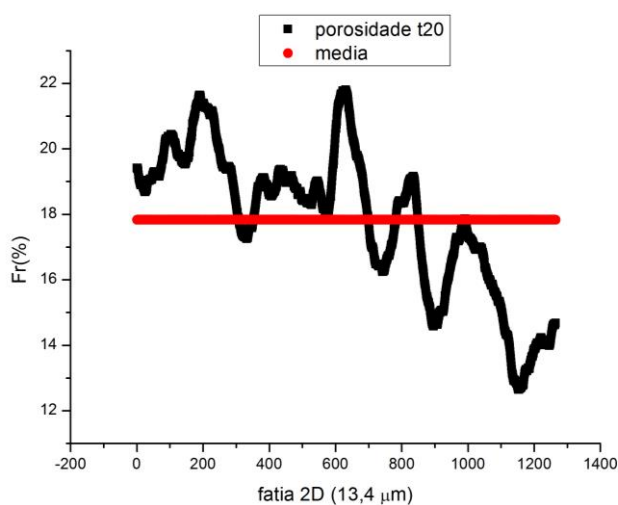
Fonte: O autor.

Gráfico 8 - Teor 10% de alumínio em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm . Porosidade de 2,94%.



Fonte: O autor.

Gráfico 9 - Porosidade em fatia do corpo de prova cilíndrico medindo 13,4 μm .



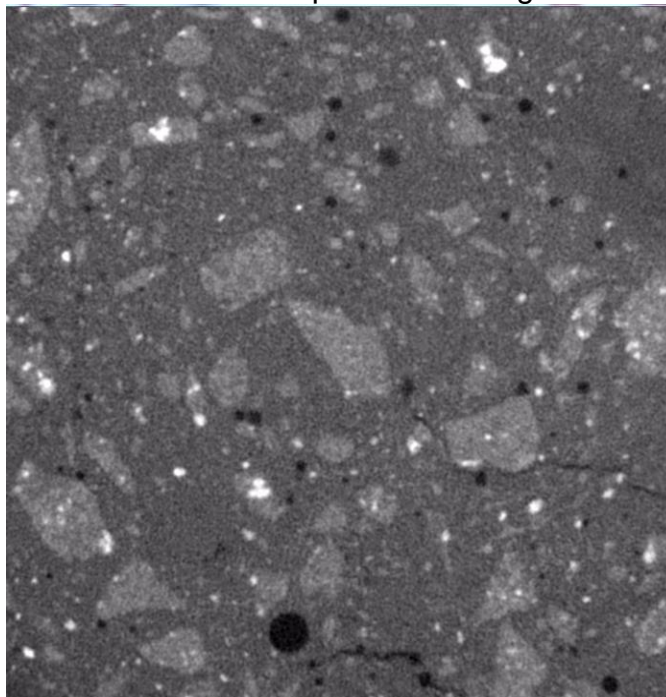
Fonte: O autor.

Os resultados das análises de posicionamento das fibras de alumínio dos agregados e da pasta de cimento estão demonstrados nas Figuras 44,45,46.

A Figura 44 demonstra que a argamassa com teor 0,0% de fibras tem porosidade bastante inferior em relação à Figura 45 com teor 10,0% de fibras. Na Figura 44, portanto, é possível observar poros fechados e poros abertos que circundam a fibra de alumínio. Na Figura 46, onde o teor de fibra é de 20,0% existe concentração maior de poros que foram incorporados durante a mistura da argamassa. Para evitar o aumento de

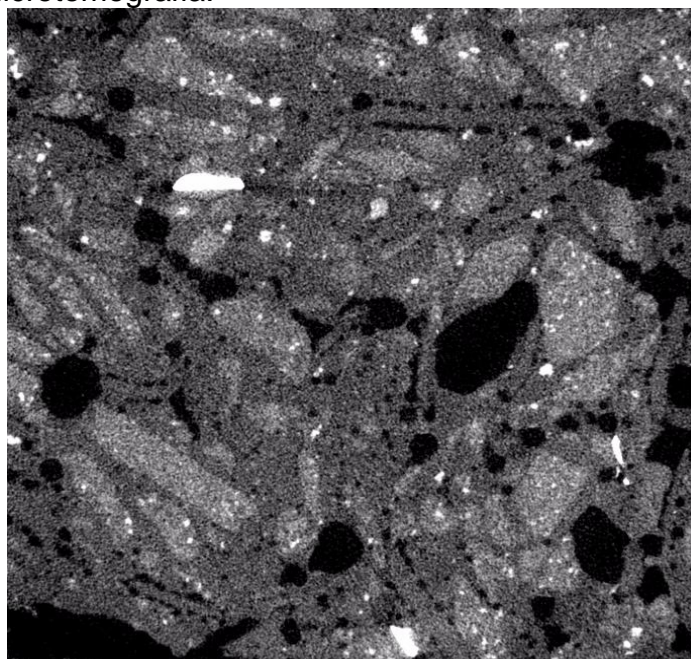
porosidade quando for adicionado teor elevado de fibras, utilizou-se a prensagem dos corpos de prova em prensa hidráulica com receptáculos de aço.

Figura 44 - Secção do corpo de prova com teor 0% de fibras de alumínio analisado por microtomografia.



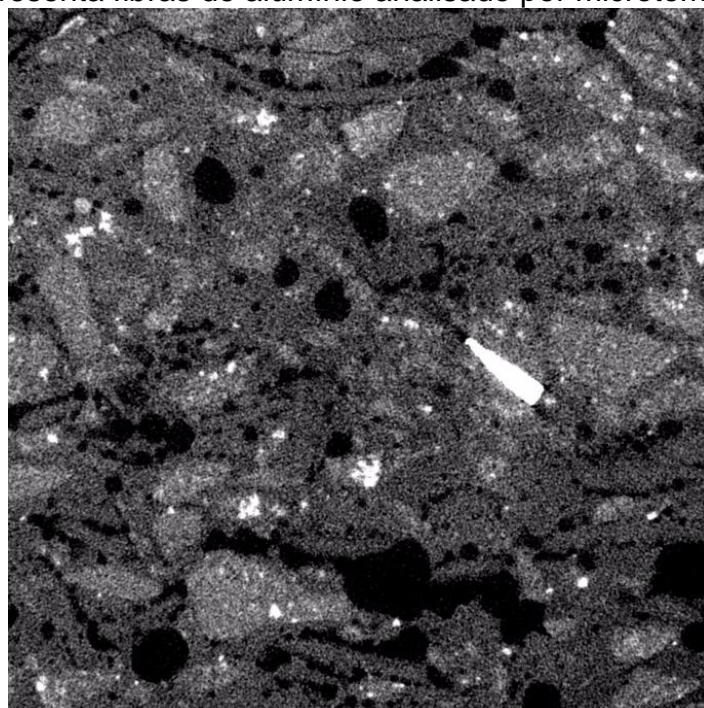
Fonte: O autor

Figura 45 – Secção do corpo de prova com teor 10% de fibras de alumínio, apresenta sensível aumento de vazios devido a incorporação de ar durante a mistura, analisado por microtomografia.



Fonte O autor.

Figura 46 - Secção do corpo de prova com teor 20% de fibras de alumínio, apresenta fibras de alumínio analisado por microtomografia.



Fonte: O autor

4.3 ANÁLISE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DA ARGAMASSA

Segundo Vicente (2010), quando se trata da resistividade elétrica do concreto, de modo geral, seu valor possui alta variabilidade. Isso significa que, embora se proceda de modo padronizado na confecção de amostras em laboratório (normalmente as amostras são condicionadas em moldes padronizados), o valor medido da resistência elétrica nesses corpos, seja em AT ou em BT, varia – em alguns casos extremos – em torno de 1000%, pois chegam a apresentar valores de resistência elétrica dez vezes maiores, mesmo que seguindo procedimentos específicos na moldagem dos corpos de prova e o teor de umidade da amostra, influencia na ionização do material.

Esse fenômeno é bastante comum na literatura. Veja-se, por exemplo, o trabalho de Torrenti (2009). Nota-se que o concreto utilizado em ensaios, apesar dos cuidados nos procedimentos para a confecção e manuseio do material, costuma exibir uma alta variabilidade.

No caso da resistividade elétrica, a relação água/cimento tem influência indireta, ou seja, influencia a estrutura dos poros e a concentração iônica da solução aquosa dos

poros, propriedades que têm atuação direta na resistividade elétrica do concreto (HOPPE, 2005).

A resistividade elétrica dos agregados utilizados em concretos ou argamassas é muito maior do que a resistividade elétrica da pasta de cimento. Citamos alguns agregados típicos: arenito (18 k Ω .cm), pedra calcária (30 k Ω .cm), mármore (290 k Ω .cm) e granito (880 k Ω .cm), basalto (10 – 100 k Ω .cm). Embora a resistividade elétrica do concreto dependa principalmente da pasta de cimento, as mudanças no tipo e no teor do agregado influenciam o valor da resistividade elétrica do concreto. É de se esperar que ao substituir um agregado por outro de maior resistividade, promova-se um aumento da resistividade do concreto (HOPPE, 2005).

Como exemplo, Hoppe (2005), também afirma que o teor do agregado influencia na resistividade dos concretos. Quando existe o aumento nas dimensões dos agregados, expresso em múltiplos da massa da pasta de cimento com aumento de 2,92 para 4,36, a resistividade passa de 4,86 para 5,73 k Ω .cm considerando a relação água/cimento de 0,50.

A temperatura ambiente tem efeito significativo na resistividade elétrica, pois influencia a condutividade elétrica da solução aquosa dos poros. Ou seja, quando a temperatura aumenta, a viscosidade do eletrólito diminui, intensificando a mobilidade dos íons, o que leva a uma maior condutividade elétrica do eletrólito e conseqüentemente a uma menor resistividade elétrica.

De todas as variáveis que influenciam nos efeitos da resistividade elétrica em materiais com adição de cimento, a variação do teor de umidade é uma das mais importantes. Isso porque a corrente elétrica que atravessa esses materiais é conduzida pela solução aquosa dos poros. O volume dessa solução diminui com a redução do teor de umidade. Sendo assim, a passagem de corrente elétrica é reduzida e conseqüentemente a resistividade elétrica aumenta.

Quanto às impedâncias complexas, é também conhecido o fenômeno simultâneo das três impedâncias: na subida da corrente, especialmente nos instantes iniciais dessa frente de subida, se nota a presença de impedâncias capacitivas. Também a componente indutiva aparece aqui com mais força, uma vez que depende diretamente da frequência. Quanto à resistência (ou à condutância), que se manifesta – como já foi citado – em valores muito inferiores ao valor DC desde que haja uma suficiente densidade de corrente

para a ionização. Ou seja, para baixas intensidades de corrente, não há alteração significativa da resistência (VISACRO; VISACRO FILHO; SOARES JÚNIOR, 1994).

Adotando a metodologia de ensaios utilizada por Vicente (2010) na padronização dos CPs com 100x200 mm, buscou-se obter a resistividade da corrente elétrica através da argamassa, para estabelecer um referencial com a condutividade térmica. Este método de análise foi utilizado em estudos anteriores e se refere ao modelo básico que vem sendo utilizado, porém, neste estudo o método se deu em CPs com dimensões menores, 50x100 mm.

A corrente era introduzida pela face circular CP, por meio de uma faixa de uma placa prensada contra as paredes circulares com pasta de prata. Assim com o contato estabelecido, a configuração utilizada provoca a distribuição linear da corrente, uma vez que a seção do CP é invariável e a densidade de corrente por unidade de área é constante ao longo do material. Por conveniência de ensaio foi escolhido para este trabalho os CP utilizados em outros ensaios de laboratório não destrutivo, com a aplicação de correntes no sentido longitudinal. A moldagem dos CP foi realizada em ambiente climatizado a 20°C e UR DE 65 %.

Os moldes utilizados foram construídos para moldar o corpo de prova na forma cilíndrica e suportar prensagem do material a 9,0 TON e 45,0 MPa. Os CP's possuem superfícies regulares, sistema de desmolde por deslizamento longitudinal e dimensões de 25/50 mm.

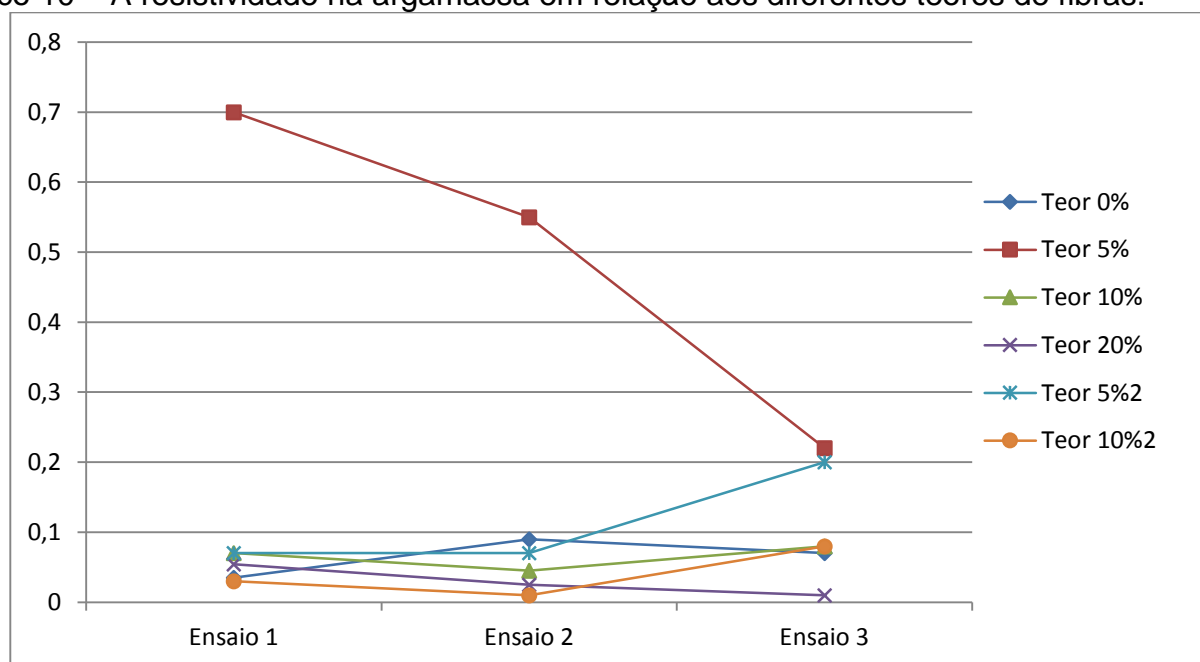
Tabela 35 - Resultados dos ensaios de resistividade elétrica em argamassa com diferentes teores de fibras de alumínio (Volt em A)

Resultados dos ensaios de resistividade elétrica em argamassa com fibras de alumínio (DDP em A)						
Ensaio	Fibras de Alumínio (Fator de Forma/Lamelar)				Serragem de Alumínio	
	Teor 0%	Teor 5%	Teor 10%	Teor 20%	Teor 5%	Teor 10%
01	0,035	0,70	0,070	0,054	0,07	0,03
02	0,09	0,55	0,045	0,025	0,07	0,01
03	0,07	0,22	0,080	0,010	0,20	0,08

Fonte: O autor.

Foram feitos ensaios de condutividade elétrica dos traços de argamassa e teores diferenciados de fibras de alumínio realizadas no Laboratório de Sistemas Elétricos da Universidade Estadual de Londrina.

Gráfico 10 – A resistividade na argamassa em relação aos diferentes teores de fibras.



Fonte: O autor.

4.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO FLUXO DE CALOR

Tabela 36 - Parâmetros estabelecidos para análise da condutividade térmica

Parâmetros de tratamento nos CP para os ensaios de transferência de calor em sólidos	Tratamento		
	CP 01	CP 02	CP 03
Pressão do ensaio (CNTP)	CNTP	CNTP	CNTP
Temperatura inicial do CP (°C)	20	20	20
Tempo de aquecimento (segundos)	1200	1200	1200
Tempo de transferência (segundos)	1200	1200	1200
Tempo de desligamento (segundos)	1200	1200	1200
Área de contato dos termopares CP (mm ²)	490,87	490,87	490,87
Comprimento do CP (mm)	480,00	480,00	480,00

Fonte: O autor.

Os corpos de prova que foram utilizados para ensaios de resistência mecânica e condutividade térmica tiveram formas prismáticas e cilíndricas.

Analisando a transferência de calor através da temperatura, foi possível determinar o teor de fibra que alcançou melhor desempenho na transferência de calor na argamassa em relação ao tempo decorrido. As Tabelas 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43 demonstram os

resultados realizados através da placa quente protegida, adicionando diferentes teores de fibras de alumínio na argamassa.

Tabela 37 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 0,0% de fibras de alumínio

Fibras. %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura a 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térm. W/m ⁻¹ K ⁻¹
0,0%		AF ^{0-1-Q}	32,0	94,3	113,4	120,7	
		AF ^{0-1-F}	32,0	33,2	34,0	34,0	
		∇t (°C) = Dif. Média	0	61,1	76,4	86,7	74,3
		AF ^{0-2-Q}	29,3	92,4	111,9	118,8	
		AF ^{0-2-F}	28,4	30,3	31,6	33,0	
		∇t (°C) = Dif. Média	0,9	62,1	80,3	85,8	
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)						
Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 38 - Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 5,0% de fibras de alumínio

Fibras. %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura a 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térmica W/m ⁻¹ K ⁻¹
5,0%	3,24	AF ^{5-Q}	33,5	129,4	152,8	157,8	
	3,24	AF ^{5-F}	34,6	35,2	36,6	37,4	
		∇t (°C) = Dif. Média	1,1	94,2	118,2	120,4	110,5
	4,31	AF ^{5-Q}	34,2	101,4	113,3	118,5	
	4,31	AF ^{5-F}	35,1	36,4	37,2	38,0	
		∇t (°C) = Dif. Média	0,9	65,0	76,1	80,5	73,5
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)						
Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 39 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 10,0% de fibras de alumínio

Fibras. %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térm W/m ⁻¹ K ⁻¹
10,0 %	0,25	AF ^{10-Q}	27,2	90,4	109,0	116,6	
	0,25	AF ^{10-F}	27,0	28,5	30,1	31,2	
		∇t (°C) = Dif. Média	0,2	61,9	78,9	85,4	75,3
	2,94	AF ^{10-Q}	29,8	93,4	112,6	119,3	
	2,94	AF ^{10-F}	29,9	31,0	32,3	33,2	
		∇t (°C) = Dif. Média	0,1	62,4	80,3	86,1	76,2
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)						
Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 40 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 15,0% de fibras de alumínio

Fibras. %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C.Tér W/m ⁻¹ K ¹	
15,0 %	0,25	AF ^{10-Q}	27,2	90,4	109,0	116,6		
	0,25	AF ^{10-F}	27,0	28,5	30,1	31,2		
	∇t (°C) = Dif. Média		0,2	61,9	78,9	85,4	75,3	
	2,94	AF ^{10-Q}	29,8	93,4	112,6	119,3		
	2,94	AF ^{10-F}	29,9	31,0	32,3	33,2		
	∇t (°C) = Dif. Média		0,1	62,4	80,3	86,1	76,2	
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)							75,7
	Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 41 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 20,0% de fibras de alumínio

Fibras. %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térmica W/m ⁻¹ K ⁻¹	
20,0 %	0,25	AF ^{10-Q}	27,2	90,4	109,0	116,6		
	0,25	AF ^{10-F}	27,0	28,5	30,1	31,2		
	∇t (°C) = Dif. Média		0,2	61,9	78,9	85,4	75,3	
	2,94	AF ^{10-Q}	29,8	93,4	112,6	119,3		
	2,94	AF ^{10-F}	29,9	31,0	32,3	33,2		
	∇t (°C) = Dif. Média		0,1	62,4	80,3	86,1	76,2	
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)							75,7
	Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 42 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 100,0% de fibras de alumínio.

Fibras %	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térm W/m ⁻¹ K ⁻¹	
100,0 %	0,0 %	A ^{100-Q}	24,1	70,4	76,6	76,8		
		A ^{100-F}	22,7	29,3	31,9	32,1		
	∇t (°C) = Dif. Média		1,4	41,3	44,7	44,7		
	Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)							43,1
	Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹							

Fonte: O autor.

Tabela 43 – Resultados das diferenças de temperatura nas faces do corpo de prova com adição de 5,0% com serragem de alumínio, sem material pulverulento extraído.

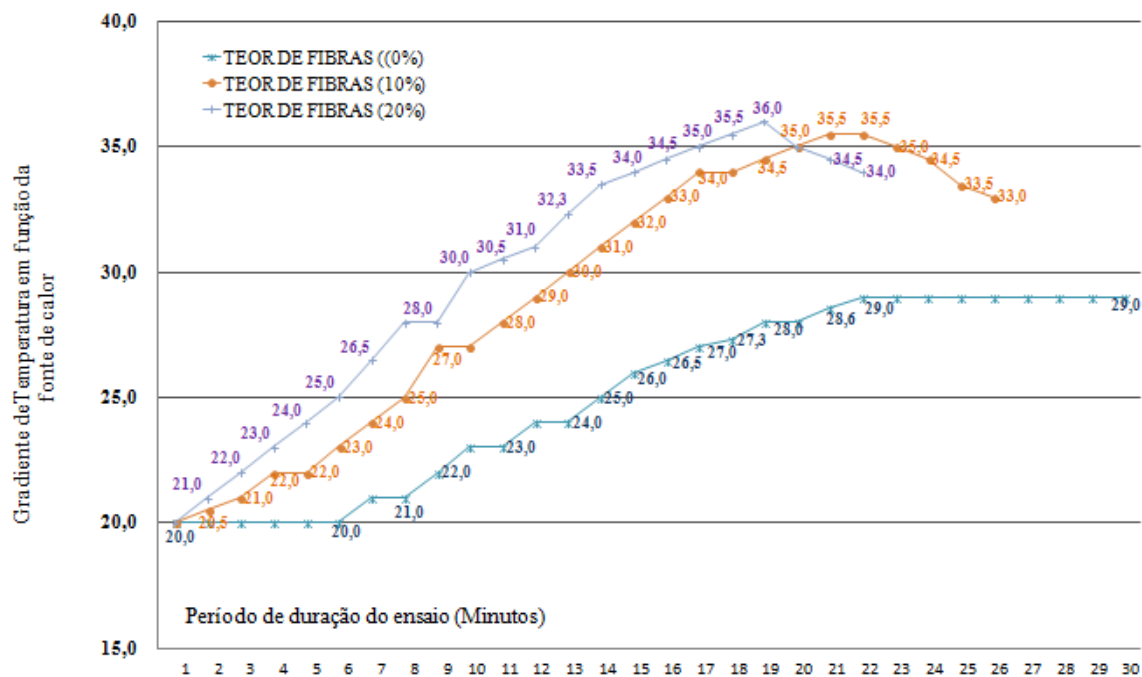
bras.	Porosidade %	Corpo Prova	Temperatura 0,0 seg. °C	Temperatura 1200 seg. °C	Temperatura 2400 seg. °C	Temperatura 3600 seg. °C	C. Térmica W/m ⁻¹ K ⁻¹	
5,0%		S ^{05-Q}	25,4	101,5	119,7	125,9		
		S ^{05-F}	23,7	24,3	25,5	26,7		
		∇t (°C) = Dif. Média	1,7	77,2	94,5	99,2		
		Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)						89,7
		S ^{05-Q}	29,8	93,4	112,2	118,9		
		F ^{05-F}	29,9	30,5	31,8	32,2		
		∇t (°C) = Dif. Média	0,1	62,9	80,4	86,7	76,6	
		Diferença de temperatura média entre os ensaios - (°C)						83.2
		Condutividade Térmica média – [K] = W.m ⁻¹ k ⁻¹						

Fonte: O autor.

As taxas de transferência de calor encontradas nas medições pelo método da placa quente protegida em argamassas com diferentes teores estão demonstradas no Gráfico 11.

A fonte de calor foi desligada aos dezessete minutos.

Gráfico 11 - Sobreposição dos resultados obtidos em ensaios de transferência de calor realizados no Laboratório de Telecomunicações – DEE – CTU – UEL, utilizando a média de três corpos de prova por traço com teor de fibras diferentes, com 1200 segundos.



Fonte: O autor.

O Gráfico 11 demonstra a transferência de calor em relação ao tempo comparativamente à argamassa com teor 0,0% de fibras de alumínio. Pode-se observar

que as argamassas contendo teores 10,0 % e 20,0% iniciam a transferência de calor 1 (um) minuto após a fonte de calor ter sido acionada. Enquanto que na argamassa com teor 0,0% esse início de transferência se dará após 6 minutos. Observa-se que nas argamassas com adição de fibras de alumínio, ocorre uma ascendência linear na transferência de calor até o período de 17 minutos.

Após o desligamento da fonte de calor, a argamassa com teor 20,0% sofre uma queda quase que imediata, indicando que a velocidade da onda de calor da mesma forma que ascendeu, abruptamente descendeu. Esta característica indica maior velocidade na transferência de calor em relação ao tempo.

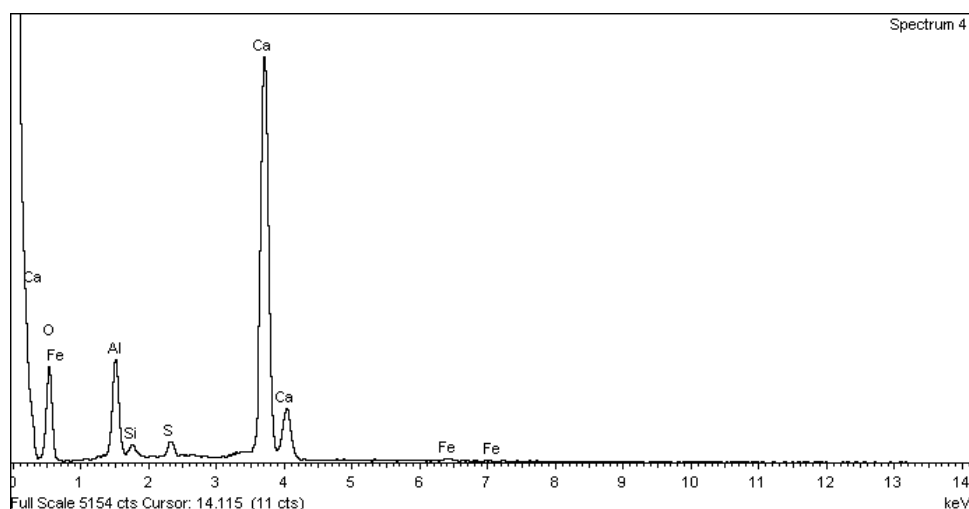
A argamassa com teor 10,0%, após o desligamento da fonte de calor, não fez uma curva descendente quanto à argamassa com maior teor de fibras. Tal característica se deve à capacidade calorífica do basalto em reter essa energia.

No teor 0,0% após o desligamento da fonte, a curva permanece estável durante um longo período caracterizando a histerese do material por um longo período antes de difundir essa energia. Portanto, esses ensaios de transferência de calor indicaram que teores próximos a 10,0% de fibras de alumínio, permitem compatibilizar a alta condutividade térmica das fibras de alumínio com a capacidade do basalto em reter calor por um período prolongado. Esse teor possibilita menor incorporação de ar durante a mistura e trabalhabilidade na moldagem ou aplicação da argamassa.

4.5 ANÁLISE DOS COMPONENTES QUÍMICOS DA ARGAMASSA (MEV)

Também foram selecionadas através da análise em microscópio eletrônico quatro amostras para serem analisadas. Os elementos com maior concentração foram: (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2). Conforme demonstra o Gráfico 12.

Gráfico 12 – Componentes presentes na argamassa



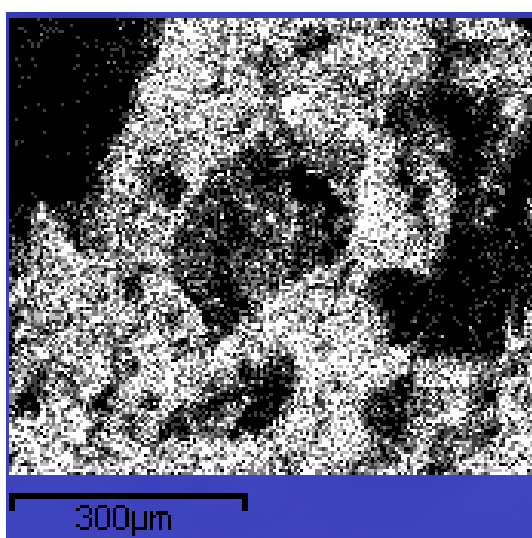
Fonte: O autor.

O Gráfico 12 demonstra os principais componentes minerais contidos na argamassa com areia de basalto e adição 0,0% de fibras de alumínio.

As Figuras 47,48,49,50 demonstram manchas com seus respectivos elementos químicos na face da argamassa (cálcio, potássio, silício e sódio), analisadas em Microscópio Eletrônico de Varredura-MEV.

Figura 47 - Contraste na concentração de cálcio e potássio na argamassa

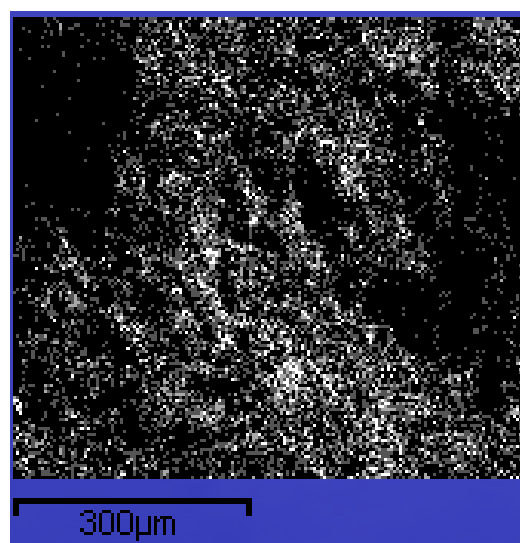
Ca Kα1



Fonte: O autor

Figura 48 - Contraste na concentração de óxidos e potássio na argamassa.

O Kα1

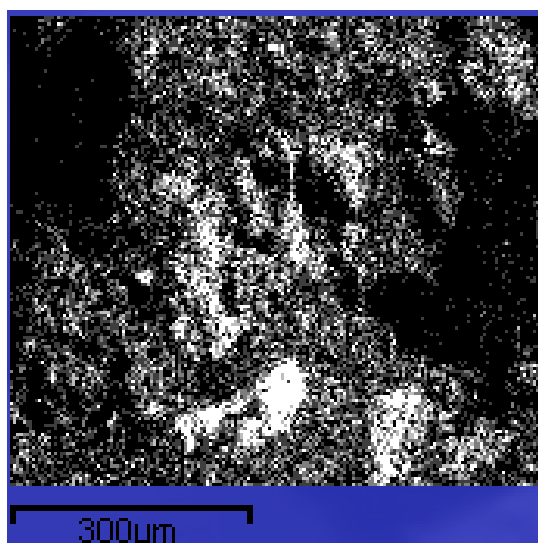


Fonte: O autor

Figura 49 - Contraste na concentração de

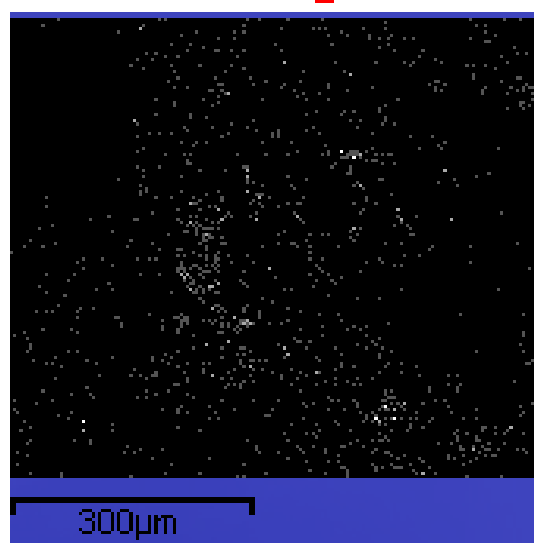
Figura 50 - Contraste na concentração de

Silício e potássio na argamassa
Si Ka1



Fonte: O autor

Sódio e potássio na argamassa
Na Ka1_2



Fonte: O autor

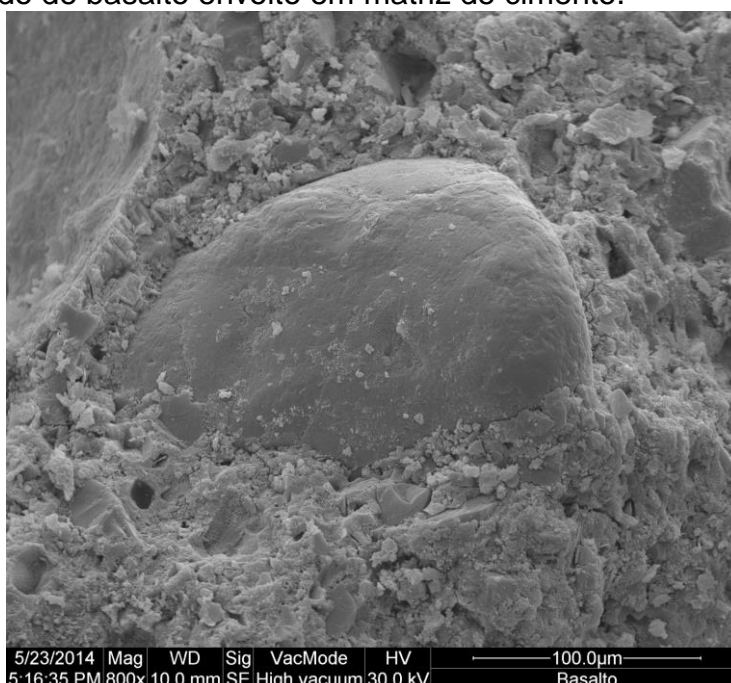
Embora não seja abordado neste estudo, por não estar disponível o Software adequado na instituição, a análise por microscopia eletrônica possibilita entender a unidade estrutural básica da maioria das formas da sílica e dos silicatos, que se destacam pelo arranjo tetraédrico de quatro átomos de oxigênio ao redor de um átomo de silício centralizado, ou silício tetraédrico, SiO_4 . Esta análise tem como objetivo a classificação dos minerais constituintes dos agregados e adições presentes em materiais, facilitando interpretação em pequenas variações na orientação das ligações de silício tetraédrico, com outro elemento que resulta no desenvolvimento de nova simetria, com diferentes polimorfos da sílica como: quartzo, tridimita, cristobalita, coesita e stishovita.

Uma orientação totalmente aleatória destas unidades resulta em variedades amorfas do material.

Esse arranjo tetraédrico possibilita a formação de uma rede cristalina tridimensional por meio do compartilhamento dos átomos de oxigênio de um tetraedro com os grupos vizinhos. Quando alguns dos vértices do tetraedro não se ligam, os átomos de oxigênio ficam livres e uma ampla faixa de possibilidades estruturais nas ligações se abre, algumas das quais são encontradas nos silicatos. Nas estruturas para as quais todos os vértices do tetraedro não são compartilhados, cada átomo de oxigênio não compartilhado contribui com uma carga negativa para o grupo aniônico então formando o equilíbrio dessas cargas que se dará pela presença de cátions (cargas positivas) na estrutura do silicato.

A sílica, em temperaturas ordinárias é quimicamente resistente a muitos dos reagentes comuns. Além disso, pode suportar uma ampla variedade de transformações em condições adversas, como por exemplo, temperaturas altas. A reatividade da sílica depende fortemente da sua forma, pré tratamento ou subdivisão de outros elementos. A Figura 51 demonstra um agregado em meio a matriz de cimento em proporções desiguais ao seu módulo de finura. Tal característica impede a condutividade térmica na argamassa, devido a quebra de regularidade na rede amorfa dos agregados.

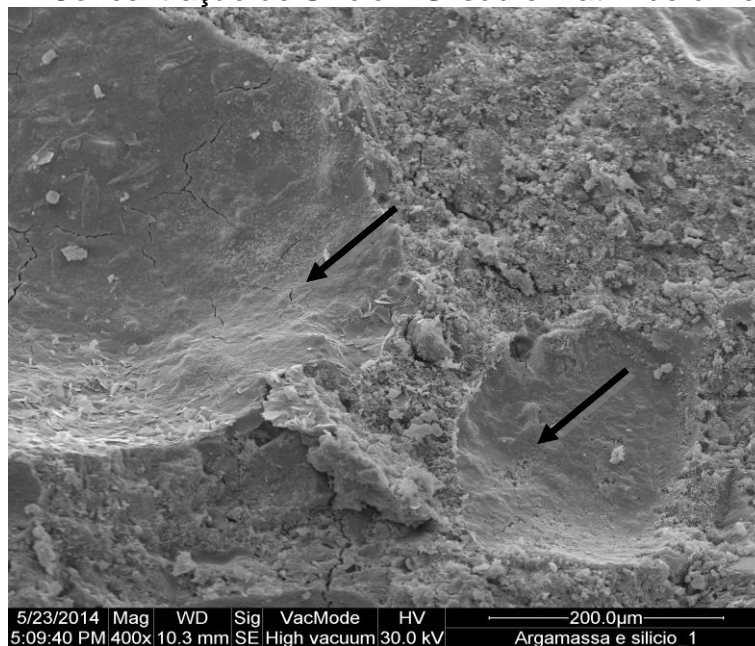
Figura 51 - Agregado de basalto envolto em matriz de cimento.



Fonte: O autor

A extração dos agregados revela sulcos com dimensões superiores a 400 µm, o que dificulta a condutividade térmica, devido à intersecção de materiais com características químicas diferentes. Esses sulcos caracterizam falta de aderência entre os agregados e a matriz de cimento. Para que haja maior aderência entre os agregados e a matriz de cimento é conveniente que os agregados tenham fórmulas cúbicas ou semi angulares. Os agregados com forma arredondada e os lamelares são os menos indicados, visto que os arredondados necessitam de maior volume de matriz de cimento e os lamelares, possibilitam maior incorporação de ar, criando poros.

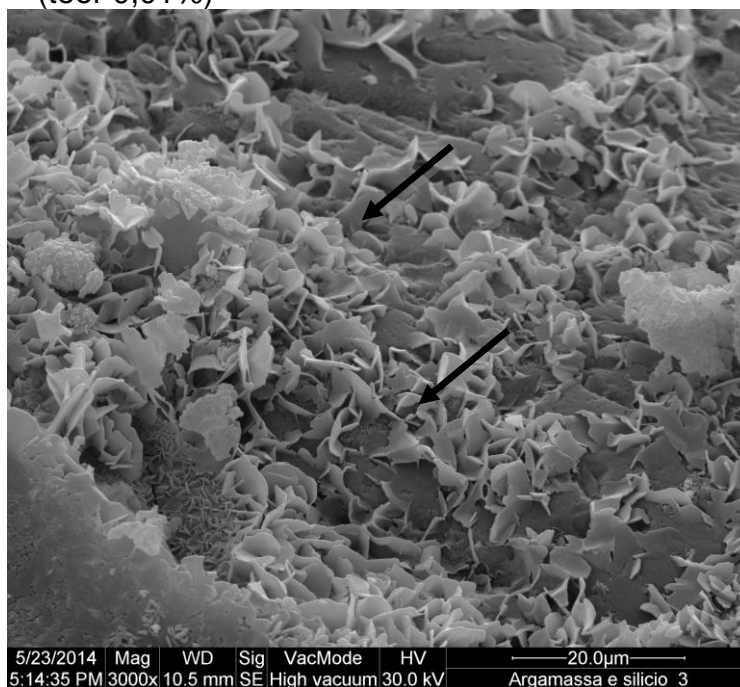
Figura 52 - Concentração de Silício – Si sobre matriz de cimento.



Fonte: O autor

O silício (Si), presente na forma de sílica SiO_2 (Figuras 52,53), embora seja encontrada em grandes proporções e dimensões próximas a $75 \mu\text{m}$, necessitaria passar por processo de cominação, purificação química e sucessivas lavagens, para adquirir características de material amorfo, com teores de materiais pulverulento inferiores à 0,01% para diminuir impurezas.

Figura 53 - Concentração de Silício – Si sobre matriz de cimento (teor 0,01%)

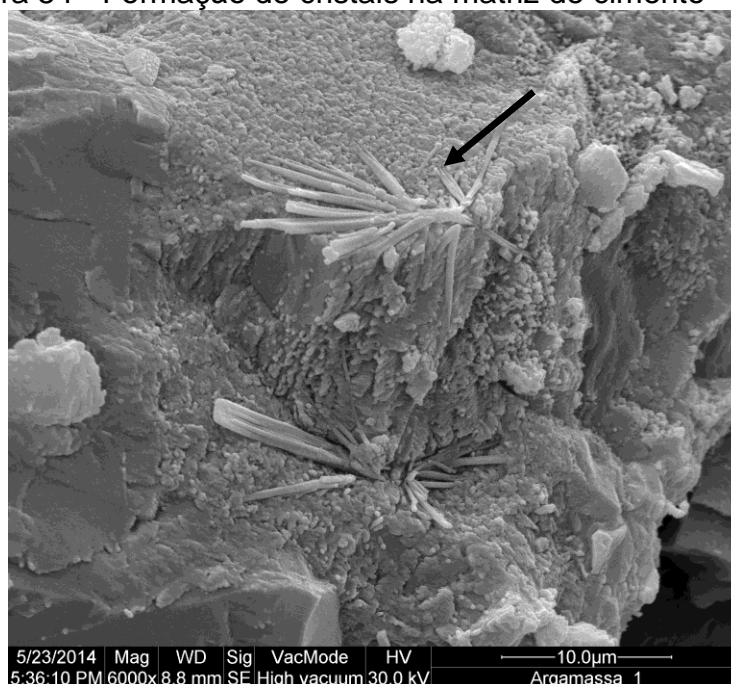


Fonte: O autor.

A Figura 54 demonstra a formação de cristais durante a pega do cimento pode servir como microestrutura de ligações trivalentes desde que haja a deposição de alumínio, nas proporções de 10^{-7} e escala granulométrica entre 10 a 44 μm , e baixa relação água/cimento na mistura.

A argamassa apresenta matrizes densas obtidas com a otimização do empacotamento e prensagem dos materiais. A trabalhabilidade é obtida com a dispersão e empacotamento das partículas de alumínio com os agregados e matriz de cimento realizada durante a mistura.

Figura 54 - Formação de cristais na matriz de cimento



Fonte: O autor.

O fator de forma das fibras produzidas varia da forma lamelar à forma arredondada de partículas, como demonstram as Figuras 55 e 56:

Figura 55 - Partículas de alumínio reciclado, produzidas a partir da serragem do corte de tarugos de alumínio, transpassadas na peneira com abertura 1,2 mm.



Fonte: O autor.

Figura 56 - Fibras de alumínio reciclado, produzidas a partir da usinagem de tarugos de alumínio, com fator de forma lamelar, o comprimento varia de 6,0 a 25,0 mm.



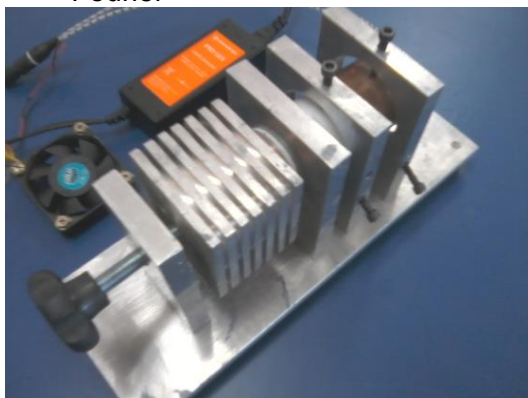
Fonte: O autor.

4.6 ANÁLISE DO ÍNDICE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA NA ARGAMASSA EM RELAÇÃO AOS TEORES ADICIONADOS DE FIBRAS DE ALUMÍNIO

O princípio físico de estudo considera a condutividade térmica como propriedade isotrópica e homogênea de um material, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1W/m^2 , quando submetido a uma fonte constante de temperatura.

O equipamento usado para medir a condutividade térmica está demonstrado nas Figuras 57 e 58 e sendo construído e operado segundo conceitos e normas técnicas capazes de determinar propriedades térmicas da argamassa com incerteza de medição menor do que 3% e um grau repetitivo maior do que 1%. A medição da condutividade térmica da argamassa foi feita pelo princípio clássico proposto por Fourier. Um dispositivo com receptáculo para receber os corpos de prova cilíndricos (25X50 mm) foi construído, utilizando fonte constante de calor seguindo o método da placa quente protegida.

Figura 57 - A medição da condutividade térmica da argamassa pelo princípio clássico proposto por Fourier



Fonte: O autor

Figura 58 - Coleta de dados, com dispositivo refrigerado, utilizando Termopares do tipo K nas placas quente e fria



Fonte: O autor

No dispositivo de coleta de dados por termopares, foram instalados trocadores de calor por ventilação para que houvesse o fluxo constante de calor, através da argamassa contida no corpo de prova.

A bancada de coleta de dados demonstrada na Figura 59 consiste de um PC, com Termopares do tipo T – Minipa ET 2600, com precisão decimal, instalado nas placas quente e fria, com medição a cada segundo que são enviadas por software fornecido pelo fabricante para medir a diferença de temperatura nas faces das placas. Os termopares

foram calibrados tendo como referência um corpo de prova de alumínio. Sendo um método clássico onde, o desvio de resultados pode variar em 3%.

Figura 59 - Bancada utilizada na medição da condutividade térmica da argamassa, através do método da placa quente protegida.



Fonte: O autor.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, com o mesmo traço de argamassa com diferentes teores de fibras e fragmentos de alumínio.

O método de medição se baseia no princípio físico clássico, descrito por Fourier, que consiste na transferência de calor através de um material, analisando a diferença de temperatura entre as superfícies, dividido pela espessura do material ao qual a transferência de calor percorreu.

As duas faces do corpo de prova foram aderidas a uma superfície de cobre com pasta de prata, sendo instalada em uma delas uma fonte de calor, a partir de corrente elétrica alternada de 12,0 V e 40,0 W.

Nas duas extremidades do corpo de prova foram instalados termopares do tipo “T” com precisão decimal para medir a diferença de temperatura entre as faces.

Os dados coletados foram inseridos no Software fornecido pelo fabricante – Minipa ET 2600 para Windows XP, gerando o coeficiente de condutividade térmica das argamassas em relação aos teores de adição de fibras de alumínio.

Os resultados da transferência de calor detectados foram transmitidos e decodificados graficamente. Por essa técnica de transferência de calor é possível avaliar o índice de condutividade térmica da argamassa.

Nos materiais de construção em condições normais de temperatura e pressão, a condutividade térmica alta tem pequena capacidade de armazenamento de calor. Nos mais comuns, o valor da difusividade térmica encontra-se na faixa de $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. e esse método também permite avaliar a difusividade do material que é alta para materiais de efusividade térmica alta, que é caracterizada pela facilidade com que o calor pode ser absorvido pela superfície dos materiais.

4.7 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os ensaios de condutividade térmica seguiram uma função linear demonstrado no Gráfico 5, que consideram a difusividade térmica em relação ao tempo e o gradiente de temperatura.

Estabelecendo condições para esses princípios, foi possível analisar as linhas traçadas e determinar o traço de argamassa com teor de fibras, que obteve a maior capacidade de transferir calor através da argamassa.

Acredita-se que o princípio físico do aumento da condutividade térmica está condicionado ao aumento dos índices de massa específica e redução dos poros, organização dos agregados e às características condutoras das fibras de alumínio como elemento metálico de rede cristalina.

Esta hipótese implica que o transiente de temperatura, que é registrado pelos Termopares do tipo T nas duas faces dos topos do corpo de prova, ativa a corrente de elétrons, devido ao aumento de temperatura na face quente, fazendo com que esta energia seja transferida na forma de calor, por unidade de tempo e sofrendo resistividade em relação à espessura ou comprimento do material que deva atravessar. Percorrendo a rede de ligações de um material específico, acaba liberando uma quantidade de energia que irá se propagar através do meio ou camadas. Essa propagação de calor num meio finito gera, no material, um campo transiente de temperaturas.

Na prática, essa transferência linear de energia é calculada pela diferença de temperatura entre as duas faces do corpo de prova e aproximada pelo coeficiente de condutividade conhecido em materiais sólidos com rede cristalina como o alumínio ou

materiais amorfos, onde a rede molecular não tenha formação simétrica. Assim, a capacidade térmica de transferência das amostras analisadas está relacionada a fatores como a exsudação da água após a mistura, a interação de materiais e a imposição de um tempo mínimo e um tempo máximo para que os elétrons de valência possam ser energizados pelo aumento da temperatura, em condições normais de temperatura e pressão, para então utilizar o cálculo da condutividade térmica proposto por Fourier.

5 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Com perspectiva de aumento na demanda por energias sustentáveis e tratamento de resíduos, o presente estudo buscou desenvolver um traço de argamassa utilizando materiais com capacidades físicas favoráveis à transferência de calor através da adição de fibras de alumínio. Foi verificado melhor desempenho na condutividade térmica da argamassa adicionando teores de alumínio inferiores a 20%, com a função de servirem como pontes de rede cristalina existente nos metais favoráveis à transferência de calor.

Estabeleceu-se uma afinidade entre as camadas dos componentes minerais de basalto da argamassa e as fibras de alumínio, aumentando em até três vezes sua capacidade térmica.

Os agregados utilizados foram caracterizados para adequar sua granulometria e forma das partículas, de modo que ficassem compatíveis com a trabalhabilidade e grau de empacotamento desejados. Os grãos dos agregados de basalto, por terem origem na britagem, não passaram por rolagem com outros grãos, como os grãos retirados nos rios, assumindo formas angulares em suas extremidades e não esféricas. Esta característica cria arranjos angulares no empacotamento dos agregados, que necessitam ser preenchidos com pasta de cimento. Entretanto, quando se formam camadas de argamassa, cria-se uma estrutura de clivagem, que quando intertravada pelas fibras direciona o fluxo de calor no sentido longitudinal das fibras dispostas na peça.

Esta argamassa, quando exposta a uma fonte constante de calor, apresentou um desempenho satisfatório quanto à condução de energia pela interação dos materiais. Observa-se que a ligação da camada de elétrons livres do alumínio (Al) com a sílica (SiO₂) contida nos agregados de basalto seria possível em escalas mais reduzidas, desde que a sílica sofra um processo de purificação, mesmo que amorfa.

Esta transferência de energia por condução se deve à junção dos materiais constituintes da argamassa: cimento, agregados de basalto e alumínio.

De forma geral, o desempenho obtido no que se refere à condutividade térmica, apesar de sofrer influências locais das características mineralógicas dos materiais, reflete as características em termos de proporcionalidade de cada traço de argamassa estudado demonstrados nas Tabelas de 37 a 43.

Foi verificado que diferenças de texturas e formas não interferiram expressivamente nos resultados obtidos.

Os menores valores de condutividade térmica obtidos foram compatíveis com os resultados das características físicas da argamassa, uma vez que estes demonstraram menor condutividade quanto maior a sua porosidade da argamassa ou quanto mais baixa sua massa aparente.

Assim, concluiu-se que resíduos de britagem de basalto poderão ser tratados e adicionados em traços de base cimentícia, para que adquiram funções ou desempenho específico quando exigirem maior concentração de silício nos agregados. Considerando que exista grande volume destes finos estocado em pátios de pedreiras, fica evidente a necessidade aproveitá-los, aplicando novas tecnologias ou propostas que entrem no ciclo produtivo da construção civil. Com o aprimoramento das técnicas de britagem, caracterização de forma das partículas e adições, as propriedades físicas de condutividade térmica do basalto poderão resultar em novas aplicações, aumentando seu valor como material utilizável em compósitos destinados ao aproveitamento de energias limpas, em sistemas de aquecimento solar de água ou geração de energia fotoelétrica.

6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Verificar a interferência da adição do pó de alumínio eliminado no processo das fibras na condutividade da argamassa.

Verificar a expansividade da argamassa decorrente da incorporação de teores acima de 10%, de fibras de alumínio.

Verificar a deposição de alumínio ao cimento em proporções de 10^{-7} , buscando o arranjo das ligações da rede de ligações amorfa durante a fase de formação dos cristais na cura.

Utilização de cimento com *nanotubos*, composto por material silicoso ou sílico-aluminoso, que quando moído e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente.

Verificar o pH da argamassa buscando o favorecimento da ionização nos cristais do cimento.

Utilização de cimentos aluminosos com pó de quartzo de alta resistência.

Utilização de “*nanocimentos*” de fibras tubulares.

Utilizar processo cominuição, levando as partículas dos agregados a dimensões entre 10 e 44 μm .

Utilizar peneira de # 325 para caracterizar as partículas dos agregados.

Utilizar o processo de cominuição para liberar o dióxido (O^2) de da sílica (SiO^2) para alcançar a molécula de silício amorfo.

Tornar a sílica (SiO_2) contida no basalto em silício (Si) amorfo, utilizando sucessivas lavagens para retirada das impurezas.

REFERÊNCIAS

- ABEYSUNDARA, U. G. Y.; BABEL, S.; GHEEWALA, S. A matrix in life cycle perspective for selecting sustainable materials for buildings in Sri Lanka. **Building and Environment**, Oxford, v. 44, n. 5, p. 997-1004, 2009.
- ALCÁCER, L. **Física no estado sólido**. Portugal: IST, 2013. Notas de Aula - Física tecnológico.
- ALMEIDA, S. L. **Aproveitamento de rejeitos de pedreiras de Santo Antônio de Pádua, RJ, para produção de brita e areia**. 2000. 118 fls. Tese (Doutorado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- ALMEIDA, S. L. M.; PEREIRA, A. F. R. Obtenção de areia artificial da pedreira Vigné. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – JIC, 12, 2004, Rio de Janeiro. **Comunicação Técnica...** Rio de Janeiro: CETEM, 2004.
- ALMEIDA, S. L. M.; SAMPAIO, J. A. **Visitas técnicas à Metso e pedreira Embu, SP**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. (RI 002/2002).
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE -ANSI. **ANSI/ASTM-C-177-76**. ASTM test for steady-state thermal transmission properties by means of the guarded hot plate. 1976.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E230M - 12**. Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1577-96**: Standard test methods for linear density of textile fibers. Philadelphia, 1996.
- _____. **ASTM O 3822**: Standard test method for tensile properties of single textile fibers. Philadelphia, 1996.
- ANDRADE, R. O. B.; TACHIZAWA, T.; CARVALHO, A. B. **Gestão ambiental: enfoque estratégico aplicado ao desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2002.
- ARMANGE, L. C. **Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa**. 2005. 104 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ALUMÍNIO – ABAL. **Relatório de Sustentabilidade da Indústria do Alumínio**. São Paulo: Ponto & Letra, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização do Cimento Portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002. (Boletim Técnico, n.106).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos. Rio de Janeiro, nov. 2004a.

_____. **NBR NM 23:2000**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica: Rio de Janeiro, jun. 2001.

_____. **NBR 10.007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, nov. 2004b.

_____. **NBR 12094**: espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico - determinação da condutividade térmica - método de ensaio. Rio de Janeiro, set. 1991a.

_____. **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão - método de ensaio. Rio de Janeiro, out. 2005a.

_____. **NBR 13277**: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - determinação da retenção de água - método de ensaio. Rio de Janeiro, out. 2005b.

_____. **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado - método de ensaio. Rio de Janeiro, out. 2005c.

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

_____. **NBR 13528**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, mar. 2010.

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

_____. **NBR 5733**: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, jul. 1991b.

_____. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, dez. 2003a.

_____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, jul. 2009a.

_____. **NBR 7220**: agregados - determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro, mar. 2000.

_____. **NBR 7222**: concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, maio 2011.

- _____. **NBR 7225**: materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, set. 1993.
- _____. **NBR 9935**: agregados – terminologia. Rio de Janeiro, abr. 2005e.
- _____. **NBR MN 26**: agregados – amostragem. Rio de Janeiro, set. 2009b.
- _____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Nov. 2003b.
- _____. **NBR NM 30**: agregado miúdo - determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, jun. 2001.
- _____. **NBR NM 45**: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, abr. 2006.
- _____. **NBR NM 46**: agregados - determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, set. 2003c.
- _____. **NBR NM 52**: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, nov. 2009c.
- _____. **NBR NM 23:2000**: cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, Jun., 2001.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Faculdade de Engenharia, UNESP, 2006. Notas de Aula.
- BAUER, F. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London: Elsevier Applied Science, 1990.
- BENTZ, D. P. A review of early-age properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 196-204, 2008.
- BRITTON, C.R. Flame Spraying With Aluminium and Aluminium Alloys. **Aluminium Industry**. v. 7, n. 10, p.3, 1988.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Produção Mineral no Brasil. **Informativo**, 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68>>. Acesso em: 06/09/2014
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION - BSI. Norma BSI 812 Section 105.1/89. Testing Aggregates. London, 1990.
- BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006. 164 fls. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BUSANELLO, G.; GARLET, G.; REGINATO, P. Uso da areia artificial oriunda de britagem de rochas na região de Caxias do Sul em substituição a areia natural para produção de concretos. In: ENCONTRO DE JOVENS PESQUISADORES DA UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, 15., 2007, Caxias do Sul. **Anais...** Caxias do Sul: Universidade do Caxias do Sul, 2007. CD-ROM.

CALLISTER, W. D. **Materials science and enginee**: ring na introducion. New York: John Wiley & Sons, 1991.

CARVALHO, E. F. T. **Materiais de construção I - CIV237**. Ouro Preto: UFOP, 2009. Apostila.

CENTRO DE INFORMAÇÕES METAL MECÂNICA – CIMM. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal>>. Acesso em: 14 set. 2014.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM. **Areia artificial pode ser a opção mais barata**. Disponível em:<<http:WWW.cetem.gov.br>>. Acesso em: 13 set. 2014.

CUNHA, M.T.; JOHANN, J.; FURUMURA, P. L. G. C.; RODRIGUES, R. Estudo da Eletrodeposição de Cobre em Meio Alcalino com uso de Corrente Pulsada. **Revista Virtual de Química**. v. 6, n. 2, p.258-278, 2013.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 10. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012.

CHAPETTA, W. **Determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida com controle e aquisição de dados utilizando linguagem de programação gráfica**. 2002. 134 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.

CHIWIACOWSKY, L. D. **Uso da função de transferência em problemas da condução de calor com a lei de Fourier modificada**. 2002. 80 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

CINCOTTO, M. A. Utilização dos subprodutos e resíduos na indústria na construção civil. In: _____. **Tecnologia das edificações**. São Paulo: PINI, 1988. p. 71-74.

CLAUSER, C.; HUEGES, E. **Thermal conductivity of rocks and minerals**. Hannover: American Geophysical Union, 1995. p.

ÇOPUROGLU, O. et al. Mineralogy geochemistry and expansion testing of an alkalireactive basalt from Western Anatolia, Turkey. **Materials Characterization**, New York, v. 60, n. 7, p. 756-766, 2009.

CORRADE, W et al. **Fundamentos da física III**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2010.

COSTA, M. J. **Avaliação do uso da areia artificial em concreto de cimento Portland**: aplicabilidade de um método de dosagem. 2005. 46 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2005.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L. Preparo de argamassas com emprego de finos de pedreira. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Materiais reciclados e suas aplicações. 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001.

DASSAULT SYSTÈMES. **The 3D**. Experience Company. Disponível em: <<http://www.3ds.com/>> Acesso em: 8 set. 2014.

De PONTE, F. et al. Reference guarded-Hot-plate apparatus for determination properties in agreement with the new international standard. ISO copyright office, CH-1211, Geneva 2, 1999. *ISO DIS 8302*.

DORFMAN M. R. Thermal spray basics. **Advanced Materials & Processes**. v. 170, n. 7, p. 47-50, 2002a.

DRAGO, C.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da Utilização de Areia de Britagem em Concretos de Cimento Portland. **REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 62, n. 3, p. 399-408, 2009.

EDWARDS, B. **O guia básico para a sustentabilidade**. 2. ed. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

FAGANELLO, A. M. P. **Rejeitos de britagem de origem basáltica: caracterização e utilização em solo-simento na região de Londrina – PR**. 2006. 134 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

FARIAS, C. E. G. Mineração e meio ambiente no Brasil. 2002. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/minera.pdf>. Acesso em: 15 set. 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998. Boletim Técnico BT/PCC 260

FIGUEIREDO, E. R. H. **Condutividade térmica de rochas: uma aplicação para granitos ornamentais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

FITESA. Uso de fibras na construção civil. 2002. Apostila técnica nº 001. Disponível em: <www.fitesa.com.br>. Acesso em: 15 set. 2014.

FONSECA, M. R. M. **Química geral: físico química**. São Paulo: FTD, 1992.

FONSECA, V. L. **Curso técnico em mineração: conceito básico de tratamento de minério - maquinas aparelhos e equipamentos**. Minas Gerais: Centro Educacional Santa Edwiges – CESE, 2007. Apostila.

FRASSON JÚNIOR, A. F. **Metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para a alvenaria estrutural**. 2000. 146 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER – FEPAM. **Relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais**. Porto Alegre, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GEHLEN, I. V. Exploração de basalto na região das missões do Estado do Rio Grande do Sul. **REM: Revista Educação Ambiental em Ação**, Novo Hamburgo, v. 6, n. 23, mar./maio, 2008.

GUTFREIND, C.; LEITE, I. C.; BECK, N.; GUERRA, V. **Fundamentos da Engenharia de Edificações**. 5^o Ed. **Materiais e Métodos**. Bookman Editora. Grupo A, 2013

GRAF, H. F. **Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: uma relação nas superfícies do envólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a norma NBR: 12721**. 2011. 160 fls. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GUÉGUEN, Y.; PALCIAUSKAS, V. **Introduction à la physique des Roches**. Paris: Hermam, 1992. Cap. 10.

GUERRA, L. **Viabilidade técnica da adição de finos de basalto na pasta de cimento Portland**. 2013. 96 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

HALLIDAY, S. P. **Architecture of habitat: design for life**. London: The Royal society, 1997.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992.

HOLZLE, L. R. B. **Comportamento Eléctroquímico do Alumínio em Misturas Etilenoglicol: Água, Efeito da Adição de Agentes Quelantes**. 2005. Tese (Doutorado). Universidade federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. I Modelling at macroscopic scale. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 25, n. 7, p. 1457-1468, 1995.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos LTC, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de São Paulo. Laboratório de Materiais de Construção Civil. São Paulo: IPT, 1982.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO DIS 8302:91** Thermal Insulation - Determination of Steady-State Thermal Resistance and Related Properties - Guarded Hot Plate Apparatus First Edition. Washington, 1991.

ITAMBÉ. **Assessoria técnica**. Disponível em:
<<http://www.cimentoitambé.com.br/assessoria-tecnica>>. Acesso em: 9 set. 2014.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 31, n. 4, p. 647-654, 2001.

KUCH, D. W. **Ciência hoje on-line**. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2004.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados para a construção civil**. São Paulo: Associação de Produtores de Agregados para a Construção Civil – ANEPAC, 2009.

LAPA, J. S. Estudo de viabilidade técnica de utilização em argamassas do resíduo de construção oriundo do próprio canteiro de obra. 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

LIBRELOTTO, L. I. **Modelo para avaliação da sustentabilidade na construção civil nas dimensões econômica, social e ambiental (ESA): aplicação no setor de edificações**. 2005. 335 fls. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

LODI, V. H., PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC. In: WORKSHOP DESEMPENHO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS, 2006, Chapecó. **Anais...** Chapecó: Unochapecó, 2006.

MARQUES, R. L. M. R. P. **Avaliação da viabilidade de colectores híbridos fotovoltaicos e térmicos para aplicação ao aquecimento de águas e micro-geração de electricidade**. 2008. 123 fls. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto-FEUP, Porto, 2008.

MARTINS, N. J. H.; SANTOS, M. A. B. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 1., 2005, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Associação Brasileira de Eficiência Energética, 2005.

MASCARENHAS, G. C. B. **Comparação de desempenho térmico de materiais convencionais com materiais de características sustentáveis em uma edificação e sistemas tecnológicos de sustentabilidade aplicados ao ambiente construído**. 2012. 43 fls. Monografia (Especialização em Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade Aplicados ao Ambiente Construído) - Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENDES, K.S. **Viabilidade do emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo**. 1999. 109 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica do Estado de São Paulo-POLI, São Paulo, 1999.

MENKES, Monica. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade**. 2004. 277 fls. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável). Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://www.unbcds.pro.br/publicacoes/MonicaMenkes.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2010.

MENOSSI, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 97 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira. 2004.

MILITKÝ J. et al. Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto. **Cerâmica**, São Paulo, v. 53, n. 326, 2007.

MILLMAN, J.; HALKIAS, C. C. **Electronic devices and circuits** (International student edition). Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1967.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: UNIVERSITY-INDUSTRY WORKSHOP ON FIBER REINFORCED CONCRETE AND OTHER ADVANCED MATERIALS, 2., 1995, Toronto. **Proceedings...** Toronto, Canadá, 1995. p.1-12.

MONTEIRO, J. M. et al. **Argamassas com desempenho térmico melhorado**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 1, 2005, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Uminho, 2005.

MORA, N. D. **Apostila de materiais elétricos**. Foz do Iguaçu: Universidade Estadual do Oeste do Paraná -UNIOESTE, 2010.

MOREIRA, I. M. **Notas de aula**. 2005. Disponível em: <Dacrolim.com.br/bibliomat>. Acesso em: 30 out. 2014.

MORSE, P. M.; FESHBACH, H. **Methods theoretical physics**. New York: McGraw-Hill Book, 1953.

MOTOKI, A. et al. Desenvolvimento da técnica para especificação digital de cores e a nova nomenclatura para classificação de rochas ornamentais com base nas cores medidas. **Geociências**, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 403-415, 2006.

MOTTA, L. A. C.; JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Caracterização de fibras sintéticas para uso como reforço de matrizes cimentícias**. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP, 2003. CD-ROM.

NEVILLE, A. M. **Propriedade do concreto**. São Paulo: Pini, 1982.

NIEBEL, P. R. **Avaliação de desempenho no estado fresco de argamassas agregados miúdos britados utilizando curvas granulométricas parabólicas**. 2008.

141 fls. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

NOLASCO, A. M.; AGNESINI, M. V. C. Utilização de resíduos da indústria de papel na produção de materiais para a construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5. 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1993.

OLIVEIRA, A. S. S. **Estudo teórico experimental da dinâmica de temperatura no interior de uma cavidade cilíndrica**. 2010. 139 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraíba, João Pessoa, 2010.

OLIVEIRA, K. N. **O paradigma da sustentabilidade na seleção de materiais e componentes para edificações**. 2009. 197 fls. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

ORDENES, M.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S. **Transferência de calor envolvente da edificação**. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Apostila

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**: micro estrutura e propriedades. Curitiba: Editora HEMUS, 2000.

PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas**: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Fazendo Arte, 2000.

PAREDES, R. S. C. **Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra corrosão marinha**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

PATERMARAKIS, G.; KERASSOVITOU, P. **Electrochimica Acta**, v.37, n 1, p. 125-137, 1992.

PEREIRA, G. L. **Avaliação do uso de areia de britagem em argamassas e concretos de cimento Portland**. 2008. 82 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2008.

PERIODICIDADE química. Disponível em: <<http://www.fisica.net/quimica/resumo2.htm>> Acesso em: 14 abr. 2014.

PETRAKIS, G. H.; MOTOKI, A.; SICHEL, S. E.; ZUCCO, L. L.; AIRES, J. R.; MELLO, S. L. M. Geologia de jazidas de brita e areia artificial de qualidade_especial: exemplos do Álcali Sienito de Nova Iguaçu, RJ e Riolito de Nova Prata, RS. **Geociências**, São Paulo, v. 29, n.1, p. 21-32, 2010.

PETRUCCI, E. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Globo, 1982.

PIRES, D. P.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A B. A termometria nos séculos XIX e XX. História da Física. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 635-665, 2006.

PIROPO, B. **Moléculas e átomos escritos**. 2005. Disponível em: <www.bpiropo.com.br>. Acesso em: 30 ago. 2014.

PORTNOI, M. **Memórias semicondutoras**: tipos, aplicações e tecnologias. Disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/memorias.html>>. Acesso em: 9 out. 2014.

RESENDE, T. M.; MORAIS, M. F.; PACHECO, P. P. **Exploração mineral na porção norte do município de Uberlândia**: o caso de Cruzeiros de Peixoto. 2008. Disponível em: <www.caminhosdegeografia.ig.ufu.br/include/getdoc.php?id=1099&article=554&mode=pdf>. Acesso em: 21 set. 2013.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

ROAF, S. **A adaptação de edificações e cidades às mudanças climáticas**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS, S. **Ecohouse**: a casa ambientalmente sustentável. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RODRIGUES, G. L. et al. Estudo comparativo entre as poeiras respiráveis de basalto e gnaiss na produção de brita nas regiões de Londrina e Curitiba, no estado do Paraná, e sua influência para os trabalhadores. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 30, n.112, p. 37-47, 2005.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. - Formação de Óxidos nos Revestimentos de Alumínio Depositados por Aspersão Térmica – **Tese de Doutorado** – Universidade Federal do Paraná, 2003.

ROSA, C. A. P. **História de ciência**: a ciência e o triunfo do pensamento científico no mundo contemporâneo. 2. ed. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2012. v. 3.

RUEGG, N. R.; AMARAL, G. Variação regional da composição química das rochas basálticas da Bacia do Paraná. **Boletim Instituto Geociências**, São Paulo, v. 7, p.131-147, 1976.

SAMPAIO, L. L. **Comportamento mecânico de resíduos beneficiados da construção e demolição utilizados na fabricação de concreto**. 2013. 100 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife. 2013.

SAMPSON, E. R. Thermal spray coatings for corrosion protection: An overview. **Coatings & Linings**. Houston, v. 36, n. 12, p.27- 29, 1997.

SANTOS, W. N. **Aplicação da técnica de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros fundidos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade federal de São Carlos (UFSCAR), 2005.

SILVA, V. A. **Arranjos atômicos**: química aplicada. Goiana: UCG, 2006. Notas de aula.

SOUZA, C. A.; MAIS, M. F.; CORRÊA, E. C. S.; SANTOS, D. B.; AGUILAR, M. T. P. CETLIN, P. R. Avaliação mecânica e microestrutural de concreto fabricado com areia artificial obtida de resíduo de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17., 2006. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), 2006. p. 4044-4055.

SCHIEFLER, M.F.; BUSCHINELLI, A. J. A.; KREY, F.G. Estudo Eletroquímico e Microestrutural de Revestimentos Aspergidos Termicamente para a Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 19-21, 2002. **Anais**. Salvador. Bahia, 2002.

ST JOHN, D. A.; POOPLE, A. W.; SIMS, I. **Concrete petrography**: a handbook of investigative techniques. London: Arnold, 1998.

TAKASHIMA, S.; BAUER, R.J.F.; CURTI, R. Estudo de concretos preparados com agregado miúdo artificial e areia silicosa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40., 1998. Rio de Janeiro. Artigo Técnico.

TANESI, J.; TORNERI, P.; FIGUEIREDO, A., de. A influência das fibras de polipropileno na fissuração por retração. Brasil – Porto Alegre, RS. 1997. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 4., CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., 1997. Artigo técnico... Porto Alegre, 1997. v.1, p. 273-280.

TANESI, J. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. 1999. 132 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1999.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

THOMAZONI, A. L. R.; TORRES, R. G.; SANTOS, R. **Medição da condutividade em uma amostra de alumínio**. 2010. 14fls. Trabalho Final de Medições Térmicas (Departamento de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre. 2010.

THORMARK, C. A low energy building in a life cycle-its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. **Building and Environment**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 429-435, 2002.

TIPLER, P. E.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

TOKUDOME, N. **Catálogo técnico**. Itambé: Assessoria Técnica Cimento, 2008.

TORRENTI, J., **Caractérisation de la variabilité des performances des bétons – Application à la durabilité des structures**. Paris: AFGC, 2009.

TURCRY, P. **Retrait et fissuration des betons autoplacants. Influence de la formulation**. 2004. 220 fls. Tese (Doutorado). École Centrale de Nantes, França. 2004.

THOMAS, S.; SHERWOOD, M. A. Valence band spectra of aluminum oxides, hydroxides, and oxyhydroxides interpreted by $X\alpha$ calculations. **Anais Chemistry**. v.64, p.2488-2495, 1992.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP. Escola Politécnica. Laboratório de Sistemas Integráveis. **Semicondutor intrínseco e extrínseco**. Disponível em: <<http://www.lsi.usp.br/~eletroni/milton/matpn.htm>>. Acesso em: 30 ago. 2014.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ. **LaMat** - Laboratório de Materiais. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/publicengquim.html>>. Acesso em: 8 set. 2014a.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - UFSCAR. **Departamento de Engenharia de Matérias – DEMA**. Disponível em: <<http://www.dema.ufscar.br/portal/>>. Acesso em: 9 out. 2014b.

VICENTE, O. **Estudo sobre o comportamento elétrico do concreto utilizado em sistemas de aterramento estrutural**. 2010. 99 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade estadual de Londrina, Londrina, 2010.

VISACRO, VISACRO FILHO, S.; SOARES JUNIOR, A. O efeito da intensidade de corrente de descarga sobre o comportamento dos sistemas de aterramento. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON LIGHTNING PROTECTION, 1994, São Paulo, 1994.

WITTMANN, F. H. On the action of capillary pressure in the fresh concrete. **Cemente and Concrete Research**, Pennsylvania, v. 6, n. 1, p. 49-56, 1976.

YANNAS, S.; MALDONADO, E. **Designing for summer comfort**. Londres: Architectural Association Graduate School, 1995. Cap. 4: Thermal Inertia.

YUNUS, A. Ç.; AFSHIN, J. G. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

ANEXOS

ANEXO A

Tabela periódica de elementos químicos e respectivas condutividades térmicas.

TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS
Condutividade Térmica

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
		Grupo																			
Período	1	H 0,1815																	He 0,152		
	2	Li 84,7	Be 200													B 27	C 155	N 0,02598	O 0,2674	F 0,0279	Ne 0,0493
	3	Na 141	Mg 156											Al 237	Si 148	P 0,235	S 0,269	Cl 0,0089	Ar 0,0177		
	4																				
	5	K 102,5	Ca 200	Sc 15,8	Ti 21,9	V 30,7	Cr 93,7	Mn 7,82	Fe 80,2	Co 100	Ni 90,7	Cu 401	Zn 116	Ga 40,6	Ge 59,9	As 50	Se 2,04	Br 0,122	Kr 0,00949		
	6	Rb 58,2	Sr 35,3	Y 17,2	Zr 22,7	Nb 53,7	Mo 138	Tc 50,6	Ru 117	Rh 150	Pd 71,8	Ag 429	Cd 96,8	In 81,6	Sn 66,6	Sb 24,3	Te 2,35	I 0,449	Xe 0,00569		
	7	Cs 35,9	Ba 18,4	La 13,5	Hf 23	Ta 57,5	W 174	Re 47,9	Os 87,6	Ir 147	Pt 71,6	Au 317	Pt 8,34	Tl 46,1	Pb 35,5	Bi 7,87	Po 20	At 1,7	Rn 0,00364		
	8	Fr 15	Ra 18,6	Ac 12	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub								
		Lantanídeos		Ce 11,4	Pr 12,5	Nd 16,5	Pm 17,9	Sm 13,3	Eu 13,9	Gd 10,6	Tb 11,1	Dy 10,7	Ho 16,2	Er 14,3	Tm 16,8	Yb 34,9	Lu 16,4				
		Actinídeos		Th 54	Pa 47	U 27,6	Np 6,3	Pu 6,74	Am 10	Cm 10	Bk 10	Cf 10	Es 10	Fm 10	Md 10	No 10	Lr 10				

Cs — Elemento químico
35,9

Condutividade Térmica (W/mK a 300 K)

Rf — Elemento químico sem referência de condutividade térmica

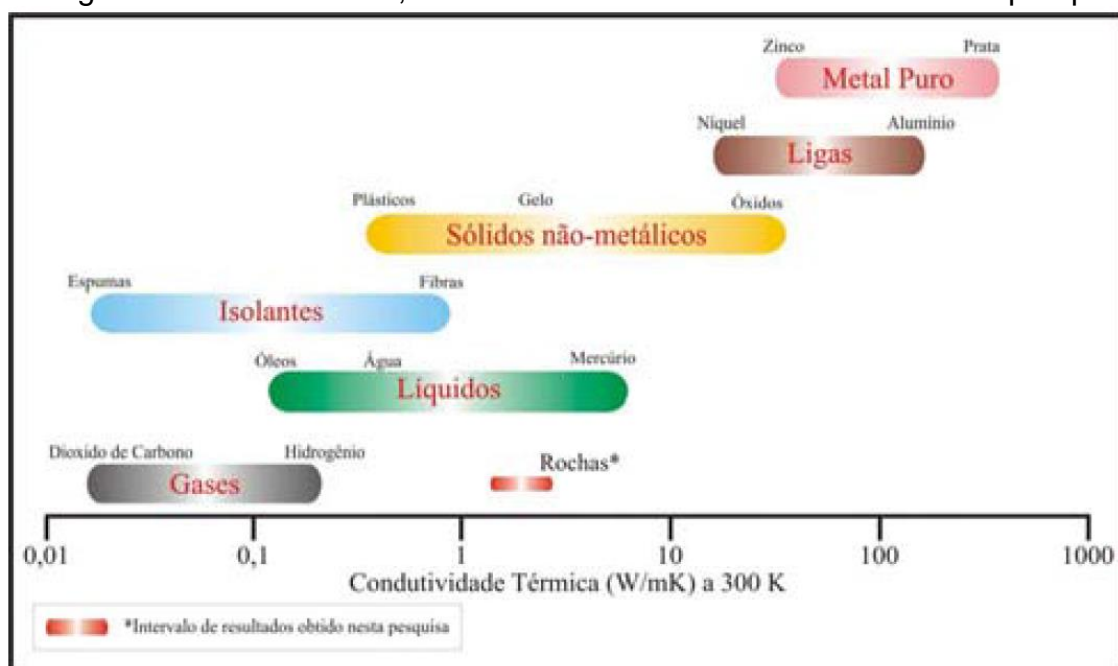
0-33	33-66	66-100	100-133	133-166	166-200	200-233	233-
------	-------	--------	---------	---------	---------	---------	------

Condutividade Térmica (W/mK) a 300 K

Fonte:

Massachusetts Institute of Technology, 2005. <http://web.mit.edu/3.091/www/pt/pert14.html>, Acesso em 05/03/2014.

Figura 2 – Domínio das condutividades térmicas a 300K, de diversos estados da matéria e alguns materiais a IATM, enfatizando o intervalo de medidas desta pesquisa.



Fonte: Incropera & Witt, (1981). Modificado.

O último século foi da eletricidade, o atual será do magnetismo.
Utilizamos blocos para construir edifícios, mas o Universo é construído com átomos.