



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

TATIANA VETTORI FERREIRA

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS
EXPANDIDAS PELA INCORPORAÇÃO DE ALUMÍNIO
RECICLADO**

Londrina
2016

TATIANA VETTORI FERREIRA

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS
EXPANDIDAS PELA INCORPORAÇÃO DE ALUMÍNIO
RECICLADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Gilson Morales.

Londrina
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Ferreira, Tatiana Vettori .

Comportamento térmico de argamassas expandidas pela incorporação de alumínio reciclado / Tatiana Vettori Ferreira. - Londrina, 2016.
207 f. : il.

Orientador: Gilson Morales .

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2016.

Inclui bibliografia.

1. Argamassa - Teses. 2. Alumínio - Teses. 3. Equilíbrio térmico - 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.

TATIANA VETTORI FERREIRA

**COMPORTAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS EXPANDIDAS
PELA INCORPORAÇÃO DE ALUMÍNIO RECICLADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito 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^a. Dr^a. Ana Virgínia Carvalhaes de Faria
Sampaio
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Vanderley Moacyr John
Universidade de São Paulo – USP

Prof. Dr. Márcio Florian
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – UTFPR / Londrina

Londrina, 01 de Março de 2016.

*A mente que se abre a uma nova ideia, jamais
voltará ao seu tamanho original.*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me dado força, persistência e sabedoria para continuar, mesmo enfrentando momentos e situações difíceis.

Agradeço ao meu esposo, João Cairo Ferreira, por todo seu incentivo, colaboração e compreensão nesse período de estudo e em todos os anos que passamos juntos.

Quero agradecer em especial ao professor Gilson Morales por toda sua paciência, incentivo e ensinamentos que mudaram minha vida acadêmica e tornaram esse sonho possível.

A todos os professores do programa ENGES/UEL, sem os quais, não chegaria até aqui.

Aos meus amigos Livia Maria Tavares Fontana e Marcos Yañes Palmieri, por terem cedido materiais e equipamentos para que fosse possível essa pesquisa.

Aos professores doutores Carlos Roberto Appoloni, Paulo José dos Reis, Liebert Nogueira e Alexandre Urbano, pela disponibilização dos equipamentos e pronto atendimento para a realização dos ensaios no Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina.

À professora doutora Thalita Gorban Ferreira Giglio do Departamento de Construção Civil da Universidade Estadual de Londrina, pela disposição e suporte para a realização dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Física – UEL, Osvaldo Capello e Diego Viscovini de Carvalho Sallas, pelo pronto atendimento na realização dos ensaios.

Aos funcionários do setor de reciclagem RECICLA-UEL, em especial à Maria José Sartor, por disponibilizar a estrutura para a moagem da escória de aciaria elétrica.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais – CTU – UEL, André Capo Bianco e Anderson Tiroli, pelo pronto atendimento na realização dos ensaios de resistência mecânica para realizar a compressão axial dos corpos de prova.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo aporte financeiro.

FERREIRA, Tatiana Vettori. **Comportamento térmico de argamassas expandidas pela incorporação de alumínio reciclado**. 2016. 207f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento - ENGES) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

RESUMO

A eficiência energética e o conforto térmico do ambiente construído envolvem, de maneira implícita, o consumo de energia. Quanto mais eficiente for a edificação, menor será o consumo de energia para operá-la e menor o impacto causado. O objetivo desse estudo foi verificar o efeito expensor da incorporação de partículas de alumínio reciclado em argamassas de cimento Portland e o comportamento dessas frente à radiação solar. Para tal, foi usada uma matriz de cimento e agregado miúdo, traço em massa 1:3, com incorporação de 10% de partículas de alumínio em relação à massa total de materiais. Foram desenvolvidas argamassas com areia natural de rio, areia de basalto e areia de escória de aciaria elétrica, com e sem partículas de alumínio reciclado. Utilizaram-se corpos de prova cilíndricos (50 x 100 mm) para os ensaios de resistência mecânica à compressão, massa específica, índice de vazios e absorção; corpos de prova cilíndricos (25 x 50 mm) para determinar a transferência de calor pelo Método da Placa Quente Protegida, análise dos componentes químicos pela Microscopia Eletrônica de Varredura e para a análise da porosidade por micro tomografia; corpos de prova retangulares (15 x 30 x 2,5 cm) para analisar a carbonatação. Para quantificar a transferência de calor por condução foram usados protótipos em concreto com tampa (50 x 50 x 50 cm) revestidos com as argamassas estudadas, sujeitos à radiação solar. Os resultados revelaram que o emprego desses resíduos é viável para produção de argamassa de revestimento, sendo que o papel das partículas de alumínio foi fundamental na expansão pela liberação de hidrogênio devido à alcalinidade das argamassas. A resistência mecânica média à compressão aos 28 dias das argamassas sem alumínio foi de 30 MPa, enquanto que, das argamassas com a adição de partículas de alumínio foi da ordem de 1/3 desse valor, ou seja, 10 MPa. Considerando que uma argamassa convencional de revestimento apresenta uma resistência à compressão da ordem de 5,6 MPa aos 28 dias, conclui-se que os valores obtidos foram mais do que satisfatórios para esse fim. No que se refere à transferência de calor nas paredes revestidas com as argamassas estudadas, verificou-se que todas apresentaram potencial de absorção e transferência da energia solar, muito embora isso tenha sido mais evidente na argamassa com resíduo de basalto, uma vez que nesse caso não houve um consumo tão intenso do alumínio como nas outras argamassas, o que possibilitou a esse compósito, maior capacidade de condução de calor. As argamassas com areia de aciaria e areia de rio, com incorporação de alumínio, apresentaram maior capacidade de conservação da temperatura da água contida nos protótipos. O estudo tornou possível identificar e atestar o potencial das argamassas expansivas produzidas na pesquisa para revestimento na construção civil em função de seu desempenho térmico frente à radiação solar, como condutor ou isolante, bem como, viabilizar o uso do alumínio reciclado, da areia de basalto e da areia de escória de aciaria elétrica na produção de argamassas de revestimento.

Palavras-chave: Argamassa expansiva. Alumínio reciclado. Transferência de calor em argamassas. Areia de basalto. Escória de aciaria elétrica.

FERREIRA, Tatiana Vettori. **Thermal behavior of mortars expanded by the incorporation of recycled aluminum**. 2016. 207p. Dissertation (Master's Degree in Construction and Sanitation Engineering - ENGES) – Londrina State University, Londrina, Londrina, 2016.

ABSTRACT

The energetic efficiency and thermal confrontation of the constructed environment involve, implicitly, energy consumption. The more efficient the construction, the lower the energy consumption used to operate it and the smaller the impact. The objective of this study was to verify the expander effect of the incorporation of recycled aluminum particles on Portland cement mortar mixes and their behavior under solar radiation. To do so, a matrix with cement and fine mesh aggregate, trace 1:3, was used, with the incorporation of 10% of aluminum particles in relation to the materials' total mass. Mortar mixes with natural river sand, basalt sand and electric arc furnace slag sand were developed, with and without recycled aluminum particles. Cylindrical specimens (50 x 100 mm) were used for mechanical resistance to compression trials, specific mass, void and absorption ratio; cylindrical specimens (25 x 50 mm) to determine heat transfer by the Protected Hot Plate Method, chemical content analysis by Electronic Microscopy and for the porosity analysis by micro tomography; and rectangular specimens (15 x 30 x 2.5 cm) to analyze carbonation. To quantify heat transfer by conduction, concrete prototypes with covers (50 x 50 x 50 cm) coated with the studied mortars were used and subject to solar radiation. Results showed that the use of these residues is viable for the production of grout mortar mixes, since the role played by the aluminum particles was essential for an expansion for hydrogen liberation due to the mortars' alkalinity. Average mechanical resistance to compression at 28 days for mortars without aluminum was in the order of 1/3 of this value, i.e., 10 MPa. Considering that a conventional grout mortar shows resistance to compression in the order of 5.6 MPa at 28 days, it was concluded that the values obtained were more than satisfactory for this purpose. As for heat transfer on the walls coated with the studied mortar mixes, it was verified that they all showed absorption potential and solar energy transfer, although this was more evident in the mortar with basalt sand, since, in this case, aluminum consumption was not so intense as in the other mortar mixes, giving this composite greater heat conduction capacity. Mortar mixes prepared with slag and river sands and with aluminum incorporation, showed greater temperature conservation capacity of the water contained in the prototypes. The study made possible to identify and attest the potential of expansive mortar mixes produced by this research for civil construction coating due to their thermal performance under solar radiation, as a conductor or insulator, as well as makes possible the use of recycled aluminum, basalt and electrical arc furnace slag sands in the production of mortar coatings.

Keywords: Expansive mortar. Recycled aluminum. Heat transfer in mortars. Basalt sand. Electrical arc furnace slag sand.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 1 - | Esquema do processo de fabricação do aço | 43 |
| Figura 2 - | Processo de reciclagem da sucata para a produção do aço | 45 |
| Figura 3 - | Mapa da formação rochosa brasileira | 52 |
| Figura 4 - | Pedreira Guaravera em Londrina | 53 |
| Figura 5 - | Montes de agregados gerados no processo da britagem do basalto..... | 53 |
| Figura 6 - | Processo da britagem do basalto | 54 |
| Figura 7 - | Depósito a céu aberto de resíduo de moagem de basalto | 55 |
| Figura 8 - | Pedreira de basalto desativada da cidade de Londrina no Estado do Paraná | 57 |
| Figura 9 - | Diagrama de <i>Marcel Pourbaix</i> | 62 |
| Figura 10 - | Processo de usinagem do tarugo de alumínio no torno mecânico..... | 63 |
| Figura 11 - | Produção de partículas de alumínio no moinho de facas alternadas | 63 |
| Figura 12 - | Mecanismos de transmissão de calor em edifícios | 65 |
| Figura 13 - | Esquema do funcionamento do sistema de coletor solar | 68 |
| Figura 14 - | Mesa de consistência – <i>flow table</i> | 85 |
| Figura 15 - | Camadas que constituem o revestimento | 98 |
| Figura 16 - | Camadas do revestimento de argamassa da vedação vertical: emboço, reboco e massa única | 99 |
| Figura 17 - | Imagem da molécula, cela unitária e cristal | 103 |
| Figura 18 - | Molde em PVC para confecção do corpo de prova | 124 |
| Figura 19 - | Corpos de prova após 28 dias de cura úmida e secagem em estufa | 124 |
| Figura 20 - | Peças desmontadas que compõem o molde do corpo de prova..... | 125 |
| Figura 21 - | Molde do corpo de prova | 126 |
| Figura 22 - | Prensa Manual | 126 |
| Figura 23 - | Estrutura de madeira para suporte dos corpos de prova submetidos à cura ao ar..... | 127 |
| Figura 24 - | Corpo de prova com pasta de prata dissipadora de calor aplicada no topo e na base | 128 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 25 - | Corpo de prova no receptáculo do equipamento (a) | 129 |
| Figura 26 - | Receptáculo (a), fonte de calor (b), tampa (c), termopares (d) face quente (e) e face fria (f) | 129 |
| Figura 27 - | Equipamento completo | 130 |
| Figura 28 - | Equipamento SKYCAN de microtomografia | 130 |
| Figura 29 - | Equipamento MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura | 133 |
| Figura 30 - | Resíduo de escória de aciaria elétrica com diversidade granulométrica | 134 |
| Figura 31- | Rebritagem do material retido na peneira 4,8 mm | 135 |
| Figura 32 - | Acondicionamento do resíduo de escória de aciaria elétrica | 135 |
| Figura 33 - | Partículas de alumínio reciclado após peneiramento | 136 |
| Figura 34 - | Argamassa moldada sobre a mesa de consistência | 143 |
| Figura 35- | Espalhamento da argamassa ao final do ensaio | 144 |
| Figura 36 - | Análise visual da mistura ARN no estado fresco | 145 |
| Figura 37 - | Análise visual da mistura ARN aplicada na parede | 145 |
| Figura 38 - | Corpos de prova em água em ebulição durante 5h | 146 |
| Figura 39 - | Corpos de prova saturados em ebulição com superfície seca | 146 |
| Figura 40 - | Verificação da massa em balança hidrostática | 147 |
| Figura 41 - | Argamassas moldadas | 148 |
| Figura 42 - | Corpos de prova após serem retirados dos moldes..... | 148 |
| Figura 43 - | Ruptura do corpo de prova na prensa manual..... | 149 |
| Figura 44 - | Ruptura do corpo de prova na prensa mecânica | 149 |
| Figura 45 - | Molde para placas com argamassa..... | 151 |
| Figura 46 - | Placas retangulares mantidas em cura ao ar na câmara úmida | 152 |
| Figura 47- | Placa de REF-A rompida com aplicação de fenolftaleína para verificar a carbonatação | 152 |
| Figura 48 - | Placa de ARB rompida com aplicação de fenolftaleína para verificar a carbonatação | 153 |
| Figura 49 - | Imagem 100 argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)..... | 156 |
| Figura 50 - | Argamassas REF-A e ARN | 157 |
| Figura 51- | Imagem 600 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)..... | 157 |

| | |
|---|-----|
| Figura 52 – Imagem 1000 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d) | 157 |
| Figura 53 - Imagem 1200 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d) | 158 |
| Figura 54 - Execução do revestimento de argamassa REF-A, ARN, ARB e ARA nos protótipos | 158 |
| Figura 55 - Protótipos das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA sobre os suportes metálicos com rodízio..... | 159 |
| Figura 56 - Protótipos das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA com equipamento <i>HOBO U30 Station da Onset Computer Corporation</i> | 159 |
| Figura 57 - Ocorrência do efeito de nucleação em partícula fina de basalto (a) com a formação de cristais (b) na superfície da mesma (ampliação da imagem em 15.000 vezes)..... | 164 |
| Figura 58 - Lâminas das amostras REF-A, ARN, ARB e ARA para a análise no MEV | 167 |
| Figura 59 - Imagem argamassa REF-A com ampliação 50 vezes | 168 |
| Figura 60 - Imagem argamassa ARN com ampliação 50 vezes | 169 |
| Figura 61 - Imagem argamassa ARB com ampliação 50 vezes | 169 |
| Figura 62 - Imagem argamassa ARA com ampliação 50 vezes | 170 |
| Figura 63 - Imagem argamassa REF-A com ampliação 800 vezes | 170 |
| Figura 64 - Imagem argamassa ARN com ampliação 800 vezes | 171 |
| Figura 65 - Imagem argamassa ARB com ampliação 800 vezes | 171 |
| Figura 66 - Imagem argamassa ARA com ampliação 800 vezes | 171 |
| Figura 67 - Imagem argamassa ARA com ampliação 800 vezes | 172 |
| Figura 68 - Imagem argamassa REF-A com ampliação 12000 vezes | 172 |
| Figura 69 - Imagem argamassa ARN com ampliação 12000 vezes | 173 |
| Figura 70 - Imagem argamassa ARB com ampliação 12000 vezes | 173 |
| Figura 71 - Imagem argamassa ARA com ampliação 12000 vezes | 174 |
| Figura 72 - Difratoograma das amostras 1 a 12 dos materiais analisados | 175 |
| Figura 73 - Difratoograma das amostras 1, 7, 2 e 8 | 176 |
| Figura 74 - Difratoograma das amostras 3, 9, 4 e 10 | 177 |
| Figura 75 - Difratoograma das amostras 5, 11, 6 e 12. | 178 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabela 1 - | Comparação das composições químicas das escórias de aciaria de alto forno, LD e de forno elétrico a arco | 46 |
| Tabela 2 - | Comparação das composições químicas das escórias de refino oxidante e refino redutor | 48 |
| Tabela 3 - | Composição do basalto em óxidos (porcentagem em massa) | 51 |
| Tabela 4 - | Passivação do alumínio | 62 |
| Tabela 5 - | Parâmetros para a construção de placa quente protegida | 69 |
| Tabela 6 - | Composições dos cimentos segundo as normas brasileiras | 80 |
| Tabela 7 - | Abertura das peneiras em relação ao diâmetro dos agregados miúdos | 82 |
| Tabela 8 - | Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo | 83 |
| Tabela 9 - | Espessuras admissíveis para o revestimento de argamassa | 99 |
| Tabela 10 - | Composição química das argamassas expansivas industrializadas | 101 |
| Tabela 11 - | Composição das argamassas estudadas | 119 |
| Tabela 12 - | Planejamento dos ensaios experimentais | 120 |
| Tabela 13 - | Resultado do peneiramento da areia natural de rio | 136 |
| Tabela 14 - | Limites granulométricos para agregado miúdo segundo a NBR 7211/2005 | 137 |
| Tabela 15 - | Resultado do peneiramento da fração grossa do resíduo de basalto | 138 |
| Tabela 16 - | Resultado do peneiramento da fração fina do resíduo de basalto | 139 |
| Tabela 17 - | Resultado do peneiramento da areia compensada de basalto | 140 |
| Tabela 18 - | Resultado do peneiramento da areia de aciaria elétrica | 141 |
| Tabela 19 - | Valores das massas unitária e específica obtidos para os agregados ensaiados | 142 |
| Tabela 20 - | Volume de água necessário para a obtenção da consistência padrão das argamassas | 143 |
| Tabela 21 - | Resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e caracterização da massa específica das argamassas no estado endurecido conforme a NBR 9778/2009 | 147 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 22 - Resistência à compressão das argamassas com incorporação de partículas de alumínio reciclado aos 7 e 28 dias..... | 150 |
| Tabela 23 - Resistência à compressão das argamassas com incorporação de partículas de alumínio reciclado e NaCl..... | 150 |
| Tabela 24 - Avaliação da carbonatação | 153 |
| Tabela 25 - Volume de água necessário para a obtenção da consistência das argamassas com espalhamento de 28 cm | 154 |
| Tabela 26 - Massa específica das argamassas em função da incorporação de PAR e NaCl..... | 154 |
| Tabela 27 - Transferência de calor (°C) nas argamassas | 155 |
| Tabela 28 - Médias das temperaturas nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA tampa, laterais e água na jornada de seis dias | 161 |
| Tabela 29 - Temperaturas externas medidas nas superfícies dos protótipos no período de seis dias com a oscilação da temperatura na cidade de Londrina no período analisado | 162 |
| Tabela 30 - Médias das temperaturas nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA tampa, laterais e vazio interior no período de seis dias | 165 |
| Tabela 31 - Material selecionado para ensaio de Difração de Raios-X..... | 175 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|--------------|---|-----|
| Gráfico 1 - | Limites inferior e superior para zona ótima e zona utilizável | 84 |
| Gráfico 2 - | Curva granulométrica da areia natural de rio | 137 |
| Gráfico 3 - | Curva granulométrica da fração grossa do resíduo de basalto | 138 |
| Gráfico 4 - | Curva granulométrica da fração fina do resíduo de basalto | 139 |
| Gráfico 5 - | Curva granulométrica da areia compensada de basalto | 140 |
| Gráfico 6 - | Curva granulométrica da areia de aciaria elétrica | 141 |
| Gráfico 7 - | Temperatura da água contida nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA no período de seis dias | 161 |
| Gráfico 8 - | Temperatura interna verificada nos protótipos revestidos com as argamassas REFA, ARN, ARB e ARA no período de seis dias | 165 |
| Gráfico 9 - | Composição argamassa REF-A realizado por <i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> (EDS) | 165 |
| Gráfico 10 - | Composição argamassa ARN realizado por <i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> (EDS) | 166 |
| Gráfico 11 - | Composição argamassa ARB realizado por <i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> (EDS) | 166 |
| Gráfico 12 - | Composição argamassa ARA realizado por <i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> (EDS) | 167 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 - Origem, classes e responsáveis pelos resíduos | 39 |
| Quadro 2 - Classificação das argamassas quanto à massa específica no estado fresco..... | 78 |
| Quadro 3 - Propriedades que influenciam a reologia das argamassas | 92 |
| Quadro 4 - Materiais e os aspectos a serem considerados na composição e dosagem da Argamassa | 94 |
| Quadro 5 - Ensaio de caracterização e normas para agregados miúdos..... | 118 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| AAE | Areia de Aciaria Elétrica |
| AB | Areia de Basalto |
| ABAI | Associação Brasileira de argamassas industrializadas |
| ABAL | Associação Brasileira do Alumínio |
| ABCP | Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| A/C | Relação Água Cimento |
| AFB | Areia Fina de Basalto |
| AGB | Areia Grossa de Basalto |
| ALCAN | <i>Aluminium Limited</i> do Canadá |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| ANTAC | Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído |
| ARA | Argamassa com areia AAE + partículas de alumínio |
| ARB | Argamassa com areia AB + partículas de alumínio |
| ARN | Argamassa com areia natural de rio + partículas de alumínio |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| ATD | Análise Térmica Diferencial |
| BOF | <i>Basic Oxygen Furnace</i> |
| CBA | Companhia Brasileira de Alumínio |
| CBEE | Centro Brasileiro de Energia Eólica |
| CIMM | Centro de Informações Metal Mecânica |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia Elétrica |
| COP-21 | 21ª Conferência do Clima |
| CP | Cimento <i>Portland</i> |
| CSH | Silicato de Cálcio Hidratado |
| DDP | Diferença de Potencial |
| DNPM | Departamento Nacional de Produção Mineral |
| DRX | Difração de Raios X |
| EDS | <i>Energy Dispersive X-Ray Detector</i> |
| ELQUISA | Eletro Química Brasileira S/A |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| EVA | Poliacetato de Etileno Vinil |
| FEA | Forno Elétrico a Álcool |
| FEPAM | Fundação Estadual de Proteção Ambiental – RS |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| GN | Gás Natural |
| HFCs | Hidrofluorcarbonos |
| IAP | Instituto Ambiental do Paraná |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IC | Índice de Consistência |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo |
| ISO | <i>International Standard Organization</i> |
| LD | <i>Linz e Donawitz</i> |
| MME | Ministério das Minas e Energia |
| NBR | Norma Brasileira |
| NM | Norma Mercosul |

| | |
|---------|--|
| OCDE | Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| PCHs | Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PET | Polietileno Tereftalato |
| PFCs | Perfluorcarbonos |
| PMRS | Plano Municipal de Resíduos Sólidos |
| PRAD | Plano de Recuperação de Áreas Degradadas |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas |
| REF-A | Argamassa com areia natural de rio – argamassa de referência |
| REF-B | Argamassa com areia de basalto – argamassa de referência |
| REF-E | Argamassa com areia de escória de aciaria elétrica – argamassa de referência |
| RCC | Resíduo da Construção Civil |
| RPM | Rotações por Minuto |
| SANEPAR | Companhia de Saneamento do Paraná |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| UEL | Universidade Estadual de Londrina |

LISTA DE SÍMBOLOS, FÓRMULAS QUÍMICAS E UNIDADES

| | |
|--------------------|---|
| % | Porcentagem |
| %RA | Porcentagem Retida Acumulada |
| ρ | Densidade |
| α | Difusidade térmica (m^2/s) |
| $(T_1 - T_2)$ | Diferença de temperatura ($^{\circ}C$) |
| $^{\circ}C$ | Graus Celsius |
| cc | Centímetro cúbico |
| c | Calor específico |
| C | Capacidade calorífica |
| A_i | Absorção de água por imersão (%) |
| C.V | Coeficiente de Variação (%) |
| CaO | Óxido de Cálcio |
| CH ₄ | Metano |
| cm | Centímetros |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| d | diâmetro do corpo-de-prova (mm) |
| dm | Decímetro |
| dm ³ | Decímetro cúbico |
| DMC | Dimensão Máxima Característica |
| e | Espessura |
| F | Força máxima obtida no ensaio (N) |
| F _c | Resistência à compressão axial (MPa) |
| F _{c28} | Resistência média à compressão aos 28 dias |
| F _{ck} | Resistência característica à compressão |
| GPa | Giga Pascal |
| Hab | Habitantes |
| IV | Índice de Vazios (%) |
| λ | Condutividade térmica (W/m.K) |
| kg | Quilograma |
| kg/dm ³ | Quilograma por decímetro cúbico |
| kg/m ³ | Quilograma por metro cúbico |
| km | Quilômetro |
| kW | Quilo Watts |
| kW.h | Quilo Watts por hora |
| LI | Limite Inferior |
| LS | Limite Superior |
| M | Massa (kg) |
| MF | Módulo de Finura |
| M _i | Massa do corpo de prova saturado imerso em água |
| m | Metro |
| m ² | Metro quadrado |
| m ³ | Metro cúbico |
| min | Minuto |
| mm | Milímetro |

| | |
|------------------|--|
| MPa | Mega Pascal |
| Ms | Massa do corpo de prova seco em estufa |
| Msat | Massa do corpo de prova saturado |
| Mseca | Massa do corpo-de-prova seco (g) |
| MW | Mega Watts |
| N ₂ O | Óxido Nitroso |
| Ø | Diâmetro |
| SF ₆ | Hexafluoreto de enxofre |
| SO ₂ | Dióxido de Enxofre |
| T | Temperatura (°C) |
| t | Tempo decorrido no ensaio (s) |
| t ou ton | Toneladas |
| V | Volume (mm ³) |
| W | Watts |
| δ | Massa específica |
| γ | Massa unitária |
| μs | Microssegundos |
| μm | Micrômetro |
| v | Coefficiente de Poisson |
| σ | Tensão |
| Ω | Ohm |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 | Justificativa..... | 23 |
| 1.2 | Objetivo Geral | 23 |
| 1.3 | Objetivos Específicos | 24 |
| 1.4 | Hipótese | 24 |
| 1.5 | Contribuições Esperadas | 24 |
| 1.6 | Estrutura da Dissertação | 24 |
| | | |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 26 |
| 2.1 | Eficiência Energética e Conforto Térmico | 26 |
| 2.2 | Sustentabilidade e Resíduos..... | 34 |
| 2.2.1 | <i>Resíduos de escória de aciaria de forno elétrico</i> | 42 |
| 2.2.2 | <i>Resíduos de basalto</i> | 51 |
| 2.2.3 | <i>Resíduos de alumínio</i> | 58 |
| 2.3 | Transferência de calor..... | 64 |
| 2.3.1 | <i>Condução</i> | 70 |
| 2.3.2 | <i>Radiação</i> | 73 |
| 2.3.3 | <i>Convecção</i> | 74 |
| 2.4 | Argamassa | 75 |
| 2.4.1 | <i>Definições</i> | 76 |
| 2.4.2 | <i>Materiais Constituintes</i> | 79 |
| 2.4.2.1 | <i>Cimento</i> | 79 |
| 2.4.2.2 | <i>Cal</i> | 81 |
| 2.4.2.3 | <i>Agregados Miúdos</i> | 81 |
| 2.4.3 | <i>Propriedades das Argamassas</i> | 84 |
| 2.4.3.1 | <i>Consistência</i> | 84 |
| 2.4.3.2 | <i>Trabalhabilidade</i> | 85 |
| 2.4.3.3 | <i>Coesão e Tixotropia</i> | 86 |
| 2.4.3.4 | <i>Plasticidade</i> | 86 |
| 2.4.3.5 | <i>Retenção de Água e Carbonatação</i> | 87 |
| 2.4.3.6 | <i>Aderência</i> | 87 |
| 2.4.3.7 | <i>Elasticidade</i> | 89 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 2.4.3.8 | <i>Durabilidade</i> | 89 |
| 2.4.4 | <i>Reologia das Argamassas</i> | 90 |
| 2.4.5 | <i>Composição e Dosagem</i> | 92 |
| 2.4.6 | <i>Argamassas tradicionais</i> | 94 |
| 2.4.6.1 | <i>Argamassa de Cal</i> | 95 |
| 2.4.6.2 | <i>Argamassa de Cimento</i> | 95 |
| 2.4.6.3 | <i>Argamassa Mista</i> | 96 |
| 2.4.7 | <i>Argamassa de Revestimento</i> | 96 |
| 2.4.8 | <i>Argamassas expansivas</i> | 100 |
| 2.4.8.1 | <i>Agentes expansivos</i> | 101 |
| 2.4.8.2 | <i>Ação expansiva do alumínio</i> | 104 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 114 |
| 3.1 | <i>Materiais</i> | 114 |
| 3.1.1 | <i>Cimento Portland</i> | 114 |
| 3.1.2 | <i>Areia</i> | 115 |
| 3.1.3 | <i>Resíduo de Basalto</i> | 115 |
| 3.1.4 | <i>Resíduo de Aciaria Elétrica</i> | 115 |
| 3.1.5 | <i>Resíduos de Alumínio</i> | 116 |
| 3.1.6 | <i>Água</i> | 117 |
| 3.2 | MÉTODOS | 117 |
| 3.2.1 | <i>Planejamento Experimental 1 (PE 1)</i> | 117 |
| 3.2.2 | <i>Planejamento Experimental 2 (PE 2)</i> | 118 |
| 3.2.2.1 | <i>Definição das misturas</i> | 118 |
| 3.2.2.2 | <i>Ensaio de consistência das argamassas</i> | 119 |
| 3.2.2.3 | <i>Análise da trabalhabilidade das argamassas</i> | 119 |
| 3.2.3 | <i>Planejamento Experimental 3 (PE 3)</i> | 120 |
| 3.2.3.1 | <i>Avaliação do desempenho mecânico</i> | 121 |
| 3.2.3.2 | <i>Avaliação do desempenho físico</i> | 121 |
| 3.2.3.3 | <i>Avaliação do desempenho químico</i> | 122 |
| 3.2.3.3.1 | <i>Verificação da carbonatação</i> | 123 |
| 3.2.3.3.2 | <i>Verificação da expansão</i> | 123 |
| 3.2.4 | <i>Planejamento Experimental 4 (PE 4)</i> | 124 |
| 3.2.4.1 | <i>Avaliação da transferência de calor nas argamassas</i> | 125 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.4.2 | <i>Avaliação da porosidade</i> | 130 |
| 3.2.5 | <i>Planejamento Experimental 5 (PE 5)</i> | 131 |
| 3.2.5.1 | <i>Estudo do desempenho da transferência de calor nas argamassas aplicadas como revestimento</i> | 131 |
| 3.2.6 | <i>Planejamento Experimental 6 (PE 6)</i> | 132 |
| 3.2.6.1 | <i>Análise dos componentes químicos das argamassas - MEV.</i> | 132 |
| 3.2.6.2 | <i>Análise dos componentes químicos das argamassas – Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)</i> | 133 |
| 4. | RESULTADOS E CONCLUSÕES | 134 |
| 4.1 | <i>Coleta dos resíduos</i> | 134 |
| 4.1.1 | <i>Resíduos de basalto</i> | 134 |
| 4.1.2 | <i>Resíduos de escória</i> | 134 |
| 4.1.3 | <i>Resíduos de alumínio</i> | 135 |
| 4.2 | <i>Caracterização dos materiais</i> | 136 |
| 4.2.1 | <i>Análise granulométrica</i> | 136 |
| 4.2.1.1 | <i>Areia natural de rio</i> | 136 |
| 4.2.1.2 | <i>Areia de basalto</i> | 138 |
| 4.2.1.3 | <i>Areia aciaria elétrica</i> | 141 |
| 4.2.2 | <i>Massa unitária e massa específica</i> | 142 |
| 4.2.2.1 | <i>Areia natural de rio</i> | 142 |
| 4.3 | <i>Avaliação das argamassas no estado fresco</i> | 142 |
| 4.3.1 | <i>Consistência das argamassas</i> | 142 |
| 4.3.2 | <i>Análise da trabalhabilidade das argamassas</i> | 144 |
| 4.4 | <i>Avaliação das argamassas no estado endurecido</i> | 145 |
| 4.4.1 | <i>Avaliação do desempenho físico - ensaio de absorção, índice de vazios e caracterização da massa específica das argamassas</i> | 145 |
| 4.4.2 | <i>Desempenho mecânico das argamassas</i> | 147 |
| 4.4.3 | <i>Avaliação do desempenho químico: verificação da carbonatação</i> | 151 |
| 4.4.4 | <i>Avaliação do desempenho químico: verificação da expansão</i> | 154 |
| 4.4.5 | <i>Avaliação da transferência de calor nas argamassas</i> | 155 |
| 4.4.6 | <i>Avaliação da porosidade nas argamassas</i> | 156 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.7 | <i>Estudo da transferência de calor nas argamassas usadas como revestimento.....</i> | 158 |
| 4.4.7.1 | <i>Transferência de calor nos protótipos contendo água</i> | 159 |
| 4.4.7.2 | <i>Transferência de calor nos protótipos vazios</i> | 162 |
| 4.5 | Análise dos componentes químicos das argamassas em estudo – microscopia eletrônica de varredura – (MEV) | 167 |
| 4.6 | Análise dos componentes químicos das argamassas em estudo – ensaio de Difração de Raios-X - (DRX)..... | 174 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 180 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 182 |
| | REFERÊNCIAS | 183 |

1. INTRODUÇÃO

O conforto térmico da edificação envolve, implicitamente, um alto consumo de energia, uma vez que, atualmente, na maior parte das edificações se recorre a equipamentos especiais para atingir o conforto. Essa demanda está diretamente associada ao processo de geração de energia.

O processo de geração de energia é considerado um grande marco de referência na história da humanidade, sendo um fator limitante e um forte obstáculo para o desenvolvimento sócio econômico mundial. Existem inúmeras formas de obtenção de energia, desde a hidrelétrica, que é a mais comum no Brasil, até a nuclear, passando pela energia gerada por meio dos biocombustíveis (KATWAL; SONI, 2003; DOVI, *et. al*, 2009).

A eficiência energética das edificações é um tópico de grande interesse mundial. Quanto mais eficiente for uma edificação, menos energia ela deverá consumir e menos impacto para a sua geração será causado.

Com o aumento da população mundial, surgiram mais espaços urbanos e o meio ambiente foi gradualmente submetido a maiores impactos para atender à demanda por edificações. O intuito de tornar o ambiente construído mais eficiente depende do desenvolvimento apropriado dos projetos arquitetônicos e dos projetos complementares, conforme as condições climáticas regionais, a correta observação da orientação solar, a escolha dos materiais, a espessura das paredes e superfícies do envoltório edificado, respeitando a volumetria e as características da obra (GRAF, 2008).

Os ambientes precisam apresentar condições mínimas de conforto para a atividade que vão abrigar, sendo que a baixa eficiência energética das edificações é agravada por projetos inadequados que requerem o uso da climatização artificial para atingir uma condição confortável. Uma maneira de melhorar o desempenho de uma edificação é através da especificação correta do seu invólucro, ou seja, do conjunto de materiais e componentes que delimitam o espaço gerador da edificação e seu isolamento térmico adequado, de acordo com o clima do local onde a edificação será inserida (GRAF, 2008).

Quanto mais isolado o invólucro, uma quantidade maior de materiais será utilizada e, conseqüentemente, mais energia será incorporada à edificação, porém menor será a transmitância térmica. O valor de transmitância térmica das superfícies que compõem o invólucro, ou seja, a sua capacidade de conduzir calor, é importante para manter a edificação na faixa de conforto térmico com a menor quantidade possível de energia para climatização dos ambientes (GRAF, 2011).

Por outro lado, de acordo com Roaf; Fuentes; Thomas (2006), as edificações, com destaque para o setor residencial, são consideradas as maiores responsáveis pela geração de impactos ambientais, devido ao mau uso dos recursos energéticos que é feito de forma ineficiente e gera grande emissão de gases poluentes na atmosfera, além da apropriação de fontes não renováveis de materiais.

Alternativas devem ser estabelecidas para minimizarem tais problemas, o que incide diretamente no modo de projetar e construir os ambientes. Da energia utilizada nas edificações, cerca da metade é consumida por residências e para estabilizar as alterações climáticas que vêm ocorrendo, há a necessidade de uma redução de 60% das emissões globais de gás carbônico nas edificações residenciais, conforme um estudo feito pela Comissão sobre Poluição Ambiental no Reino Unido (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

A maior parte das atividades antrópicas é realizada em espaços construídos, de forma que, 80% da vida das pessoas ocorre no interior das edificações. A representação das edificações na qualidade de vida é significativa, assim como nos impactos ambientais, já que estes possuem grande responsabilidade na obtenção de um *habitat* mais sustentável (EDWARDS, 2008).

As construções fazem parte das necessidades básicas dos indivíduos e devem ser concebidas mediante uma preocupação com a saúde e bem-estar dos seus usuários. Para se obter um ambiente saudável é preciso, na fase de projeto, estabelecer coerentemente as variáveis que permitam indicar as direções favoráveis à correta evolução do espaço construído, pois, o principal objetivo desse ambiente artificial é proporcionar conforto e qualidade de vida às pessoas. Como tal, devem oferecer boa qualidade de ar interno, condições confortáveis referentes à temperatura, aeração, umidade, descarte de efluentes e resíduos, além do fornecimento de água potável, transporte, comunicação, estabilidade e segurança (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Da mesma forma, a melhoria do ambiente externo à edificação também é responsabilidade do projetista, que divide com os usuários as preocupações em relação à ineficiência, ao desperdício e à poluição gerada. Concomitantemente ao cuidado com a qualidade de vida dos usuários e suas necessidades, deve haver o respeito pelo ambiente natural e pela comunidade local, reduzindo os impactos causados através de um projeto ecologicamente consciente e do gerenciamento da demanda de energia, de águas e descargas, além de emissões, barulho, desperdício e impacto visual (HALLIDAY, 1997).

Em edificações adaptadas às pessoas e as suas atividades, é gerado um ambiente confortável como uma contribuição para a sociedade, de forma a apropriar a arquitetura à necessidade humana e à melhoria da qualidade de vida.

Dessa forma, associada à questão energética e à necessidade de climatização da edificação, se contrapõe outro problema, que é a geração de resíduos urbanos. Muito embora a construção civil seja a grande geradora de resíduos, denominados RCC, segmentos a ela vinculados são responsáveis pela geração de outros resíduos, tais como resíduos de pedreira, resíduos da indústria de manufatura do alumínio e resíduos siderúrgicos para a produção de aço.

Durante o processo de obtenção de britas de basalto, por exemplo, tanto a extração da matéria prima, quanto as operações de britagem da rocha acarretam a geração e a deposição de um grande volume de resíduos na natureza. Este passivo ambiental, depositado nas pedreiras, traz consequências nocivas para o meio ambiente, particularmente as frações finas, da ordem de 75 μm ou menos, com pouca utilidade na indústria da construção civil. O acúmulo desses resíduos gera a necessidade de grandes áreas para sua deposição, uma vez que podem ser responsáveis pelo assoreamento dos rios, pela contaminação dos solos onde estão depositados, bem como pela poluição do ar, caso não sejam dispostos ou armazenados adequadamente.

No tocante à produção do aço, a partir de sucata, por meio do processamento em fornos elétricos, ocorre a geração de um volume considerado de escória, o qual, por existirem poucas alternativas de destinação, tais como, uso do agregado graúdo na mistura asfáltica; agregado para base e sub-base; estabilização de solos e agregado para a produção de concreto acaba sendo descartado em um pátio siderúrgico (ROHDE, 2002).

Dessa forma, esse material ainda em fase inicial de estudos, acaba se constituindo em um passivo ambiental. Há um grande empenho da comunidade científica para o desenvolvimento de estudos com a escória de aciaria elétrica, visando o seu uso como agregado na construção civil, o que representaria uma redução no custo final do produto, além de um ganho ambiental considerável decorrente do fato de se desenvolver um processo de reciclagem desse resíduo.

Por outro lado, ainda sob o foco desse estudo, verificou-se que no processo da usinagem do alumínio são gerados resíduos na forma de cavacos longos e contínuos. Uma solução para minimizar esse problema seria a reciclagem. Para tal, é preciso observar se os mesmos apresentam resíduos de fluidos utilizados durante o processo de usinagem e corte e, caso isso ocorra, os mesmos devem ser lavados.

A proposta desse trabalho é a incorporação desses três tipos de resíduos em processos de produção de elementos a base de materiais cimentícios para uso na construção civil. É importante observar que a reciclagem desses resíduos agrega valor aos mesmos e possibilita a minimização dos problemas, sendo que esses materiais retornariam ao ciclo produtivo com menor consumo de energia.

Dessa forma, a reciclagem, além de reduzir a demanda na extração de novos insumos, em função da classificação e reutilização de subprodutos, possibilita um ciclo de reserva junto aos grandes extrativistas, que por sua vez destinariam esta reserva de matéria prima e energia à produção de outros bens e serviços.

Com isso, as edificações ao incorporarem esses resíduos em seus processos construtivos, estariam permitindo a devolução de energia ao sistema gerador ao longo de sua vida útil e favoreceriam a produção de energia de modo sustentável, aliadas à logística reversa.

1.1 Justificativa

Associado ao intuito de atender à demanda de materiais cujo desempenho térmico favoreça o condicionamento térmico da construção, esse trabalho se propõe a estudar o comportamento térmico de argamassas expandidas e associar a essa necessidade, a reciclagem dos resíduos citados, incorporando-os à argamassa de revestimento.

O diferencial dessas argamassas, em função da expansão provocada pela presença do alumínio, seria a interferência na transferência de calor por condução que, dependendo do agregado utilizado, tanto pode apresentar comportamento de condução, como de isolamento de calor.

Outra questão a ser estudada é o comportamento dessa argamassa quando aplicada na face externa de reservatórios, a qual poderia favorecer o aquecimento da água pelo calor absorvido através da radiação solar.

1.2 Objetivo Geral

O presente estudo visa verificar a ação expansiva resultante da incorporação de partículas de alumínio reciclado em argamassas de cimento *Portland* utilizando resíduos e o seu efeito sobre o comportamento dessas frente à radiação solar.

1.3 Objetivos Específicos

Verificar o potencial de expansividade do resíduo de alumínio reciclável quando incorporado às argamassas com areia natural, areia de basalto e areia de escória de aciaria elétrica.

Verificar o comportamento térmico decorrente da transferência de calor por condução em paredes de concreto revestidas com as argamassas estudadas.

Avaliar a interferência da adição de partículas de alumínio na massa específica das argamassas.

1.4 Hipótese

A incorporação de partículas de alumínio reciclado em argamassas de diferentes constituições provoca expansão, interfere na transferência de calor e reduz sua massa específica.

1.5 Contribuições Esperadas

Possibilitar a produção de argamassas expansivas utilizando o resíduo de alumínio proveniente de processos industriais.

Explorar o potencial das argamassas expansivas para revestimento na construção civil em função de seu desempenho térmico quando sujeitas à radiação solar.

Viabilizar a utilização do alumínio reciclado, da areia de basalto e da escória de aciaria elétrica na produção de argamassas de revestimento.

1.6 Estrutura da Dissertação

A estrutura desse trabalho é composta por seis capítulos, sendo que no Capítulo I são apresentados a importância do tema, a justificativa, os objetivos (geral e específicos), a hipótese da pesquisa e as contribuições esperadas.

No Capítulo II é apresentada a revisão bibliográfica sobre eficiência energética e o conforto térmico, sustentabilidade e resíduos, transferência de calor e argamassa.

O Capítulo III apresenta os materiais e os métodos utilizados, com a descrição dos planejamentos experimentais e os ensaios especificados para a pesquisa.

Em seguida, no Capítulo IV, são apresentados os resultados e as conclusões dos ensaios.

No Capítulo V apresentam-se as considerações finais e no Capítulo VI apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eficiência Energética e Conforto Térmico

A energia é essencial para o desenvolvimento de todos os países. O mundo depende do abastecimento de vetores energéticos como o carvão, o petróleo, o gás natural, a energia nuclear e a hidroeletricidade, para o seu funcionamento. Os quatro primeiros são as principais fontes energéticas primárias, porém não são renováveis e dispõem de reservas limitadas. A hidroeletricidade, por sua vez, mesmo sendo renovável, se encontra em quantidade limitada e se concentra apenas em alguns países.

Todas as atividades desenvolvidas pelo homem em suas edificações e nas cidades necessitam de energia, tanto para a construção como para a manutenção destes espaços, independente do setor em que esteja inserido (energético, comercial, público, residencial, agropecuário, de transporte e industrial), funcionando indiferentemente da matriz energética utilizada (MME, 2009). Essa é a principal razão pela qual a eficiência energética é um assunto de relevância, pois, quanto mais eficiente for um equipamento ou uma edificação, menos energia deverá consumir e menos impacto para a produção desta energia deverá causar. Além do impacto causado pela extração dos materiais necessários à atividade de edificar, existe a devastação no local da implantação das obras com a retirada da vegetação natural, além da destruição do ambiente original, bem como a poluição causada pelo setor de transportes, que está diretamente ligada às atividades antrópicas e seus ambientes construídos (MME, 2009).

A busca pela autossuficiência na geração de energia, aliada a uma diversificação da matriz energética, que supra a demanda interna dos países, no caso de uma escassez de combustíveis fósseis, é a nova tendência mundial. Para que isso ocorra, os países precisam ter sob controle fontes primárias de geração de energia elétrica, térmica e veicular (combustível fóssil e combustível renovável), sendo necessário que exista uma autossuficiência de alguma fonte de energia, reorganizando o sistema energético em bases sólidas e sustentáveis priorizando a eficiência com a maior participação das fontes renováveis e a descentralização da produção de energia (LUCON; GOLDEMBERG, 2009).

A crise energética pode ser uma importante oportunidade para reorganizar o sistema energético em bases mais sólidas e sustentáveis, buscando a eficiência energética, uma vez que a maior participação das fontes renováveis é a descentralização da produção de energia. O Brasil pode aproveitar a experiência dos países desenvolvidos em eficiência energética, complementando com um programa vigoroso voltado para as energias renováveis,

como a eólica, a solar e a biomassa, bem como as pequenas hidrelétricas (LUCON; GOLDEMBERG, 2009).

As fontes de energia renováveis já demonstraram poder sustentar a economia mundial de várias maneiras. No entanto, é fato que os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e a eletricidade se constituem como base para operar o atual modelo tecnológico e manter o estilo de vida (BARROS, 2007).

De acordo com Pacheco (2006), as energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, fonte primária de quase toda energia disponível na Terra e por isso, praticamente inesgotável. Por outro lado, não alteram o balanço térmico do planeta e se configuram como um conjunto de fontes de energia que podem ser chamadas de não convencionais, também denominadas energias renováveis, ou detentoras de ciclos de renovação natural. Incluem-se nesta categoria a energia eólica, a energia proveniente da biomassa e a solar, as quais são formas de energia que se regeneram de maneira cíclica ao longo de uma escala de tempo reduzido.

As energias renováveis terão um grande papel a desempenhar, não só por serem menos poluentes, como também, pela sua própria natureza, uma vez que podem ser produzidas em pequenas unidades, favorecidas pelo fato de que a descentralização da produção de energia se traduz em aumento na segurança de fornecimento e na geração de oportunidades de empregos (LUCON; GOLDEMBERG, 2009).

Ao tratar especificamente de conforto térmico, a baixa eficiência energética das edificações pode ser agravada por um projeto que não se enquadre aos novos conceitos de sustentabilidade e conservação de energia, pela especificação inadequada de materiais e equipamentos, bem como pelo uso inadequado. Se as edificações forem bem projetadas, por exemplo, será desnecessário o uso da climatização artificial (aquecimento ou resfriamento do ambiente) para atingir uma condição térmica confortável (GRAF, 2008).

Nos casos em que é imprescindível o uso de sistemas artificiais para atingir as situações de conforto, esses índices seriam atingidos com maior eficiência pelo correto dimensionamento e especificação de equipamentos de baixo índice de consumo. Para isso, bastaria planejar a edificação com a perspectiva energética desde o início da sua concepção, pensando também na energia incorporada (GRAF, 2008). A energia incorporada é uma forma de mensurar o impacto ambiental das construções, sendo um fator importante para a tomada de decisões quanto à escolha dos materiais (ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2009).

O consumo de energia em edificações está relacionado aos ganhos ou perdas de calor pela envoltória da edificação, que, associados à carga interna gerada pela ocupação, pelo

uso de equipamentos e pela iluminação artificial, resultam no consumo dos sistemas de condicionamento de ar, além dos sistemas de iluminação e equipamentos elétricos (CARLO, 2008).

Com base neste contexto, planejar uma construção eficiente não se resume apenas ao consumo de energia, mas também à quantidade de energia gasta para tornar possível a existência desses ambientes. Isso está relacionado ao chamado ciclo de vida da edificação, que abrange toda a energia consumida neste edifício ao longo de sua vida útil, incluindo a energia incorporada pelos materiais utilizados (CARLO, 2008).

No Brasil, de acordo com Ministério das Minas e Energia (MME, 2009), o setor residencial representa 10% do consumo final de energia e 22,3% do consumo de eletricidade do país, envolvendo os setores: energético, comercial, público, agropecuário, transportes e industrial. Os impactos causados pelas edificações, espaços públicos ou cidades, tornam a questão da eficiência energética nos ambientes construídos um tema de prioritária relevância para que haja salubridade atmosférica, qualidade de vida e condições para a sobrevivência humana.

O uso adequado da arquitetura está ligado diretamente à racionalização de energia, que pode ser garantida através de um projeto arquitetônico que considere o clima para ser concebido, diminuindo o uso de sistemas artificiais de climatização para aquecer ou resfriar os espaços. Ao tornar uma edificação mais confortável termicamente através da concepção adequada do projeto, o custo de utilização e os gastos com a manutenção são reduzidos (FROTA; SCHIFFER, 1999).

Na atualidade tem se dado ênfase especial ao aproveitamento da energia solar nas edificações. A energia proveniente do sol pode ser utilizada diretamente para o aquecimento do ambiente, para o aquecimento de água e para produção de eletricidade, com possibilidade de reduzir em 70% o consumo de energia convencional. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico, (LUCON; GOLDEMBERG, 2009).

De acordo com Lucon; Goldemberg (2009), as aplicações práticas da energia solar podem ser divididas em dois grupos: energia solar fotovoltaica, que se constitui num processo de aproveitamento da energia solar para conversão direta em energia elétrica, utilizando os painéis fotovoltaicos (fabricados com a utilização do silício) e a energia térmica (coletores termo solares planos e concentradores) relacionada basicamente aos sistemas de aquecimento de água.

O aproveitamento da energia solar através de painéis térmicos ou com células fotovoltaicas possui características locais que dispensam frequentemente transporte da energia a grandes distâncias. Com os recentes desenvolvimentos da energia solar, é possível gerar eletricidade por meio de placas coletoras posicionadas nos telhados das edificações, utilizando-a imediatamente ou alimentando a rede elétrica com os excedentes. Completando a integração energética, perspectivas futuras incluem os veículos elétricos e os movidos à células de hidrogênio (LUCON; GOLDEMBERG, 2009).

O grande argumento para a difusão e o desenvolvimento da tecnologia solar térmica é o fato do aquecimento solar, para aquecimento de água, proporcionar medidas eficazes de conservação de energia, com atenuação e deslocamento do horário de ponta (entre 17h e 21h) das concessionárias de energia, principalmente quando se sabe que somente com aquecimento doméstico de água para banho, via chuveiro elétrico, são gastos anualmente bilhões de KW/h de energia elétrica que poderia ser suprida com aquecedores solares, com vantagens socioeconômicas e ambientais (MMA, 2015).

As perspectivas de crescimento deste tipo de energia vão depender da apropriação do progresso técnico na produção de células solares. As primeiras células produzidas em escala comercial surgiram na década de 50 e tinham um coeficiente de conversão de energia solar em eletricidade de 2% apenas. Com este coeficiente, um metro quadrado de célula solar produzia 20 Watts. Este coeficiente chegou a 33% no ano 2000 (330 Watts/m²) e, atualmente, chega-se a coeficientes superiores a 40%. Tudo indica que em poucos anos a eletricidade proveniente da energia solar venha a competir com a gerada em usinas termoeletricas (MMA, 2015).

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Assim, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção (PACHECO, 2006).

O homem sempre buscou conforto, proteção e segurança nos ambientes onde vive. As características atuais das sociedades, tanto desenvolvidas como em desenvolvimento, fazem com que um elevado número de pessoas passe a maior parte de seu dia em ambientes interiores. Quando esses ambientes não apresentam características adequadas ao uso, inerentes às condições climáticas regionais podem, muitas vezes, gerar condições adversas, de má qualidade do ar interior, desconforto térmico, situações de insalubridade e perda de produtividade (HALLIDAY, 1997; EDWARDS, 2008).

No passado, as casas eram construídas apenas para protegerem da chuva, do sol e do frio, sem atenção especial ao isolamento térmico. Isso começou a mudar no Século XX, quando a consciência da limitação dos recursos energéticos, o aumento do custo da energia elétrica, bem como uma procura cada vez mais acentuada pelo conforto térmico levou à implementação de conceitos que especificam níveis mínimos de isolamento térmico em paredes, telhados e vãos envidraçados.

O conhecimento das diversas alternativas para isolamento térmico dos elementos existentes para se executar uma edificação, serve de subsídios para a elaboração de projetos visando à economia de energia e também para encontrar soluções construtivas que propiciem condições satisfatórias de conforto térmico sem utilizar equipamentos de aquecimento ou resfriamento para o condicionamento ambiental (PAES, 2008).

Existem duas formas de se minorarem os problemas de desconforto térmico em edificações: de forma ativa, com a utilização de equipamentos de condicionamento de ar; e de forma passiva, com a utilização de técnicas naturais (PAES, 2008).

Define-se conforto térmico como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A não satisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente. A norma internacional para averiguar o conforto térmico em ambientes é a ISO 7730/1994 (LAMBERTS, DUTRA, PEREIRA, 2014).

O isolamento térmico tem como função principal o aumento da resistência térmica do edifício, de forma a reduzir as trocas de calor entre o edifício e o exterior, reduzindo as necessidades de aquecimento e resfriamento (GRAF, 2011).

Um sistema de isolamento térmico com características técnicas e espessuras adequadas, aplicado pelo exterior dos edifícios (pavimento térreo, paredes envolventes e coberturas), contribui melhor para a eficácia do desempenho energético de um edifício, do que qualquer outro sistema equiparável (BARROS, 2009).

A arquitetura que se utiliza dos recursos da natureza, conhecida como arquitetura bioclimática, tem como base a estruturação do projeto arquitetônico às características de cada região, para isso, deve-se fazer um estudo detalhado de cada área ou região de implantação da obra, para que o projeto se torne viável. Além de garantir a eficiência da edificação e a redução dos impactos ambientais através da escolha dos materiais utilizados (CUNHA, 2004).

A arquitetura bioclimática pode ser definida como aquela que, fazendo uso da tecnologia que se baseia na correta aplicação dos elementos arquitetônicos, com o intuito de

fornecer ao ambiente construído, um alto grau de conforto higrotérmico, com pequeno consumo energético, onde, as cartas bioclimáticas permitem se chegar às estratégias arquitetônicas mais adequadas para uma determinada localidade (PAPST, 1999).

De acordo com Papst (1999) a arquitetura bioclimática baseia-se na correta aplicação de elementos arquitetônicos e tecnologias construtivas para consumir menos energia, otimizando o conforto de seus ocupantes.

Todos os materiais quando sujeitos a uma diferença de temperatura absorvem (no caso de um aumento de temperatura) ou libertam (no caso de uma diminuição de temperatura) uma quantidade de calor que é função da sua massa e calor específico. O produto da massa pelo calor específico toma a designação de capacidade ou massa térmica e, quanto maior for o valor desta propriedade, maior é a capacidade de armazenamento ou liberação de calor do material. Este comportamento não representa mais do que a resistência em termos térmicos que o edifício oferece às solicitações térmicas atuantes, por analogia com outros domínios científicos é comum designar esta resistência por inércia térmica (FERREIRA, 2012).

Em uma residência, cerca de um terço do calor total perdido durante o inverno ocorre através das janelas. Por outro lado, no verão, o fluxo de radiação solar incidente através delas, aquece indesejavelmente o interior da edificação. A principal característica de um bom desempenho térmico em uma edificação nas estações frias é um adequado isolamento, pois, este reduzirá as perdas de calor do lado interno para o lado externo e conseqüentemente reduzirá o uso de energia (PAPST, 1999).

A Norma Brasileira ABNT NBR 15220/2005 - Desempenho térmico de edificações apresenta definições, símbolos, unidades, métodos de cálculos da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, o zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida e pelo método fluximétrico, para saber onde utilizar um material condutor térmico ou um material isolante térmico, dependendo do desempenho térmico que se quer atingir em determinada edificação. Esta norma estabeleceu uma subdivisão das condições climáticas brasileiras para projeto em oito zonas bioclimáticas, de acordo com o zoneamento bioclimático do Brasil, definidas de acordo com o clima e com as necessidades humanas de conforto. Para cada zona, são relacionadas as estratégias consideradas adequadas para adoção nas edificações e para a formulação das diretrizes construtivas.

O fator clima é uma variável de caráter imprescindível que deve ser levada em consideração na elaboração do projeto de uma edificação, sendo a temperatura do ar exterior e

a radiação solar, os dois parâmetros de maior relevância, onde a temperatura do ar é responsável pelas transferências de calor que ocorrem na edificação, do exterior para o interior no verão e por perdas térmicas para o exterior no inverno. A radiação solar tem uma função fundamental no comportamento térmico das construções, contribuindo para o aumento da temperatura do seu interior no inverno e sendo uma fonte indesejável de calor no verão (BARRIA, 2007).

A intensidade da radiação solar, a orientação do edifício, a porcentagem de área envidraçada e a forma como ela se distribui pelas fachadas são fatores que têm grande influência no desempenho térmico do edifício, tanto no inverno quanto no verão (FERREIRA, 2012).

Para garantir um nível adequado de conforto térmico e a qualidade do ar interior, deve-se levar em consideração a zona bioclimática brasileira em que a construção se situa, pois, as medidas de isolamento e proteção climática estão diretamente relacionadas com a sua localização. As janelas devem ser posicionadas para as orientações solares que recebem a incidência do sol, porém devem ficar protegidas da exposição solar excessiva no verão e permitirem sua incidência no inverno, com a utilização de coberturas, pergolados, persianas, brises ou outros sistemas de proteção solar, como técnicas passivas com vegetação e plantas trepadeiras ou o sombreamento exterior através de uma árvore de folhas caducas, ou seja, aquelas que perdem suas folhas durante o outono, permitindo a obtenção de sombra nas estações quentes e a incidência solar no inverno (FERREIRA, 2012).

Os materiais e elementos que constituem a base de construção das envoltentes, que devem assegurar prioritariamente as exigências de segurança e estabilidade, não possuem normalmente as características de isolamento térmico exigidas pela regulamentação, pelo que é necessário introduzir materiais adicionais com essa função específica. Estes materiais de isolamento térmico têm uma baixa condutividade térmica, em razão da sua baixa massa volumétrica, como o poliestireno expandido, a lã de vidro, a lã de rocha, a espuma de poliuretano, e são dispostos em camadas com a espessura dimensionada para conferir à envoltente opaca, ou seja, uma parede de vedação sem aberturas, o nível de resistência térmica pretendido (FERREIRA, 2012).

A utilização de vidros duplos, preferencialmente de baixa emissividade, com esquadrias de baixa transmissão térmica, por exemplo, as esquadrias de PVC, podem reduzir em até 50% as perdas térmicas pelas janelas, assim como o ruído do exterior. As fachadas envidraçadas, com grande exposição solar, devem possuir, além de elementos de proteção,

condições para favorecer a ventilação natural cruzada, ou seja, com entradas de ar no nível inferior e saídas do ar no nível superior (MARTINS, 2009).

Ao isolar um edifício termicamente, a redução de consumo de energia pode chegar até 30%, desde que bem aplicado, levando em consideração as características térmicas dos materiais escolhidos e também o local onde estes serão aplicados (BARROS, 2009).

Em projetos de arquitetura, o importante é que o isolamento do calor se constitua no mais poderoso instrumento junto à radiação, para controle das condições térmicas internas das edificações, instrumentos extremamente necessários para se obter o conforto por meios passivos ou mais baixo consumo de energia elétrica nos casos onde serão utilizados resfriamentos ativos através de aparelhos para climatização do ar (KRAUSE *et. al.*, 2005).

Adequar a arquitetura ao clima de um determinado local significa construir espaços que possibilitem ao homem condições de conforto, à arquitetura, cabe tanto amenizar as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos, tais como os de excessivo calor, frio ou ventos, como também propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre em climas amenos (BARROS, 2009).

Em locais onde predomina o clima frio, um bom isolamento é fundamental, pois, este reduzirá as perdas de calor do lado interno para o lado externo e, conseqüentemente, reduzirá o uso de energia (PAPST, 1999). Como exemplo, procura-se o isolamento das fachadas e cobertura, utilizando vidros mais transparentes que permitam a entrada da luz solar, a fim de proporcionar um ambiente mais aquecido e iluminado naturalmente. Em locais mais quentes, faz-se o processo inverso, optando por vidros mais escuros que impeçam a entrada direta de radiação solar, criando aberturas em pontos estratégicos na edificação para que haja a renovação do ar no ambiente, criando desta maneira, um espaço fresco e arejado (CUNHA, 2004).

Desta forma, para se obter um bom desempenho térmico principalmente em países de clima tropical e subtropical, deve-se optar por materiais que tenham o mínimo de absorção solar na superfície externa; possuam baixa condutividade térmica; ou na pior das situações, deve-se trabalhar com a espessura das paredes (quanto maior a espessura maior será a dispersão do calor), além de se levar em consideração a orientação das fachadas e o percentual de aberturas, uma vez que, se a orientação for favorável, as aberturas poderão possuir áreas maiores, se as aberturas forem na fachada voltada para a face oeste podem comprometer a eficiência da edificação (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

Melhores níveis de eficiência energética podem ser alcançados quando são levados em consideração no projeto de uma edificação, o percentual, a orientação e o sombrea-

mento das aberturas, aliados à escolha dos materiais e à adequação da edificação ao clima e ao entorno urbano. As características técnicas da construção, o microclima, a temperatura externa, a radiação solar, o vento, as trocas térmicas das paredes e cobertura, os ganhos de calor no interior da edificação provenientes do metabolismo dos usuários, os sistemas de iluminação e equipamentos eletrônicos são variáveis que influenciam no balanço energético de uma edificação. Quando essas variáveis são pensadas conjuntamente, o edifício apresenta uma boa resposta com relação ao consumo de energia elétrica e ao conforto térmico dos ocupantes. A melhoria da eficiência energética da envoltória e a interação da edificação com o meio em que está inserida podem contribuir também na redução do uso de iluminação artificial e de sistemas de refrigeração mecânica, responsáveis pela maior parte da energia consumida nos edifícios comerciais (FOSSATI; LAMBERTS, 2010).

A avaliação do desempenho de uma edificação pode ser feita, tanto na fase de projeto, quanto após a construção, por profissionais especializados, através de medições das variáveis representativas de desempenho juntamente com a verificação do cumprimento de diretrizes construtivas ou pela simulação computacional com base nas normas brasileiras (GRAF; TAVARES, 2010).

2.2 Sustentabilidade e Resíduos

O crescimento da população urbana e a diversificação do consumo de bens e serviços aumentam de maneira considerável a geração de resíduos, que se transformou em um sério problema urbano. As soluções possíveis envolvem um gerenciamento oneroso, considerando-se os volumes acumulados. A situação se agrava devido à escassez de áreas destinadas à deposição, aos altos custos no gerenciamento adequado dos resíduos, pelos problemas de saneamento público, além de uma possível contaminação ambiental (CARNEIRO; BURGOS; ALBERTE, 2000).

Com isso, segundo Ecclesia (2015), nas últimas décadas, houve um aumento expressivo da preocupação com a preservação do meio ambiente, iniciando um processo de conscientização através de eventos para tratar de assuntos como a diminuição dos impactos ambientais, o desenvolvimento sustentável aliado ao desenvolvimento econômico e tecnológico.

Dentre estes eventos, tem-se: a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972; o documento Nosso Futuro Comum, elaborado em 1987, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento,

no Rio de Janeiro em 1992 (Eco 92) e a Agenda 21, com definições e metas a serem alcançadas nas próximas décadas (ECCLESIA, 2015).

Todos os países participantes dessa conferência deveriam conceber a sua Agenda 21, com a intenção de incentivar a sustentabilidade. Nos dias 7 e 18 de dezembro de 2009, aconteceu um salto em direção à busca da sustentabilidade do planeta, a Conferência Climática de *Copenhagen*, a COP 15, conferência das nações unidas sobre as mudanças climáticas, cujo principal objetivo foi estabelecer o tratado que substituiu o Protocolo de Quioto, tratado internacional com compromissos rígidos para a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa, vigente de 2008 a 2012 (ECCLESIA, 2015).

Partindo desse contexto, as indústrias e empresas em geral, sofrem cobranças para que possam crescer de forma tecnológica e econômica, sem prejudicarem o meio ambiente e o futuro das próximas gerações, ou seja, serem sustentáveis, uma vez que a principal fonte de degradação ambiental é a geração de resíduos (CARNEIRO; BURGOS; ALBERTE, 2000).

Na construção civil esta realidade não é diferente. Com o desenvolvimento industrial, houve o crescimento dos centros urbanos e a necessidade de atendimento às demandas da população. Com isso, grandes quantidades de matéria-prima e energia foram despendidas e grandes volumes de resíduos foram gerados, surgindo, desta maneira, a necessidade de se minimizar o impacto ambiental causado através do gerenciamento de resíduos (CARNEIRO; BURGOS; ALBERTE, 2000). Minimizar a geração e intensificar o reaproveitamento de resíduos constitui a base de qualquer programa de gerenciamento de resíduos. Portanto, redução de resíduos é uma estratégia preventiva, que evita a geração do problema (MARTINI, 2005).

A maior parte dos materiais empregados na construção civil são recursos naturais que podem ou não passar por processos de industrialização. A variedade destes recursos leva a um interesse em pesquisas para soluções alternativas que aprimorem a eficiência e a qualidade das edificações, levando em consideração alguns fatores importantes como: por quanto tempo as reservas disponíveis poderão atender à demanda, a quantidade de poluição que é gerada na extração e no beneficiamento dos materiais, bem como, a possibilidade de reaproveitamento destes materiais (SCHNEIDER; PHILIPPI, 2004).

Os pesquisadores da construção civil buscam, pelo desenvolvimento sustentável e pela preservação do meio ambiente, utilizando materiais alternativos que permitam o emprego de diversos resíduos no desenvolvimento de materiais e produtos destinados à redução de custos e aumento da durabilidade, manter a preocupação com a eficiência energética,

potencialidades, resistência e reaproveitamento, não somente dos resíduos urbanos, como também dos resíduos industriais (MARCONDES; CARDOSO, 2005).

A sustentabilidade pode ser considerada no processo construtivo, ainda na etapa de elaboração do projeto, quando o edifício é planejado para uma melhor utilização da água e da energia, uma vez que um projeto bem elaborado pode permitir que o processo construtivo se torne mais sustentável (SCHNEIDER; PHILIPPI, 2004).

Dessa maneira, a reciclagem de resíduos representa um componente primordial do esforço para o desenvolvimento sustentável. Além disso, ela guarda uma relação econômica importante com as práticas legais de descarte, cada vez mais restritivas. Técnicas de utilização destes resíduos foram desenvolvidas em todo o mundo, mas muito ainda deve ser feito quanto à recuperação de alguns deles, considerados nocivos (SCHNEIDER; PHILIPPI, 2004).

Como consequência natural, podem-se prever investimentos crescentes em técnicas de tratamento interno às usinas de resíduos como a reciclagem, a obtenção de subprodutos ou em último dos casos, o descarte em categoria menos onerosa (MARCONDES; CARDOSO, 2005).

Para uma melhor definição, segundo a Norma Brasileira ABNT NBR 10004/2004, resíduos são materiais decorrentes de atividades antrópicas, geradas como sobras de processos ou aqueles que não possam ser utilizados com a finalidade para as quais foram produzidos.

Os resíduos podem ser classificados quanto a sua origem:

- Domiciliar: originado da vida diária das residências, constituído por restos de alimentos (tais como cascas de frutas e verduras), produtos deteriorados, jornais, revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens, mas também pode conter alguns resíduos tóxicos;
- Comercial: originado dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares e restaurantes;
- Serviços públicos: originados dos serviços de limpeza urbana, incluindo todos os resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de praias, galerias, córregos, restos de podas de plantas, limpeza de feiras livres, podendo ser constituído por restos de vegetais diversos e embalagens;

- Hospitalar: descartados por hospitais, farmácias, clínicas médicas, odontológicas e veterinárias (algodão, seringas, agulhas, restos de remédios, luvas, curativos, sangue coagulado, órgãos e tecidos removidos, meios de cultura e animais utilizados em testes, resina sintética, filmes fotográficos de Raios - X). Em função de suas características, merecem um cuidado especial em seu acondicionamento, manipulação e disposição final, devendo ser incinerados e as cinzas descartadas em aterros sanitários;
- Portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários: resíduos sépticos, ou seja, que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos. Basicamente originam-se de material de higiene pessoal e restos de alimentos, que podem hospedar doenças provenientes de outras cidades, estados e países;
- Industrial: originado nas atividades dos diversos ramos da indústria, tais como: o metalúrgico, o químico, o petroquímico, o de papelaria, da indústria alimentícia, etc. O lixo industrial é bastante variado, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, escórias, vidros e cerâmicas. Nesta categoria, inclui-se grande quantidade de lixo tóxico, o qual necessita de tratamento especial pelo seu potencial de envenenamento;
- Radioativo: resíduos provenientes da atividade nuclear (resíduos de atividades com urânio, céσιο, tório, radônio e cobalto), que devem ser manuseados apenas com as técnicas e equipamentos adequados;
- Agrícola: resíduos sólidos das atividades agrícola e pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, etc. O lixo proveniente de pesticidas é considerado tóxico e necessita de tratamento especial;
- Entulho: resíduos da construção civil, também denominados de caliça ou metralha, provenientes de demolições, restos de obras e solos de escavações. O entulho é geralmente um material inerte, passível de reaproveitamento.

No dia 31 de maio de 2004, a ABNT publicou a nova versão da sua norma NBR 10004 - Resíduos Sólidos (resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam das atividades da comunidade, de origem industrial, agrícola, doméstica, hospitalar, comercial e de serviços de limpeza urbana).

Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Nas atividades de gerenciamento de resíduos, a NBR 10004/2004 é uma ferramenta imprescindível, sendo aplicada por instituições e órgãos fiscalizadores. A partir da classificação estipulada por esta Norma, o gerador de um determinado resíduo pode, facilmente, identificar o potencial de risco do mesmo, bem como identificar as melhores alternativas para sua destinação final e/ou reciclagem. Esta nova versão, classifica os resíduos em três classes distintas: Classe I (perigosos), Classe II (não inertes) e Classe III (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 de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II - 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. São, basicamente, os resíduos com as características do lixo doméstico;
- Classe III - Resíduos inertes: são aqueles que, ao serem submetidos aos testes de solubilização (NBR-10006/2004 da ABNT), não têm 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 e não se decompõem, ou se decompõem muito lentamente, quando dispostos no solo. Estão nesta classificação, por exemplo, os entulhos de demolição, pedras, rochas e areias retirados de escavações, vidros, certos plásticos e borrachas. A toxicidade é uma das características que confere periculosidade a um resíduo e pode ser avaliada através da análise química de uma amostra representativa do resíduo lixiviado, após o teste de lixiviação de acordo com a NBR 10005/2004 ou de testes de toxicidade com ratos e coelhos para determinação da Concentração Letal - CL50 (por via inalatória para ratos menor que 2 mgL⁻¹), Dose Letal - DL 50 (por via dérmica para coelhos menor que 200 mg/Kg e DL50 por via oral para ratos menor que 50 mg/Kg), (ABNT, 2004).

O Quadro 1 apresenta a origem, as classes e os responsáveis pelos resíduos.

Quadro 1 - Origem, classes e responsáveis pelos resíduos

| ORIGEM | CLASSES | RESPONSÁVEL |
|---|-------------|--------------------|
| Domiciliar | II | Prefeitura |
| Comercial | II e III | Prefeitura |
| Industrial | I, II e III | Gerador do Resíduo |
| Público | II e III | Prefeitura |
| Serviços de Saúde | I, II e III | Gerador do Resíduo |
| Portos, aeroportos e terminais ferroviários | I, II e III | Gerador do Resíduo |
| Agrícola | I, II e III | Gerador do Resíduo |
| Entulho | III | Gerador do Resíduo |

Fonte: <http://www.ambientebrasil.com.br/2015>

Em relação aos resíduos da construção civil (RCC), por exemplo, a Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA 307/2002, classifica em:

I – Classe A – resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados. Como exemplo tem-se: solos, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto, etc.

II – Classe B – resíduos recicláveis para outras destinações. Como exemplo tem-se: plásticos, papéis e/ou papelões, metais, vidros, etc.

III – Classe C – resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem e/ou recuperação.

IV – Classe D – resíduos perigosos. Ex.: tintas, solventes, resíduos contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, etc.

Essa classificação foi alterada pela Resolução 469/2015, que alterou a classe do gesso da classe C para a classe B.

Alguns conceitos de aproveitamento de resíduos são importantes para entender melhor o processo da reciclagem. Dentre estes processos, pode-se considerar: a recuperação, a valorização e a reciclagem.

- Recuperação – consiste na retirada do resíduo de seu circuito tradicional de coleta de tratamento, como exemplo tem-se a recuperação de PET, papéis, dos sistemas tradicionais de coleta, ou ainda de lodos de tratamento de efluentes destinados à eliminação em aterros controlados;
- Valorização – é quando se pretende agregar um valor financeiro a um determinado resíduo, por exemplo, vidros, na produção de silicatos e vitrocerâmicos;

- Reciclagem – tem por objetivo introduzir o resíduo no seu ciclo de produção e substituição total ou parcial de uma matéria prima.

A reciclagem de resíduos, dentro do contexto da sustentabilidade, apresenta vantagens em potencial, contudo, só é válida após a análise do ciclo de vida, sendo necessário que o novo material, a partir do resíduo, não venha contaminar a construção que o utilizar, seja pela contaminação da água, por radiação ou também pela volatilização de frações orgânicas.

A vida útil de um produto é sempre limitada, a partir da qual o produto se transforma em resíduo e, mesmo os produtos duráveis possuem vida útil finita. Alguns produtos acabam se tornando resíduos por não se enquadrarem de acordo com as normas e classes especificadas e, desta maneira, a reciclagem é condição para o desenvolvimento sustentável, pois é ela que permite se fechar o ciclo (JOHN, 2000).

Nos últimos anos, muitos foram os estudos que analisaram a possibilidade de reciclagem de uma vasta gama de resíduos industriais. A maior parte das pesquisas demonstraram a importância da reciclagem na proteção ambiental e no desenvolvimento tecnológico, o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa que contemplem a utilização de resíduos, dentro de uma visão que trata estes poluentes como matérias primas importantes para aplicações com maior valor agregado, visando a sua transformação em bens úteis para a sociedade e a proteção do meio ambiente, é uma iniciativa importante e necessária (CASAGRANDE *et. al.*, 2008).

Morales (1995) estudou a reatividade pozolânica da cinza de lodo da estação de tratamento de efluentes da cidade de Londrina, comprovando em seus estudos que: o lodo na forma calcinada apresentou características satisfatórias como finura e superfície específica, a temperatura ideal para a calcinação do lodo foi 750°C, a reatividade pozolânica se deu pela presença de montmorilonita sódica no lodo, a composição química do lodo calcinado estava de acordo com as exigidas pelas normas brasileiras, o lodo depois de calcinado possui reatividade pozolânica que o caracterizam como uma pozolana.

Balaton; Gonçalves; Ferrer (2002) estudaram a incorporação de resíduos sólidos galvânicos em massas de cerâmica vermelha. Foram avaliados os riscos ambientais da incorporação dessa lama mediante testes de lixiviação e solubilização nos produtos cerâmicos. Observou-se que, com a adição de até 2% da lama galvânica na composição da massa, não houve alteração significativa nas propriedades da massa referencial, mas com a adição de proporções superiores a esta, os corpos de prova apresentaram durante o processo de secagem

a formação de eflorescência em suas superfícies, sendo tal formação tanto maior quanto mais elevada à proporção de resíduo. Os resultados mostraram que a incorporação do resíduo galvânico em massa de cerâmica vermelha estrutural é uma boa alternativa para a inertização do resíduo.

Basegio; Berutti; Bernardes (2002) estudaram a incorporação de lodo de curtume em argilas usadas na produção de materiais cerâmicos. Os materiais foram misturados em diferentes proporções. Os aspectos analisados foram: absorção de água, porosidade, retração linear, força de ruptura, lixiviação, solubilização e emissões gasosas durante a queima. A caracterização ambiental dos produtos cerâmicos indicou que um material contendo 10% de lodo de curtume pode ser usado satisfatoriamente para a fabricação de tijolos destinados à construção civil.

Nuvolari; Coraucci Filho (2003) estudaram a utilização de lodo gerado em estação de tratamento de esgoto em massas cerâmicas para confecção de tijolos. Foi utilizado como matéria-prima um solo argiloso ao qual o lodo foi misturado nas proporções de 10, 20 e 30% (em massa seca). Foram avaliados os principais parâmetros tecnológicos (massa específica pós-queima, retração, absorção de água e resistência à compressão), e ambientais (solubilização, lixiviação e radioatividade), concluindo-se que o lodo analisado pode ser utilizado em massa cerâmica na proporção de até 10%.

Giffone; Lange (2005) estudaram a borra de fosfato, um resíduo gerado em indústrias que possuem em seu processo produtivo a etapa de pintura em superfícies metálicas, como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. Foram analisadas as proporções de 5%, 10% e 20% do resíduo misturados à argila para avaliação da melhor composição. Com base nos resultados obtidos, chegou-se a uma formulação de que o tijolo fabricado com 10% do resíduo de borra de fosfato atende ao requisito de absorção de água estabelecido para blocos cerâmicos pela norma NBR 15270/2005.

Vieira; Monteiro (2006) pesquisaram a incorporação de resíduo oleoso proveniente do setor petrolífero em cerâmica argilosa. O resíduo utilizado se constitui de uma borra pastosa obtida no processo de separação de água e óleo realizado na plataforma marítima após a extração do petróleo. Antes de sua incorporação, esta borra foi submetida a um processo de tratamento de inertização. Observou-se uma redução da absorção de água de 15% para 10% com o incremento do teor de resíduo, havendo uma melhora na resistência mecânica do material cerâmico.

Paiva (2007) estudou a utilização de lodo gerado na estação de tratamento de efluentes da indústria de papel na produção de compósitos cimentícios para a construção civil.

Foram estudados diferentes teores da adição do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE), 5%, 10%, 20% e 30% em massa, em argamassa de cimento e areia, com relação água-cimento de 0,65. Foram analisados: a massa específica aparente, a absorção de água por capilaridade e imersão, a retratilidade, o isolamento acústico, a resistência à compressão e a microestrutura. Determinou-se 12% de incorporação, garantindo a resistência mínima à compressão de 2,5 MPa exigida para blocos sem função estrutural.

Rolim (2007) estudou a viabilidade da incorporação ao concreto de cimento *Portland* de resíduos de EVA (poliacetato de etileno vinil ou copolímero de etileno-acetato de vinila) da indústria calçadista. O resíduo de EVA é composto pelos retalhos que sobram do processo de corte mecânico das chapas no formato da sola, entressola ou palmilha de calçados. O produto obtido a partir deste resíduo é um agregado sintético para a construção civil, empregado na fabricação de blocos para alvenaria, painéis moduláveis, enchimento de lajes, entre outros. Blocos de concreto produzidos pela incorporação deste resíduo apresentaram algumas vantagens em relação aos convencionais fabricados com concreto puro, como menor massa por m³, maior uniformidade, leveza, excelente capacidade de aderência à argamassa de reboco e outros tipos de acabamento.

De acordo com os estudos citados, verifica-se que é possível obter soluções viáveis economicamente para problemas ambientais, trazendo benefícios para a sociedade, por meio da redução do volume de resíduos enviados para aterros e até a geração de novos empregos.

Sob essa perspectiva, a produção de argamassas de revestimento utilizando resíduos, pode ser uma boa alternativa para sua destinação final. No caso desse trabalho, os resíduos sólidos empregados são provenientes de fornos de aciaria elétrica, da britagem de basalto e da indústria de manufatura de alumínio.

A seguir, serão abordados aspectos dos resíduos considerados nesse trabalho.

2.2.1 Resíduos de escória de aciaria de forno elétrico

A indústria siderúrgica é considerada uma grande geradora de resíduos. O aço é um produto que pode ser reciclado várias vezes, sem perder suas características, sendo que, aproximadamente nove milhões de toneladas de sucata de aço são recicladas a cada ano pelas usinas de aço brasileiras (IABR, 2015).

Segundo o IABR (2015), a produção anual de aço no Brasil é da ordem de 35 milhões de toneladas, resultando em uma média de cerca de 3 milhões de toneladas por mês.

A produção mundial de aço, por sua vez, é de 1,55 bilhão de toneladas, sendo a China o principal produtor, com uma produção acima de 700 milhões.

Para a fabricação do aço são necessárias quatro etapas fundamentais, como podem ser visualizadas na Figura 1, (IABR, 2015):

1. Preparação da carga;
2. Redução;
3. Refino e lingotamento contínuo e
4. Laminação.

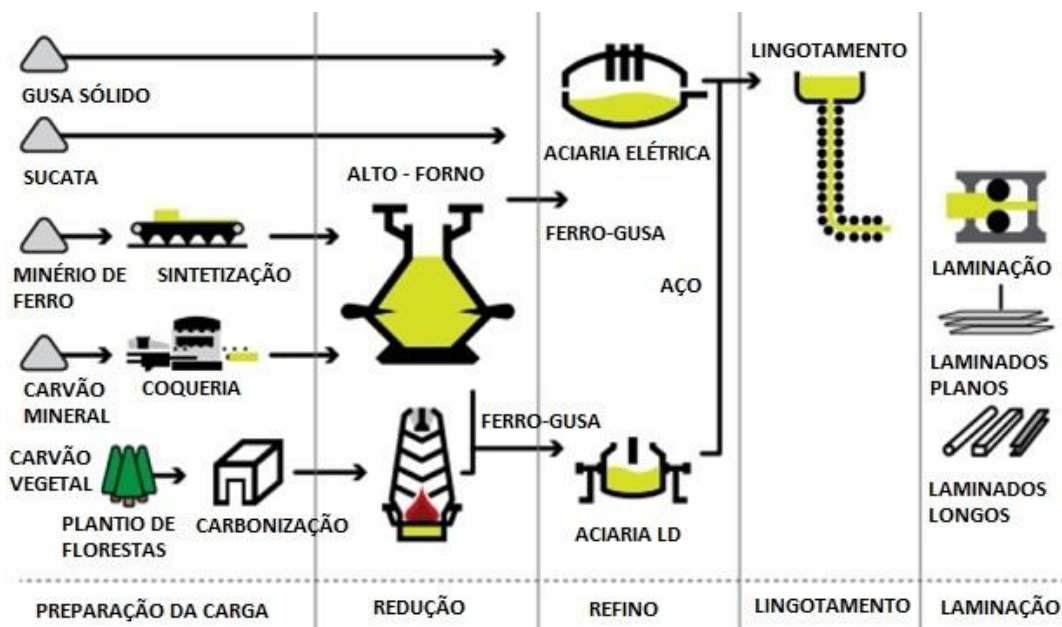
Estas quatro etapas podem ocorrer em uma mesma usina ou em usinas diferentes.

As usinas siderúrgicas são classificadas pelo processo de produção do aço em: integradas, semi-integradas e não integradas (IABR, 2015).

As usinas integradas são as que participam de todo o processo produtivo, onde existem as fases de redução, refino e laminação do aço. O minério de ferro é reduzido em um alto-forno, onde são acrescentadas outras matérias-primas como: minério de manganês, carvão vegetal e calcário (IABR, 2015).

Conforme Geyer (2001), os dois processos mais utilizados para a produção de aço, se dão através da fusão e refino de sucata em fornos elétricos a arco (aciarias elétricas) e através do refino do ferro-gusa líquido em convertedores a oxigênio (LD).

Figura 1 - Esquema do processo de fabricação do aço



Fonte: IABR, 2015.

No alto-forno o seu conteúdo é aquecido a mais de 1200°C, o que resulta no ferro-gusa (líquido), e também as impurezas do minério de ferro que, juntamente com a adição de fundentes, formam a escória de alto forno.

Após a fase da redução, o ferro-gusa é refinado em um conversor à oxigênio, na aciaria LD e está pronto para as etapas de lingotamento e laminação. Se for necessário, pode ser feito um refino secundário em forno panela para se ajustar a composição química e temperatura pretendidas. Nestas usinas são obtidas as chamadas escórias de aciarias LD.

Já as usinas semi-integradas, são aquelas em que há somente as etapas de refino e laminação, onde a fusão da sucata metálica e do ferro-gusa é refinada em forno elétrico e, se for preciso, pode ser feito o refino secundário em forno panela.

Na sequência, o aço já pode ser encaminhado para as etapas de lingotamento e laminação, nestas usinas são obtidas as escórias de aciaria de forno elétrico. O diferencial entre estes dois tipos de usinas é o fato de que a usina integrada possui processo de redução e na usina semi-integrada não se aplica este processo, conforme pode ser visualizado na Figura 2 (IABR, 2015).

As usinas não integradas não produzem aço, pois, apresentam somente uma etapa do processo: redução ou processamento (IBS, 2015).

Desta forma, na produção do aço pode-se obter a escória de aciaria através das duas principais formas de fabricação:

- Escória de forno elétrico - a sucata metálica é convertida em aço através de fusão e refino em um FEA (forno elétrico a arco). É essencial incluir uma fonte de calor externa, pois, o calor de combustão não é o suficiente.
- Escória de conversor LD (*Linz e Donawitz*) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*) - o ferro-gusa (líquido) transforma-se em aço em um conversor LD. Não é necessária uma fonte de calor externa, a oxidação do carbono, silício e ferro criam a energia necessária para sua produção.

Figura 2 - Processo de reciclagem da sucata para a produção do aço



Fonte: IABR, 2015.

No Brasil, em média, são produzidas em torno de 35 milhões de toneladas de aço bruto por processo de aciaria e, deste total, cerca de 27 milhões de toneladas através do processo de aciaria a oxigênio LD ou BOF e 8 milhões de toneladas pelo processo de aciaria de forno elétrico (IABR, 2015).

A escória de aciaria é o resíduo gerado na etapa de refino para a produção de aço, sendo classificada, de acordo com o sistema de refinamento, em escória de aciaria LD ou escória de aciaria elétrica. Este tipo de escória difere da escória de alto forno por apresentar menores teores de Al_2O_3 (óxido de alumínio) e SiO_2 (dióxido de silício), como pode ser visualizado na Tabela 1 (MACHADO, 2000).

A escória de aciaria apresenta um alto teor de CaO (óxido de cálcio) e MgO (óxido de magnésio), os quais são os responsáveis por uma grande instabilidade volumétrica, associada à hidratação destes compostos. Devido a isto, a escória precisa de um período de estocagem para reduzir este potencial de expansão a níveis não prejudiciais à sua finalidade (MACHADO, 2000).

Segundo Caselato (2014), dentre as atuais aplicações para a escória de aciaria, estão: 65% em estradas vicinais, 7% em base e sub-base, 13% em condicionamento de solos, 8% em artefatos de concreto, 2% em preenchimento de aterro e 5% para outras destinações. Como o material ainda é pouco estudado na área de tecnologia de concretos e argamassas, o seu uso para estes fins ainda é bastante restrito.

Tabela 1 - Comparação das composições químicas das escórias de aciaria de alto forno, LD e de forno elétrico a arco

| COMPONENTE | ESCÓRIA DE ACIARIA DE ALTO FORNO - (%) | ESCÓRIA DE ACIARIA LD - (%) | ESCÓRIA DE ACIARIA DE FORNO ELÉTRICO EM ARCO (FEA) - (%) |
|--------------------------------|--|-----------------------------|--|
| SiO ₂ | 33,65 | 10,63 | 16,47 |
| Al ₂ O ₃ | 12,42 | 1,19 | 5,76 |
| CaO | 41,6 | 39,29 | 37,78 |
| MgO | 7,95 | 8,25 | 4,81 |
| Outros | 4,38 | 40,64 | 35,18 |

Fonte: POLESE *et.al.*, 2006 e ARCELORMITTAL, 2014.

Graffitti (2002) cita que a reciclagem da escória pode acontecer de forma interna e externa. A reciclagem interna ocorre dentro da própria siderúrgica e tem como objetivo a recuperação da fração metálica; na reciclagem externa, o material pode ser utilizado como agregado graúdo ou agregado miúdo na produção de concreto ou na produção de material asfáltico, como base e sub-base para pavimentos, bem como na adição mineral ao cimento e também na fabricação de fertilizantes.

No caso particular da produção de aço a partir da reciclagem da sucata, além de se evitar a ocupação de áreas para seu descarte, o processo diminui o consumo de minério de ferro, ou seja, reduz o consumo de matéria-prima de fontes não renováveis. Por outro lado, este processo utiliza apenas uma fração da energia necessária para a produção de aço no processo de obtenção em alto forno, e ainda permite uma diminuição no consumo de combustíveis fósseis, que se constituem na matriz energética do processo (IABR, 2015).

A indústria siderúrgica gera, em média, 600 kg de resíduos e coprodutos por tonelada de aço produzido, onde os principais resíduos são: lamas, pós e escórias brutas, e os principais coprodutos são: os benzenos, o alcatrão e as escórias de alto-forno já beneficiadas, além das escórias de aciaria (CASELATO, 2014).

A produção das escórias pode se dar tanto na fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa, como na produção do aço, resultando nas escórias chamadas de alto-forno e de aciaria, respectivamente (MASUERO; VILELA; DAL MOLIN, 1998).

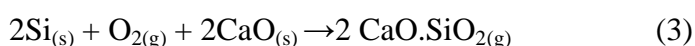
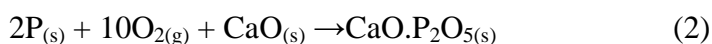
No processo de obtenção do aço em fornos elétricos, estima-se que no refino de cada tonelada de aço é gerada uma média de 70 a 170 kg de escória de aciaria (PEREIRA, 1994).

Dentre os subprodutos que são utilizados como insumos na fabricação de materiais de construção estão: as escórias de alto-forno, as escórias de aciaria elétrica e escórias de

aciaria LD das usinas siderúrgicas, cinza volante das usinas termoelétricas e sílica ativa gerada na produção de ferro fundido, silício metálico e ligas de ferrosilício nos fornos metalúrgicos, (GEYER, 2001).

A escória de alto-forno é utilizada na fabricação do cimento como matéria-prima, após seu resfriamento, beneficiamento e controle de qualidade e pode ser considerada como um agregado siderúrgico. Já a escória de aciaria elétrica não possui um emprego determinado, o que gera o seu acúmulo em aterros de resíduos industriais e nos pátios das siderúrgicas, considerada desta maneira, como um resíduo de aciaria (GEYER, 2001).

Segundo Machado (2000), o processo de produção do aço em forno elétrico consiste na fusão de sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo. Neste processo, são adicionadas cal calcítica e cal dolomítica com consumo médio de 40 Kg/t de aço. As cales juntamente com o oxigênio, atuam como agentes que removem as impurezas como o carbono (C), silício (Si) e fósforo (P), através das reações de oxidação apresentadas nas Reações 1, 2 e 3.



Nestas escórias, devido ao elevado teor dos elementos de liga presentes na sucata de aço, outros óxidos podem ser encontrados, tais como: TiO_2 e Cr_2O_3 .

A escória de aciaria elétrica, tanto no refino oxidante (FEA), quanto no redutor (forno panela) é normalmente vazada em um pote de escória e descarregada em locais onde sofre solidificação em forma cristalina. Após o resfriamento, a escória é britada, sendo então separada em diferentes faixas granulométricas por meio de correias rolantes, durante esta separação, o resíduo passa por um eletroímã que tem a função de separar a escória rica em ferro que poderá voltar para o forno. Esta escória é conhecida como sucata recuperada (GEYER, 2001).

A Tabela 2 mostra as composições químicas das escórias de refino oxidante (FEA) e de refino redutor (forno panela) no Brasil.

Tabela 2 - Comparação das composições químicas das escórias de refino oxidante e refino redutor

| COMPONENTE | CaO (%) | MgO (%) | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | FeO (%) | MnO (%) | SO ₃ (%) |
|------------------------|---------|---------|----------------------|------------------------------------|---------|---------|---------------------|
| REFINO OXIDANTE | 30-35 | 8-12 | 15-20 | 3-9 | 25-35 | 3-6 | - |
| REFINO REDUTOR | 45-55 | 8-12 | 20-25 | 3-9 | 0,5-3,5 | 0,5-3,5 | 0,5 |

Fonte: Geyer, 2001

A escória de aciaria apresenta propriedades físicas e mecânicas tão boas quanto os agregados convencionais, porém, o que limita sua utilização é a grande capacidade de expansão e instabilidade volumétrica. Estes fenômenos acontecem em consequência da reação química causada pelo contato da água com os óxidos de magnésio e cálcio livres presentes na escória, possibilitando a formação de um material com uma forte estrutura inter travada de elevada resistência à deformação (JONES; DOBSON; HANLEY, 1996).

Segundo Masuero (2001) as propriedades físicas das escórias de aciaria (densidade, granulometria e propriedades estruturais) variam de acordo como é feito o resfriamento deste resíduo, podendo apresentar grandes variações mesmo sendo produzidas em uma mesma indústria. Ao sair do forno, à temperatura próxima de 1500°C, a escória fundida pode ser submetida à diferentes processos de resfriamento. A escória pode ser resfriada naturalmente ao ar, desta forma, os óxidos componentes se cristalizam e perdem as características hidráulicas, podendo ser considerada inerte.

A escória solidificada apresenta estrutura vesicular, textura superficial rugosa, maior superfície específica quando comparada com agregados mais lisos, favorecendo a aderência com material betuminoso e cimento (MASUERO, 2001).

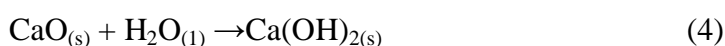
Caso sofra resfriamento rápido, é previamente expandida através da aplicação de uma quantidade controlada de água. Decorrente da ação da água e do vapor gerado, a escória incorpora ar e expande, apresentando uma estrutura alveolar e baixa massa específica, sendo denominada como escória expandida. Apresenta maior porosidade e densidade que a escória resfriada ao ar (MASUERO, 2001).

A escória granulada é obtida por resfriamento brusco, através de fragmentação por jato d'água seguido por resfriamento em tanque com água. Desta maneira obtém-se uma escória vítrea, com estrutura porosa, textura áspera e granulometria semelhante à da areia de rio, ocorrendo pouca ou nenhuma cristalização (MACHADO, 2000).

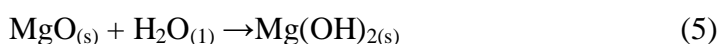
A característica expansiva da escória de aciaria está associada à hidratação da cal livre (CaO) e do periclásio (MgO), além da corrosão e oxidação do ferro metálico residual.

Estas reações são responsáveis por um considerável aumento de volume em relação às dimensões originais do cristal, podendo causar expansão destrutiva na escória de aciaria (MACHADO, 2000).

O óxido de cálcio livre (CaO) presente na escória de aciaria constitui um fator de instabilidade pela sua transformação em hidróxido de cálcio, que pode causar expansão volumétrica e ao mesmo tempo desagregação do material. O processo de hidratação deste óxido se dá de acordo com a Reação 4, onde os índices subscritos indicam o estado físico do composto: s = sólido e l = líquido.



A utilização da cal dolomítica e o desgaste do revestimento refratário do forno no processo de refino do aço são responsáveis pela presença do óxido de magnésio (MgO) na escória, que na presença de umidade, hidrata-se lentamente formando o hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)₂), conforme a Reação 5 (MACHADO, 2000).



O silicato dicálcico (2CaO.SiO₂) ou C₂S (onde C=CaO e S= SiO₂) também apresenta uma grande importância no fenômeno da instabilidade da escória. Na forma β (larnita) pode sofrer reações de hidratação, passando para a fase γ (calco-olivina). Esta transformação produz um aumento de volume, causando o fenômeno de esfrelamento (MASUERO, 2001).

A expansividade da escória de aciaria é resultante do processo de hidratação do óxido de cálcio livre, do óxido de magnésio reativo e do β-silicato dicálcico, podendo ocorrer também devido ao processo de corrosão e oxidação do ferro metálico. Tais processos geram uma instabilidade volumétrica, podendo provocar expansões de até 14% do volume inicial da escória (MACHADO, 2000).

A escória de aciaria também apresenta como característica a hidraulicidade, que é o processo pelo qual o material endurece através da reação com a água, na prática rodoviária recebe o nome de cimentação ou concrecionamento. Esta propriedade é importante, pois, além de melhorar as demais características mecânicas da camada compactada, propicia um comportamento estrutural semelhante ao das estruturas rígidas e semirrígidas. Quimicamente a hidraulicidade é o fenômeno que ocorre quando a água, em contato com a escória,

reage com CaO e SiO₂, formando uma película de hidratos na superfície da escória. Em atmosfera alcalina, ocorre a formação de hidratos contendo Al₂O₃, cuja combinação transforma a escória num material de alta dureza (LIMA *et. al.*, 2000).

Para serem utilizadas como agregado para pavimentação, as escórias de aciaria devem atender aos requisitos estipulados na especificação de materiais DNER-EM 262/94 (ROHDE, 2002).

Um problema a ser considerado quando se emprega a escória de aciaria em pavimentos é a possível ocorrência de tufa. A tufa é uma forma de carbonato de cálcio precipitado, tem sido observada obstruindo os sistemas de drenagem em rodovias construídas com a utilização de agregado de escória como base e sub-base. O bloqueio do sistema de drenagem da rodovia impede a drenagem correta da estrutura do pavimento, resultando na deterioração acelerada do pavimento e custos com a manutenção. Estudos neste sentido tem mostrado que, a cal livre presente nas escórias é a responsável pela precipitação da tufa (GUPTA *et. al.*, 1994).

As reações químicas entre a cal livre e a água da chuva ocorrem sobre a superfície do pavimento formando hidróxido de cálcio que vai se depositar nos drenos, elevando o pH a valores acima de 11. Além disso, altas concentrações de dióxido de carbono provenientes da atmosfera e dos escapamentos dos automóveis reagem com a água da chuva formando ácido carbônico que reagindo com o hidróxido de cálcio, forma o bicarbonato de cálcio. Nas saídas dos sistemas de drenagem, a água contendo a solução de bicarbonato de cálcio [Ca(HCO₃)₂] evapora quando em condições de alta temperatura e o dióxido de carbono (CO₂) evapora para a atmosfera, ocorrendo então a deposição do carbonato de cálcio e a formação da tufa. Temperaturas elevadas tendem a aumentar os níveis de deposição de tufa nas saídas dos sistemas de drenagem, enquanto que em baixas temperaturas o dióxido de carbono mantém-se em solução favorecendo a dissolução. Desta forma, a concentração da cal livre, a água, o dióxido de carbono, a temperatura e a umidade são os principais fatores controladores da deposição de tufa nos drenos e vasos coletores das rodovias (GUPTA *et. al.*, 1994).

A utilização da escória de aciaria elétrica como um agregado representa uma redução no custo final do produto e um ganho ambiental decorrente do fato de se reciclar este resíduo, que normalmente é descartado nos pátios siderúrgicos sem uma destinação final definida. Diminui-se deste modo, a necessidade de aterros de resíduos industriais, o consumo de recursos naturais não renováveis (com a substituição do consumo de rochas, areia e outros materiais primários) bem como a emissão de gás carbônico na atmosfera (CASELATO, 2014).

2.2.2 Resíduos de basalto

O basalto é produzido principalmente nas erupções que ocorrem nas cristas meso-oceânicas, que são o foco da expansão do assoalho oceânico e dão origem às chamadas placas tectônicas. Assim, a maior parte do embasamento oceânico é constituído de basalto; em menor volume, embora mais evidentes, em erupções vulcânicas como em algumas das ilhas do arquipélago do Havaí e em enormes derrames que formaram grandes platôs continentais, como, por exemplo, no norte da Sibéria, no planalto de Decan, na Índia (LAMEGO 1950 apud GEHLEN, 2007).

O basalto encontrado na região de Londrina faz parte de uma jazida localizada na Bacia do Rio Paraná, sendo um tipo de rocha proveniente dos derrames vulcânicos que ocorreram há milhões de anos. Sua área de abrangência é o centro sul do Brasil, que vai desde o Estado do Mato Grosso até o Estado do Rio Grande do Sul e, além do Brasil, ela se estende ao nordeste da Argentina, leste do Paraguai e norte do Uruguai, possuindo uma área estimada de cerca de 1,5 milhões de km² (GUERRA, 2013). Este se constitui num dos maiores derrames basálticos do mundo, conforme pode ser visualizado na Figura 3.

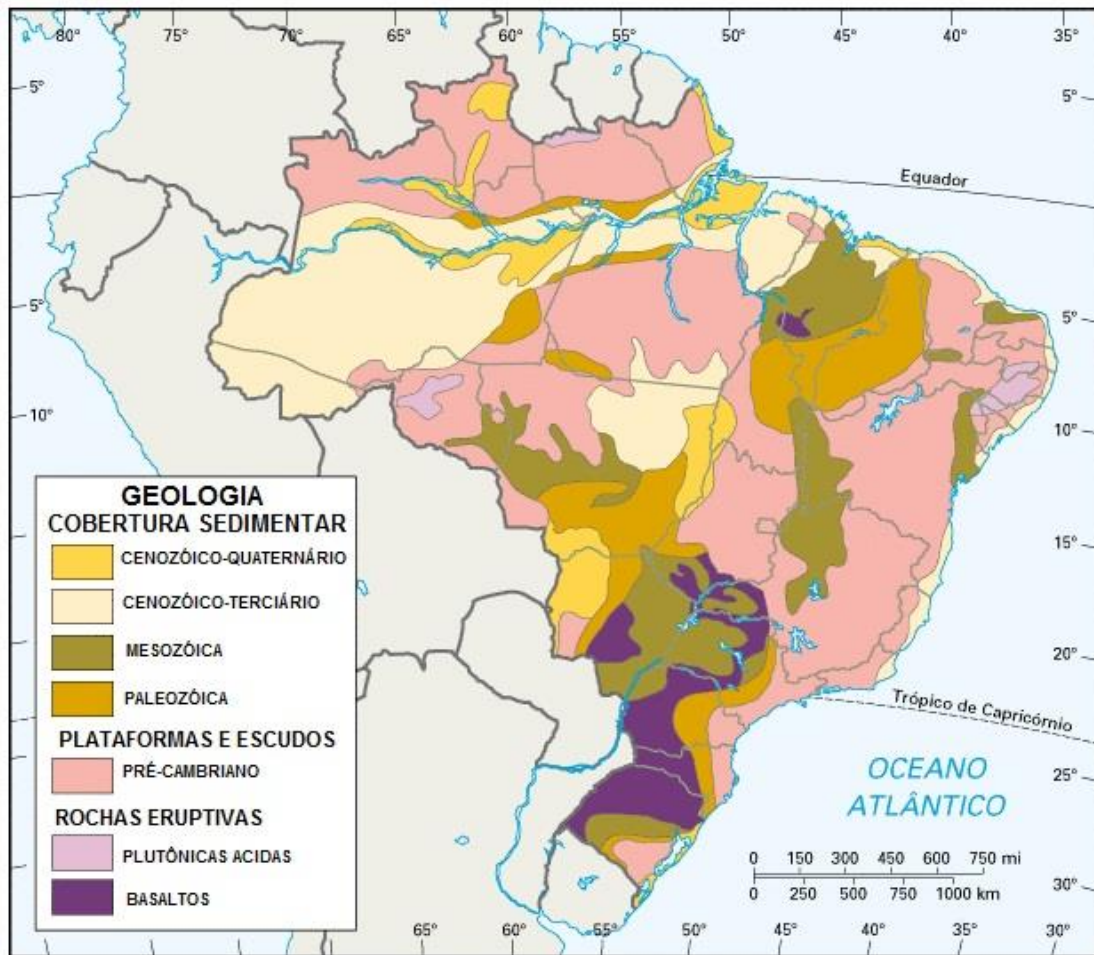
O basalto é uma rocha ígnea eruptiva, de granulação fina, afanítica, podendo, ainda, conter grandes quantidades ou ser constituído integralmente de vidro (material amorfo). Na região do Paraná, pode-se verificar o percentual de 12,6% de material vítreo em sua composição. Esta rocha é constituída principalmente de plagioclásio e piroxênio e, em muitos casos, de olivina, a Tabela 3 apresenta a composição do basalto em óxidos. Como minerais acessórios se encontram com maior frequência os óxidos de ferro e titânio.

Tabela 3 - Composição do basalto em óxidos (porcentagem em massa)

| COMPONENTE | DESCRIÇÃO | BASALTO TOLEÍTICO (%) | BASALTO ALCALINO (%) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| SiO ₂ | Dióxido de silício | 51,38 | 48,25 |
| TiO ₂ | Dióxido de titânio | 1,55 | 2,21 |
| Al ₂ O ₃ | Óxido de alumínio/ alumina | 16,30 | 16,05 |
| Fe ₂ O ₃ | Óxido de ferro III/hematita | 3,23 | 3,11 |
| FeO | Óxido de ferro | 7,41 | 8,03 |
| MnO | Óxido de manganês | 0,17 | 0,17 |
| MgO | Óxido de magnésio | 5,60 | 6,57 |
| CaO | Óxido de cálcio | 9,75 | 9,87 |
| Na ₂ O | Óxido de sódio | 2,53 | 2,99 |
| K ₂ O | Óxido de potássio | 0,78 | 1,03 |

Fonte: <http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Basalto>, 2012 apud Guerra, 2013.

Figura 3 - Mapa da formação rochosa brasileira



Fonte: <http://www.guianet.com.br/brasil/mapageologia.htm> (2014).

As rochas provenientes do basalto apresentam cor escura, conforme pode ser visualizado na Figura 4, conhecidas tecnicamente como rocha máfica, apresentando alto desempenho mecânico, responsável pelo seu emprego na construção civil como agregado para o concreto de cimento *Portland*, conforme pode ser visualizado na Figura 5. Este agregado apresenta características como refratariedade, resistência a meios agressivos e resistência à abrasão, sendo empregado ainda na construção de ferrovias, na pavimentação e conservação de rodovias (GUERRA, 2013).

Figura 4 - Pedreira Guaravera em Londrina



Fonte: Arquivo da empresa mineradora (2009).

Figura 5 - Montes de agregados gerados no processo da britagem do basalto



Fonte: <http://www.pedreiraexpressa.com.br/produto/>, 2015.

O beneficiamento do basalto por meio da britagem dá origem a uma fração de elevada superfície específica, denominada *filler*, com granulometria inferior a 0,075 milímetros, definido também como pó de pedra ou material pulverulento, pela ABNT - NBR 7211/2009. O processo da britagem do basalto pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Processo da britagem do basalto



Fonte: <http://www.pedreiraexpressa.com.br/produto>, 2015.

O *filler* apresenta aproximadamente a mesma finura do cimento *Portland*, que, devido as suas propriedades físicas, possui um efeito sobre as propriedades do concreto, tais como: trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, capilaridade, exsudação e tendência de fissuração. Muito embora o *filler* tenha sido considerado um material inerte, atualmente vem sendo desenvolvidos vários estudos a respeito de seu desempenho junto à pasta de cimento *Portland*, atuando como ponto de nucleação (GUERRA, 2013).

Outro emprego do basalto é a produção de agregados miúdos pelo processo de moagem das rochas, dando origem à areia de britagem, com granulometria inferior a 4,8 milímetros.

A terminologia utilizada para estes materiais ainda é bastante inconsistente e diversificada. Cuchierato (2000) denomina “pó de pedra” o material de diâmetro menor que 4,8 milímetros, o qual fica armazenado nas próprias pedreiras a céu aberto, conforme a Figura 7. Em pedreiras onde o beneficiamento é feito por via úmida, adotam-se dois termos: “areia de brita” para a fração entre 4,8 mm e 0,075 mm, com lavagem e conseqüente retirada da fração mais fina; e “finos de pedra” para a fração inferior a 0,075 mm, que permanecem em suspensão na água e são descartados para bacias de decantação.

Frente à crescente exploração das jazidas de basalto na região norte do Paraná, tem-se a geração e também a deposição de um grande volume de resíduos na natureza, os quais se constituem em passivos ambientais, podendo ser responsáveis pelo assoreamento dos cursos d’água, comprometendo a vida aquática pelo excesso de turbidez da água, contami-

nando os solos onde são depositados, bem como poluindo o ar em função da disposição inadequada.

Figura 7 – Depósito a céu aberto de resíduo de moagem de basalto



Fonte: <http://www.pedreiraexpressa.com.br/produto>, 2015.

Uma solução para minimizar esse problema é a incorporação destes resíduos na construção civil, para a produção de argamassas e concretos, fabricação de blocos de concreto e execução de pavimentos.

Diante da crescente importância da questão ambiental, muitos países vêm criando medidas, sob o respaldo legal, com o intuito de atribuírem às indústrias geradoras destes resíduos, a responsabilidade pela gestão e descarte de todos os rejeitos gerados em seus processos de produção.

Para o desenvolvimento sustentável, a evolução da ciência e da tecnologia deverá contribuir na busca de compatibilidade entre a produção e a proteção do meio ambiente, colocando o manejo adequado de detritos industriais como uma importante meta, segundo a resolução do CONAMA 307/2002 (CONAMA, 2002).

No Século XIX, quando surgiram as primeiras pedreiras no Brasil, o processo de extração do basalto era executado de forma lenta e rudimentar. Os diversos materiais de construção eram retirados, principalmente, dos aluviões e dos afloramentos rochosos, cuidadosamente desagregados com cunhas, acompanhando as clivagens, amarrados ou cortados com ponteiros e marretas e, quando necessário, perfurados e detonados com pólvora caseira (GERMANI, 2002).

O processo de exploração das pedreiras de basalto é uma atividade complexa e de alto custo, tendo início com a localização da jazida, o que acontece por mero acaso ou, muitas vezes, através de estudos geológicos regionais, seguidos por mapeamento geológico com o detalhamento da área selecionada. Somente depois de qualificada e quantificada a reserva total de basalto na jazida é que se dá início à atividade de mineração através da extração e do beneficiamento do basalto (GERMANI, 2002).

Até a década de 70, a extração de basalto era executada sem qualquer legislação ambiental e as áreas de exploração acabavam degradadas, trazendo graves consequências de devastação ao meio ambiente (GOMES, 1984).

O processo de regularização e de legalização das pedreiras de basalto foi instituído em Lei, em 1990, pelas Fundações Estaduais de Proteção Ambiental, exigindo das empresas mineradoras o cumprimento da legislação ambiental, para obtenção das licenças inicial, prévia e de operação das jazidas.

A questão conflitante entre a mineração e o meio ambiente habita na definição da disponibilidade do uso do solo pela mineração, ou seja, se a mineração pode ser ou não realizada em determinados locais e, em caso positivo, quais as restrições impostas à sua realização. Em relação aos impactos causados pela mineração ao meio ambiente, tal atividade está sujeita à regras e controles de órgãos competentes, tais como, o licenciamento ambiental e a recuperação das áreas degradadas (GONÇALVES; LIRA, 2012). A maneira racional de decidir e resolver os conflitos sobre o uso do solo pela mineração seria o uso sequencial do solo, o qual consiste em planejar sucessivas ocupações, de modo que, o primeiro uso não venha produzir danos irreversíveis para fins do segundo aproveitamento e, assim, sucessivamente (SOUZA, 2001).

No processo de mineração, além dos descartes, existe a degradação do meio físico devido à exploração dos minérios, gerando, portanto, uma segunda escassez, considerando que as jazidas minerais são avaliadas como bens não renováveis (NETO; OLIVEIRA; PETTER, 2005).

O processo de extração de basalto traz como consequência mudanças na topografia do terreno e uma completa alteração da paisagem, cujas alterações da superfície se manifestam pelos elementos visuais da linha, forma, textura, escala, complexidade e cor que compõem a paisagem original. Consequentemente, causam impactos topográficos, vegetativos e hídricos na área de influência direta do empreendimento. As recomposições topográficas das áreas, a drenagem e o plantio de espécies vegetais constituem medidas que minimizam esses impactos (RIBEIRO, 2005).

As estratégias de recuperação de áreas degradadas executadas pelas empresas de mineração são priorizadas para a recuperação do substrato (solo) atingido. Tais procedimentos buscam auxiliar no desenvolvimento de espécies nativas, que compunham a vegetação local antes do processo de exploração (RIBEIRO, 2005).

A Constituição Federal determina que o empreendedor tenha a obrigação de reabilitar as áreas degradadas. Tal obrigação já vem sendo atendida, parcialmente, durante a fase de exploração da mina, através da aplicação de recursos, ou seja, o custeio na contenção de taludes e tratamento das áreas adjacentes, como barragens e depósitos. Quando ocorre o encerramento da vida útil de uma mina, deve ser realizada a reabilitação definitiva da área (FARIAS, 2002).

Um dos quesitos impostos ao minerador, para a obtenção da licença ambiental de operação é a apresentação do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), que estabelece, em linhas gerais, os programas de recuperação a serem adotados durante a lavra e após a exaustão da jazida (LOTT; BESSA; VILELA, 2004).

Nem sempre isso ocorre, muitas vezes, as pedreiras são simplesmente abandonadas após o período de exploração da jazida, como pode ser visualizado na Figura 8 referente à pedreira localizada no bairro Cafezal, da região sul da cidade de Londrina no Estado do Paraná.

Figura 8 - Pedreira de basalto desativada da cidade de Londrina no Estado do Paraná



Fonte: https://www.youtube.com/watch?v=6sZQh_SaGyA.

Nesse contexto, é imprescindível propor um novo sistema econômico e uma nova estrutura para a sociedade, capaz de equilibrar suas necessidades atuais e, sobretudo, as necessidades futuras. Por outro lado, também se faz necessário impor limites à expansão da produção e ao mesmo tempo, que essa seja perfeitamente viável para produzir novas condições para a sustentabilidade, considerando-se que o desenvolvimento não deve apenas se harmonizar com o meio ambiente e a natureza, mas garantir-lhe condições ambientais adequadas. O importante é que isso deve ser feito de modo a garantir a existência das futuras gerações, sendo possível explorar de forma planejada todo e qualquer tipo de extração mineral, mas com o princípio básico de respeito ao meio ambiente (SOUZA, 2001).

2.2.3 Resíduos de alumínio

O alumínio é o metal mais jovem usado em escala industrial. Atualmente, as reservas mundiais de bauxita totalizam cerca de 27,1 bilhões de toneladas, no entanto, o Brasil conta com cerca de 7% desse total. Vale ressaltar que aproximadamente 95% de toda a bauxita lavrada no mundo é utilizada para a produção da alumina (CUNHA *et. al.*, 2013)..

Há milênios, ceramistas da Pérsia já produziam seus vasos com um tipo de barro que continha óxido de alumínio, que hoje é conhecido como alumina. Trinta séculos mais tarde, egípcios e babilônios usaram outra substância contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais. Sua trajetória mostra que, mesmo nas civilizações mais antigas, o metal dava um tom de sofisticação aos mais diferentes artefatos (ABAL, 2015).

O alumínio foi fabricado em escala industrial a partir de 1886, quando *Charles Martin Hall*, nos Estados Unidos, e *Louis Toussaint Héroult*, na França, obtiveram o metal puro a partir da dissolução eletrolítica de óxido de alumínio (alumina), em banho de criolita. Conhecido como processo *Hall-Héroult*, o qual é considerado o primeiro processo de produção. A busca por produtos leves e resistentes impulsionou a indústria do alumínio durante a Primeira Guerra Mundial e, desde então, tem ocupado uma posição de destaque ao suprir com metal diversos setores da economia mundial (ABAL, 2015).

No Brasil, no ano de 1917, a fabricação de alumínio teve início com a instalação da Companhia Paulista de Artefatos de Alumínio. No final do Século XIX, com o aumento da produção e menores preços, foi gradualmente utilizado em utensílios de cozinha e em alguns dos primeiros automóveis, no entanto, apenas em 1938, com o apoio do governo do presidente Getúlio Vargas, iniciou a produção do metal na cidade de Ouro Preto no estado de Minas Gerais, porém, sua primeira utilização para a produção em escala industrial, de alumi-

na e alumínio no país, aconteceu em 1944, durante a 2ª Grande Guerra Mundial, consolidando a indústria no Brasil (ABAL, 2010).

Em 1983, o Brasil passou de grande importador a um dos principais exportadores mundiais, devido aos grandes investimentos das empresas deste setor, desta maneira, em 1986, o Brasil torna-se o quinto produtor mundial de alumínio primário (ABAL, 2010).

Como o alumínio é obtido a partir da bauxita, um minério que pode ser encontrado em três principais grupos climáticos: o mediterrâneo, o tropical e o subtropical, onde a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) para que a produção de alumínio seja viável, ou seja, é necessário de pouco mais de 5,00 kg de bauxita para produzir 1,00 kg de alumínio (ABAL, 2010).

O Brasil, além de possuir grandes reservas (especialmente na região de Trombetas, no Pará e em Minas Gerais), é considerado um dos maiores produtores deste minério, se destacando no cenário mundial (ABAL, 2010).

As inúmeras aplicações do alumínio em diversos setores da indústria (transportes: automóveis, aeronaves, trens, navios); construção civil (portas, janelas, fachadas); eletroeletrônico (equipamentos elétricos, componentes eletrônicos e de transmissão de energia); petroquímica e metalurgia além da frequente presença no nosso dia-a-dia (móveis, eletrodomésticos, brinquedos, utensílios de cozinha, embalagens de alimentos, latas de refrigerantes, produtos de higiene, cosméticos e produtos farmacêuticos) ilustram bem a sua importância. A própria reciclagem de embalagens de alumínio, setor no qual o Brasil se destaca, apresenta um papel relevante do ponto de vista econômico, social e ambiental (CONSTANTINO; ARAKI; SILVA; OLIVEIRA, 2002).

A combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral. De acordo com ABAL (2015), dentre as principais características químicas e físicas encontram-se:

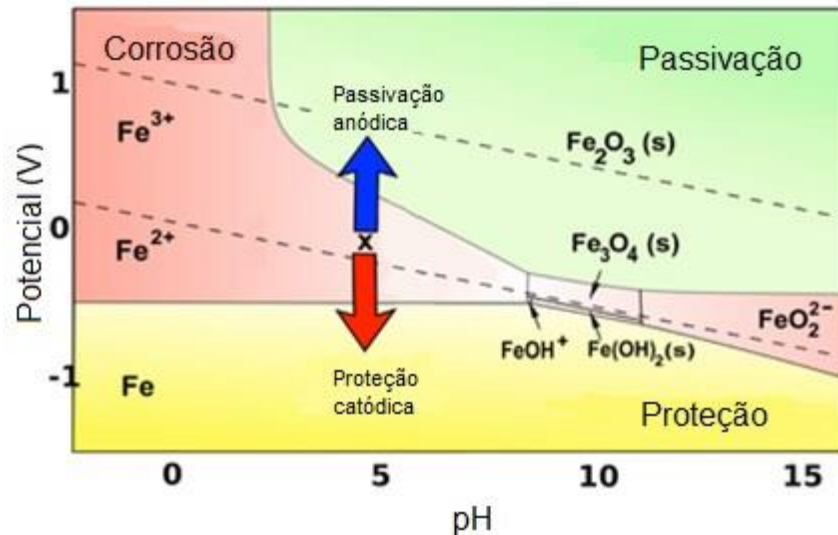
- Ponto de fusão: possui ponto de fusão de 660°C , o que é relativamente baixo comparado ao do aço, que é da ordem de 1570°C ;
- Massa específica: a leveza é uma das principais características, sua massa específica é de cerca de $2,70 \text{ g/cm}^3$;
- Condutividade elétrica: em seu estado puro, possui condutividade elétrica de 62%, a qual associada a sua baixa massa específica significa que um condutor de alumínio pode conduzir tanta corrente quanto um condutor de cobre, que é duas vezes mais pesado e proporcionalmente mais caro;

- Condutividade térmica: possui condutibilidade térmica 4,5 vezes maior que a do aço;
- Refletividade: apresenta uma refletividade acima de 80%, a qual permite ampla utilização em luminárias;
- Propriedade antimagnética: por não ser magnético, é frequentemente utilizado como proteção em equipamentos eletrônicos, além disso, não produz faíscas, o que é uma característica muito importante para garantir sua utilização na estocagem de substâncias inflamáveis ou explosivas, bem como em caminhões-tanque de transporte de combustíveis;
- Característica de barreira: é um importante elemento de barreira à luz, é também impermeável à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens;
- Reciclagem: a característica de ser infinitamente reciclável, sem perda de suas propriedades físico-químicas é uma das principais vantagens.
- Alta relação resistência/massa: com uma resistência à tração de 90 MPa, por meio do trabalho à frio, permite seu uso em estruturas, com excelente comportamento mecânico, aprovado em aplicações como aviões e trens.
- Maleabilidade e soldabilidade: a alta maleabilidade e ductilidade do alumínio permite à indústria utilizá-lo de diversas formas. Suas propriedades mecânicas facilitam sua conformação e possibilitam a construção de formas adequadas aos mais variados projetos.
- Durabilidade e resistência à corrosão: o alumínio oferece uma excepcional resistência à agentes externos, intempéries, raios ultravioleta, abrasão e riscos, proporcionando elevada durabilidade, inclusive quando usado na orla marítima e em ambientes agressivos. Possui uma propriedade de autoproteção natural que só é destruída por uma condição agressiva ou por determinada substância que dissipe sua película de óxido de proteção. Gentil (1996) define a corrosão, como sendo a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio. A oxidação poderá ser benéfica quando houver transferência de massa (passivação), que ocorre na presença de oxigê-

nio, permite a formação de óxido de alumínio, formando um filme de óxido de excelente resistência. Entretanto, esta camada passivadora não impede sua oxidação por ácidos e bases fortes, ocasionando a corrosão do material. O processo de passivação ocorre naturalmente ou pode ser induzido através da ação de ácidos fortemente oxidantes. O 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.

- Comportamento em meio alcalino: como o alumínio é um metal que possui uma película auto protetora de oxidação, a técnica de eletrodeposição, isenta de íons de cianeto em meios alcalinos, faz com que finas camadas sejam formadas em metais como o alumínio, criando desta maneira, uma barreira de proteção. Este processo em meios alcalinos necessita da presença de um agente complexante para a estabilização dos íons metálicos, impedindo a redução dos íons sobre o material, originando uma camada de proteção com baixa aderência, devido à formação de elementos de oxidação ao substrato. Os agentes complexantes podem atribuir características físicas e morfológicas favoráveis à deposição de elementos na superfície do alumínio através da diminuição das partículas, melhorando sua aderência e tornando a peça adequada para receber tratamentos posteriores (CUNHA *et. al.*, 2013).

Diante desse contexto, o químico *Marcel Pourbaix* (1904-1998), estabeleceu o diagrama de *Pourbaix*, onde avalia as condições favoráveis à oxidação do alumínio. É um gráfico que leva em conta a variável potencial de eletrodo de um material (geralmente metal) e o pH do meio. O diagrama permite observar os níveis de pH, onde ocorre oxidação, suas formas de oxidação e o ambiente de passivação. Dessa maneira, possibilita formular composições de preservação do alumínio contra corrosão ou do material que estiver em contato com os diferentes níveis de pH, descritos por *Pourbaix*, conforme apresentados na Figura 9 e na Tabela 4 (RODRIGUEZ, 2003).

Figura 9 – Diagrama de *Marcel Pourbaix*

Fonte: <https://www.google.com.br/search?q=diagrama+de+marcel+pourbaix>

Tabela 4 - Passivação do alumínio

| OXIDAÇÃO DO ALUMÍNIO EM RELAÇÃO AO pH | | | |
|---------------------------------------|--------------|-------------------|------------------------|
| pH | CONCENTRAÇÃO | REAÇÕES NEGATIVAS | REAÇÕES POSITIVAS |
| 0 a 7 | Ácido | Inerte | 3,0 > pH < 8,0 |
| 7 | Neutro | Inerte | Passivação |
| 8 a 13 | Básico | Oxidação | Oxidação |
| Próximo a 14 | Alcalino | Oxidação | Transferência de massa |

Fonte: Adaptado de PALMIERI (2015).

O alumínio pode sofrer vários tipos de processamento, devido a sua maleabilidade; tais como: usinagem de tarugos ou placas em torno mecânico, onde a usinagem pode ser entendida como uma operação que confere à peça, formas, acabamentos e dimensões apropriadas. Estas combinações de resultado de qualquer um destes três itens produzem o cavaco, o qual pode ser definido como a porção de material de forma geométrica irregular, retirada pela ferramenta das peças a serem usinadas (FEPAM, 2003).

Os cavacos são considerados resíduos intrínsecos ao processo de usinagem dos metais que podem ser reciclados quando são vendidos como sucata, porém, se eles estiverem impregnados de fluido de corte terão baixo valor agregado. Os materiais dúcteis tendem a produzir cavacos longos e contínuos, já os materiais frágeis produzem cavacos em forma de pequenas partículas, como pode ser visualizado na Figura 10. São classificados de acordo com suas formas em: fita ou filamento, helicoidal, espiral, em lascas ou pedaços (CASTRO, 2003). O cavaco pode ser definido também como todo material que é removido das peças com auxílio de uma ferramenta (CIMM, 2015).

Figura 10 - Processo de usinagem do tarugo de alumínio no torno mecânico



Fonte: Palmieri (2015).

A geração destes resíduos se dá em mechas de cavacos de alumínio e possibilitam ser divididas em volumes compatíveis para prensagem e enfardamento ou para serem ensacados sem prensagem para posterior processamento, como a produção de partículas de alumínio no moinho de facas alternadas, como pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11 - Produção de partículas de alumínio no moinho de facas alternadas



Fonte: Palmieri, (2015).

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. Muitas indústrias têm procurado obter certificações ISO (*International Organization for Standardization*) que regulamentam padrões de qualidade da produção em todo o mundo, visto que o setor metal mecânico realiza uma atividade impactante já que produz resíduos de Classe I (PALMIERI, 2015).

Uma forma de minimizar os impactos ambientais causados pelas indústrias 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, que em algumas ocasiões são simplesmente rejeitados e considerados como passivos ambientais. Sob este foco, este trabalho busca o aproveitamento deste resíduo, na forma de partículas, para serem incorporadas na argamassa.

Como na região da cidade de Londrina no Estado do Paraná, existe uma diversidade de atividades industriais que se utilizam de alumínio para o processo de corte ou usinagem de tarugos, placas e perfis onde esta diversidade de atividades na transformação do alumínio gera grande volume de aparas, a obtenção destes resíduos, do ponto de vista da logística, é favorável.

2.3 Transferência de calor

O calor é a energia transferida entre dois corpos sujeitos à diferentes temperaturas, ou seja, o calor pode ser visto como sendo a energia em trânsito devido a uma diferença de temperaturas impostas. Pode-se dizer que dois corpos estão em contato térmico quando existe transferência de calor entre eles, caso isto ocorra, estes atingirão o equilíbrio térmico se não existir mais trocas de calor entre si (SERWAY, 1996). Em resumo, a transmissão de calor entre dois pontos ocorre sempre que se estabelece uma diferença de temperatura entre eles, desenvolvendo o fluxo de calor na direção das temperaturas decrescentes.

As leis da termodinâmica preveem um fluxo de calor quando dois sistemas, a temperaturas diferentes, se encontram em contato térmico. Este fluxo se processa do sistema com temperatura mais elevada para o sistema com temperatura mais baixa, atuando no sentido de minimizar as diferenças de temperatura (FIGUEIREDO, 2006).

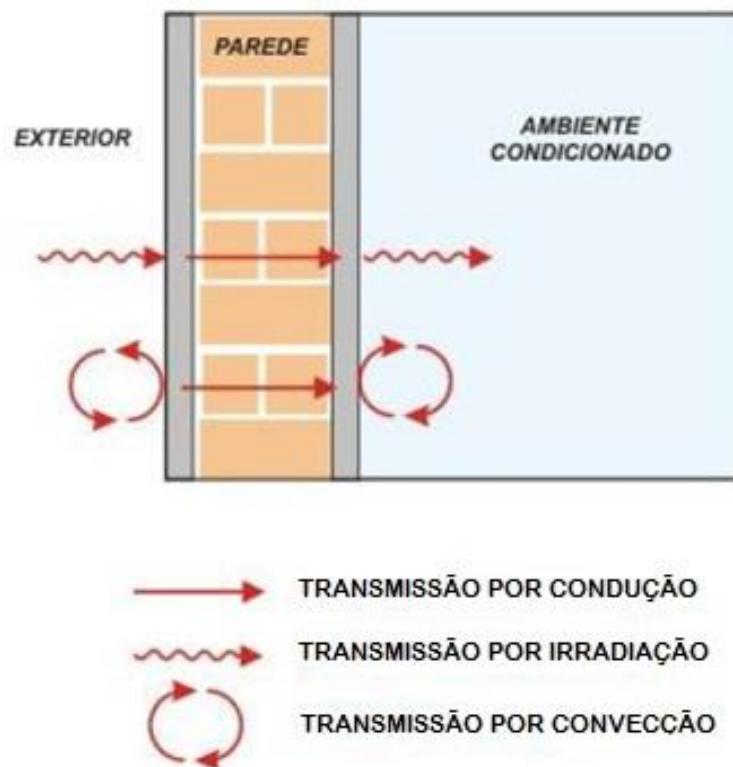
O transporte de calor modificará as temperaturas dos dois sistemas, os quais tendem a ficar com a mesma temperatura final. Quando esta situação é atingida, diz-se que os sistemas estão em equilíbrio térmico. A taxa de transporte de calor entre os dois sistemas pode ser alterada, se entre eles for colocada uma barreira que ofereça alguma resistência à passa-

gem de energia. Estas barreiras de separação entre dois subsistemas são consideradas pela termodinâmica como paredes. A taxa a que a energia térmica é transferida através dessas paredes está relacionada com o material que as constituem e suas características geométricas (FIGUEIREDO, 2006).

Transferência de calor é a ciência que explica e prediz quão rápida ocorre à troca de energia. É a ciência que integra as várias ferramentas analíticas e empíricas promovendo conhecimento, para projetistas, construtores, operadores, gerentes e pesquisadores de forma mais apurada, para estudar calor como uma troca de energia. É a energia térmica em trânsito devido à uma diferença de temperatura em um meio ou meios diferentes (SERWAY, 1996).

Os mecanismos de transferência de calor estão intrinsicamente ligados com a termodinâmica, ou seja, o fluxo de calor trata do estudo da transferência de energia térmica durante a evolução de um sistema termodinâmico (SERWAY, 1996). Como pode ser visualizada na Figura 12, esta energia pode ser observada através dos três mecanismos essenciais de transporte do calor: a radiação, a convecção e a condução.

Figura 12 - Mecanismos de transmissão de calor em edifícios



Fonte: Reis, 2005.

Em relação aos materiais, 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 categoria de semicondutores não puros, em se tratando de sua estrutura molecular, como a mesma se caracteriza como um compósito, pelo fato de ter em sua constituição a pasta de cimento *Portland*, apresenta teores de impurezas que interferem em suas características físicas. Sendo que a massa específica e a porosidade de um material quantificam o volume de sólidos e de poros fechados e a massa unitária e a porosidade total quantificam também os poros abertos, que influenciam diretamente nos resultados de condutividade (CALLISTER, 2007).

Diante deste contexto, o engenheiro civil e o arquiteto sentem a importância de buscarem uma previsão do isolamento térmico adequado da edificação, que garanta o conforto dos ambientes por eles projetados (CALLISTER, 2007).

Os processos de transferência de calor afetam também o desempenho das habitações e necessitam de uma análise de sistemas de aquecimento e refrigeração por meio de equipamentos (LAMBERTS, 2014).

Alguns sistemas envolvem a aplicação de materiais isolantes ou transmissores de calor, como por exemplo, o isolamento (por fibra de vidro) de tetos e paredes de edifícios para manter determinadas condições climáticas, a quantificação da perda de energia através de janelas modernas e isoladas para manter o ambiente confortável tanto no inverno quanto no verão, a manutenção de temperaturas adequadas em circuitos de computadores e outros sistemas por meio do condicionamento térmico e o condicionamento térmico do ar, propriamente dito, para garantir o conforto térmico do ambiente interno à edificação (LAMBERTS, 2014).

Os equipamentos de aquecimento de água, por exemplo, podem funcionar conforme uma variedade de fontes de energia, podendo ser gás combustível, tais como gás natural (GN) e gás liquefeito de petróleo (GLP) ou ainda a eletricidade, lenha, carvão, óleo combustível e solar. São compostos por equipamentos, dispositivos e acessórios com o objetivo de converter a fonte de energia em calor e transferi-lo para a água a ser consumida, na quantidade e temperatura desejada, sendo o aquecedor o elemento principal deste sistema (CHAGURI JUNIOR, 2009).

A crise de energia elétrica que o Brasil enfrentou no ano de 2001, renovou o interesse em fontes de energias alternativas. Neste período se constatou que aproximadamente 25% do consumo de energia elétrica do setor residencial foi utilizado para aquecimento de água para banho, comprovando que o chuveiro elétrico é o dispositivo de aquecimento de

água mais utilizado no país e o responsável por aproximadamente 20% do consumo nacional de eletricidade (PROCEL, 2003).

O cenário brasileiro indica uma previsão de aumento da demanda por energia elétrica superior à capacidade do aumento na geração que os investimentos atuais serão capazes de realizar. Como fator agravante tem-se a utilização do chuveiro elétrico nos horários de pico, entre 17h00min e 21h00min, que sobrecarregam a rede de distribuição (ANEEL, 1998 apud LAFAY, 2005).

Os sistemas de aquecimento de água diferem entre si em vários aspectos, entre os quais, o custo para a implantação, o custo de operação e o atendimento ao perfil de consumo. Nesta categoria, o chuveiro elétrico é o que apresenta o menor custo de implantação, seguido dos aquecedores a gás de passagem, aquecedores elétricos de acumulação, aquecedores a gás de acumulação e por último, o aquecimento com energia solar (LAFAY, 2005).

Segundo Lafay (2005), a capacidade instantânea de suprir a demanda é um fator limitante dos sistemas de aquecimento de passagem. Nesta categoria se encontram os aquecedores de acumulação que utilizam energia elétrica, gás e energia solar. Nos casos em que é necessário fornecer grandes quantidades de energia em curtos períodos de tempo, são favorecidos os sistemas que utilizam acumulação.

O Brasil possui uma ampla área territorial, com boa incidência de radiação solar. A utilização da energia solar, para o aquecimento de água em residências, reduziria o impacto sobre o sistema elétrico e também sobre o meio ambiente (COSTA, 2007).

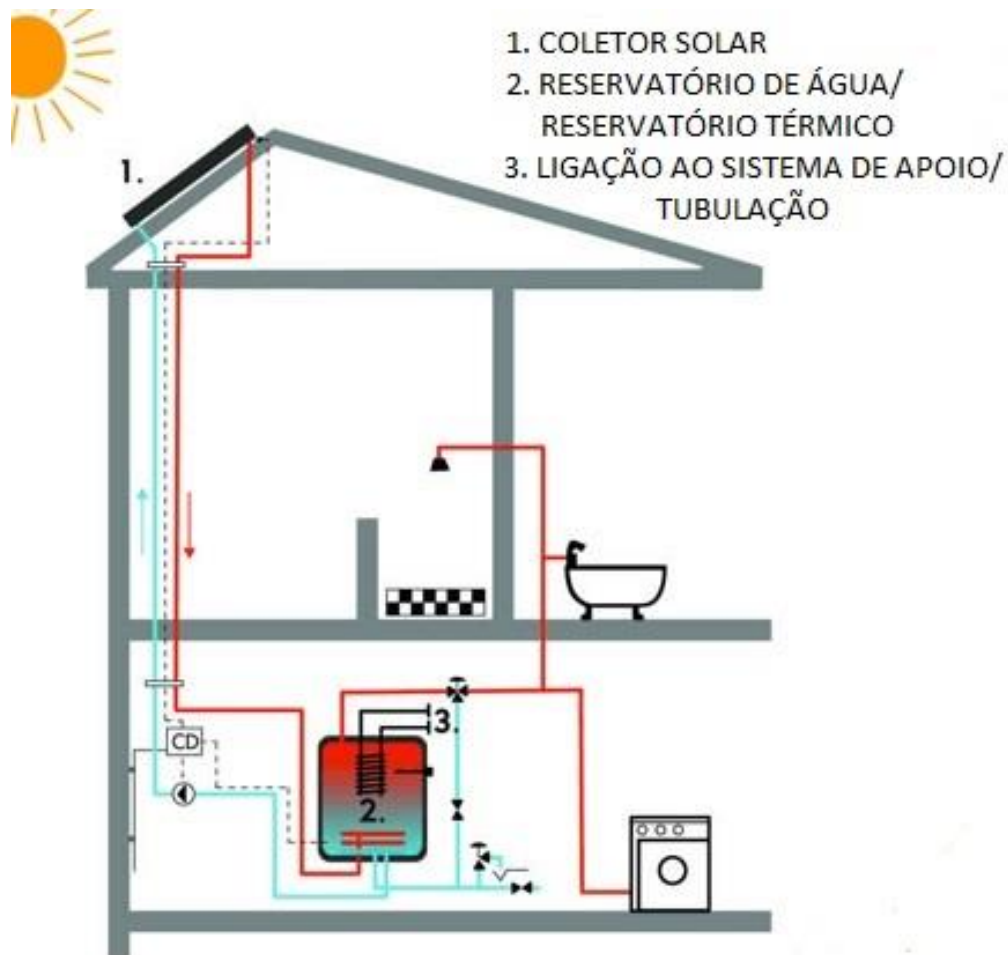
A radiação solar é utilizada para produzir potência através de duas tecnologias: fotovoltaica e térmica. Os métodos para a geração de potência térmica são essencialmente os mesmos das tecnologias convencionais, porém o combustível utilizado é a energia térmica, que utiliza como fonte geradora a radiação solar. A faixa de temperatura requerida para aplicações domésticas e comerciais pode ser coberta com as tecnologias disponíveis na conversão da energia solar em energia térmica. Os sistemas térmicos solares permitem a obtenção de temperaturas para pré-aquecer a água de alimentação de caldeiras, aquecer água, o ar e através de processos industriais produzirem vapor para gerar potência (COSTA, 2007).

Nestes sistemas, pode-se utilizar um reservatório térmico com maior capacidade volumétrica e temperatura de operação mais baixa, resultando em menores perdas térmicas, onde além do menor custo de implantação, é obtida uma maior eficiência do sistema solar durante o ano todo (KREZNINGER; BLAUTH; WISBECK, 2002). O esquema do funcionamento do sistema de coletor solar pode ser visualizado na Figura 13.

A eficiência dos coletores solares está diretamente relacionada à radiação solar, temperatura ambiente e temperatura da água na entrada do coletor. Estes sistemas são constituídos por coletores solares, reservatórios térmicos, reservatórios de água, fonte auxiliar de energia e tubulação (KRENZINGER; BLAUTH; WISBECK, 2002).

As capacidades termo físicas dos materiais, condutividade térmica, difusidade e calor específico, são exaustivamente estudados em diversas áreas ligadas à engenharia química, de materiais, mecânica, civil e arquitetura para atenderem a estas necessidades (KRENZINGER; BLAUTH; WISBECK, 2002).

Figura 13 – Esquema do funcionamento do sistema de coletor solar



Fonte: ADENE, (2015).

A ISO 8302 - DIS 8302/1990 especifica parâmetros necessários para o projeto e construção de equipamentos com a função de avaliar o desempenho de um determinado material quanto a sua condutividade térmica, utilizando o método da placa quente protegida, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para a construção de placa quente protegida

| PARÂMETROS | ESPECIFICAÇÕES |
|---|----------------|
| Espessura mínima e máxima do espécime a ser testado | 25 e 50 mm |
| Resistência térmica mínima e máxima do espécime | 3,5 a 237 W/m |
| Diferença mínima e máxima de temperatura do espécime | 108°C – 23°C |
| Sensibilidade do sistema de equilíbrio da guarda de proteção | 3°C |
| Temperatura mínima da unidade de resfriamento | Ambiente |
| Temperatura máxima da unidade de aquecimento | 108°C |
| Precisão total do aparelho com erro máximo aceitável na propriedade medida definida como aceitável na pior condição | 3% |
| Temperatura ambiente | 23°C |

Fonte: ISO - DIS 8302 (1990) apud Krenzinger; Blauth; Wisbeck (2002).

Para a concepção do projeto, construção e execução das edificações, existem inúmeros tipos de materiais que possuem características termo físicas com características específicas, os quais devem ser utilizados de acordo com os quatro princípios básicos de projeto:

- Para um clima específico;
- Para o meio ambiente social e físico;
- Para o tempo, seja o dia ou à noite, uma estação ou a vida útil de um edifício;
- Para edificação que se adaptará ao longo dos anos (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Vários materiais utilizados na construção civil armazenam radiação solar e re-emitem esta radiação na forma de calor. O acúmulo deste calor durante o dia, devido às propriedades de absorção dos materiais utilizados, compromete a durabilidade e provoca o 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, ou seja, a edificação deve funcionar como um isolante térmico que não perde o calor no inverno e não o absorve no verão. 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 (MASCARENHAS, 2012).

A capacidade de um material ser condutor ou isolante está relacionada ao arranjo das ligações atômicas de seus elétrons, onde esses elétrons podem se deslocar entre camadas e estabelecer condições favoráveis de 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 (YANNAS; MALDONADO, 1995).

A durabilidade surge como condição para que um material tenha longa permanência como componente da edificação, uma vez que requer menos manutenção e, certamente, contribuirá para o uso racional dos recursos energéticos e diminuição dos problemas relacionados à geração de resíduos sólidos (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Neste sentido, a argamassa de revestimento possui um papel preponderante na transmissão do fluxo de calor, favorecendo-o ou dificultando-o.

2.3.1 Condução

O mecanismo de transmissão de calor por condução ocorre sempre que exista transferência de energia cinética em sólidos, líquidos ou gases. Esta condução é feita por vibrações ou colisões entre partículas, que transferem energia das zonas mais quentes (maior energia) para as zonas mais frias (menor energia), ou seja, sempre que se estiver diante de um sistema que está a uma temperatura diferente da sua vizinhança, ocorrerá transferência de energia. Esta transferência de energia é feita através da interação de partícula a partícula e o seu fluxo difere de material para material.

Os metais são bons condutores, porque recebem e também cedem energia, sob a forma de calor, de maneira rápida, pois, os elétrons livres, responsáveis pela condução da corrente elétrica, aumentam significativamente o transporte de energia da parte mais quente para a mais fria. No entanto, os sólidos não metais também transferem energia, mas com maior dificuldade, através de vibrações da sua estrutura molecular, o que faz com que alguns materiais sejam denominados como materiais isolantes, devido à sua estrutura molecular porosa e constituída por materiais não metálicos. Isto faz com que estes aumentem a resistência à troca de calor por condução (CALLISTER, 1991).

Os bons condutores de calor (geralmente também bons condutores de corrente elétrica) possuem condutividades térmicas elevadas, como por exemplo, os metais. Pelo contrário, os isolantes térmicos possuem condutividades térmicas baixas, como por exemplo, a madeira, a borracha ou o ar, o que significa que para a mesma diferença de temperatura, área e espessura, obtém-se um valor muito mais baixo de transferência de calor por condução nos materiais isolantes do que nos materiais condutores (CALLISTER, 1991).

Na engenharia civil, mais concretamente nos edifícios, o processo de transmissão de calor mais significativo é por condução, uma vez que depende da condutividade térmica

ca dos materiais. Os diferentes materiais possuem comportamentos diversos com relação à velocidade que transferem calor por condução, o que depende da sua condutividade térmica (λ), expressa em $W/(m \cdot ^\circ C)$ ou $W/(m \cdot K)$ (MARTINS, 2009).

A condução é o fenômeno físico responsável pela transferência da energia pela ativação de elétrons livres de valência (YUNUS; AFSHIN, 2012). A transmissão do calor por condução é característica do transporte através dos sólidos e se dá, principalmente, por vibração da rede cristalina e/ou pelos elétrons de condução (INCROPERA; WITT, 2003).

De acordo com a Lei de *Fourier*, a condução pode ser considerada como a transferência de energia de partículas mais energéticas de uma substância ou fonte de calor, para partículas menos energéticas, devido às interações das ligações atômicas entre as partículas em materiais condutores. De um modo geral, pode-se entender que 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 (PALMIERI, 2015).

A capacidade calorífica (C) de uma amostra se define como a quantidade de energia térmica necessária para elevar em um grau Celsius e varia de substância para substância. A capacidade calorífica de um corpo é proporcional à sua massa (m), deste modo, é conveniente definir a capacidade calorífica por unidade de massa de uma substância, o calor específico (c), conforme a Equação 1.

$$c = C/m \quad \text{Equação 1}$$

A condutividade térmica (λ) é definida como a taxa à qual o calor flui através de uma certa área de um corpo. A definição precisa da condutividade térmica é dada pela equação 2, de acordo com a Lei de *Fourier*, onde: 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 (FIGUEIREDO, 2006).

Segundo Figueiredo (2006), a constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente de condutividade térmica do material (λ). 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 2, a Equação de Fourier:

$$Q = - \lambda. A (T_1 - T_2) / dx$$

Equação 2

Onde:

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

λ = é o coeficiente de condutividade térmica do material

A = é a secção do sentido da corrente

(T1 – T2) = diferença de temperatura

dx = espessura do material

A condução térmica pode ser interpretada como a transmissão passo a passo de agitação térmica, onde um átomo 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 (FIGUEIREDO, 2006).

Segundo Figueiredo (2006), as substâncias metálicas com maior número de elétrons livres, que tendem a potencializar a condução térmica, como é o caso dos metais que, associado ao tipo de ligação (metálica), justificaria sua alta condutividade térmica.

No caso dos gases nobres, a própria natureza física (gás), os torna isolantes térmicos, sendo a transferência térmica de calor realizada principalmente por convecção e não por condução (DANA, 1969).

A condutividade térmica de um mineral é a habilidade desse em conduzir calor, sendo uma propriedade vetorial que depende da composição e da estrutura interna do cristal. Quanto maior o valor da condutividade térmica de um mineral, maior será sua habilidade em conduzir calor, e esta propriedade está relacionada às suas características físicas, químicas e cristalográficas (DANA, 1969).

A condutividade térmica de minerais fica melhor definida se comparada com as rochas, pois, as características físicas, químicas e cristalográficas são geralmente melhor controladas, mas quando se trata de minerais, os principais problemas na aquisição dos dados de condutividade térmica são: a pureza e o tamanho das amostras (NAVARRO, 2002).

Vários autores avaliaram a condutividade térmica dos minerais tentando definir os parâmetros térmicos para cada um, ou grupo de minerais, utilizando técnicas similares onde as medidas foram realizadas levando em consideração a anisotropia (foliação) dos cristais, na grande parte realizadas a temperatura ambiente. Os resultados mostraram, por vezes, variações em torno de 10%, mas sempre boas correlações entre minerais com altas e baixas condutividades (NAVARRO, 2002).

A 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, a composição química, a porosidade, a massa específica, a pressão, a temperatura, a textura, a estrutura, o grau de consolidação e o grau de alteração (NAVARRO, 2002).

Como se sabe, de acordo com Navarro, (2002) as rochas são constituídas de minerais utilizados como agregados em partes vitais da edificação, cada um com valores característicos de condutividade térmica e, portanto, é de se esperar que ao se variarem as proporções entre os minerais, a condutividade também sofrerá alterações, apresentando uma complexa interação de variáveis, exigindo para tanto, não só o estudo das propriedades, mas também o entendimento das leis que regem a termodinâmica.

No que diz respeito à avaliação da condutividade térmica, Clauser; Huenges, (1995) descreveram o comportamento em quatro grupos de rochas: sedimentares, vulcânicas, plutônicas e metamórficas. No caso específico de rochas sedimentares, como os arenitos, os fatores determinantes seriam a porosidade e a origem da partícula sedimentar, já nas rochas vulcânicas, como os basaltos e granitos, o fator determinante seria a porosidade, em rochas plutônicas a fase mineral dominante e, por fim, nas rochas metamórficas, como os mármore, seriam influenciadas pela anisotropia (foliação) e pela fase mineral predominante.

Segundo Navarro (2002), analisando a influência da temperatura e pressão sobre a condutividade térmica, para a variável de temperatura, houveram pequenas variações no intervalo entre 0°C a 100°C, mostrando que a condutividade térmica é praticamente a mesma, sofrendo variações insignificantes. Já o efeito da pressão é menos evidente, mas apresenta um discreto aumento de condutividade térmica com o aumento da pressão, no intervalo de zero MPa a 500 MPa. Por fim, a porosidade mostrou excelente correlação com a condutividade térmica, onde baixos valores de porosidade estavam associados a altos valores de condutividade térmica e altas porosidades se correlacionavam a baixas condutividades.

Em termos gerais, é possível demonstrar que, assim como outros parâmetros físicos, as relações das variáveis térmicas dependerão fundamentalmente das características físicas, mecânicas e químicas da rocha e que estas características estarão intimamente relacionadas à estrutura, textura e composição mineralógica (NAVARRO, 2002).

2.3.2 Radiação

O calor à superfície de um corpo é transformado, segundo as leis da termodinâmica, em radiação eletromagnética. Este processo de transferência de energia não necessita

de meio material para se propagar, ao contrário da condução (que necessita de um meio sólido) e da convecção (que necessita de um meio líquido ou gasoso); deste modo, a radiação difunde-se através de massas de ar, mas também através do vácuo, com características semelhantes às da luz, em quantidade que depende essencialmente da sua natureza e temperatura (MARTINS, 2009).

Portanto, a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas designa-se radiação. Não é necessário existir um meio material entre dois corpos para que a energia seja transferida de um para outro. De um modo geral, todos os corpos sólidos, líquidos ou gasosos emitem, absorvem e transmitem radiação (MARTINS, 2009).

A radiação que está relacionada com a temperatura designa-se radiação térmica. Esta é a energia emitida pela matéria que está a uma temperatura diferente de zero. A radiação térmica emitida por um corpo inclui vários comprimentos de onda, mas a potência máxima de emissão desloca-se para o visível e ultravioleta nas temperaturas mais elevadas. Por exemplo, a temperatura da superfície do Sol é cerca de 5800 K e a respectiva radiação atinge o máximo de potência na banda visível, enquanto os planetas, cujas superfícies possuem temperaturas inferiores a 800 K emitem na banda dos infravermelhos (BARROS, 2009).

Um corpo em equilíbrio térmico com a sua vizinhança emite e absorve a mesma quantidade de energia. Contudo, se a sua temperatura for superior à da sua vizinhança, ele emitirá mais energia radiante do que aquela que absorve (MARTINS, 2009).

2.3.3 Convecção

O transporte por convecção é o mecanismo geralmente mais importante quando o meio que lhe serve de suporte é um fluido. Neste tipo de transporte, um corpo a certa temperatura está em contato com um fluido a uma temperatura diferente. As camadas de fluido em contato com o corpo estão constantemente sendo renovadas devido à alteração das propriedades do fluido induzidas por via da transferência de calor, estabelecendo-se correntes para o transporte do calor através da convecção, em que circulam camadas de fluido em diferentes temperaturas (BARROS, 2009).

Diante deste contexto, pode-se dizer que a transferência de calor por convecção ocorre essencialmente quando existe um fluido em movimento na vizinhança de uma superfície sólida. Este processo de transferência de calor inclui os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. Esta transferência é tanto mais elevada quanto mais rápido for o escoamento do fluido. Na ausência de movimento a transferência de calor entre a superfície

do sólido e o fluido ocorre por condução pura, ou seja, quando a diferença de temperatura entre o sólido e o fluido não é suficiente para vencer a viscosidade do fluido, e desta forma, não se estabelecem correntes convectivas e neste caso, a transferência de calor se processa por condução.

A convecção pode ser considerada forçada ou natural, sendo designada convecção forçada, quando o fluido é forçado a fluir sobre a superfície sólida através de meios externos, como uma ventoinha, uma bomba ou o vento. É considerada natural ou livre se o movimento do fluido é causado por diferenças de densidade, resultantes das diferenças de temperatura. Por exemplo, no caso de um aparelho eletrônico que liberta calor, o ar adjacente aquece, expande e sobe, visto que a sua densidade é mais baixa do que a do ar envolvente, e o ar vizinho mais frio se desloca para ocupar este lugar. Este processo estabelece correntes convectivas naturais (BARROS, 2009).

Desta forma, a constituição e as características dos materiais exercem uma influência direta na transferência de calor.

2.4 Argamassa

Na Grécia, durante o Período Micênico (por volta de 2000 a.C.), a argila crua foi empregada em construções de taipa e pau-a-pique, envolvendo as estruturas resistentes de madeira, conforme constam nos livros de *Boltshauer* (1963), (SELMO,1989).

Nas construções egípcias modestas, de 1600 a 1100 a.C., a argila em pasta foi utilizada envolvendo a armação estrutural das casas, feita de caules de plantas ou de tronco de palmeiras. Já a argila cozida em placas molduradas e com baixos relevos foi empregada na arquitetura grega, para revestir os paramentos de pedra das fachadas, (SELMO,1989).

De acordo com Selmo (1989), os gregos e romanos fizeram um amplo uso das argamassas, tanto no assentamento das alvenarias, como nos revestimentos de seus edifícios. Para tal, preparavam misturas de cal, areia e água, ou adicionavam gesso para obter o estuque, o qual constituiu uma especialidade para revestimentos internos. Portanto, há mais de 2.000 anos, a argamassa vem sendo utilizada para assentamento e revestimento dos blocos de pedra, que constituem as paredes das edificações.

Segundo Westphal (2014), no Brasil, a argamassa passou a ser utilizada no primeiro Século, pós-descobrimento, para assentamento de alvenaria de pedra, onde a cal utilizada na argamassa era obtida através da queima de conchas e mariscos e o óleo de baleia utilizado como aglomerante.

Há cerca de seis mil anos, foram utilizadas estas argamassas na Babilônia e deste modo, foi possível executar edificações que duraram por séculos (BAYER; LUTZ, 2003). Mais tarde, os homens começaram misturar um material aglomerante, a pozolana (cinzas vulcânicas), com materiais inertes e estas argamassas hidráulicas foram bastante utilizadas por civilizações fenícias, gregas e romanas (SABBIONI; BONAZZA; ZAPPIA, 2002; LANAS *et. al.* 2004; MOROPOULOU; BAKOLAS; ANAGNOSTOPOULOU, 2005).

Portanto, há mais de 3000 anos, que esse material vem sendo utilizado, tanto para pavimentar as edificações, como para unir e revestir os blocos que formam as paredes e os muros (REAL, 2001).

As misturas de aditivos (como sabão, resinas, proteínas e cinzas) com os aglomerantes e agregados, são também conhecidos desde a antiguidade e idade média, para melhorarem o desempenho das argamassas (SABBIONI; BONAZZA; ZAPPIA, 2002; LANAS *et. al.* 2004; MOROPOULOU; BAKOLAS; ANAGNOSTOPOULOU, 2005).

Os Romanos, por exemplo, utilizavam o sangue, como aditivo nas argamassas hidráulicas, talvez com o fim de melhorar sua trabalhabilidade. Conforme Bayer; Lutz (2003), estas substâncias provocam a introdução de ar, sob a forma de bolhas, o que pode ter contribuído para a duração das edificações romanas.

O estudo das argamassas no Brasil teve um forte impulso a partir de 1984, com a realização do primeiro Simpósio Nacional de Argamassas realizado na cidade de Belo Horizonte (WESTPHAL, 2014).

2.4.1 Definições

As argamassas são definidas como uma mistura de um ou mais aglomerantes orgânicos ou inorgânicos, agregados miúdos e aditivos (EMODICO, 2001).

Segundo Sabbatini (1986), pode ser definida como um material complexo, constituído essencialmente de materiais inertes de baixa granulometria (agregados miúdos) e de uma pasta com propriedades aglomerantes, composta por minerais e água (materiais ativos), podendo conter ainda produtos especiais, denominados aditivos.

Constituem-se em misturas plásticas obtidas com um aglomerante (gesso, cal ou cimento), areia e água, que servem para ligar entre si as pedras naturais e artificiais das construções de alvenaria, e para revestí-las com camadas protetoras ou decorativas (BRANCO, 1981).

As composições mais comuns são constituídas por cimento, areia e água, em alguns casos, adiciona-se cal para a obtenção de propriedades especiais, como a plasticidade, a retenção de água, a untuosidade, entre outros (SABBATINI, 1986).

Da mesma maneira que o concreto, as argamassas também se apresentam em estado plástico nas primeiras horas de execução, e endurecem com o decorrer do tempo, ganhando elevado poder de aderência, resistência mecânica e durabilidade. Entre as diversas utilidades das argamassas destacam-se: o assentamento de tijolos e blocos, azulejos, ladrilhos, cerâmicas e tacos; o revestimento de superfícies; a regularização de paredes pisos e tetos e também a impressão de diferentes texturas superficiais (com acabamentos liso, áspero ou rugoso) (SABBATINI, 1986).

Os materiais utilizados influenciam as propriedades da argamassa, em função da destinação e do tipo de aplicação (MOROPOULOU *et. al*, 2003).

Uma argamassa pode ser considerada como uma rocha artificial, constituída por pequenos fragmentos de rocha, agregados por um aglomerante que mantém a forma do conjunto e lhe confere solidez. A água, o aglomerante e os agregados misturados permitem produzir a rocha artificial, onde os vazios existentes no volume de agregados, cerca de 25% a 40%, devem ser preenchidos com pasta aglomerante para proporcionar coesão à mistura final (GEOLOGICAL SOCIETY, 1993; WARREN, 1999).

Segundo Sabbatini; Baía, (2008), a elaboração do projeto para o revestimento em argamassa é de fundamental importância para a obtenção de um resultado melhor na produção e no seu desempenho, através do aumento da qualidade, produtividade, da redução das falhas, desperdícios e custos. Mas, para que ocorra, é necessária uma reorganização do processo de projeto, buscando-se a coordenação entre o projeto das diversas partes do edifício e a incorporação do conhecimento tecnológico para a definição das soluções. Assim, o projeto do revestimento de argamassa deve apresentar um conjunto de informações relativas às características do produto e a forma de produção. De maneira geral, esse projeto deve definir:

- O tipo de revestimento (número de camadas);
- O tipo de argamassa;
- Espessuras das camadas;
- Os detalhes arquitetônicos e construtivos;
- As técnicas mais adequadas para a execução;
- O padrão de qualidade dos serviços.

Todas estas definições devem ser feitas com base em parâmetros tecnológicos, considerando as exigências do revestimento frente às diferentes condições de exposição (SABBATINI; BAÍA, 2008).

A NBR 13530 (ABNT, 1995) classifica as argamassas seguindo os seguintes critérios:

- Quanto à natureza do aglomerante: argamassa aérea e hidráulica;
- Quanto ao número de aglomerantes: argamassa simples e mista;
- Quanto ao tipo de aglomerante: argamassa de cal, de cimento e de cimento e cal;
- Quanto à função do revestimento: argamassa de assentamento e de revestimento (chapisco, emboço e reboco);
- Quanto à forma de preparo ou fornecimento: argamassa dosada em central, preparada em obra, industrializada e mistura semi pronta;
- Quanto às propriedades especiais: argamassa aditivada, de aderência melhorada, colante, redutora de permeabilidade, de proteção radiológica, expansiva, hidrófuga e termoisolante.

Usualmente, nas obras se utilizam as argamassas de cal, argamassas de cimento e areia e as argamassas de cimento, cal e areia, mais conhecidas como argamassas mistas.

O Quadro 2 apresenta a massa específica da argamassa classificada no seu estado fresco com os parâmetros que devem ser seguidos, conforme especifica a NBR NM 23: 2000 (ABNT, 2001).

Quadro 2 - Classificação das argamassas quanto à massa específica no estado fresco

| ARGAMASSA | MASSA ESPECÍFICA DA ARGAMASSA (g/cm ³) | PRINCIPAIS AGREGADOS EMPREGADOS | USOS |
|-----------|--|--|-------------------------------|
| LEVE | < 1,40 | Vermiculita, Perlita, Argila expandida | Isolamento térmico e acústico |
| MÉDIA | $1,40 \leq A \leq 2,30$ | Areia de rio (quartzo) Calcário britado | Aplicações convencionais |
| PESADA | > 2,30 | Barita (sulfato de bário) | Blindagem de radiação |

Fonte: ABNT – NBR NM 23, (2001).

A classificação das argamassas se dá segundo o tipo de aglomerante utilizado, podendo ser consideradas como: aéreas, hidráulicas e mistas. Quanto ao tipo de aglomerante, as aéreas endurecem pela ação química do CO₂ do ar, as hidráulicas endurecem pela ação

química exclusiva da água, e as mistas são compostas por um aglomerante hidráulico e um aéreo, exceto cimento e gesso em função de sua incompatibilidade química.

2.4.2 Materiais Constituintes

2.4.2.1 Cimento

O cimento empregado é o cimento *Portland*, que pode ser vendido à granel ou em sacos de papel *craft*, os quais podem ser armazenados por um período de três meses, desde que o local esteja devidamente fechado coberto e seco. Além disso, o cimento deve ser estocado sobre estrados de madeira, em pilhas com no máximo 10 sacos.

De acordo com as Normas Brasileiras ABNT 5732; 11578; 5733; 5735; 5736 (1991) e 12989 (1993) os cimentos brasileiros são classificados em:

- Cimento *Portland* Comum (CPI) – constituído de cerca de 95% de clínquer e gipsita e 5% de *filler* calcário, hoje é raramente empregado.
- Cimento *Portland* Composto (CPII) – existem 03 (três) tipos de cimento composto: o CPII-E, o CPII-Z e o CPII-F; onde o CPII-E é produzido com adição de escória de alto forno, acarretando menor resistência inicial, baixo calor de hidratação, tempo de início de pega prolongado e maior durabilidade em presença de meios agressivos; o CPII-Z é obtido com a adição de material pozolânico, o que acarreta uma pega mais lenta, redução na resistência inicial e no calor da hidratação, garantindo maior resistência ao ataque de sulfatos e consequente aumento da durabilidade dos concretos com ele produzidos; já o CP II-F é produzido com maiores teores de *filler* calcário PENA (2004).
- Cimento *Portland* de Alto Forno (CP III) – este tipo de cimento tem como características apresentar menor calor de hidratação, o que garante redução no índice de fissuras no concreto, e quando exposto à meios e agentes agressivos, principalmente água do mar e águas residuais, apresenta uma boa durabilidade.
- Cimento *Portland* Pozolânico (CP IV) – este cimento é obtido com teores de pozolanas superiores a 14%, sendo indicado para obras hidráulicas, como barragens, canais e reservatórios. Em presença de agregados potenci-

almente reativos e estruturas em contato com agentes agressivos, como cloretos e sulfatos, apresentam bom desempenho e durabilidade. Estes cimentos apresentam vantagens tais como: melhora da plasticidade do concreto, menor calor de hidratação, aumento da resistência ao ataque químico, estabilidade de volume e inibição da reação álcali-agregado. O aspecto desfavorável deste tipo de cimento é o tempo de pega ser mais lento.

- Cimento *Portland* ARI (CP V) – é um tipo de cimento que desenvolve alta resistência inicial em função do elevado índice de finura. Apresenta em sua composição cerca de 95% de cimento CP-I e até 5% de filer calcário. A rapidez verificada no processo de endurecimento do cimento ARI, garante que aos 3 (três) dias de idade, este cimento alcance valores da resistência mecânica à compressão superiores a 30 MPa, valores estes alcançados pelos demais cimentos de classe 32 em idades superiores a (14) quatorze dias. Normalmente são verificados valores da resistência aos 28 dias superiores a 40 MPa.

A Tabela 6 apresenta as características dos cimentos nacionais.

Tabela 6 - Composições dos cimentos segundo as normas brasileiras

| SIGLA | COMPONENTES % EM MASSA | | | | | |
|-----------------|--------------------------|----------|-----------------------------------|--|------------------------|-------------------------|
| | NOME | CLASSE | CLINQUER+ SULFATO DE CÁLCIO | ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO | MATERIAL POZOLÂNICO | MATERIAL CARBONÁTICO |
| CPI | Comum | 25/32/40 | 100 | 0 | | |
| CPI-S | | | 99-95 | 1 - 5 | | |
| CPII-E | Composto | 25/32/40 | 94 - 56 | 6 - 34 | - | 0 - 10 |
| CPII-Z | | | 94 - 76 | - | 6 - 14 | 0 - 10 |
| CPII-F | | | 94 - 90 | - | - | 6 - 10 |
| CPIII | Alto forno | 25/32/40 | 65 - 25 | 35 - 70 | - | 0 - 5 |
| CPIV | Pozolânico | 25/32 | 85 - 45 | 15 - 50 | - | 0 - 5 |
| CP V ARI | Alta resistência inicial | - | 100 - 95 | - | - | 0 - 5 |
| CPB | Branco estrutural | 25/32/40 | 100 - 75 | - | - | 0 - 5 |
| CPB | Branco não estrutural | - | 74 - 50 | - | - | 26 - 50 |

Fonte: ABNT – NBR n° 5732 (1991), 11578 (1991), 5733 (1991), 5735 (1991), 5736 (1991) e 12989 (1993).

Para esse estudo, considerou-se que o cimento mais adequado dentre os apresentados seria o CP V (ARI), que corresponde ao cimento americano tipo III (*High Early Strength*) segundo a ASTM C150.

2.4.2.2 Cal

A cal utilizada em argamassas tanto pode ser virgem, como hidratada.

Segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal hidratada é obtida pela hidratação adequada da cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

De acordo com Carasek; Cascudo; Scartezini (2001) a cal pode ser classificada, segundo a sua composição química em:

- Cálctica: teor de CaO \geq 90% em relação aos óxidos totais;
- Magnésiana: 65% < teor de CaO < 90%;
- Dolomítica: teor de CaO \leq 65%.

No seu estado fresco, a cal propicia maior plasticidade à argamassa, permitindo melhor trabalhabilidade e, conseqüentemente, maior produtividade na execução do revestimento, outra propriedade importante é a retenção de água, por não permitir a sucção excessiva de água pela base (RAGO; CINCOTTO,1999).

A adição de cal hidratada em argamassas de cimento CP I reduz, significativamente, o módulo de elasticidade sem afetar, na mesma proporção, sua resistência à tração, que é a máxima resistência de aderência da argamassa e, assim, tende a aumentar a vida útil do revestimento (JOHN, 2003).

Diversos estudos indicam que, à medida que se aumenta a porcentagem de hidróxido de magnésio na composição da cal, em relação ao hidróxido de cálcio, há também um aumento na capacidade de aderência da argamassa (CARASEK; CASCUDO; SCARTEZINI, 2001).

No Estado do Paraná existe a tradição do emprego da cal virgem, devendo serem tomados os devidos cuidados para que a sua hidratação prévia ocorra por cerca de sete dias antes do seu emprego na produção de argamassa. Uma prática comum é efetuar a queima na forma de argamassa branca e estocá-la até o uso.

2.4.2.3 Agregados Miúdos

A areia utilizada na região de Londrina no Estado do Paraná é retirada do leito dos rios Tibagi e Paraná.

A norma NBR 9935/2005 define agregado miúdo como sendo o material que passa na peneira com abertura de malha 4,8 mm e fica retido na peneira com abertura de malha de 0,15 mm. A distribuição granulométrica da areia influencia diretamente o desempenho da argamassa, interferindo na trabalhabilidade e no consumo de água e de aglomerantes no seu estado fresco. Já no revestimento acabado, exerce influência na fissuração, na rugosidade, na permeabilidade e na resistência de aderência (ANGELIM; ANGELIM; CARASEK, 2003).

De um modo geral, a areia é caracterizada pelo seu módulo de finura, especificações de faixas granulométricas ou selecionadas a partir de normas, as quais determinam a granulometria dentro de certas faixas de utilização.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) determina a classificação granulométrica dos agregados miúdos em relação às dimensões: muito finos, finos, médios e grossos, conforme pode ser visualizado na Tabela 7.

A areia não participa das reações químicas da pasta, porém interfere no estado fresco, influenciando a trabalhabilidade e a retenção de água; bem como no estado endurecido, influenciando as resistências mecânicas, a capacidade de deformação e a permeabilidade, em função de sua composição granulométrica; do formato dos grãos, da aspereza, entre outras (CARNEIRO; CINCOTTO, 1999).

Tabela 7 - Abertura das peneiras em relação ao diâmetro dos agregados miúdos

| CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS MIÚDOS EM (mm) - NBR 7211/2009 | |
|--|------------------|
| 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 - NBR 7211, (2009a).

O resultado de uma análise granulométrica pode ser interpretado muito mais facilmente quando representado graficamente e, por essa razão, são usadas as curvas granulométricas. Através delas é possível verificar se o agregado se enquadra em uma especificação, ou se é muito grossa ou muito fina, ou deficiente em um determinado tamanho (NEVILLE, 1997).

Segundo Carneiro; Cincotto; John, (1997), a areia de granulometria muito uniforme, denominada descontínua por apresentar grãos de dimensões muito próximas, independente do formato, compromete a trabalhabilidade e o empacotamento da argamassa. Há um

consequente enrijecimento, impedindo o deslizamento dos grãos da areia entre si, com demanda de um maior consumo de pasta.

É importante ressaltar que o módulo de finura, a distribuição granulométrica e o coeficiente de uniformidade desconsideram a forma dos grãos que, evidentemente, possuem grande influência no empacotamento (BARBOSA; COURA; MENDES, 2008).

O empacotamento está relacionado com a proporção e o tamanho das partículas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos pelas partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente (BARBOSA; COURA; MENDES, 2008).

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) – Agregados para concreto – especificações, criou novos limites de utilização para agregados miúdos. Conforme o módulo de finura (MF) se classifica em: zona utilizável inferior (MF varia de 1,55 a 2,20 – areia fina), zona ótima (MF varia de 2,20 a 2,90 - areia média) e zona utilizável superior (MF varia de 2,90 a 3,50 – areia grossa), como podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

| PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA ABNT – NBR NM ISO 3310-1 | PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA | | | |
|--|---|------------|--------------------|-----------------|
| | Limites inferiores | | Limites superiores | |
| | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável |
| 9,5 mm | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6,3 mm | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,75 mm | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,36 mm | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,18 mm | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 600 µm | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 300 µm | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 150 µm | 85 | 90 | 95 | 100 |

NOTA 1 – O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

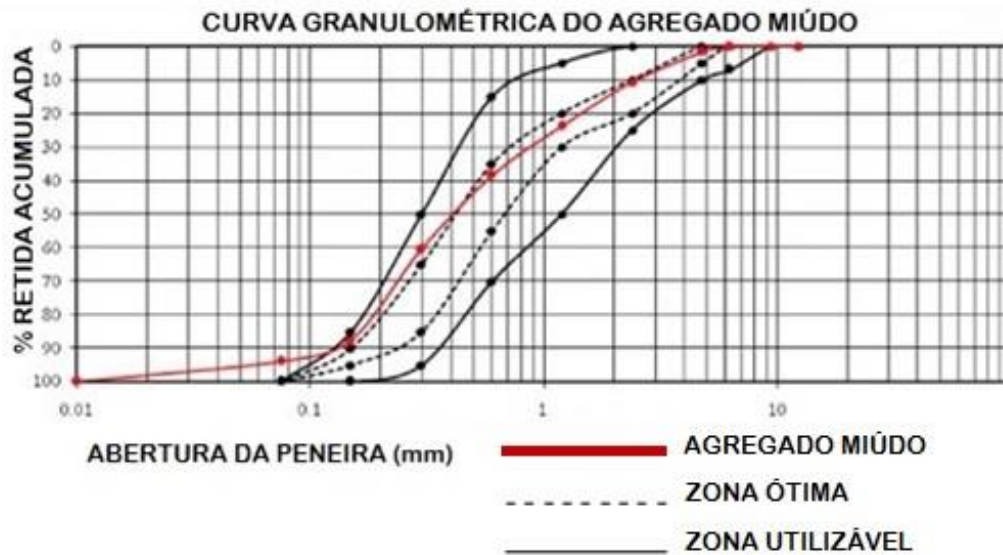
NOTA 2 – O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3 – O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT – NBR 7211(2009).

No Gráfico 1 estão apresentados os limites inferior e superior para a zona ótima e zona utilizável, respectivamente.

Gráfico 1 - Limites inferior e superior para zona ótima e zona utilizável



Fonte: ABNT – NBR 7211, (2009).

2.4.3 Propriedades das Argamassas

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 e evitar a exsudação, além de consistência adequada, coesão e tixotropia, plasticidade e adesão inicial. Por outro lado, as características no estado endurecido devem ser: resistência à compressão adequada, boa resistência de aderência e/ou ao cisalhamento, boa elasticidade e boa resiliência (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995).

2.4.3.1 Consistência

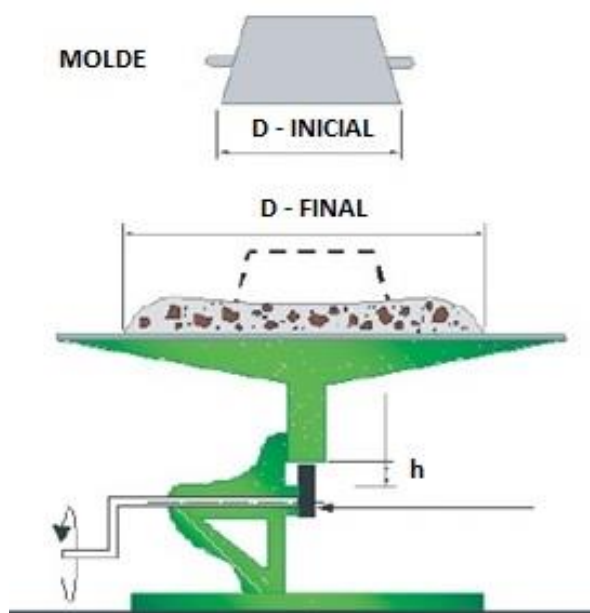
Segundo Cincotto; Silva; Cascudo (1995) é a propriedade pela qual a argamassa, no estado fresco, tende a resistir à deformação. Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em secas (a pasta preenche os vazios entre os grãos), plásticas (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados) e fluídas (os grãos ficam imersos na pasta). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante.

Em geral, nas argamassas de consistência plástica à fluída, pode ocorrer a exsudação de água, que interfere na trabalhabilidade, exigindo remisturas frequentes para a homogeneização do material, podendo interferir na capacidade de adesão da argamassa ao ser lançada contra a base (SELMO, 1989).

Para a avaliação da consistência da argamassa é utilizada a mesa de consistência (*flow table*) para a realização do ensaio que determina o índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005).

O teste consiste em medir o espalhamento horizontal de uma argamassa moldada na forma de um tronco de cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do molde, conforme pode ser visualizado na Figura 14 (CARDOSO, 2009).

Figura 14 - Mesa de consistência – *flow table*



Fonte: Cardoso (2009).

2.4.3.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade relaciona-se principalmente à consistência. Em termos práticos, a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio. Pode-se dizer que uma argamassa é trabalhável, de um modo geral, quando ela distribui-se facilmente ao ser assentada, não gruda na ferramenta quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorvivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a operação seja completada (SABBATINI, 1984).

De acordo com o documento MR-3 da RILEM /1982, trabalhabilidade das argamassas é complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento sob sucção e tixotropia. Avaliar, quantificar e prescrever valores de trabalhabilidade das argamassas por meio de ensaios é uma tarefa muito difícil, uma vez que ela depende não só das características intrínsecas, mas também da habilidade do pedreiro que está executando o serviço e de várias propriedades do substrato, além da técnica de aplicação e dos equipamentos utilizados (CASCUDO; CARASEK; CARVALHO, 2005).

2.4.3.3 Coesão e Tixotropia

A coesão, segundo Cincotto, Silva, Cascudo (1995), refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante. Ainda, segundo os autores, a influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado.

A tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o estado gel (SELMO, 1989). O estado gel, no caso das argamassas, diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta, mais densa após a hidratação (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995).

2.4.3.4 Plasticidade

É a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a se conservar deformada após a redução das tensões de deformação. De acordo com Cincotto; Silva; Cascudo (1995), a plasticidade e a consistência são as propriedades que, efetivamente, caracterizam a trabalhabilidade e são influenciadas pelo teor de ar aprisionado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura.

Segundo Cascudo; Carasek; Carvalho (2005), a plasticidade adequada para cada mistura, de acordo com a finalidade e forma de aplicação da argamassa, demanda uma quantidade ótima de água, a qual possibilita uma consistência ótima, sendo essa, função do proporcionamento e natureza dos materiais.

2.4.3.5 Retenção de Água e Carbonatação

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita à solicitações que provocam perda de água por evaporação, sucção do substrato ou pela hidratação do cimento e carbonatação da cal (CINCOTTO; RAGO, 1995).

A carbonatação é um fenômeno produzido pela interação entre os constituintes ácidos do meio e o líquido presente nos poros do concreto ou dos elementos argamassados, tendo início na superfície externa e avançando para o seu interior. O CO₂ (dióxido de carbono) se solubiliza no líquido intersticial da pasta de concreto e reage com o hidróxido de cálcio, formando carbonato de cálcio e reduzindo o pH do concreto, isto é, causando sua carbonatação (SOUZA; RIPPER, 1998).

A penetração do CO₂ presente no ar atmosférico no concreto é um dos maiores desencadeadores da corrosão das armaduras, uma vez que provoca alteração na condição de equilíbrio da alta alcalinidade e redução do pH para valores menores que 9, rompendo a camada passivadora da armadura que, por sua vez, torna-a suscetível à corrosão. Já quando o pH do extrato aquoso do concreto é superior a 9, ocorre a formação de um filme de óxido passivante sobre a superfície da armadura, inviabilizando sua corrosão (SOUZA; RIPPER, 1998).

Segundo Rosello (1976) apud. Selmo (1989) as argamassas tendem a conservar a água necessária para molhar as partículas dos aglomerantes e do agregado miúdo e a água em excesso é cedida facilmente, devido à absorção do substrato.

Robinson *et. al.* apud. Carasek (1996) constataram em seus experimentos, utilizando argamassas com diferentes retenções de água, aplicadas em diferentes tipos de substratos, que aquelas com menores capacidades de retenção de água produziam maior resistência de aderência do revestimento.

2.4.3.6 Aderência

A aderência inicial da argamassa no estado fresco ao substrato é a propriedade que caracterizará o comportamento futuro do conjunto substrato/revestimento quanto ao desempenho decorrente da adesão (CINCOTTO; SILVA; CASCUDO, 1995).

Segundo Rosello (1976) apud. Selmo (1989), a adesão inicial ou a aderência da argamassa no estado fresco ao substrato se deve às características reológicas da pasta aglomerante e à baixa tensão superficial da pasta, sendo função inversa do consumo de aglomerantes.

Para uma boa aderência inicial da argamassa, as condições de limpeza do substrato, isentos de poeiras, partículas soltas e gorduras, são considerados fatores essenciais.

Quanto à argamassa endurecida, segundo Sabbatini (1984), a sua aderência ao substrato pode ser definida como sendo a capacidade que a interface substrato/argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se. Não existe uma correspondência biunívoca entre um dado parâmetro e a capacidade de aderência. Por exemplo, aumentando o teor relativo de cimento pode-se aumentar ou diminuir a capacidade de aderência, dependendo das características do substrato.

Taha; Shrive (2001) apud Carvalho Jr.; Brandão; Freitas (2005) descrevem que a aderência à alvenaria se desenvolve segundo dois mecanismos: aderência química onde a resistência de aderência advém de forças covalentes ou forças de *Van der Waals*, desenvolvidas entre a unidade de alvenaria e os produtos da hidratação do cimento; aderência mecânica, a qual é formada pelo inter travamento mecânico dos produtos da hidratação do cimento, transferidos para a superfície dos poros dos blocos de alvenarias devido ao efeito da sucção ou absorção capilar.

Manifestações patológicas como o descolamento em placas junto à interface argamassa/substrato podem ser relacionadas com a inadequada condição do substrato para possibilitar a penetração da pasta de aglomerante em seus poros, como por exemplo, base impregnada com pulverulência e com gordura (CARVALHO JR.; BRANDÃO; FREITAS, 2005).

De acordo com Gonçalves (2004), fatores como processo de execução do revestimento, materiais utilizados e condições climáticas respondem por uma variabilidade de até 33% nos resultados do ensaio de aderência, em que os resultados do ensaio de resistência de aderência à tração devem ser analisados em relação ao tipo de ruptura ocorrido, visto que, tanto o fato de romper na interface argamassa/substrato (aderência pura) quanto no interior dos materiais (falha de estruturação interna) representam fraturas no sistema de revestimento.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições da base, como a porosidade e a absorção de água, a resistência mecânica, a textura superficial e pelas condições de execução do revestimento. A capacidade de aderência da interface argamassa/substrato depende da capacidade de retenção de água, da consistência e do teor de ar aprisionado da argamassa. A aderência é influenciada favoravelmente pelo teor de finos do agregado miúdo (SILVA; BUEST; CAMPITELI, 2005).

A NBR 15258 (ABNT, 2005), vigente a partir de outubro de 2005, propõe procedimentos de ensaio para determinação da resistência de aderência à tração. Esta norma in-

introduz o conceito de aderência potencial, estabelecendo um substrato-padrão para a aplicação das argamassas de modo a minimizar a influência da base na aderência, buscando assim avaliar apenas a contribuição da argamassa na resistência de aderência à tração (ANTUNES, 2005).

2.4.3.7 Elasticidade

Segundo Sabbatini (1984), elasticidade é a capacidade que a argamassa no estado endurecido apresenta em se deformar sem apresentar ruptura quando sujeita à solicitações diversas e de retornar à dimensão original inicial quando cessam estas solicitações.

De acordo com Cincotto; Silva; Cascudo (1995), a elasticidade é, portanto, uma propriedade que determina a ocorrência de fissuras no revestimento e, desta forma, influi decisivamente sobre o grau de aderência da argamassa à base e, conseqüentemente, sobre a estanqueidade da superfície e sua durabilidade.

A capacidade do revestimento de absorver deformações pode ser avaliada através do módulo de elasticidade, que pode ser obtido através do método estático ou dinâmico. Quanto menor o valor do módulo, maior será a capacidade do revestimento de absorver deformações.

2.4.3.8 Durabilidade

A durabilidade das argamassas está diretamente relacionada com sua porosidade e com o seu grau de carbonatação (COUTINHO, 1997).

Carbonatação é a reação química entre a cal (desenvolvida durante a hidratação do cimento) e o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar. Esta reação forma carbonato de cálcio (CaCO_3). A espessura da carbonatação é avaliada com um sistema colorimétrico usando fenolftaleína diluída em álcool etílico. Se a argamassa ou o concreto não mudar de cor, significa que está afetado pelo fenômeno da carbonatação, se ficar cor-de-rosa, significa que não foi penetrado pelo dióxido de carbono (COUTINHO, 1997).

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 (NEVILLE, 1997).

A espessura do revestimento de argamassa é um fator determinante na carbonatação, pois, a umidade liberada pela reação do dióxido de carbono (CO_2) com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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, 1997).

2.4.4 Reologia das Argamassas

A reologia é um dos parâmetros das argamassas que vem sendo largamente estudado. Ela está relacionada com a deformação dos materiais, podendo se correlacionar as propriedades do material com seu comportamento em situações práticas, (CINCOTTO; RAGO, 1995).

Bauer (2005) conceitua reologia como sendo a ciência que estuda deformação e escoamento da matéria. Estuda os materiais compreendidos entre sólidos e elásticos, que obedecem a *Lei de Hooke* e os fluídos *Newtonianos*. Os sólidos elásticos sofrem deformações proporcionais às aplicadas; já um fluído *Newtoniano*, em condições semelhantes, deforma-se com uma velocidade que aumenta com o aumento da intensidade da força, (CINCOTTO; RAGO, 1995).

A argamassa no estado fresco é constituída por suspensões reativas, as quais tem sua consistência modificada ao longo do tempo, sobretudo pela atuação do cimento. O estudo reológico destas é bastante complexo devido à sua natureza multifásica, com a presença de aglomerantes, agregados, bolhas de ar e adições minerais (ANTUNES, 2005).

As propriedades no estado fresco que influenciam diretamente na reologia das argamassas são: coesão ou estruturação interna, tixotropia, plasticidade, consistência e trabalhabilidade, sendo o seu estudo essencial já que sem propriedades satisfatórias no estado fresco é pouco provável que as propriedades desejadas no estado endurecido sejam alcançadas (BANFILL, 2003).

A consistência e a plasticidade são as propriedades reológicas básicas em termos de trabalhabilidade das argamassas, desta forma, estas devem ser avaliadas de forma sinérgica, pois atuam e influenciam diretamente a trabalhabilidade (BAUER, 2005). Por outro lado, Recena (2007) afirma que se pode entender trabalhabilidade como sendo a interação

entre consistência e coesão, onde a alteração da trabalhabilidade de uma argamassa pode se dar pela adição de água na mistura, desde que haja uma quantidade adequada de finos, preferencialmente aglomerantes, para absorvê-la, garantindo uma adequada coesão e estabilidade de volume necessária para a ocorrência de uma aderência instantânea sem segregação. O excesso de água acarretará em uma perda de coesão, tornando a argamassa mais fluida e menos trabalhável.

Existem algumas formas de melhorar a trabalhabilidade das argamassas sem a necessidade do uso excessivo de água e, portanto, sem prejudicar suas propriedades mecânicas. Uma delas é o uso de aditivos incorporadores de ar, os quais influenciam positivamente na trabalhabilidade, isso porque servem como lubrificante entre os grãos sólidos (YOSHIDA, BARROS e BOTTURA, 1995).

Antunes (2005) afirma que são diversos os constituintes que agem sobre o comportamento reológico das argamassas, como a matriz (partículas inferiores a 100 μm), os agregados (constituídos por partículas maiores), a interação com a água de amassamento, a utilização de aditivos que interferem nas forças intrínsecas do sistema e as forças extrínsecas provenientes do processo construtivo.

As diversas propriedades que caracterizam a reologia das argamassas influenciam diretamente no mecanismo da aderência, uma vez que, por exemplo, sua trabalhabilidade é determinante quanto à facilidade de espalhamento da argamassa e conseqüentemente o incremento na extensão de aderência (MARANHÃO *et. al.*, 2003).

A reologia afeta a aderência da argamassa, pois, são as deformações viscoplásticas no momento do lançamento contra o substrato, que permitem a liberação ou não do ar incorporado entre as camadas de base e revestimento. Além disso, o teor de água de amassamento pode determinar uma argamassa de reologia muito fluida, fato que pode eliminar o teor de ar incorporado para determinada energia de aplicação, porém pode resultar em poros pela evaporação da água, afetando a resistência mecânica (JOHN, 2003).

Neste sentido, a principal propriedade quando se fala em reologia das argamassas é a trabalhabilidade, sendo esta, o resultado visível das características de plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade (YOSHIDA, BARROS e BOTTURA, 1995).

A trabalhabilidade pode ser entendida como a maior ou menor facilidade de dispor a argamassa em sua posição final, cumprindo adequadamente sua finalidade, sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e uso (RECENA, 2007).

Na prática, a trabalhabilidade interfere diretamente no trabalho do operário, na aderência da argamassa ao substrato e nas propriedades da argamassa no estado endurecido, podendo alterar-se completamente em função da relação água/aglomerante, aglomerante/areia, da granulometria do agregado e da natureza e qualidade do aglomerante (YOSHIDA, BARROS e BOTTURA, 1995).

O Quadro 3 apresenta o conceito de cada uma das propriedades que influenciam no comportamento das argamassas no estado fresco.

Quadro 3 - Propriedades que influenciam a reologia das argamassas

| PROPRIEDADE | CONCEITO |
|-------------------------|--|
| COESÃO | Propriedade da argamassa em manter seus constituintes homogêneos, sem segregação. |
| TIXOTROPIA | Variação da consistência de uma argamassa em pasta, por ação de um movimento ou força de agitação. |
| PLASTICIDADE | Propriedade que permite que a argamassa deforme-se e absorva certas deformações após redução das tensões que lhe foram impostas. |
| CONSISTÊNCIA | Fluidez de uma argamassa fresca (EM 1015-3 e EM 12706). |
| TRABALHABILIDADE | Conjunto de propriedades de aplicação de uma argamassa que caracterizam sua adequação ao uso (EM 1025-9). |

Fonte: EMODICO, (2001).

Sendo assim, em um contexto prático, o que se espera de uma argamassa de revestimento é que, ao mesmo tempo, tenha viscosidade suficiente para permitir manuseio e aplicação pelo operário ao substrato e apresente tensão limite de escoamento tal que, após a aplicação, permaneça em contato com o substrato sem deslocar ou escorregar sob a ação de seu peso próprio (BAUER, 2005).

Devido à complexidade dos fenômenos reológicos e às diferentes solicitações as quais os materiais cimentícios são submetidos, a sua caracterização reológica requer uma associação de técnicas complementares, por exemplo, as argamassas colantes sofrem cisalhamento durante a aplicação, necessitando de ensaio de fluxo para simular esta situação (BETIOLI, 2007).

2.4.5 Composição e Dosagem

A definição da composição e dosagem é relativa à argamassa dosada no próprio canteiro de obras, a partir da medição e mistura dos materiais. No caso da argamassa industrializada, a composição e dosagem são definidas pelo fabricante, sendo necessário especi-

ficar uma avaliação a ser feita antes do seu emprego. A composição da argamassa diz respeito aos seus materiais constituintes, já a dosagem refere-se ao proporcionamento dos materiais, comumente denominada traço da argamassa (CARASEK, 2007).

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 (BETIOLI, 2007).

A argamassa dosada no canteiro de obras é composta, normalmente, por cimento, cal, areia, aditivos ou adições e água. Cada um desses materiais apresenta características próprias que interferem nas propriedades da argamassa de revestimento, devendo ser consideradas no momento da sua definição (BETIOLI, 2007).

Além das características dos materiais a serem empregados, existem outros fatores importantes que devem ser considerados, tais como: as condições de exposição do revestimento; as características da base de aplicação; as propriedades requeridas para a argamassa e para o revestimento; as condições de produção e controle da argamassa, as condições do revestimento e o custo (BETIOLI, 2007).

Segundo Betioli (2007), o Quadro 4 resume os principais aspectos relativos aos materiais constituintes da argamassa que devem ser considerados.

Quadro 4 - Materiais e os aspectos a serem considerados na composição e dosagem da argamassa

| MATERIAIS | ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA COMPOSIÇÃO E DOSAGEM |
|-----------------|--|
| CIMENTO | tipo de cimento (características) e classe de resistência disponibilidade e custo comportamento da argamassa produzida com o cimento |
| CAL | tipo de cal (características) forma de produção massa unitária disponibilidade e custo comportamento da argamassa produzida com a cal |
| AREIA | composição mineralógica e granulométrica dimensões do agregado forma e rugosidade superficial dos grãos massa unitária inchamento comportamento da argamassa produzida com a areia manutenção das características da areia |
| ÁGUA | características dos componentes da água, quando essa não for potável |
| ADITIVOS | uso de aditivos acrescentados à argamassa no momento da mistura ou da argamassa aditivada tipo de aditivo (características) finalidade disponibilidade e custo comportamento da argamassa produzida com o aditivo |
| ADIÇÕES | tipo de adição (características) finalidade comportamento da argamassa produzida com a adição disponibilidade, manutenção das características e custo |

Fonte: BETIOLI, 2007.

2.4.6 Argamassas tradicionais

As argamassas estão associadas à arquitetura e à construção de edifícios há milhares de anos, utilizadas de forma tradicional para a construção e também para o revestimento de paredes e de muros.

Com o objetivo de reforçar e proteger as edificações, o homem recorreu à argamassa como revestimento de superfícies, provavelmente devido à sua simplicidade, baixo custo, disponibilidade de seus componentes e por ser tradicionalmente uma solução de revestimento que conta com a aceitação dos usuários e o conhecimento por parte da mão de obra, além de permitir a execução de diversos tipos de detalhes e texturas (RUDUIT, 2009).

Tradicionalmente, as composições mais utilizadas para revestimentos externos e internos têm sido as argamassas de cimento (cimento e areia), argamassa de cal (cal e areia) e argamassas mistas (cimento, cal e areia).

Estas argamassas, por muito tempo garantiram a regularização e a proteção das paredes, mantendo boa durabilidade por longos períodos. No entanto, estes revestimentos têm

apresentado uma série de problemas, atribuídos principalmente à seleção pouco criteriosa dos materiais e desrespeito às regras de execução, somado à escassez de mão de obra especializada (TERRA, 2001).

2.4.6.1 Argamassa de Cal

Este tipo de argamassa é composto por cal, agregado miúdo e água. A pasta de cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a plasticidade e a retenção de água. A argamassa de cal recebe usualmente o nome de argamassa intermediária, ou argamassa branca, pois, quando se utiliza a cal virgem este tipo de argamassa é utilizado na maturação ou queima da cal, para posteriormente ser misturado o cimento (FIORITO, 2009).

Seu uso pode ser para emboço, reboco ou para alvenarias de vedação, por causa de sua plasticidade e por ter boas condições de endurecimento e elasticidade, além de ter propriedades bactericidas. A argamassa de cal também proporciona acabamento plano e regular (FIORITO, 2009).

2.4.6.2 Argamassa de Cimento

A argamassa de cimento *Portland* é composta, essencialmente, por cimento, agregado miúdo e água. Adquire elevada resistência mecânica em pouco tempo, porém, apresenta baixa trabalhabilidade e baixa retenção de água. Este tipo de argamassa tem emprego específico para certas situações, como por exemplo, na confecção de pisos como argamassa armada, sendo raramente utilizadas em revestimentos de alvenaria. É muito utilizada na confecção de chapisco para ser aplicada nas paredes de alvenaria e estruturas de concreto para aumentar a resistência e aderência do revestimento (SILVA, 2006).

As argamassas de cimento são chamadas de argamassas hidráulicas porque se diferenciam bastante das aéreas, pois, iniciam o processo de pega e endurecem principalmente imersas em água, sendo caracterizada por sua alta resistência mecânica, impermeabilidade e resistência à abrasão, conferindo-lhe durabilidade (SILVA, 2006).

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 (CARASEK, 2007).

2.4.6.3 Argamassa Mista

Este tipo de argamassa utiliza basicamente cimento, cal, agregado miúdo e água. Segundo Sabbatini (1984), os ingleses utilizam a proporção 1:3 (aglomerante: areia seca) em volume como traço básico, pois, partem do princípio de que, com esta proporção, os vazios da areia são preenchidos pela pasta aglomerante (cimento e cal). Esta proporção é muito utilizada também no Brasil, como os tradicionais traços em volume 1:1:6 (cimento : cal : areia) para assentamento e revestimentos externos e 1:2:9 para revestimentos internos (SILVA, 2006).

2.4.7 Argamassa de Revestimento

As argamassas de revestimento recobrem paredes, pisos e tetos com funções niveladora e estética, colaborando para o conforto termo acústico e, também, para a estanqueidade do sistema de vedação. Desta forma, os requisitos de desempenho em uso das argamassas estão relacionados às propriedades finais no estado endurecido, como a porosidade, a resistência mecânica e a aderência, o módulo de elasticidade e a permeabilidade, considerados parâmetros importantes para promover a maior durabilidade e conforto das edificações (CARDOSO, 2009).

O revestimento de argamassa apresenta importantes funções como:

- Proteger os elementos de vedação dos edifícios da ação direta dos agentes agressivos;
- Auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções como, por exemplo, isolamento termo acústico e a estanqueidade à água e aos gases;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação, servindo de base regular adequada ao recebimento de outros revestimentos ou constituir-se no acabamento final;
- Contribuir para a estética da fachada (CARASEK, 2007).

É importante ressaltar que não é função do revestimento dissimular imperfeições grosseiras da base, muito embora na prática, esta situação ocorra com frequência, devido à falta de cuidado no momento da execução da estrutura e da alvenaria, que ficam desaprumadas e desalinhadas. Com isso, é necessário esconder as imperfeições com a argamassa, o

que compromete o cumprimento adequado das reais funções deste revestimento (CARDOSO, 2009).

Os revestimentos de um modo geral, são sempre constituídos de diversas camadas de materiais diferentes ligadas entre si, sendo que, qualquer deformação em uma destas camadas resultará no aparecimento de tensões em todo o conjunto. Tais tensões dependem da espessura, do módulo de elasticidade e, enfim, de todas as características físicas próprias de cada camada (BAUER, 2005).

As deformações podem ser de causas endógenas como, por exemplo, a retração do concreto e das argamassas e a dilatação higroscópica dos revestimentos cerâmicos ou causadas por esforços externos (BAUER, 2005).

O uso de argamassas de revestimento surgiu com o início do processo de urbanização das cidades, devido ao interesse de proteger a edificação com uma pele. Os primeiros estudos sobre aderência de argamassas ao substrato surgiram na década de 30, sendo que apenas na década de 90 houve uma expansão nos estudos sobre o tema (GONÇALVES, 2004).

Segundo a NBR 13530 (ABNT, 1995), os revestimentos de argamassa são classificados de acordo com os seguintes critérios:

1. Quanto ao número de camadas de aplicação:
 - Revestimento de camada única;
 - Revestimento de duas camadas.
2. Quanto ao ambiente de exposição:
 - Revestimentos de paredes internas;
 - Revestimentos de paredes externas;
 - Revestimento com contato com o solo.
3. Quanto ao comportamento à umidade:
 - Revestimento comum;
 - Revestimento de permeabilidade reduzida;
 - Revestimento hidrófugo.
4. Quanto ao comportamento à radiação:
 - Revestimento de proteção radiológica.
5. Quanto ao comportamento ao calor:
 - Revestimento termoisolante.
6. Quanto ao acabamento de superfície:
 - Camurçado;

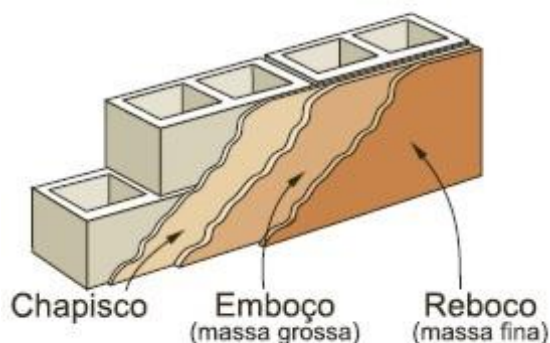
- Chapiscado;
- Desempenado;
- Sarrafeado;
- Imitação do travertino;
- Lavado e
- Raspado.

Neste contexto, as argamassas são destinadas a proteger as paredes contra a umidade externa ou preparar superfícies para receber a pintura ou outros tipos de revestimentos. O revestimento de argamassa, segundo a NBR 13529 (ABNT,2013) pode ser definido como o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas sobrepostas aptas a receberem acabamento decorativo ou constituírem-se em acabamento final.

A NBR 13529 (ABNT, 2013) determina que o revestimento pode ser constituído por camada única, ou seja, um único tipo de argamassa aplicado sobre o substrato a ser revestido ou em duas camadas, onde o revestimento é constituído por argamassa de emboço e reboco. Nesta perspectiva o chapisco é considerado como um tratamento superficial do substrato para receber o reboco e o emboço.

O revestimento de uma parede, conforme pode ser visualizado na Figura 15 é constituído por três camadas: chapisco, emboço e reboco.

Figura 15 - Camadas que constituem o revestimento



Fonte: ABCP (2009).

A NBR 13529 (ABNT, 2013), define a argamassa para revestimento como sendo uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

Para o uso do revestimento do tipo emboço e reboco, a camada de reboco deve ter, no máximo 5 mm, sendo o restante da espessura referente à camada de emboço. As camadas de argamassas de revestimentos, segundo Sabbatini (1984), recebem as seguintes denominações: emboço, reboco, massa única e chapisco.

As espessuras admissíveis para os revestimentos de argamassa estão apresentados na Tabela 9 de acordo com a NBR 13749 (ABNT,1996).

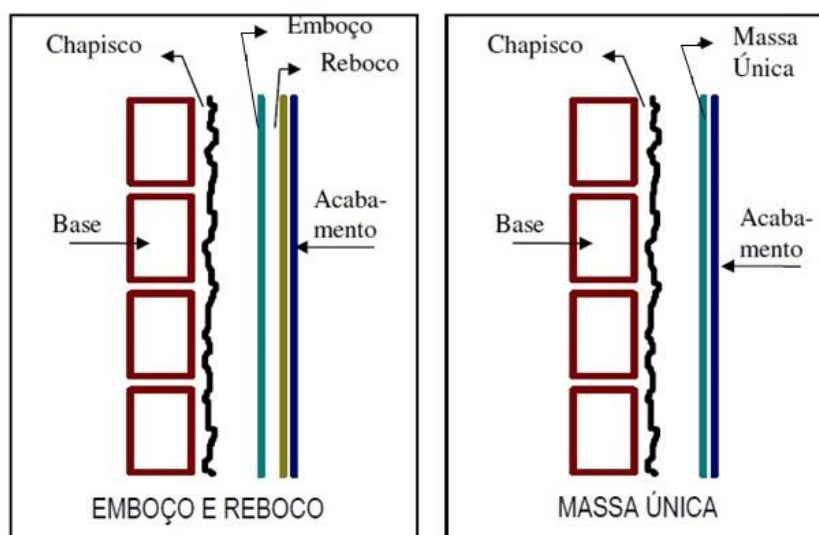
Tabela 9 - Espessuras admissíveis para o revestimento de argamassa

| REVESTIMENTO | ESPESSURA (mm) |
|---------------------------|----------------|
| Parede interna | 5 e 20 mm |
| Parede externa | 20 e 30 mm |
| Tetos internos e externos | 20 mm |

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 1996).

A Figura 16 ilustra o revestimento da vedação vertical do tipo emboço e reboco e do tipo massa única (reboco paulista). Estes dois tipos de revestimento podem ser aplicados sobre uma camada de preparo da base, denominada chapisco e podem receber sobre a sua superfície uma camada de acabamento decorativo (SABBATINI, 1984).

Figura 16 - Camadas do revestimento de argamassa da vedação vertical: emboço, reboco e massa única



Fonte: Sabbatini,(1984).

Nos revestimentos constituídos por duas camadas, emboço e reboco, cada uma delas cumpre funções específicas, sendo o emboço uma camada de regularização da base e o reboco, uma camada de acabamento. Já os revestimentos constituídos por uma única camada,

a mesma cumpre as duas funções de regularização da base e acabamento (SABBATINI, 1984).

2.4.8 Argamassas expansivas

A argamassa expansiva é um material com finalidades especiais, como a produção de blocos de vedação, o encunhamento de paredes, a produção de revestimentos de baixa massa específica, o condicionamento térmico específico e o uso como agente demolidor não explosivo.

Como agente demolidor, a argamassa expansiva é utilizada para deslocar a rocha em função de seu componente majoritário, a cal virgem. Em contato com água, iniciam-se reações de hidratação, com aumento de volume durante o progresso dessas reações, promovendo, quando em confinamento, grandes pressões sobre as paredes confinantes, as quais chegam aproximadamente a 78 MPa. Essas tensões geram fissuras no meio confinante (rocha, concreto ou outro meio que se deseja demolir), cuja magnitude e direção dependem do balanço de esforços atuantes no referido meio (LUZ; BALAREZO; PEREIRA, 2003).

No caso particular dessas argamassas, os parâmetros atuais indicam que o início da reação deve ocorrer de 15 minutos a 30 minutos após a adição de água e possua pressão expansiva superior a 7000 ton./m², num período de tempo de no máximo 30 horas após sua aplicação (CAIMEX, 2015).

A argamassa expansiva produz uma ruptura de forma segura e precisa, sem causar qualquer tipo de vibração, explosão, ruído, tremor ou gases. É bastante efetiva em espaços abertos e reduzidos, em zonas de difícil acesso com risco explosivo ou inflamável, viabilizando projetos onde não se podem utilizar explosivos por questões de segurança. A mesma pode ser utilizada em zonas urbanas, trabalhos de cimentação, demolição de vigas e estruturas, edificações, em obras públicas, em canteiros de mineração, túneis, obras portuárias, poços e canalizações, como também em demolições submarinas (CAIMEX, 2015).

Normalmente, a aplicação da argamassa expansiva não requer mão de obra especializada, bastando serem seguidas rigorosamente as instruções do fabricante para que o manuseio e uso sejam adequados ao produto. O consumo unitário de material expansivo fica em torno de 80 kg/m³, para desmonte industrial em pedreiras (PINHEIRO, 1999).

Shiro (2006) indica que uma argamassa expansiva comercial é composta de cal, argila e gesso misturados em proporções determinadas. Essa mistura é calcinada em forno

rotatório à 1500°C. A massa resultante é então triturada até atingir 2000 a 3000 cm²/g de área específica dos grãos.

Estas argamassas são preparadas pela pulverização de um clínquer obtido principalmente pela mistura de óxidos de cálcio, óxidos de silício (SiO₂) e sulfato de cálcio (CaSO₄) (KAWANO, 2015). De acordo com Moyer (2015), é formado o clínquer de uma mistura, onde ele destaca o uso de óxido de cálcio (80% a 95%), cimento *Portland*, hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e carbonato de cálcio (CaCO₃).

Luz; Balarezo; Pereira (2003) estudaram o emprego de argamassa expansiva no corte de blocos para cantaria e nos processos de termo consolidação das peças já esculpidas para o restauro nas cidades barrocas de Ouro Preto e Mariana do estado de Minas Gerais.

Huynh; Laefer (2009) citam uma composição química para argamassa expansiva industrializada conforme exposta na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição química das argamassas expansivas industrializadas

| SUBSTÂNCIA | FRAÇÃO (%) |
|--------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 1,5 - 8 |
| Al ₂ O ₃ | 0,3 - 0,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,2 - 3 |
| CaO | 81 - 96 |
| MgO | 0,0 - 1,6 |
| SO ₃ | 0,6 - 4 |

Fonte: Huynh e Laefer (2009).

Uma das propostas do presente estudo é verificar a expansão de argamassas provocada pela incorporação de partículas de alumínio reciclado.

2.4.8.1 Agentes expansivos

Os agentes expansivos são produtos que permitem compensar a retração existente durante a pega da pasta, induzindo a uma expansão na argamassa, a qual possibilita melhorar a homogeneidade e a estabilidade da pasta, com a diminuição do risco de exsudação e o aumento da retenção de água. São elementos que, quando em contato com os constituintes do cimento, produzem pequenas bolhas de gás hidrogênio responsáveis pelo aumento do volume do produto (GONÇALVES, 2010).

De acordo com Venuat; Papadakis (1961) apud Paulo (2006), os agentes expansivos são produtos que se contrapõem à retração, produzindo uma expansão que não afeta a estabilidade da argamassa endurecida. Esses produtos apresentam os seguintes efeitos sobre a argamassa no estado fresco:

- Elevação da fluidez das argamassas;
- Melhor aderência ao substrato;
- Homogeneidade da massa;
- Diminuição da segregação;
- Aumento da retenção da água na pasta;
- Redução da retração característica de argamassas durante a pega, proporcionando uma expansão controlada da massa;
- Aumento da plasticidade;
- Diminuição da relação água/cimento;
- Redução da massa específica;
- Diminuição da resistência mecânica.

A expansão que ocorre na pasta de cimento envolve a formação de sulfoaluminatos de cálcio. As duas teorias mais aceitas para explicar o mecanismo da expansão são a teoria dos cristais e a teoria do inchamento por adsorção de água (METHA; MONTEIRO, 1994; KURDOWSKI; GEORGE; SORRENTINO, 1986).

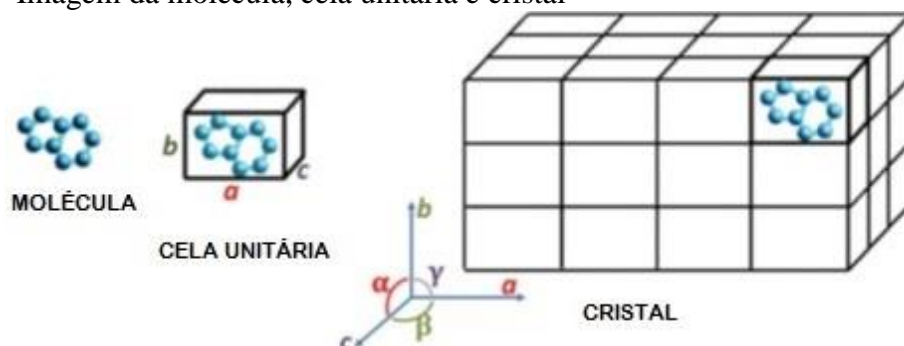
Com base na teoria dos cristais, a estrutura cristalina da pasta endurecida possui espaços vazios, que são menores quando os átomos estão livres no estado líquido, onde as pontes de hidrogênio são mais flexíveis. A formação do cristal provoca uma expansão de volume, uma vez que o produto gerado ocupa um maior espaço do que os componentes que lhe deram origem (ALMEIDA, 2012).

Os cristais são formados por conjuntos de átomos organizados no espaço periodicamente, posicionados nos vértices de figuras geométricas específicas para cada material, constituindo a cela cristalina. Essa é, portanto, a menor unidade de cristal que se repete no espaço, recebendo ainda, o nome de célula unitária. Dentro dela, podem ser encontrados desde um até milhares de átomos (ALMEIDA, 2012).

Para Ben-Abraham (2007) essa estrutura cristalina é responsável pelo comportamento de alguns sólidos que apresentam ordem posicional de longo alcance, caracterizada pelo agrupamento de seus componentes (átomos, íons ou moléculas) segundo o modelo de repetição periódica, denominado cela unitária. O que diferencia o cristal de uma molécula é

que nessa os átomos se aglomeram desordenadamente para a constituição de um sólido, como o vidro, por exemplo. O cristal é, portanto, uma figura tridimensional (3D), conforme pode ser visualizado na Figura 17.

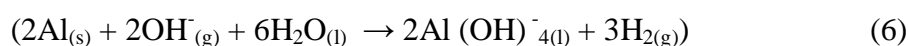
Figura 17 – Imagem da molécula, cela unitária e cristal



Fonte: Caracelli (2011).

Nos estudos de Kuperman (1992), os elementos utilizados para o desenvolvimento de um concreto expansivo e de uma argamassa expansiva foram: o caulim, o gesso e a pozolana.

Para a fabricação de concreto celular auto clavado, utiliza-se cal micronizada, cimento, areia fina como matérias de base e uma pequena quantidade de pó de alumínio como agente expansivo. O pó de alumínio reage com os componentes alcalinos do cimento, liberando o gás hidrogênio pela expansão da argamassa, onde a incorporação desses agentes expansivos a pasta de cimento provoca a incorporação de bolhas de ar junto ao reticulado cristalino, conforme a Reação 6.



A liberação deste gás expande a mistura, formando inúmeras bolhas de ar, de dimensões reduzidas, dispersas igualmente em toda a massa do material, resultando em um material sólido, leve e termicamente isolante. Após a desmoldagem, o produto vai para a autoclave, onde é submetido a 10 atm. de pressão e à temperatura de 200°C durante um período de 12 horas. Esse processo faz com que ocorra uma transformação de fase, surgindo um componente altamente resistente, a tobermorita. Os blocos de concreto celular auto clavados alcançam uma resistência à compressão de 2,5 MPa e uma massa específica de 550 kg/m³ (UFRGS, 2015; LAREX, 2015).

No concreto celular espumoso, a incorporação de ar é alcançada pela adição de espuma obtida num gerador, a qual em seguida é misturada à argamassa. O concreto espumoso é moldado “in loco”, sua massa específica varia de 1000 kg/m³ a 1800 kg/m³ e a respectiva resistência à compressão aos 28 dias varia de 4 MPa a 25 MPa (LAREX, 2015).

2.4.8.2 Ação expansiva do alumínio

Nos últimos anos, estão sendo desenvolvidos estudos que analisam as reações do pó de alumínio com a água, para serem utilizados na fabricação do concreto refratário contendo cimento, expansão em matrizes cimentícias decorrente da corrosão do alumínio, provando que quanto menor o pH da matriz menos eficaz será o desempenho do pó de alumínio, além da geração do gás hidrogênio decorrente de incorporação de partículas inseridas num compósito cimentício, verificando que as taxas de liberação de hidrogênio podem ser elevadas por meio da incorporação de sais inorgânicos solúveis em água, como cloreto de potássio (KCl) e cloreto de sódio (NaCl) (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

Estudos realizados com as dimensões das partículas do pó de alumínio, com parâmetros como a temperatura, o pH, bem como os aditivos, alteram a cinética da reação Al-H₂O e a quantidade de gás de hidrogênio gerado, sendo que, quanto mais elevada for a temperatura da água, maior é a taxa de produção de hidrogênio e mais curto o tempo de indução. O Al, as ligas de alumínio e até mesmo a sucata de Al, poderiam ser usados para gerar hidrogênio através de um sistema ambientalmente correto. Ativando a reação com o cloreto de sódio, uma vez que a reação do alumínio com a água é exotérmica, pode-se aumentar a taxa de geração de hidrogênio (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

Este novo conceito de sistema de conversão de energia com base na combustão de alumínio com água pode ser considerado uma fonte de energia bastante promissora na aplicação em transporte pelo fato de ser um combustível com baixas emissões de poluentes, além do baixo impacto ambiental uma vez que a oxidação do alumínio é completamente livre de gases do efeito estufa e produz apenas hidrogênio e alumina, contribuindo desta maneira, para a diminuição da exploração de reservas de bauxita, pois, pode ser utilizado como matéria prima o alumínio reciclado (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

A maior parte dos estudos realizados demonstrou a viabilidade de incorporação de resíduos, que a importância da utilização do pó de alumínio, ou das ligas de alumínio, e até mesmo da sucata de alumínio poderiam ser usados para gerar o hidrogênio através de um sis-

tema ambientalmente seguro e reciclável, além da geração de energia limpa, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e proteção ambiental (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

De acordo com os estudos apresentados por Studart *et. al.* (2005), um uso particular do pó de alumínio é na produção de concreto refratário, uma vez que a geração de poros minimiza o problema do estilhaçamento ou explosão em função da elevação da temperatura. Durante a desidratação ocorre um aumento da permeabilidade dos concretos através da geração de H₂ (hidrogênio) gasoso decorrente da reação com H₂O, acentuando a formação de poros abertos no interior da microestrutura.

Diante desse contexto, a compreensão dos mecanismos envolvidos na cinética da reação, ou seja, a possibilidade de extrair algumas conclusões sobre o que ocorre em nível molecular durante a reação entre o Al e a H₂O (pH, temperatura, força iônica e espécies) em concretos refratários é de fundamental importância para a aplicação adequada do pó de alumínio como uma adição geradora de gás que viria provocar a expansão (STUDART *et. al.*, 2005).

Uma característica comum é controlar a reação do pó de alumínio com a água para se obter a formação de gel de alumina, boemita (AlOOH) e gibsita (Al(OH)₃), conforme apresentadas nas Reações 7, 8 e 9, respectivamente (STUDART *et. al.*, 2005):



O papel do alumínio, quando utilizado em concretos refratários à base de carbono é atuar como um material de sacrifício para ser oxidado antes da oxidação do carbono para ambientes ricos em O₂ (STUDART *et. al.*, 2005).

Segundo Studart *et. al.* (2005), a presença de aluminato de cálcio nos concretos refratários leva a alterações significativas da solução aquosa de inter partículas e pode afetar a reação entre o pó de alumínio e a água, Al - H₂O, além de apresentar um aumento acentuado de temperatura, por se tratar de uma reação exotérmica. Em contato com a água, as partículas de cimento começam a dissolver, obtendo-se Ca²⁺ + (Al(OH)₄⁻), elevando-se o pH e a força iônica do meio aquoso até atingir um nível de saturação que persiste até serem formados núcleos de hidratos de aluminato de cálcio, causando uma diminuição acentuada na concentração de Ca⁺⁺ + 2Al(OH)⁻ no meio líquido.

A elevada taxa de dissolução da camada protetora do hidróxido de alumínio em função do meio alcalino do concreto, cujo pH é da ordem de 12,6 justifica as velocidades da reação significativamente elevadas observadas nesses concretos (STUDART *et. al.*, 2005).

A dissolução do hidróxido de alumínio depende da concentração de íons de aluminato $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ observadas as taxas de reação durante o processo de cura. A velocidade de reação mais baixa nas fases iniciais se deve à elevada concentração de íons de aluminato presentes no cimento e resultantes da dissolução. A precipitação dos íons de aluminato em hidratos de aluminato de cálcio justifica a velocidade de reação mais elevada observada numa fase subsequente (STUDART *et. al.*, 2005).

Segundo Kinoshita *et. al.* (2013), a expansão decorrente da corrosão do alumínio em pastas à base de cimento *Portland* produzindo o gás de hidrogênio causa problemas em determinadas estruturas, tais como aquelas usadas para encapsulação de alumínio contendo resíduos nucleares. Embora a corrosão do alumínio em matrizes de cimentos seja conhecida, a sua extensão ainda não está bem estabelecida.

Sistemas à base de cimento, que contêm níveis elevados de escória de alto forno pulverizada ou cinzas volantes, são utilizados para encapsular uma variedade de resíduos sólidos e líquidos da indústria nuclear (MILESTONE, 2006). Uma das principais características desses sistemas é o ambiente alcalino elevado, com pH da ordem de 12,6. Isto é vantajoso para o encapsulamento de alguns resíduos, tais como metais pesados, promovendo a precipitação (ATKINS, GLASSER, 1992; GLASSER, 1993).

Por outro lado, pode não ser adequado para a incorporação de metais reativos, em especial resíduos contendo alumínio, quando essa expansão é indesejável, pelo fato do alumínio sofrer corrosão e conseqüente expansão em soluções alcalinas (TABRIZI *et al.*, 1991; MOON; PYUN, 1997). O processo de corrosão com pH acima de 8,5 é considerado como sendo a oxidação do metal de alumínio para íons de aluminato de $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, através da camada de óxido (Al_2O_3) formado na superfície do metal de alumínio (MOON; PYUN, 1997).

Segundo Setiadi *et al.* (2006), essa expansão pode causar problemas para a integridade da forma cimentada dos resíduos e o aumento da porosidade, indesejável em estruturas usadas para a encapsulação de resíduos.

De maneira geral, é aceito que a redução do pH do sistema de cimentação ou da água livre irá reduzir a reação de alumínio na matriz de cimento (ZHOU, MILESTONE, HAYES, 2006; SETIADI *et al.*, 2006).

De acordo com Setiadi *et al.* (2006), é possível reduzir a corrosão do alumínio utilizando uma mistura de escória de alto forno e cimento *Portland* na proporção de 9:1. A redução da corrosão do alumínio foi observada com grandes quantidades de etringita que está sendo formada, nestes casos, devido à disponibilidade de excesso de sulfato. A redução da corrosão foi atribuída à quantidade reduzida de água livre disponível para as reações, devido à incorporação de excesso de água à etringita, e à redução do pH interno do cimento.

Kinoshita *et al.* (2013) investigaram o limite máximo de corrosão do pó de alumínio em sistemas baseados em cimento *Portland*. Esses sistemas foram produzidos com a adição de 7 g de pó de alumínio (<1 mm Φ) às matrizes de cimento *Portland* puro ou a uma mistura 4:1 de escória de alto forno e cimento *Portland*. Os materiais foram misturados manualmente em 50 ml de água durante 5 minutos, seladas e curadas à temperatura ambiente durante 21 dias.

Nesse estudo foram produzidas amostras contendo pequenas placas de alumínio com água destilada, poli fosfato de sódio e/ou ácido bórico, esse último utilizado para controlar a configuração acelerada do aluminato de cálcio causada pelo poli fosfato de sódio e para melhorar a trabalhabilidade (SWIFT, KINOSHITA, COLLIER, 2013).

O exame visual revelou um aumento crescente no volume das amostras em função da elevação da quantidade de pó de alumínio. Observou-se também o aumento da porosidade em decorrência da geração de gás de hidrogênio. Foi constatado um aumento no consumo de água decorrente da corrosão do alumínio, a despeito da hidratação do cimento (ZHOU, MILESTONE, HAYES, 2006; COLLIER, MILESTONE, SWIFT, 2010).

A presença de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) diminuiu proporcionalmente ao aumento da quantidade do alumínio. Foram identificadas baixas concentrações para alita não hidratada (C_3S) e belita (C_2S). A gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) foi identificada nos sistemas contendo alumínio e isto parece ser a principal fase cristalina formada a partir da reação do alumínio com o cimento *Portland*. Observou-se ainda baixos teores de sulfato (SWIFT, KINOSHITA, COLLIER, 2013).

Na presença de alumínio, a quantidade de C-S-H parece ter diminuído ligeiramente enquanto que a etringita e o monossulfato aumentaram ligeiramente às temperaturas de 200°C-400°C, apresentando um pico endotérmico em torno de 260°C, indicando um gel de alumina amorfo (MEHER, BASU, GHATAK, 2005; SZETU *et al.*, 2000).

Juntamente com o pico principal de desidroxilação de gipsita em torno de 280°C-310 °C. Ambos os picos aumentaram em intensidade, com o aumento do teor de Al,

onde o gel de alumina amorfo parece ser o produto da reação principal que contribui para a corrosão do alumínio. O pico distinto atribuído à desidroxilação da portlandita em torno de 450°C diminuiu à medida que a quantidade de alumínio no sistema aumentou. Isto é mais provável porque íons hidróxido (OH⁻) foram consumidos pela reação de corrosão de alumínio juntamente com o gel de alumina amorfo. Um pequeno pico também foi observado a 660°C, a temperatura de fusão do alumínio metálico, sugerindo que uma pequena quantidade de metal de alumínio que não reagiu permaneceu no sistema quando 7,0% em massa de alumínio foi adicionado (KLOPROGGE, RUAN, FROST, 2002; ZHU, FANG, LI, 2010).

Os dados indicam que a quantidade de Ca(OH)₂ em ambos os sistemas diminuiu com o aumento do conteúdo de alumínio, mais do que seria esperado a partir de diluição simples devido à adições de alumínio. Essa redução de Ca(OH)₂ corresponde à quantidade de alumínio corroído no sistema. A corrosão do alumínio consome OH⁻ e a água no sistema, o nível de OH⁻ torna-se demasiado baixo para sustentar a formação suficiente de Ca(OH)₂ e ainda mais corrosão do alumínio (STUDART *et. al.*, 2005).

Em todos os sistemas foi observada a geração de hidrogênio gasoso, embora as placas de alumínio imersos na matriz de cimento não tivessem corroído completamente depois de 28 dias de reação. A taxa de liberação de gás hidrogênio foi de 2,07 ml/cm²/dia nos primeiros 7 dias, e a taxa reduzida para 0,02 ml/cm²/dia entre 7 e 28 dias. Essa redução é mais provável pelo esgotamento de hidroxilas (OH⁻) no ambiente em torno da placa de alumínio devido à reação de corrosão intensa inicial de alumínio. Foi observado ainda, que a alteração do pH durante essas reações de conversão foi mínima, e resultaram na liberação de um pequeno volume de água que possibilitou a reação posterior do material anidro restante. Os autores sugeriram que a quantidade de corrosão de alumínio em um sistema baseado no aluminato de cálcio corresponderia à extensão da reação de hidratação do cimento (STUDART *et. al.*, 2005).

Os resultados, segundo Kinoshita *et. al.* (2013), mostraram que a quantidade máxima de pó de alumínio utilizada nesse processo de corrosão no sistema de cimento *Portland* puro foi de 6% em massa. A presença de íons hidróxidos no sistema determina a extensão da corrosão do alumínio, principalmente a presença de portlandita (Ca(OH)₂), sendo que quanto menor o teor desse hidróxido, maior terá sido a corrosão do alumínio. A corrosão do alumínio foi reduzida para 2,3% em massa do sistema escória de alto forno pulverizada-cimento *Portland*, devido à reduzida concentração de OH⁻ por diluição de cimento *Portland* e

o aumento do volume de água eficaz. Quanto menor o pH da matriz menos eficaz será o desempenho do pó de alumínio.

De acordo com os estudos realizados por Czech; Troczynski (2010), o alumínio sofre corrosão em ambiente alcalino, esse comportamento justifica a geração de hidrogênio decorrente do contato das partículas inseridas num compósito cimentício.

Conforme Czech; Troczynski (2010), a geração de hidrogênio decorre da desintegração química de ligas de alumínio ou do próprio alumínio em soluções aquosas, segundo as Reações 10 e 11. A partir de 1,00 g de alumínio a 25°C e 1 atm, obtém-se 1,36 litros de H₂ gasoso.



Termodinamicamente o alumínio é um dos metais mais reativos, porém sua corrosão é lenta em condições de pH quase neutro, devido ao filme passivo de óxidos hidratados que impede o acesso dos reagentes na superfície do metal (VARGEL, 2004; BUNKER *et. al.*, 2002). Essa velocidade de reação aumenta à medida que aumenta a alcalinidade do meio. Isso explica a geração de hidrogênio no concreto com a incorporação do pó de alumínio, uma vez que a taxa de dissolução da película de óxido, ou seja, a corrosão do Al é especialmente alta em fortes soluções ácidas e alcalinas (DELTOMBE; POURBAIX, 1958; LAWSON, 1974).

As taxas de liberação de hidrogênio podem ser elevadas por meio da incorporação de sais inorgânicos solúveis em água, tais como cloreto de potássio (KCl) e cloreto de sódio (NaCl) (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

O contato do alumínio com KCl e NaCl, após 1 h de reação, promove a sua corrosão em teores da ordem de 80% e 70%, respectivamente, passando para Al(OH)₃ e AlOOH e liberando 1095 cc e 970 cc de hidrogênio por 1,00 g de Al, na mesma ordem (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

A liberação de H₂ ao longo da primeira hora de reação se verifica em três fases distintas. A primeira fase, denominada período de indução, ocorre no período compreendido até 5 minutos e depende do tipo de aditivo, da temperatura da água (55°C) e do tempo de moagem. A segunda fase, caracterizada por taxas mais elevadas de geração de hidrogênio (até 450 cc de H₂/min por 1,00 g de Al), com duração igual ou superior a 5 minutos. Esta fase é

seguida pela fase final de moderadas a baixas taxas de geração de hidrogênio (1-20cc de H₂/min por 1,00 g de Al) (CZECH; TROCZYNSKI, 2010).

A moagem interfere diretamente no comportamento do alumínio em contato com o cimento hidratado, uma vez que a deformação plástica repetitiva decorrente do processo de moagem muda a sua microestrutura e redistribui os constituintes e afeta a magnitude das tensões residuais, o que faz com que o Al reaja mais rapidamente (SURYANARAYAMA, 2001; LALANDE *et. al*, 1999).

Os experimentos desenvolvidos por Mahmoodi; Alinejad, (2010) visaram o aumento da taxa de geração de hidrogênio na reação de alumínio e água, para melhorar a atividade das partículas de alumínio e utilizar o calor liberado durante a reação, obtido por meio do desenvolvimento de novas superfícies de moagem de partículas de alumínio em conjunto com o cloreto de sódio.

O método estudado por Mahmoodi; Alinejad, (2010), baseia-se na moagem de alumínio juntamente com sal, o qual serve como uma pequena cobertura. Durante a moagem, as partículas de sal e de alumínio são transformadas em partículas ainda menores. Imergindo o pó de alumínio na água, as partículas de sal são lavadas e tem início a reação. A redução da dimensão das partículas e a elevação da temperatura da água aceleram a solução salina, aumentando a cinética da reação e reduzindo a sua duração, o que eleva a taxa de produção de hidrogênio e faz com que esse flua para fora das nano partículas de alumínio e impeçam que a camada passiva da AlOOH seja formada sobre as partículas e que o interior dos átomos tenha contato com a água.

As partículas ativadas, ao serem envolvidas por esse sal não se reoxidam quando expostas ao ar. Desse modo, a imersão do pó ativado em água quente faz com que as partículas de cloreto de sódio (NaCl) sejam lavadas e liberem o hidrogênio a uma taxa de até 100% de eficiência, sendo que a velocidade da reação depende da temperatura inicial da água. O valor ideal de razão molar de sal/alumínio foi 2 para alcançar alta ativação e 100% de capacidade de armazenamento (MAHMOODI; ALINEJAD, 2010).

O hidrogênio tem provado ser um transportador de energia limpa com alto poder calorífico, pode ser extraído por meio de diversos métodos como: biológicos, químicos e eletrólise da água, cada um dos quais com suas vantagens e desvantagens (HOFFMANN, 2002; MURADOV, VEZIROGLU, 2008). É produzido recentemente através de uma reação entre uma substância como fonte de hidrogênio e um metal como material de hidrólise (WEGNER *et al*. 2006; GROSJEAN *et al*. 2006).

A água é considerada a substância mais promissora, devido aos seus elevados teores de hidrogênio, (TZIMAS *et al.* 2003). O alumínio é uma boa opção para a hidrólise de metal, por ser abundante, além de produzir através da reação hidróxido de alumínio e água, o óxido de alumínio e/ou o hidróxido de alumínio precipitado, com características ambientais e inúmeras aplicações industriais como a produção da alumina, tratamento de água ou retardante de chamas (MISRA, 2004).

O uso de aditivos, tais como: silício, grafite ou bismuto, no teor de 7% da massa de alumínio revelaram uma aceleração na reação e apresentaram taxas maiores de geração de hidrogênio, chegando a taxas médias de 108 W, 169 W e 287 W ml/min por 1,00 g de Al à temperatura inicial de 55°C; 249 W, 339 W e 713 W ml/min por 1,00 g de Al à temperatura inicial de 70°C. Ativando a liga ou o compósito com o sal, pode-se aumentar a taxa de geração de hidrogênio. Os íons gerados pela dissolução do sal em água ajudam a aumentar a corrosão segundo Woodall; Allen; Ziebarth (2008); Fan; Xu; Sun (2007), sendo que esse aumento da temperatura da água, segundo Hiraki *et al.* (2005), aumenta a taxa de geração de hidrogênio, uma vez que a reação entre o alumínio e a água é exotérmica.

O pó de alumínio gerador de hidrogênio com eficiência de 100%, segundo os autores, ficou armazenado ao ar durante dois meses, produzindo uma taxa média de 101W e 210 ml/min por 1,00g de pó de alumínio quando imerso em água à temperaturas iniciais de 55°C e 70°C. Esse método se baseia na remoção mecânica da camada de óxido de alumínio em torno de partículas, quebrando-as; quando as partículas de alumínio e de sal são moídas, dois eventos ocorrem de forma simultânea, as partículas de sal cortam as partículas de alumínio em partes menores e cobrem-nas impedindo sua oxidação ao ar. A moagem do conjunto sal e alumínio reduz a dimensão das partículas de alumínio a valores inferiores a 100 µm, fazendo com que o contato dessas partículas com a água à altas temperaturas aumente notavelmente a cinética da reação (MAHMOODI; ALINEJAD, 2010; PAUL, HOFFMANN, 1986).

As reações iniciaram imediatamente após o contato do pó com a água, devido à formação de células galvânicas como resultado de aumento na taxa de corrosão, acentuado pela presença do aditivo devido ao potencial eletroquímico que favorece a geração de hidrogênio (MAHMOODI; ALINEJAD, 2010).

Conforme estudos realizados por Franzoni *et al.* (2010), pode-se produzir hidrogênio e energia através da combustão de alumínio com a água. Em suas experiências é proposto um sistema capaz de fornecer hidrogênio pressurizado e vapor de alta temperatura

juntamente com calor, demonstrando a eficiência de conversão de alta energia, sendo compatível com os requisitos de sustentabilidade ambiental. Uma vez removida a camada de óxido de alumínio, o alumínio puro pode reagir com a água produzindo a alumina e o hidrogênio, liberando uma quantidade significativa de calor que pode ser utilizado para produzir vapor de água sobreaquecido. Esse hidrogênio pressurizado, bem como o vapor sobreaquecido, podem ser utilizados num sistema de potência através de uma turbina para desenvolver energia elétrica ou mecânica. O hidrogênio pode ser armazenado para posterior utilização.

A produção de hidrogênio e energia combinada baseia-se na combustão de alumínio com a água em um sistema de geração de hidrogênio e de conversão de energia. A oxidação do alumínio com água tem sido estudada desde o início da década de 1950, devido à sua utilização na propulsão de foguete (BECKSTEAD, 2005), bem como na propulsão subaquática (FOOTE; THOMPSON; LINEBERRY, 2001; MILLER; HERR, 2004) e como um método de produção de hidrogênio em alta velocidade com propulsão e respiração aérea (INGENITO, BRUNO, 2004). O alumínio reage com os produtos da combustão do oxidante energético e aglutinante, tais como a água e o dióxido de carbono.

O novo conceito de sistema de conversão de energia com base na combustão de alumínio com água, proposto por *Franzoni et al.* (2010), se torna muito interessante, devido ao baixo impacto ambiental da oxidação de alumínio com a água, bem como para aplicações em campos específicos e confinado, mas também para os sistemas de conversão de energia. Na verdade, a reação produz alumina e hidrogênio, juntamente com uma quantidade significativa de calor. Um aspecto crítico para o emprego de combustão de alumínio com a água, conforme Woodall, Allen, Ziebarth (2008) apud *Franzoni et al.* (2010), é a remoção da camada de óxido que eventualmente se forma inicialmente, e a inibição da sua formação, durante o processo de oxidação. Os métodos utilizados na resolução dessas questões visam diferenciar as tecnologias existentes que exploram a reação de combustão Al-H₂O.

A grande vantagem dos sistemas de conversão de energia que utilizam a combustão de alumínio com a água, segundo *Franzoni et al.* (2010), é que a oxidação do alumínio é completamente livre de gases do efeito estufa e produz apenas hidrogênio e alumina. Os autores destacam ainda que a alumina obtida por essa reação, além de apresentar elevada qualidade, é inofensiva ao meio ambiente e pode ser empregada em outros processos tecnológicos, o que diminuiria significativamente a exploração de reservas de bauxita.

O emprego do hidrogênio nos processos de combustão para a geração de energia o tornam uma das mais promissoras fontes de energia, particularmente na aplicação em

transporte pelo fato de ser um combustível com baixas emissões de poluentes (COWNDEN, NAHON, 1996; NEEF, 2009; WHITE; STEEPER; LUTZ, 2006).

O processo termoquímico do hidrogênio é uma tecnologia em desenvolvimento, a qual utiliza o calor para dissociar a água e obter o hidrogênio, sendo que outros compostos químicos podem ser utilizados no lugar da água, tais como o ácido sulfúrico. Essa tecnologia torna-se interessante quando as fontes renováveis de energia são utilizadas para se obter o calor necessário para as reações (FRANZONI *et al.*, 2010).

Watanabe; Ximeng; Ryuichi (2004) desenvolveram estudos em que as partículas do alumínio foram ativadas por meio de um tratamento de choque térmico anterior.

Neste contexto, foi constatado que a dimensão das partículas de alumínio interferem diretamente na reação de combustão Al-H₂O, sendo que as mesmas podem se consumir completamente se apresentarem dimensões entre 50 µm e 20 µm (FOOTE, THOMPSON, LINEBERRY, 2001; WATANABE, XIMENG, RYUICHI 2004).

A produção de hidrogênio por meio de oxidação do alumínio na água é caracterizado por várias vantagens, dentre as quais há possibilidade de se utilizar grande quantidade de matérias-primas em circuito fechado, sem emissões de gases do efeito estufa, bem como outros poluentes. Além disso, o alumínio pode ser visto como um sistema de armazenamento do hidrogênio a ser empregado em processos para a conversão de energia (FRANZONI *et al.*, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa científica tem sua validação e conclusão vinculadas ao rigor na aplicação das técnicas e dos métodos de ensaio, com o objetivo de se obterem dados com elevados graus de confiabilidade possíveis. Com este propósito, realizou-se o trabalho experimental, visando à obtenção de subsídios para analisar o desempenho e emitir conclusões quanto aos efeitos da adição dos resíduos de britagem de basalto, de partículas de alumínio reciclado e da escória de aciaria elétrica na argamassa de revestimento.

Os estudos laboratoriais foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, no Laboratório de Aglomerantes do Centro de Tecnologia e Urbanismo e nos Laboratórios de Física Nuclear do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina.

3.1 Materiais

Os materiais empregados neste estudo foram:

- Cimento *Portland* CPV-ARI;
- Areia quartzosa de rio;
- Resíduos da britagem de basalto;
- Resíduos da produção do aço em fornos elétricos, a partir de sucata;
- Partículas de alumínio reciclado (PAR).

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi adquirido junto a fornecedores de materiais de construção em sacos de 50 kg. Foi utilizado o cimento CPV-ARI, de alta resistência inicial, de acordo com a NBR-5733. Seu uso em experimentos se deve a alta pureza e rapidez na obtenção da resistência mecânica. Dessa forma, essa opção se deveu ao menor teor de adições e elevado teor de silicatos cálcicos deste cimento, bem como da maior finura, garantindo elevadas resistências à compressão nas primeiras idades. Este cimento corresponde ao cimento tipo III – *High Early Strength* - ASTM C150.

3.1.2 Areia

A areia utilizada foi a areia quartzosa procedente do Rio Paraná, região de Porto Primavera no Estado de São Paulo, classificada granulometricamente como areia média.

3.1.3 Resíduo de Basalto

Os resíduos utilizados foram provenientes de uma pedreira da região de Londrina, no Estado do Paraná. Esta pedreira opera com os seguintes equipamentos: 01 britador primário de mandíbula (62x40 mm), 01 rebitador de mandíbula, (90x26 mm) e 01 britador cônico 90 mm, intercalados por três pontos de peneiramento. Nesse processo, verificou-se a geração de duas frações de material, ambas com dimensões inferiores a 4,8 mm, de pouco ou nenhum interesse comercial, as quais são estocadas no pátio da empresa a céu aberto, constituindo-se em um passivo ambiental.

Este material residual apresenta duas frações distintas, uma com características de uma areia grossa e denominada a partir deste ponto, agregado AGB (areia grossa de basalto) e outra fração com dimensões inferiores, denominada agregado AFB (areia fina de basalto).

O agregado miúdo obtido a partir da mistura dessas duas areias foi constituído de 30% de AFB e 70% de AGB, para se adequar a composição granulométrica, sendo denominado a partir deste ponto AB (areia de basalto). As coletas foram feitas em pontos distintos, respeitando o sistema de quarteramento, no topo, meio e base dos montes, na profundidade em torno de aproximadamente 40 cm. As amostras coletadas totalizaram 100 kg de AGB e 50 kg de AFB, sendo ambas acondicionadas em tambores plásticos no Laboratório de Aglomerantes, CTU da UEL.

3.1.4 Resíduo de Aciaria Elétrica

A areia utilizada nesse estudo provém de resíduos siderúrgicos de duas usinas de produção do aço a partir de sucata em fornos elétricos, por meio do peneiramento (# 4,8mm) e posterior composição granulométrica. Estes resíduos foram encaminhados à Universidade Estadual de Londrina – UEL pelas empresas geradoras.

O agregado miúdo assim obtido, a partir da mistura dos resíduos procedentes destas duas empresas, nominadas A e B, situadas nas cidades de Piracicaba no Estado de São

Paulo e Araucária no Estado do Paraná, respectivamente, foi constituído de 30% do material da usina A e 70% da B, sendo denominado a partir deste ponto, AAE (areia de aciaria elétrica).

A fração com dimensões superiores a 4,8 mm, presente no material encaminhado pelas empresas geradoras, foi submetida à moagem no setor de reciclagem da UEL-RECICLA, para se obter maior quantidade de agregado miúdo, classificado granulometricamente como uma areia média, totalizando entre 400 kg. Este material foi acondicionado em tambores plásticos hermeticamente vedados e armazenados no Laboratório de Materiais da UEL.

3.1.5 Resíduos de Alumínio

Estes resíduos são gerados no processo de torneamento (no torno mecânico) e em algumas situações apresentam a forma de cavacos, necessitando de um processo simplificado para sua padronização. Após passarem pelo torneamento, os cavacos são acondicionados em recipientes chamados *bags*, para que não se misturem com materiais ferrosos. Como estes cavacos formam “ourijos” que se entrelaçam, formando um emaranhado que impossibilita sua dispersão homogênea na argamassa, recorre-se à operação de corte através de um moinho de facas alternadas para a redução das dimensões e posterior peneiramento, para serem transformados em partículas de dimensões menores.

O material utilizado neste trabalho foi adquirido junto a uma empresa recicladora de alumínio, já na forma de partículas.

Para a obtenção de material com dimensão média de 2 x 1mm recorreu-se ao peneiramento em peneira de malha metálica quadrada de 2 mm de espaçamento (peneira de feijão).

Como as partículas não apresentavam presença de óleo, graxa ou material de varrição, foi dispensada a lavagem das mesmas, as quais foram acondicionadas em tambores plásticos com tampa e armazenadas no Laboratório de Materiais da UEL.

A quantidade de material requerida para o experimento foi de 50 kg aproximadamente.

3.1.6 Água

A água utilizada foi proveniente da rede de abastecimento do Município de Londrina, fornecida pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR).

3.2 MÉTODOS

Este trabalho consistiu em comparar diferentes argamassas de revestimento produzidas com areia grossa e areia fina de basalto (AB), areia de aciaria elétrica (AAE) e partículas de alumínio reciclado (PAR).

Para o seu desenvolvimento foram estabelecidas uma argamassa de referência (REF-A) e três argamassas com diferentes teores dos resíduos já mencionados, segundo o traço unitário genérico, em massa, 1:3, com as seguintes composições:

- REF-A - argamassa de referência com areia quartzosa natural de rio;
- ARN - argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado;
- ARB - argamassa com areia AB + partículas de alumínio reciclado;
- ARA - argamassa com areia AAE + partículas de alumínio reciclado.

O método proposto consistiu em seis planejamentos experimentais (PE):

- PE 1: Coleta e caracterização dos materiais;
- PE 2: Produção e análise das argamassas no estado fresco;
- PE 3: Análise do desempenho físico e mecânico das argamassas no estado endurecido;
- PE 4: Avaliação da transferência de calor e análise da porosidade das argamassas;
- PE 5: Desempenho das argamassa utilizadas no revestimento de protótipos em concreto, com e sem água em seu interior;
- PE 6: Análise dos componentes químicos das argamassas.

3.2.1 Planejamento Experimental 1 (PE 1)

Coleta e caracterização dos materiais.

Os ensaios realizados para a caracterização dos materiais estão apresentados no Quadro 5, tendo sido adotados os mesmos procedimentos e cuidados para os agregados naturais e industriais.

Quadro 5 - Ensaio de caracterização e normas para agregados miúdos

| ENSAIO | NORMA |
|--|--------------------------------|
| Análise granulométrica | NBR NM 248/2003 |
| Massa unitária | NBR 7251/1982 – NBR NM 45/2006 |
| Massa específica* (agregado miúdo) | NBR 9776/1987 – NBR NM 52/2009 |
| *Para o cálculo da massa específica do resíduo de aciaria elétrica (areia siderúrgica) foi necessário utilizar 300 ml de água para a realização do ensaio. | |

Fonte: A própria autora.

3.2.2 *Planejamento Experimental 2 (PE 2)*

Para a análise da argamassa no estado fresco foram desenvolvidos os seguintes tópicos:

- Definição das misturas segundo o traço 1:3;
- Ensaio de consistência da argamassa;
- Análise da trabalhabilidade da argamassa (coesão, aderência, exsudação e cobrimento).

3.2.2.1 *Definição das misturas*

Para a pesquisa, foi utilizado o traço de referência 1:3 em massa.

A composição das misturas das argamassas manteve a mesma proporcionalidade dos agregados, respeitado o traço unitário em massa 1:3, variando apenas o agregado utilizado para cada composição, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Composição das argamassas estudadas

| MATERIAL | REF-A | ARN | ARB | ARA |
|---|-------------|-------------|--|-------------|
| Areia | 750 g | 750 g | 750 g | 750 g |
| Granulometria | Areia média | Areia média | Areia média (compensada) | Areia média |
| % Areia | 100% | 100% | 30% AFB – areia fina de basalto 70% AGB – areia grossa de basalto | 100% |
| Cimento CPV-ARI | 250 g | 250 g | 250 g | 250 g |
| Partículas de alumínio | 0% | 10% | 10% | 10% |
| Quantidade de material | 1000 g | 1100 g | 1100 g | 1100 g |
| * A quantidade de água de amassamento foi definida através do ensaio de consistência, fixando-se o espalhamento em 28 cm, para as quatro composições de argamassa: REF-A, ARN, ARB e ARA. | | | | |

Fonte: A própria autora.

3.2.2.2 Ensaio de consistência das argamassas

Para se obter o consumo de água necessário para atingir a consistência normal dessas argamassas utilizou-se a mesa de consistência (*flow table*) prescrita pela NBR 7215 (ABNT, 1996) e foram realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005) (espalhamento horizontal de 27 a 30 cm).

O método de ensaio utilizando a mesa de consistência (*flow table*) consiste em medir o espalhamento de uma argamassa moldada na forma de um molde metálico tronco-cônico (cone padrão), anteriormente umedecido, posicionado no centro da mesa de consistência também umedecida.

Porém, por se tratarem de quatro tipos de argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA, com agregados diferentes, optou-se por utilizar o mesmo traço e fixar o espalhamento em 28 cm para obter a mesma consistência nas quatro argamassas, alterando-se apenas a quantidade de água de amassamento, a qual foi determinada através desse ensaio.

3.2.2.3 Análise da trabalhabilidade das argamassas

Para a avaliação da trabalhabilidade das argamassas (coesão, aderência, exsudação e cobrimento), foram feitas análises visuais das misturas no estado fresco, quando de sua manipulação com a colher de pedreiro, observando-se se as mesmas mantinham-se coesas, bem como se não ocorria segregação e exsudação.

Além disso, foi feita a aplicação dessas argamassas como emboço em uma parede previamente chapiscada, para avaliar sua aderência, bem como, para comprovar se a consistência de cada uma estava adequada ao uso como argamassa de revestimento.

3.2.3 Planejamento Experimental 3 (PE 3)

A avaliação das argamassas no estado endurecido foi realizada por meio dos ensaios apresentados na Tabela 12:

- Avaliação do desempenho mecânico das argamassas por meio da compressão axial;
- Avaliação do desempenho físico das argamassas por meio dos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica;
- Avaliação do desempenho químico das argamassas por meio dos ensaios de verificação da carbonatação e da expansividade.

Tabela 12 - Planejamento dos ensaios experimentais

| ENSAIOS | FOMATO E DIMENSÃO CORPOS DE PROVA (cp) | Nº DE AMOSTRAS cp | AMOSTRAS POR IDADE | |
|--|---|---|--------------------|---------|
| | | | 7 dias | 28 dias |
| Resistência à Compressão NBR 7222/2011 | Cilíndrico 5 x 10 cm | 12 | 6 | 6 |
| Absorção, índice de vazios e massa específica NBR 9778/2009 | Cilíndrico 5 x 10 cm | 6 | - | 6 |
| Avaliação da Carbonatação | Placa Retangular 15x30x2,5cm | 1 | - | - |
| Avaliação da Expansão (ar incorporado) | Cilíndrico 4,7 x 10 cm | 12 | - | 12 |
| Transferência de calor e porosidade | Cilíndrico D=2,5cm e H=5cm | 8 | - | 8 |
| Estudo do desempenho das argamassas | Protótipo de concreto 50x50x50 cm (com tampa) + rodízios | 1 | - | 1 |
| Total para cada argamassa | | 18 – 5 x 10 cm 1 – placa 12 – 4,7 x 20 cm 8 – 2,5 x 5 cm 1 – protótipo + suporte metálico com rodízios | | |
| Total para as quatro argamassas (REF-A, ARN, ARB e ARA) | | 72 – 5 x 10 cm 4 – placas 48 – 4,7 x 10 cm* 32 – 2,5 x 5 cm 4 – protótipos + suportes metálicos c/ rodízios | | |

REF-A - argamassa de referência com areia quartzosa natural de rio;

ARN - argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado;

ARB - argamassa areia AB + partículas de alumínio reciclado e

ARA - argamassa com areia AAE + partículas de alumínio reciclado

*Foram desenvolvidos para o ensaio de Expansão 12 cp para a argamassa REF-B – argamassa de referência com AB e 12 cp para a argamassa REF-E – argamassa de referência com AAE.

Fonte: A própria autora.

3.2.3.1 Avaliação do desempenho mecânico

Para a avaliação do desempenho mecânico por meio da resistência à compressão axial das argamassas, foram confeccionados 12 corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) para cada argamassa, submetidos a cura por imersão em água e rompidos seis corpos de prova na idade de 7 dias e seis corpos de prova aos 28 dias. A moldagem dos corpos de prova seguiu a NBR 7215/1996.

3.2.3.2 Avaliação do desempenho físico

As características físicas avaliadas foram a absorção da água por imersão, o índice de vazios e a massa específica das argamassas em estudo. Para isto, foram confeccionados seis corpos de prova para cada argamassa, submetidos à cura por imersão em água, dos quais foram selecionados os três melhores para os referidos ensaios.

Os ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica das argamassas no estado endurecido, seguiram os procedimentos prescritos na NBR 9778/2009.

Este ensaio consistiu em secar três amostras em estufa, mantidas à temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, por um período de 72 horas e registrar a massa (ms) de cada amostra.

Logo após, as amostras foram imersas em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, onde permaneceram por 72 h, após este período, verificam-se as suas massas com a superfície seca e com o auxílio da balança hidrostática a superfície úmida. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água que foi levada progressivamente à ebulição, que deve começar entre 15 a 30 minutos depois do início do aquecimento. A ebulição foi mantida por um período de 5 h, durante o qual o volume de água foi mantido constante. A seguir, deixou-se a água resfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, e foi determinada com ajuda de balança hidrostática a massa (mi) das amostras.

Os corpos de prova foram então retirados da água e enxugados com o auxílio de papel toalha, a seguir determinaram-se as suas massas (msat).

O resultado de cada determinação de massa foi considerado como sendo a média obtida nos três corpos de prova.

A absorção de água por imersão (A), em porcentagem, foi calculada pela Equação 3:

$$A = [(msat - ms)/ms] \times 100 (\%) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

msat = massa da amostra saturada em água após imersão e fervura

ms = massa da amostra seca na estufa.

O índice de vazios, em porcentagem, foi calculado pela Equação 4:

$$Iv = [(msat - ms)/(msat - mi)] \times 100 (\%) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

mi = massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

A massa específica da amostra seca (δ_s) foi calculada pela Equação 5:

$$\delta_s = (ms)/(msat - mi) \quad (g/cm^3) \quad \text{Equação 5}$$

A massa específica da amostra saturada após fervura (δ_{sat}) foi calculada pela Equação 6:

$$\delta_{sat} = (msat)/(msat - mi) \quad (g/cm^3) \quad \text{Equação 6}$$

A massa específica real (δ_r) foi calculada pela Equação 7:

$$\delta_r = (ms)/(ms - mi) \quad (g/cm^3) \quad \text{Equação 7}$$

3.2.3.3 Avaliação do desempenho químico

Os aspectos químicos das argamassas estudadas se referem ao fenômeno da carbonatação e da expansão em função da incorporação das partículas de alumínio reciclado (PAR).

3.2.3.3.1 Verificação da carbonatação

Para a avaliação da carbonatação das argamassas foram confeccionadas placas retangulares (15 x 30 cm) com espessura de 2,5 cm, que é a espessura máxima admissível para uma camada de revestimento.

As placas foram mantidas em cura ao ar na câmara úmida e fragmentadas nas datas estabelecidas para verificação da carbonatação por meio da aspensão na superfície recém-rompida do indicador de pH (fenolftaleína diluída em álcool etílico), observando-se que a área onde não havia ocorrido a carbonatação apresentava a cor magenta, e a área aonde o fenômeno já havia ocorrido apresentava a cor natural. A coloração muda entre os valores de pH 8,2 e pH 9,8. A profundidade da carbonatação no material é medida com o auxílio de um paquímetro.

3.2.3.3.2 Verificação da expansão

Para a avaliação da expansão e massa específica das argamassas em estudo, além das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA, foram utilizadas outras duas argamassas de referência, uma empregando areia de basalto (REF-B) e outra areia de aciaria elétrica (REF-E), ambas sem incorporação de partículas de alumínio para verificar a expansão provocada pelas argamassas ARB e ARA em relação à sua respectiva argamassa de referência REF-B e REF-E respectivamente. Utilizou-se o Ensaio de Consistência para se determinar o volume de água de amassamento para se atingir o limite de 28 cm de espalhamento, conforme foi padronizado para as demais argamassas.

Adotou-se ainda a adição de 10% de NaCl em relação à massa total de material para intensificar a reação de liberação do hidrogênio.

Foram moldados doze corpos de prova cilíndricos (4,7 x 10 cm) para cada uma das argamassas, sendo três com adição de NaCl.

Os moldes utilizados foram confeccionados em PVC, na dimensão de 4,7 x 20 cm, com abertura longitudinal, a qual foi vedada com fita adesiva de multiuso com largura de 45 mm para facilitar a desmoldagem, como pode ser visualizado na Figura 18. Após a aplicação de desmoldante, os moldes foram preenchidos até a altura de 10 cm, permanecendo na câmara úmida por 24 horas. Decorrido esse tempo, foram desmoldados e submetidos à cura úmida por 28 dias, sendo posteriormente secos em estufa durante 24 horas à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, conforme a Figura 19.

Figura 18– Molde em PVC para confecção do corpo de prova



Fonte: A própria autora.

Figura 19– Corpos de prova após 28 dias de cura úmida e secagem em estufa



Fonte: A própria autora.

Na sequência, após resfriamento à 21°C, foram verificadas a massa, a altura final e a massa específica de cada corpo de prova, comparando os resultados com os valores obtidos com as respectivas argamassas de referência. O excedente à altura de 10 cm foi recortado e os corpos de prova assim obtidos foram rompidos à compressão.

3.2.4 Planejamento Experimental 4 (PE 4)

Nesta etapa experimental foram realizadas:

- Avaliação da transferência de calor;
- Avaliação da porosidade.

3.2.4.1 Avaliação da transferência de calor nas argamassas

Para a avaliação da transferência de calor nas argamassas foram utilizados:

- 03 corpos de prova cilíndricos (25x50 mm) de cada argamassa (REF-A, ARN, ARB e ARA).
- Pasta de prata dissipadora de calor (*Thermal Silver*);
- Conjunto de equipamentos formado por: receptáculo conectado a uma fonte de calor, termopares do tipo T 2600, multímetro e *Software - ET - Minipa 2600* para *Windows XP* instalado no computador.

A moldagem dos corpos de prova (25x50 mm) foi realizada primeiro por adensamento manual com o auxílio de um pilão, utilizando as peças apresentadas na Figura 20, as quais constituíram o molde apresentado na Figura 21. Em seguida, o adensamento foi complementado por prensagem em prensa manual, com pressão de 9 toneladas, conforme pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 20- Peças desmontadas que compõem o molde do corpo de prova



Fonte: A própria autora.

Figura 21 – Molde do corpo de prova



Fonte: A própria autora.

Figura 22 - Prensa Manual



Fonte: A própria autora.

O corpo de prova moldado sob pressão, pode ser retirado do molde e manipulado com cuidado para a cura ao ar por 24 horas. Para isto, fez-se uma estrutura de madeira com as cavidades da mesma dimensão do corpo de prova, evitando vibrações ou qualquer

outra causa que pudesse interferir na cura da argamassa ao ar, conforme pode ser visualizado na Figura 23.

Figura 23- Estrutura de madeira para suporte dos corpos de prova submetidos à cura ao ar



Fonte: A própria autora.

Após a cura ao ar por 24 horas, os corpos de prova ficaram submersos para cura úmida por 28 dias.

Decorrido o tempo de cura úmida, os corpos de prova foram retirados da água e, depois de secos, submetidos à retificação e regularização das faces, proporcionando uma superfície lisa e livre de falhas. Finalmente, fez-se um capeamento com uma fina camada de pasta de prata dissipadora de calor (*Thermal Silver*), com espessura $< 1,0$ mm.

Para a determinação da transferência de calor foi utilizado o Método calorimétrico de placa quente/placa fria, que consiste em um método direto, ou seja, que se utiliza dos resultados experimentais comparativos em regime estacionário e a difusidade térmica calculada com a medição dessas temperaturas.

Este equipamento foi desenvolvido por pesquisadores no Laboratório de Sistemas Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica da UEL, seguindo conceitos e normas capazes de determinar propriedades térmicas das argamassas com incerteza de medição menor do que 3% e um grau repetitivo maior do que 1% (NBR 12094/1991). Esta norma apresenta o método de determinação da condutividade térmica de espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico, baseando-se na medição do fluxo de calor em regime permanente de temperaturas, através de corpos de prova com formato de placas planas e paralelas. A partir dos dados de transferência de calor no material, é possível determinar a condu-

tividade térmica da argamassa em estudo, desde que sejam conhecidos os índices de condutividade térmica de cada componente.

Foi construído um dispositivo com receptáculo para receber os corpos de prova cilíndricos (25x50 mm), ligado a dois termopares conectados ao multímetro, utilizando uma fonte constante de calor, seguindo o método da placa quente protegida. No dispositivo de coleta de dados por termopares foi instalado um trocador de calor por ventilação para que houvesse o fluxo constante de calor através da argamassa contida no corpo de prova ensaiado. Para resfriar o equipamento após o término de cada ensaio, foi utilizado um ventilador.

Os resultados da transferência de calor detectados foram transmitidos e decodificados graficamente. Através desta técnica de transferência de calor é possível obter o resultado em °C (PALMIERI, 2015).

Os corpos de prova foram mantidos em ambiente climatizado, a uma temperatura de 20°C, sendo as medições realizadas sucessivamente a cada segundo, por um período de 3600 segundos, tanto na face quente como na face resfriada de cada corpo de prova.

Inicialmente, as duas faces do corpo de prova foram recobertas com uma fina camada de pasta de prata dissipadora de calor (*Thermal Silver*). A aplicação da pasta, conforme a Figura 24, consiste no espalhamento de um volume reduzido deste material em toda a face do topo e da base do corpo de prova.

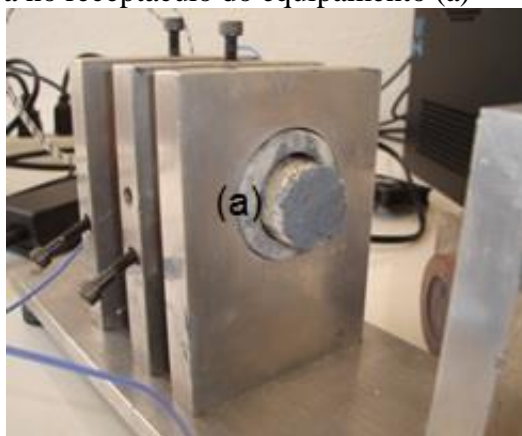
Figura 24 – Corpo de prova com pasta de prata dissipadora de calor aplicada no topo e na base



Fonte: A própria autora.

Em seguida, o mesmo foi introduzido no receptáculo de cobre, até encostar uma das faces em seu final, conforme a Figura 25. Feito isto, o corpo de prova foi ajustado por meio de uma tampa também em cobre, parafusada até que o mesmo ficasse perfeitamente posicionado. A pasta serve para eliminar irregularidades da superfície e melhor dissipar o calor.

Figura 25 – Corpo de prova no receptáculo do equipamento (a)

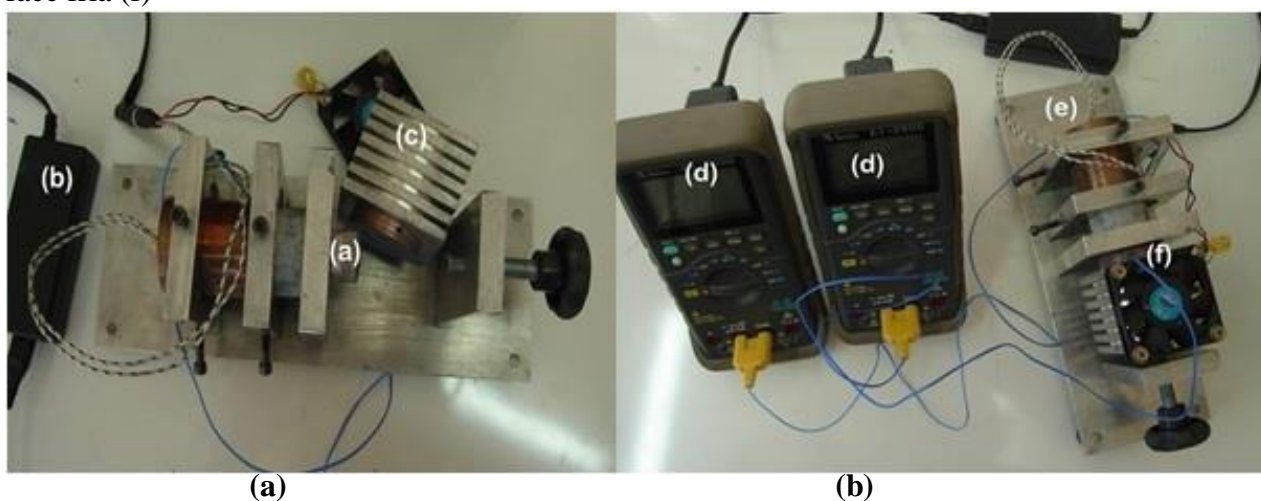


Fonte: A própria autora.

Na face oposta ao receptáculo (a) e à tampa (c), existe uma fonte de calor (b) a partir de corrente elétrica contínua de 12 volts e 40 watts como pode ser visualizado na Figura 26 (a). Nas duas extremidades do corpo de prova são posicionados termopares do tipo T 2600 (d), com precisão decimal, para medir a diferença de temperatura entre as faces quente (e) e face fria (f), como se pode ver na Figura 26 (b) e o equipamento completo como se pode visualizar na Figura 27.

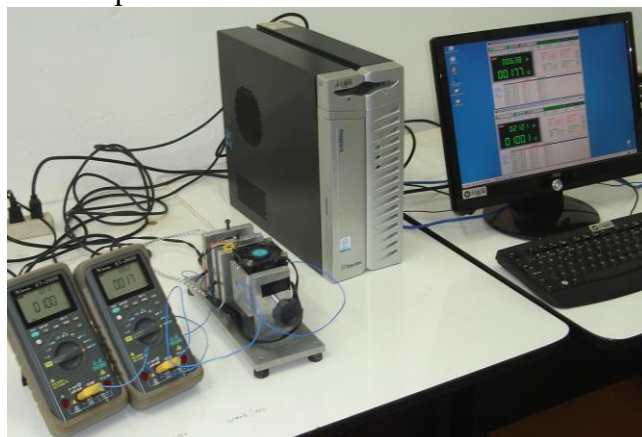
O início da medição ocorre a partir do acionamento do *Software* fornecido pelo fabricante - ET - Minipa 2600 para *Windows XP*. Os dados coletados são automaticamente transferidos para o *Software*, gerando a transferência de calor de cada argamassa.

Figura 26 – Receptáculo (a), fonte de calor (b), tampa (c), termopares (d) face quente (e) e face fria (f)



Fonte: A própria autora.

Figura 27 – Equipamento completo



Fonte: A própria autora.

3.2.4.2 Avaliação da porosidade

A porosidade das argamassas foi avaliada por meio do Equipamento *SKYCAN 1172* – Micro CT de Micro tomografia do Laboratório de Física Nuclear do Departamento de Física da UEL, que pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Equipamento *SKYCAN* de microtomografia



Fonte: A própria autora.

O corpo de prova utilizado foi o cilíndrico (25 x 50mm), fixado no equipamento com cera da marca Wilson para procedimentos odontológicos. A determinação consistiu em sucessivas análises por difração a cada 13 μm de espessura em fatias transversais ao corpo

de prova, com duração de 6,5 segundos cada análise, o tempo de ensaio para cada corpo de prova teve duração aproximada de 3h e 30min.

3.2.5 Planejamento Experimental 5 (PE 5)

3.2.5.1 Estudo do desempenho da transferência de calor nas argamassas aplicadas como revestimento

Para a verificação do desempenho das argamassas quando aplicadas como revestimento, foram utilizados:

- 04 protótipos de reservatórios em concreto (50x50x50cm), com paredes e tampa de espessura 25 mm, revestidas com 20 mm de argamassa;
- 04 suportes de ferro com rodízios para movimentação dos protótipos, em função da incidência dos raios solares;
- Equipamento *HOBO U30 Station da Onset Computer Corporation* com 04 sensores, para verificação da temperatura.

Procedimentos adotados na realização deste ensaio:

- Impermeabilizaram-se internamente os 04 protótipos com duas demãos do impermeabilizante *Tecplus top – Quatzolit da Weber Saint-Gobain*;
- Chapiscaram-se externamente os 04 protótipos com argamassa de cimento e areia;
- Revestiram-se os protótipos (paredes e tampa), após a secagem do chapisco, com uma camada de 2,0 cm de argamassa. O protótipo 1 recebeu a argamassa REF-A; o protótipo 2, a ARN; o protótipo 3, a ARB e o protótipo 4 a ARA.
- Aguardaram-se o tempo de cura ao ar por um período de 28 dias.
- Colocaram-se os 04 protótipos sobre o suporte de ferro com rodízio, para permitir a movimentação visando ajustar à incidência solar;
- Procedeu-se às medições de temperatura no interior dos protótipos vazios, utilizando o equipamento *HOBO U30 Station da Onset Computer Corporation*.

- Preencheram-se os protótipos com água e procederam-se às medições de temperatura no interior dos mesmos.

Observação:

- As medições foram realizadas em dia de céu claro, com poucas nuvens e com insolação e temperatura conhecidas (temperatura máxima e temperatura mínima em °C), colocando em cada protótipo um sensor conectado à bateria do aparelho de medição para verificar a temperatura da água e do ar no interior de cada protótipo, respeitando o espaçamento de tempo de minuto à minuto, durante o período de 24 horas;
- O período de medição estabelecido foi de 6 dias para cada situação, sendo efetuadas as coletas das temperaturas diárias, oscilação da temperatura da cidade de Londrina, no Estado do Paraná, máxima e mínima, em °C;
- No período da medição, verificaram-se as temperaturas diárias (em °C) atingidas na tampa e na lateral de cada protótipo com a mesma incidência solar.

3.2.6 Planejamento Experimental 6 (PE 6)

3.2.6.1 Análise dos componentes químicos das argamassas - MEV.

A análise dos componentes químicos das argamassas para a verificação da interação entre as partículas de alumínio e a pasta de cimento foi realizada por meio do Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) FEI – Phillips – Quanta 200 do Laboratório de Física Nuclear do Departamento de Física da UEL, que pode ser visualizado na Figura 29.

A partir dos corpos de prova das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA, com as dimensões de 2,5 x 5,0 cm, foram retiradas amostras com dimensão aproximada de 0,5 x 0,5 cm para a confecção de lâminas delgadas, as quais foram analisadas por microsonda eletrônica e *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS), com o objetivo de identificar os elementos presentes nos materiais.

Figura 29 – Equipamento MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: A própria autora.

3.2.6.2 Análise dos componentes químicos das argamassas – Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)

A análise dos componentes químicos presentes nas argamassas em estudo foi realizada por meio do Equipamento de Difração de Raios-X (DRX) do Laboratório de Física Nuclear do Departamento de Física da UEL.

O material utilizado foi obtido por meio da trituração de cada uma das argamassas (mistura do material seco cimento + areia e cimento + areia + partículas de alumínio) com o objetivo de identificar componentes químicos presentes nas fases cristalográficas dos materiais.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

4.1 Coleta dos resíduos

4.1.1 Resíduos de basalto

Os resíduos de basalto utilizados foram coletados diretamente nos montes gerados ao longo do processo de produção de agregados, estocados a céu aberto.

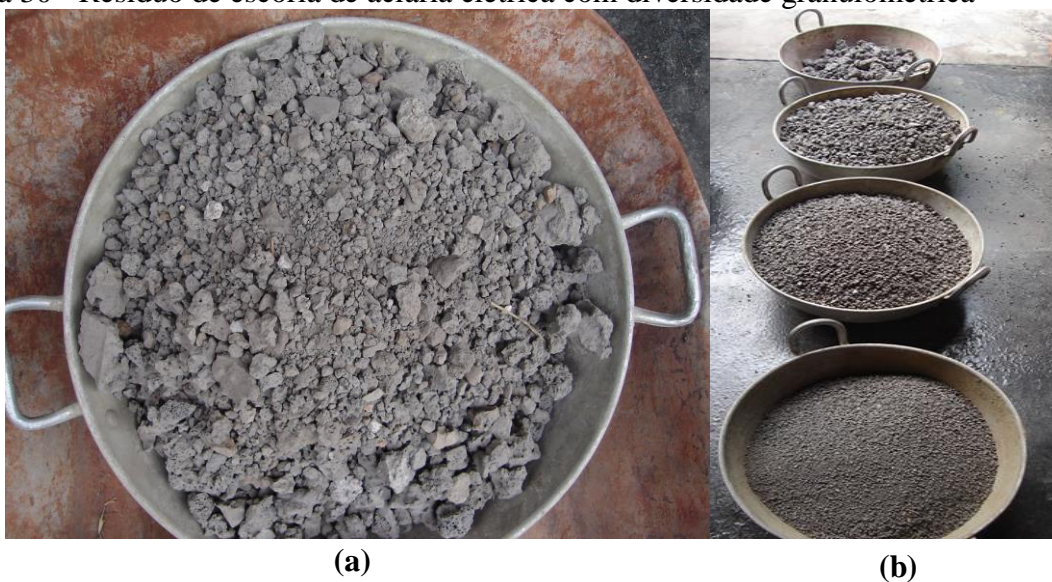
A amostra de material graúdo (AGB) totalizou 100 kg e a de material miúdo (AFB) 50 kg, sendo ambas acondicionadas em tambores plásticos no Laboratório de Aglomerantes do CTU da UEL.

4.1.2 Resíduos de escória

Os resíduos de escória foram fornecidos por duas usinas de produção, constituídos por frações de agregados graúdos e miúdos misturados, como se pode ver na Figura 30 (a).

Procedeu-se o peneiramento para a separação do material inferior a 4,8 mm presente na amostra, conforme a Figura 30 (b). As frações restantes foram submetidas à rebriagem e, novamente, foi selecionado o material passante na peneira 4,8 mm, como pode ser visualizado na Figura 31, tendo sido descartado o restante do material.

Figura 30 - Resíduo de escória de aciaria elétrica com diversidade granulométrica



Fonte: A própria autora.

Figura 31 – Rebritagem do material retido na peneira 4,8 mm



Fonte: A própria autora.

O resíduo, após passar pelos processos de peneiramento e rebritagem, foi acondicionado em tambores plásticos fechados hermeticamente e armazenado no Laboratório de Materiais da UEL, conforme pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 32– Acondicionamento do resíduo de escória de aciaria elétrica



Fonte: A própria autora.

4.1.3 Resíduos de alumínio

O resíduo de alumínio reciclado, já na forma de fibras, foi peneirado em peneira de malha metálica quadrada (2x2 mm) para se obterem partículas com dimensões aproximadas de, no máximo, 2x1 mm, de acordo com a Figura 33, as quais foram acondicionadas em tambores plásticos e armazenadas no Laboratório de Materiais da UEL.

Figura 33 – Partículas de alumínio reciclado após peneiramento



Fonte: A própria autora.

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 Análise granulométrica

4.2.1.1 Areia natural de rio

A análise granulométrica foi realizada segundo a NBR NM 248/2003. Os resultados médios de três determinações constam na Tabela 13 e a curva granulométrica correspondente, no Gráfico 2.

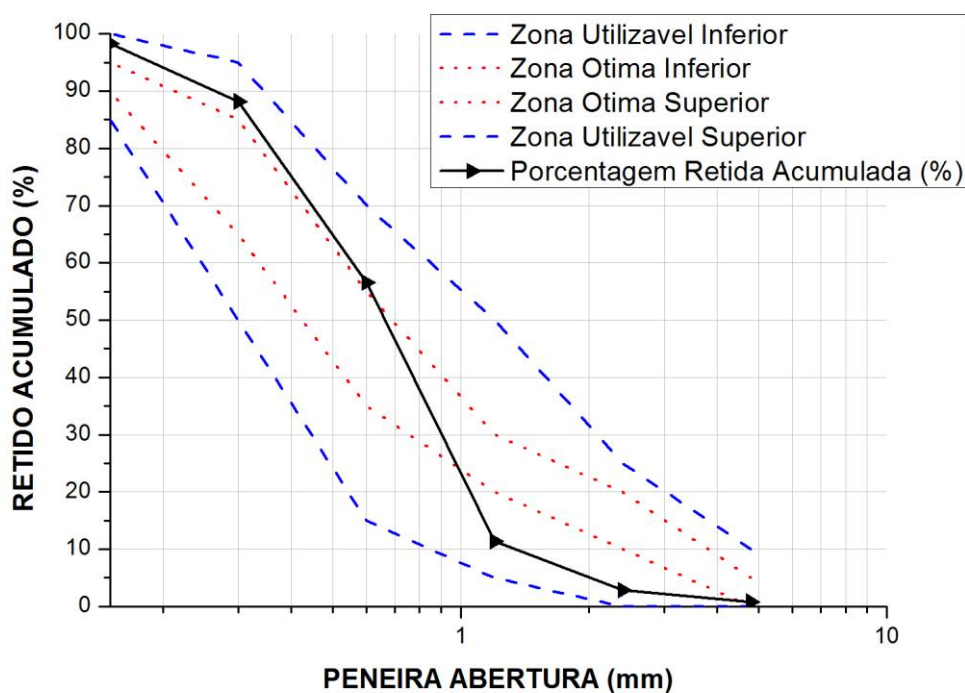
Tabela 13 – Resultado do peneiramento da areia natural de rio

| Caracterização Granulométrica da Areia Natural de Rio – média | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Abertura da peneira (mm) | Ensaio 01 Porcentagem Retida Acumulada (%) | Ensaio 02 Porcentagem Retida Acumulada (%) | Ensaio 03 Porcentagem Retida Acumulada (%) | Média Porcentagem Retida Acumulada (%) |
| 4,8 | 0,50 | 1,00 | 1,00 | 0,83 |
| 2,4 | 3,50 | 3,52 | 1,51 | 2,84 |
| 1,2 | 15,50 | 14,57 | 4,02 | 11,36 |
| 0,6 | 53,00 | 50,75 | 65,83 | 56,53 |
| 0,3 | 86,50 | 84,92 | 92,96 | 88,13 |
| 0,15 | 98,00 | 97,49 | 99,49 | 98,33 |
| FUNDO | 100 | 100 | 100 | 100 |

Dimensão máxima característica = 2,4mm
Módulo de finura = 2,58 (areia média)

Fonte: A própria autora.

Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia natural de rio



Fonte: A própria autora.

A NBR 7211/2009 – Agregados para concreto – Especificação – fornece os parâmetros para a classificação dos agregados miúdos, conforme os limites granulométricos apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Limites granulométricos para agregado miúdo segundo a NBR 7211/2005

| PENEIRA | PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA | | | |
|---------|---|------------|--------------------|-----------------|
| | LIMITES INFERIORES | | LIMITES SUPERIORES | |
| | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável |
| 9,5 mm | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6,3 mm | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 4,75 mm | 0 | 0 | 5 | 10 |
| 2,36 mm | 0 | 10 | 20 | 25 |
| 1,18 mm | 5 | 20 | 30 | 50 |
| 0,6 mm | 15 | 35 | 55 | 70 |
| 0,3 mm | 50 | 65 | 85 | 95 |
| 0,15 mm | 85 | 90 | 95 | 100 |

Fonte: adaptado NBR 7211/2009.

Com base nos dados das Tabelas 13 e 14 e da curva granulométrica do Gráfico 2, concluiu-se ser uma areia média e verificou-se que a mesma se enquadrava na zona utilizável, apresentando certa descontinuidade, em função do baixo teor de material retido nas peneiras 0,15 mm; 1,2 mm e 2,4 mm.

Os valores obtidos para o módulo de finura (2,58) e dimensão máxima característica (2,4 mm) confirmam que esta areia é adequada para a produção de concretos e argamassas.

4.2.1.2 Areia de basalto

Os resultados médios do peneiramento das frações grossa e fina do resíduo de basalto, como mostram as Tabelas 14, 15 e 16 e as respectivas curvas granulométricas apresentadas nos Gráficos 3 e 4, revelaram que ambas as frações estão fora da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211/2009.

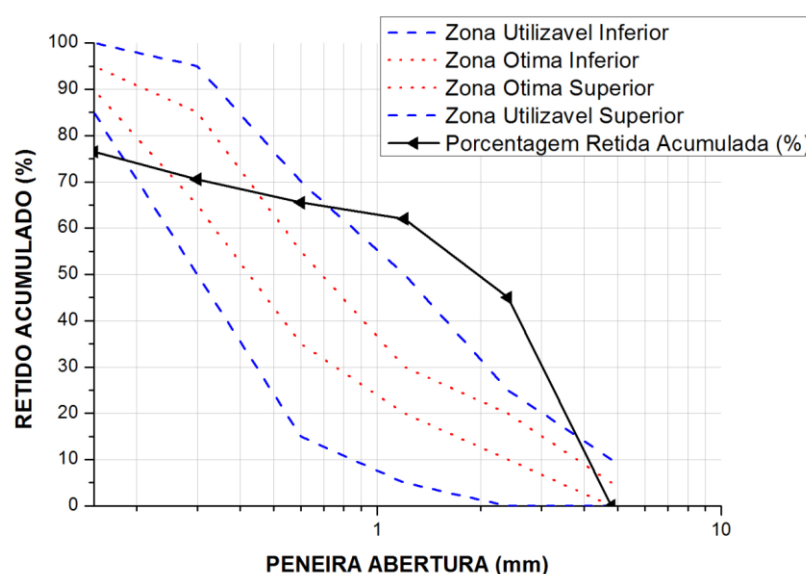
Tabela 15 - Resultado do peneiramento da fração grossa do resíduo de basalto

| CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE BASALTO – AGB | | | |
|---|------------------|------------------------|----------------------------------|
| Abertura peneira (mm) | Massa Retida (g) | Porcentagem Retida (%) | Porcentagem Retida Acumulada (%) |
| 4,8 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 450 | 45,00 | 45,00 |
| 1,2 | 170 | 17,00 | 62,00 |
| 0,6 | 35 | 3,50 | 65,50 |
| 0,3 | 50 | 5,00 | 70,50 |
| 0,15 | 60 | 6,00 | 76,50 |
| FUNDO | 235 | 23,50 | 100 |

Dimensão máxima característica = 4,8 mm
Módulo de finura = 3,19 (areia média)

Fonte: A própria autora.

Gráfico 3 – Curva granulométrica da fração grossa do resíduo de basalto



Fonte: A própria autora.

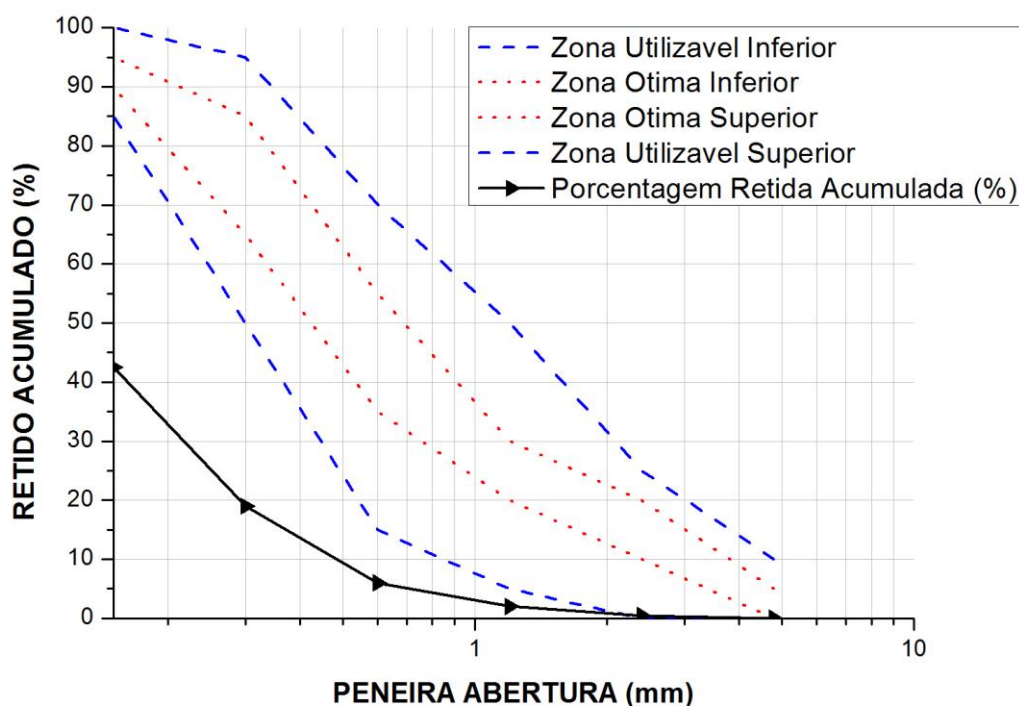
Tabela 16 – Resultado do peneiramento da fração fina do resíduo de basalto

| CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE BASALTO – AFB | | | |
|---|------------------|------------------------|----------------------------------|
| Abertura da peneira (mm) | Massa Retida (g) | Porcentagem Retida (%) | Porcentagem Retida Acumulada (%) |
| 4,8 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 5 | 0,50 | 0,50 |
| 1,2 | 15 | 1,50 | 2,00 |
| 0,6 | 40 | 4,00 | 6,00 |
| 0,3 | 130 | 13,00 | 19,00 |
| 0,15 | 235 | 23,50 | 42,50 |
| FUNDO | 575 | 57,50 | 100 |

Dimensão máxima característica = 1,2 mm
Módulo de finura = 0,7 (areia muito fina)

Fonte: A própria autora.

Gráfico 4 – Curva granulométrica da fração fina do resíduo de basalto



Fonte: A própria autora.

Para a obtenção de uma areia com melhores características granulométricas, denominada areia compensada de basalto, optou-se pela composição de um agregado constituído de 70% da fração grossa e 30% da fração fina de basalto, de forma que a curva granulométrica correspondente a essa se situasse dentro dos limites da zona utilizável, de acordo com a Tabela 17 e Gráfico 5.

Os valores obtidos para o módulo de finura (2,44) e dimensão máxima característica (4,8 mm) confirmaram que esta areia é adequada para a produção de concretos e argamassas.

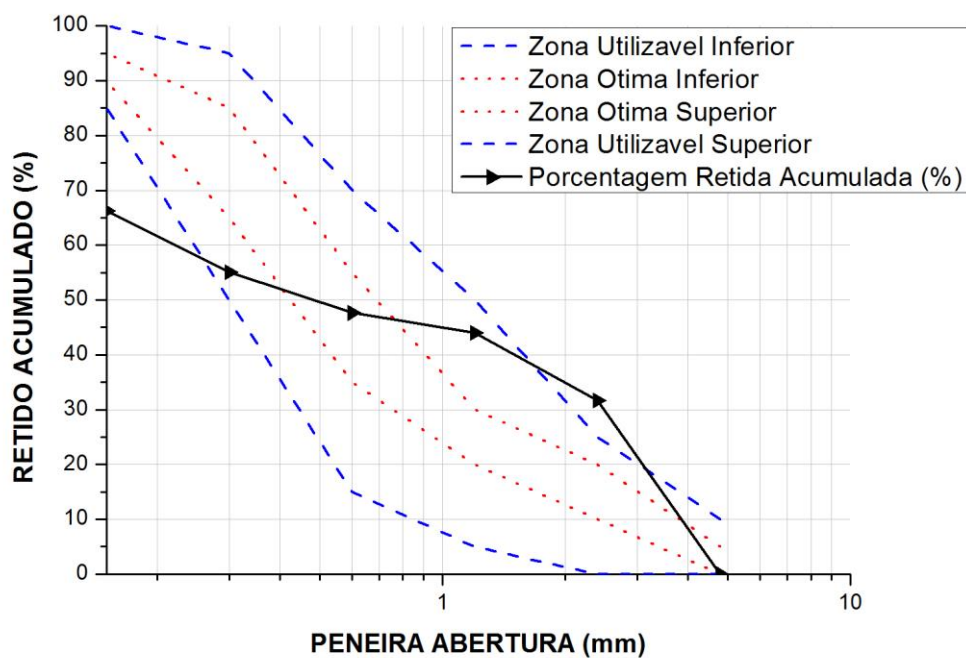
Tabela 17 – Resultado do peneiramento da areia compensada de basalto

| CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA COMPENSADA | | | |
|---|------------------|------------------------|----------------------------------|
| Abertura da peneira (mm) | Massa Retida (g) | Porcentagem Retida (%) | Porcentagem Retida Acumulada (%) |
| 4,8 | 0 | 0 | 0 |
| 2,4 | 316,50 | 31,65 | 31,65 |
| 1,2 | 123,50 | 12,35 | 44,00 |
| 0,6 | 36,50 | 3,65 | 47,65 |
| 0,3 | 74,00 | 7,40 | 55,05 |
| 0,15 | 112,50 | 11,25 | 66,30 |
| FUNDO | 337,00 | 33,70 | 100 |

Dimensão máxima característica = 4,8 mm
Módulo de finura = 2,44 (areia média)

Fonte: A própria autora.

Gráfico 5 – Curva granulométrica da areia compensada de basalto



Fonte: A própria autora.

4.2.1.3 Areia aciaria elétrica

Os resultados da análise granulométrica da areia de aciaria constam na Tabela 18 e a respectiva curva granulométrica no Gráfico 6.

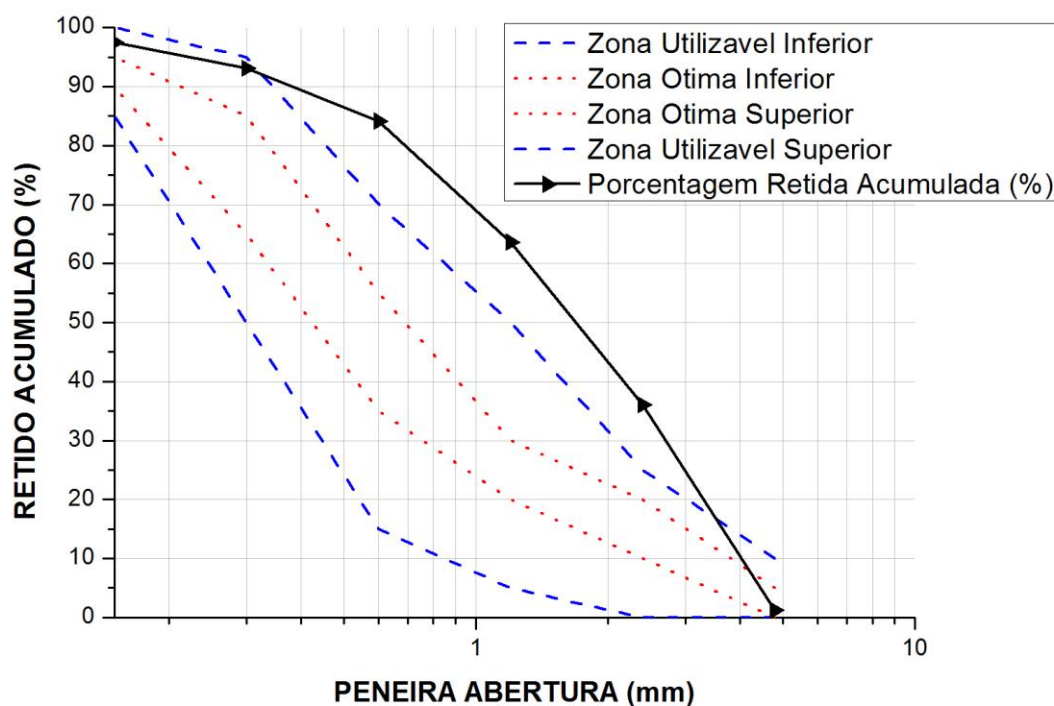
Tabela 18 – Resultado do peneiramento da areia de aciaria elétrica

| CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA DE ACIARIA | | | |
|---|------------------|------------------------|----------------------------------|
| Abertura da peneira (mm) | Massa Retida (g) | Porcentagem Retida (%) | Porcentagem Retida Acumulada (%) |
| 4,8 | 12,50 | 1,22 | 1,22 |
| 2,4 | 354,75 | 34,82 | 36,04 |
| 1,2 | 280,85 | 27,57 | 63,61 |
| 0,6 | 208,65 | 20,48 | 84,09 |
| 0,3 | 91,45 | 8,97 | 93,06 |
| 0,15 | 45,30 | 4,44 | 97,50 |
| FUNDO | 25,00 | 2,50 | 100,00 |

Dimensão máxima característica = 4,8 mm
Módulo de finura = 3,76 (areia média)

Fonte: A própria autora.

Gráfico 6 – Curva granulométrica da areia de aciaria elétrica



Fonte: A própria autora.

Os valores obtidos para o módulo de finura (3,76) e dimensão máxima aparente (4,8 mm) indicaram ser uma areia média, tendendo a grossa. A curva granulométrica corres-

pondente a essa areia se situa próxima ao limite superior estabelecido pela norma, o que indicou uma certa deficiência de partículas nas peneiras 0,30 e 0,15 mm.

Dada a dificuldade em se conseguir a britagem deste material em um moinho de bolas, o mesmo foi utilizado com as características granulométricas ora apresentadas.

4.2.2 Massa unitária e massa específica

4.2.2.1 Areia natural de rio

Na Tabela 19 são apresentados os resultados dos ensaios das massas unitárias e massas específicas da areia natural de rio, areia de basalto e areia de aciaria elétrica. Para o cálculo da massa específica das areias, foi seguida a metodologia de ensaio conforme a norma para agregado miúdo convencional. No caso específico da areia de aciaria elétrica, em função do comportamento da mesma no Frasco de *Chapman*, ou seja, o de não ocorrer elevação do nível de água após a inserção do agregado nos 200 ml iniciais, repetiu-se o mesmo procedimento utilizando-se 300 ml de água, para que fosse possível verificar a leitura.

Tabela 19 – Valores das massas unitária e específica obtidos para os agregados ensaiados

| AGREGADO MIÚDO | MASSA UNITÁRIA (g/cm³) | MASSA ESPECÍFICA (g/cm³) |
|---------------------------|--|--|
| Areia natural de rio | 1,50 | 2,63 |
| Areia de basalto | 1,76 | 2,94 |
| Areia de aciaria elétrica | 1,95 | 3,67* |

(*) Para o cálculo da massa específica da areia de aciaria elétrica foi utilizado 300 ml de água.

Fonte: A própria autora.

Os resultados obtidos para esses agregados foram compatíveis com os padrões esperados.

4.3 Avaliação das argamassas no estado fresco

4.3.1 Consistência das argamassas

Os resultados do ensaio de consistência das argamassas ensaiadas (REF-A; ARN; ARB e ARA), apresentados na Tabela 20 e nas Figuras 34 e 35, indicaram diferentes quantidades de água de amassamento para se atingir o limite de 28 cm de espalhamento, de forma a se padronizar a consistência, por se tratarem de agregados com características dife-

rentes. Para se determinar o respectivo volume de água necessário para se atingir a consistência padrão, foram realizadas sucessivas misturas, com o aumento gradual da água de amassamento, seguido de ensaio na mesa de consistência.

Tabela 20 – Volume de água necessário para a obtenção da consistência padrão das argamassas

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA | | |
|---|--------------------------|---------------------|
| Composição | Relação água/aglomerante | Água de amassamento |
| REF-A | 0,64 | 160 ml |
| ARN | 0,88 | 220 ml |
| ARB | 0,84 | 210 ml |
| ARA | 0,84 | 210 ml |

Fonte: A própria autora.

Observou-se que o aumento da água de amassamento verificado nas argamassas ARN, ARB e ARA, em relação à argamassa REF-A, se deveu à incorporação das partículas de alumínio reciclado.

Figura 34 – Argamassa moldada sobre a mesa de consistência



Fonte: A própria autora.

Figura 35 – Espalhamento da argamassa ao final do ensaio



Fonte: A autora.

4.3.2 Análise da trabalhabilidade das argamassas

Ao se proceder a avaliação da trabalhabilidade das argamassas no estado fresco, observando visualmente os aspectos associados à coesão, aderência, exsudação e cobrimento, mediante sua manipulação com a colher de pedreiro, conforme se pode visualizar nas Figuras 36 (a) e (b) e aplicação como emboço, na Figura 37, verificou-se que todas as argamassas se mantiveram coesas, livres de segregação e exsudação. Após o desempenamento dos respectivos rebocos, foi constatado em todos os casos avaliados um bom cobrimento e um nivelamento satisfatório.

A incorporação de partículas de alumínio proporcionou um comportamento comum a todas elas, ou seja, um aspecto de segregação inicial corrigidas através do amassamento, resultando em misturas homogêneas e coesas, mantidas as mesmas relações água/aglomerante determinadas na mesa de consistência.

No processo de aplicação como reboco, no entendimento do pedreiro encarregado desse serviço, as argamassas apresentaram maior aspereza em relação à argamassa de referência (REF-A), sendo que o grau de dificuldade em relação a essa característica foi aumentando sequencialmente nas argamassas ARN, ARB e ARA. Muito embora nenhuma delas houvesse apresentado dificuldade de aderência, a argamassa feita com areia de escória de aciaria foi a que apresentou pior trabalhabilidade, pelo fato dessa areia apresentar características granulométricas de areia média tendendo para a areia grossa e encontrar-se acima do limite granulométrico correspondente à zona utilizável superior.

Figura 36 – Análise visual da mistura ARN no estado fresco



Fonte: A própria autora.

Figura 37 – Análise visual da mistura ARN aplicada na parede



Fonte: A própria autora.

4.4 Avaliação das argamassas no estado endurecido

4.4.1 Avaliação do desempenho físico - ensaio de absorção, índice de vazios e caracterização da massa específica das argamassas

Ao se proceder a análise visual dos corpos de prova para a avaliação do desempenho físico por meio do ensaio de absorção, índice de vazios e caracterização da massa específica, foram selecionados três corpos de prova de cada argamassa, segundo a NBR 9778/2009.

Os corpos de prova foram colocados na estufa para secagem à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas e, após esse período, quando completada a secagem em estufa, aguardou-se o resfriamento dos corpos de prova para verificar a massa seca de cada um. Após esse processo, os corpos de prova foram imersos em água à temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 72 horas e, em seguida, foram registradas as massas dos corpos de prova depois de saturados com superfície seca (secos com toalha de papel) e com superfície úmida (balança hidrostática).

Na sequência, os corpos de prova foram levados à saturação em ebulição durante um período de 5 horas, conforme pode ser visualizado na Figura 38. Após esse processo, aguardou-se a água esfriar naturalmente durante 14 horas registrou-se a massa dos corpos de prova depois de saturados em ebulição, com superfície seca (secos com toalha de papel) e com superfície úmida (balança hidrostática), como pode ser visualizado nas Figuras 39 e 40.

Figura 38 – Corpos de prova em água em ebulição durante 5h



Fonte: A própria autora.

Figura 39 – Corpos de prova saturados em ebulição com superfície seca



Fonte: A própria autora.

Figura 40 – Verificação da massa em balança hidrostática



Fonte: A própria autora.

Os resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e caracterização da massa específica das argamassas no estado endurecido conforme a NBR 9778/2009.

| ENSAIO | ARGAMASSA | | | |
|---|-----------|-------|-------|-------|
| | REF-A | ARN | ARB | ARA |
| Absorção após imersão em água 23°C ± 2°C (%) | 8,99 | 9,08 | 18,12 | 10,38 |
| Absorção após imersão e fervura (%) | 9,35 | 9,34 | 19,29 | 10,54 |
| Índice de vazios após saturação em água (%) | 17,70 | 15,27 | 24,79 | 19,23 |
| Índice de vazios após saturação e fervura (%) | 18,39 | 15,72 | 26,54 | 19,62 |
| Massa específica da amostra seca (g/cm ³) | 1,95 | 1,67 | 1,34 | 1,84 |
| Massa específica da amostra após saturação (g/cm ³) | 2,12 | 1,82 | 1,59 | 2,03 |
| Massa específica da amostra após saturação e fervura (g/cm ³) | 2,13 | 1,83 | 1,60 | 2,04 |
| Massa específica real (g/cm ³) | 2,39 | 1,98 | 1,81 | 2,29 |

Fonte: A própria autora.

A argamassa ARB apresentou os maiores índices de absorção de água e de vazios, além de apresentar a menor massa específica, tendo sido a argamassa que mais se expandiu após a incorporação do resíduo de alumínio em sua composição.

4.4.2 Desempenho mecânico das argamassas

Para a avaliação do desempenho mecânico foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos (5 x 10 cm) para cada argamassa, como pode ser visualizado nas Figuras 41 e 42, e rompidos à compressão axial às idades de 7 e 28 dias, conforme as Figuras 43 e 44.

Figura 41 – Argamassas moldadas



Fonte: A própria autora.

Figura 42 – Corpos de prova após serem retirados dos moldes



Fonte: A própria autora.

Os corpos de prova de argamassa ARB foram rompidos em prensa manual, com capacidade de 20 toneladas, com proteção através do molde metálico revestido internamente com neoprene, por apresentarem menores resistências à idade de 7 dias. Para as demais situações, as rupturas foram feitas em prensa mecânica – EMIC modelo PC 200 I, conforme Figuras 43 e 44 e os resultados apresentados na Tabela 22.

Figura 43 - Ruptura do corpo de prova na prensa manual



Fonte: A própria autora.

Figura 44 – Ruptura do corpo de prova na prensa mecânica



Fonte: A própria autora.

Tabela 22 – Resistência à compressão das argamassas com incorporação de partículas de alumínio reciclado aos 7 e 28 dias.

| ENSAIO COMPRESSÃO AXIAL | | | | |
|-------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|------------------------|
| Argamassa | Teor de alumínio (%) | Média 7 dias (MPa) | Média 28 dias (MPa) | fc ₂₈ |
| REF-A | 0 | 30,63 | 35,53 | fc ₇ . 1,16 |
| ARN | 10 | 3,42 | 10,96 | fc ₇ . 3,20 |
| ARB | 10 | 1,62 | 8,82 | fc ₇ . 5,44 |
| ARA | 10 | 5,87 | 11,05 | fc ₇ . 1,88 |

REF-A - argamassa de referência com areia quartzosa natural de rio;
 ARN - argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado;
 ARB - argamassa com areia AB + partículas de alumínio reciclado;
 ARA - argamassa com areia AAE + partículas de alumínio reciclado.

Fonte: A própria autora.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão axial das argamassas estudadas revelaram um aumento da resistência mecânica de 7 para 28 dias, conforme mostra a Tabela 22.

A Tabela 23 apresenta a interferência da incorporação de PAR e NaCl na resistência mecânica das argamassas.

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão axial realizados aos 28 dias indicaram um decréscimo da resistência mecânica à compressão em relação à argamassa de referência devido à incorporação das partículas de alumínio reciclado.

Tabela 23 – Resistência à compressão das argamassas com incorporação de partículas de alumínio reciclado e NaCl.

| RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS | | | | |
|---|-------------------------------|--|------------------------------------|---|
| Tipo de agregado miúdo usado na argamassa | Argamassa de Referência (MPa) | Argamassa de referência com alumínio * | Argamassa de referência com NaCl * | Argamassa de referência com alumínio + NaCl (MPa) |
| AREIA | 35,53 | 10,96 | 27,33 | 9,96 |
| BASALTO | 23,20 | 8,82 | 27,30 | 5,93 |
| ESCÓRIA | 35,11 | 11,05 | 38,93 | 1,90 |

(*) o teor de material (Al ou NaCl) corresponde a 10% da massa total de materiais

Fonte: A própria autora.

A argamassa de cimento e areia natural (ARN), com 10% de alumínio em relação à massa total de material, apresentou uma redução média na resistência mecânica à compressão de 69% em relação à argamassa de referência; a argamassa de cimento com areia de basalto (ARB) apresentou uma redução média de 62% e a argamassa de cimento e areia de

escória (ARA) apresentou uma redução média de 69%, como pode ser verificado na Tabela 23. Considera-se que isso se deveu ao volume de vazios decorrente da expansão provocada pela liberação de hidrogênio devida à ação do ambiente alcalino sobre as partículas de alumínio.

Em relação à incorporação de NaCl às argamassas, observou-se que a argamassa de cimento e areia natural (ARN) com 10% de NaCl em relação à massa total de material apresentou uma redução média na resistência mecânica à compressão de 23% em relação à argamassa de referência; a argamassa de cimento com areia de basalto (ARB) apresentou um aumento médio de 18% e a argamassa de cimento e areia de escória (ARA) apresentou um aumento médio de 11%, como pode ser verificado na Tabela 23.

Em relação à incorporação de partículas de alumínio reciclado associadas à NaCl, mantendo-se a taxa de 10% de cada um em relação a massa total de material, observou-se que a argamassa de cimento e areia natural (ARN) apresentou uma redução média na resistência mecânica à compressão de 72% em relação à argamassa de referência; a argamassa de cimento com areia de basalto (ARB) apresentou uma redução média de 74% e a argamassa de cimento e areia de escória (ARA) apresentou uma redução média de 95%, como pode ser verificado na Tabela 23.

4.4.3 Avaliação do desempenho químico: verificação da carbonatação

Os aspectos químicos das argamassas estudadas se referem ao fenômeno da carbonatação e a expansão decorrente da incorporação das partículas de alumínio reciclado. Para a execução dessa etapa seguiu-se o procedimento descrito no planejamento experimental 03. Para a avaliação da carbonatação foram moldados quatro placas retangulares (15 x 30 cm) com espessura de 2,5 cm para cada argamassa, como pode ser visualizado na Figura 45.

Figura 45 – Molde para placas com argamassa



Fonte: A própria autora.

As placas foram mantidas em cura ao ar na câmara úmida e fragmentadas nas datas estabelecidas para verificação da carbonatação por meio da aspensão na superfície recém-rompida do indicador de pH (fenolftaleína diluída em álcool etílico), como se pode visualizar na Figura 46.

Figura 46 – Placas retangulares mantidas em cura ao ar na câmara úmida



Fonte: A própria autora.

A área onde ainda não havia ocorrido a carbonatação apresentou cor magenta e onde a carbonatação já havia ocorrido permaneceu na cor natural, conforme pode ser visualizado nas Figuras 47 e 48. A profundidade de carbonatação nas placas foi medida com o auxílio de um paquímetro.

Figura 47– Placa de REF-A rompida com aplicação de fenolftaleína para verificar a carbonatação



Fonte: A própria autora.

Figura 48– Placa de ARB rompida com aplicação de fenolftaleína para verificar a carbonatação



Fonte: A própria autora.

Tabela 24– Avaliação da carbonatação

| ESPESSURA DA CARBONATAÇÃO (mm) | | | | |
|--------------------------------|-------|-----|-----|-----|
| Composição | REF-A | ARN | ARB | ARA |
| 7 dias | 1,5 | 5 | 12 | 12 |
| 28 dias | 3 | 8 | 20 | 20 |
| 41 dias | 3 | 10 | 23 | 20 |
| 51 dias | 4 | 15 | 25 | 20 |
| 58 dias | 4 | 15 | | 25 |
| 71 dias | 7 | 25 | | |
| 92 dias | 7 | | | |

REF-A - argamassa de referência com areia quartzosa natural de rio;
 ARN - argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado;
 ARB - argamassa com areia AB + partículas de alumínio reciclado;
 ARA - argamassa com areia AAE + partículas de alumínio reciclado.

Fonte: A própria autora.

A Tabela 24 apresenta as datas e as medidas das profundidades de carbonatação do material nas quatro argamassas estudadas, até que houvessem atingido a carbonatação por completo, tendo sido constatado que a argamassa ARB foi a primeira a atingir a carbonatação por completo, aproximadamente aos 51 dias; a ARA aos 58 dias; a ARN aos 71 dias. A argamassa de referência, REF-A, até as datas das avaliações, atingiu apenas a profundidade de 7 mm de carbonatação, demonstrando que a expansividade das argamassas influenciou esse processo.

4.4.4 Avaliação do desempenho químico: verificação da expansão

Os resultados do Ensaio de Consistência para a confecção das argamassas de referência REF-B e REF-E são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Volume de água necessário para a obtenção da consistência das argamassas com espalhamento de 28 cm

| RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA | | |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Composição | Relação água/aglomerante | Água de amassamento (ml) |
| REF-A | 0,64 | 160 |
| ARN | 0,88 | 220 |
| REF-B | 0,92 | 230 |
| ARB | 0,84 | 210 |
| REF-E | 0,68 | 170 |
| ARA | 0,84 | 210 |

Fonte: A própria autora.

Os corpos de prova, após cura úmida e secagem, apresentaram os valores de massa específica constantes na Tabela 26.

Tabela 26 – Massa específica das argamassas em função da incorporação de PAR e NaCl

| MASSA ESPECÍFICA DAS ARGAMASSAS ENSAIADAS | | | | |
|---|--|---|---|--|
| Tipo de agregado miúdo usado na argamassa | Argamassa de Referência (g/cm ³) | Argamassa com alumínio * (g/cm ³) | Argamassa com NaCl * (g/cm ³) | Argamassa com alumínio + NaCl (g/cm ³) |
| AREIA | 2,09 | 1,58 | 2,06 | 1,62 |
| BASALTO | 2,03 | 1,74 | 2,09 | 1,50 |
| ESCÓRIA | 2,52 | 1,75 | 2,55 | 1,75 |

(*) o teor de material (Al ou NaCl) corresponde a 10% da massa total de materiais

Fonte: A própria autora.

A argamassa de cimento e areia natural (ARN) com 10% de alumínio em relação à massa total de material apresentou uma redução média na massa específica de 24% em relação à argamassa de referência; a argamassa de cimento com areia de basalto (ARB) apresentou uma redução média de 14% e a argamassa de cimento e areia de escória (ARA) apresentou uma redução média de 30%, como pode ser verificado na Tabela 26. Considera-se que isso se deveu ao volume de vazios gerados pela liberação de hidrogênio na reação da pasta de cimento com as partículas de alumínio.

Em relação à incorporação de NaCl às argamassas ensaiadas, percebeu-se que seu efeito foi inócuo, não ocorrendo variação considerável nas massas específicas, indicando que não houve a incorporação de ar.

Em relação à incorporação de partículas de alumínio reciclado associadas ao NaCl, mantendo-se a taxa de 10% de cada um em relação a massa total de material, observou-se que a argamassa de cimento e areia natural (ARN) apresentou uma redução expressiva na massa específica, da ordem de 22% em relação à argamassa de referência; a argamassa de cimento com areia de basalto (ARB) apresentou uma redução média de 26% e a argamassa de cimento e areia de escória (ARA) apresentou uma redução média de 30%, como pode ser verificado na Tabela 26.

4.4.5 Avaliação da transferência de calor nas argamassas

Os resultados da avaliação da transferência de calor nas argamassas estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Transferência de calor (°C) nas argamassas

| ENSAIO TRANSFERÊNCIA DE CALOR NAS ARGAMASSAS | | | | | |
|--|---------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Composição | Frio e Quente | Temperatura (°C) 0 segundos | Temperatura (°C) 1200 segundos | Temperatura (°C) 2400 segundos | Temperatura (°C) 3600 segundos |
| REF-A | F | 19,76 | 19,36 | 19,76 | 20,30 |
| | Q | 28,60 | 68,93 | 90,36 | 101,30 |
| Transferência (°C) | | 8,84 | 49,57 | 70,60 | 81,00 |
| ARN | F | 19,43 | 19,00 | 19,50 | 20,03 |
| | Q | 24,93 | 68,20 | 89,70 | 100,63 |
| Transferência (°C) | | 5,50 | 49,20 | 70,20 | 80,60 |
| ARB | F | 19,43 | 19,40 | 19,93 | 20,26 |
| | Q | 24,53 | 67,60 | 90,93 | 102,63 |
| Transferência (°C) | | 5,10 | 48,20 | 71,00 | 82,37 |
| ARA | F | 17,68 | 18,00 | 18,63 | 19,26 |
| | Q | 25,80 | 74,90 | 97,10 | 107,66 |
| Transferência (°C) | | 8,12 | 56,90 | 78,47 | 88,40 |

REF-A - argamassa de referência com areia quartzosa natural de rio;
 ARN - argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado;
 ARB - argamassa com areia AB + partículas de alumínio reciclado;
 ARA - argamassa com areia AAE + partículas de alumínio reciclado.

Fonte: A própria autora.

Analisando a transferência de calor na argamassa com areia de rio (REF-A), em comparação com a argamassa de areia de rio e partículas de alumínio (ARN), percebeu-se que a presença dessas partículas atenuou a transferência de calor, com a redução da temperatura final de 81°C para 80,6°C, provavelmente em decorrência dos poros gerados na argamassa quando da liberação do hidrogênio na reação do alumínio com o hidróxido de cálcio. Já na

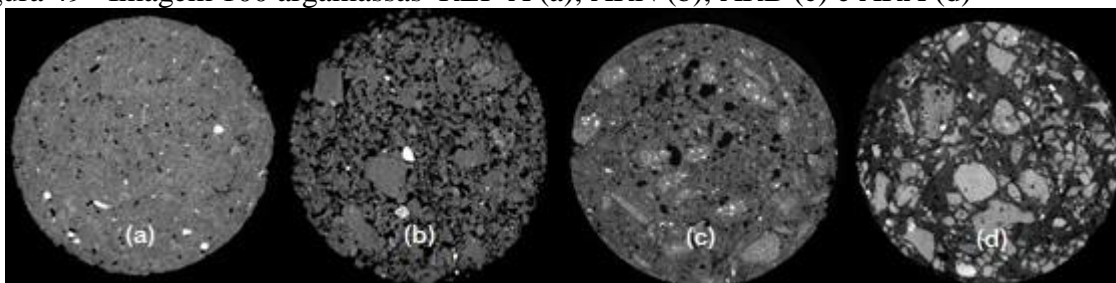
argamassa com areia de basalto (ARB), ocorreu o contrário, uma vez que a temperatura final dessa argamassa com partículas de alumínio foi de 82,37°C, indicando que, apesar da incorporação de ar, prevaleceu o caráter condutor do alumínio associado ao coeficiente de condutividade térmica do basalto. O mesmo se verificou na argamassa com areia de escória (ARA), onde a temperatura final foi de 88,4°C, bem superior aos 80,6°C verificados na argamassa com areia de rio, indicando que prevaleceu o caráter condutor do alumínio associado ao coeficiente de condutividade térmica da escória de aciaria elétrica, o qual não foi calculado para esse estudo.

4.4.6 Avaliação da porosidade nas argamassas

A avaliação qualitativa da porosidade das argamassas, ou seja, a verificação da ocorrência de homogeneidade ou não na distribuição dos poros originados quando da liberação de hidrogênio pela presença do alumínio em ambiente alcalino foi efetuada por meio do Equipamento *SKYCAN* de Micro tomografia do Laboratório de Física Nuclear do Departamento de Física da UEL.

Os resultados obtidos com os corpos de prova cilíndricos (25 x 50 mm) de cada uma das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA, conforme descrito no planejamento experimental 04 indicaram a presença de poros de dimensões uniformes distribuídos homogeneamente em todas as amostras. Conforme se observa na Figura 49, os pontos pretos se referem aos poros, sendo que nos três casos (b), (c) e (d), ficou evidente o efeito de incorporação de ar em função da adição do alumínio.

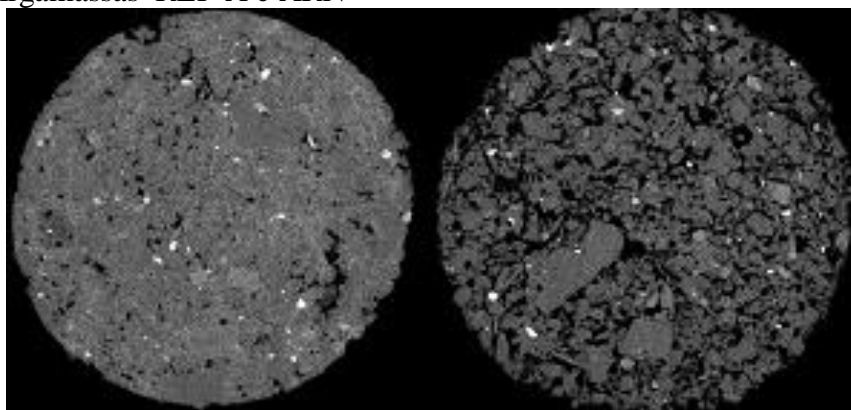
Figura 49– Imagem 100 argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)



Fonte: A própria autora.

Ao se comparar a REF-A, em cuja composição não está presente o alumínio, com a argamassa ARN, ambas com o mesmo agregado miúdo, observa-se o aumento da porosidade nessa última, decorrente do hidrogênio liberado na reação, conforme a Figura 50.

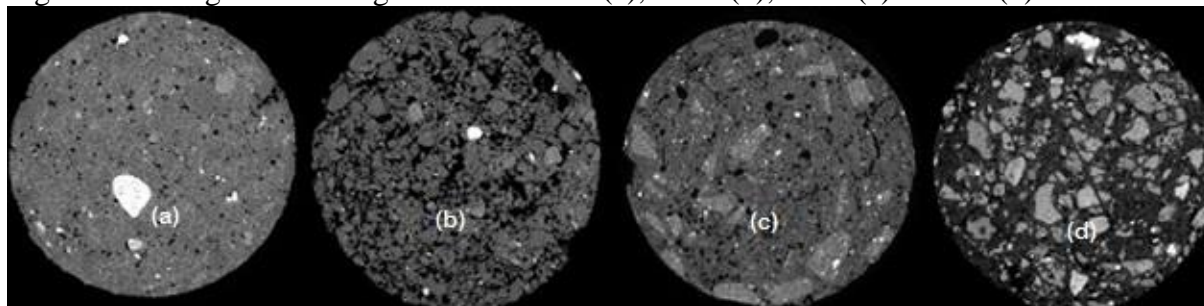
Figura 50 – Argamassas REF-A e ARN



Fonte: A própria autora.

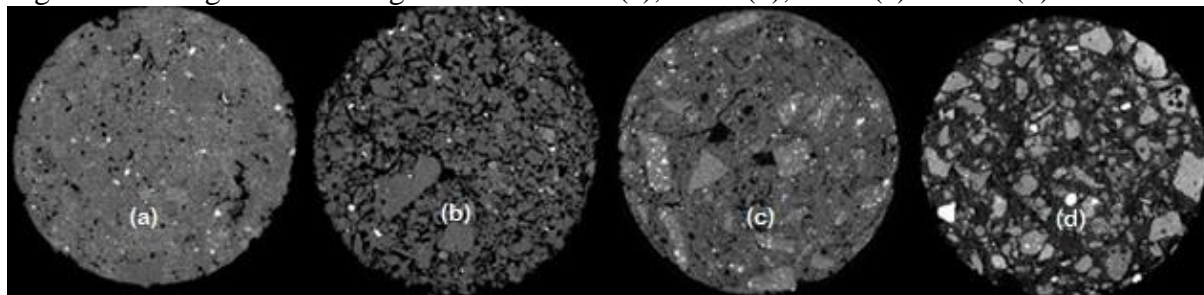
As sucessivas análises de cada corpo de prova por difração em fatias transversais de 13 μm de espessura, indicaram que a distribuição homogênea dos poros ocorreu em toda a amostra, conforme pode ser visualizado nas imagens referentes às fatias de número 600, 1000 e 1200 para cada uma das argamassas em estudo apresentadas nas Figuras 51, 52 e 53.

Figura 51– Imagem 600 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)



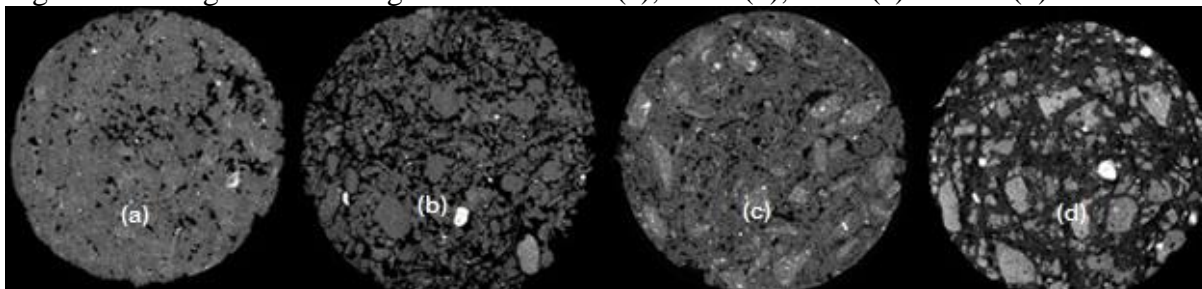
Fonte: A própria autora.

Figura 52– Imagem 1000 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)



Fonte: A própria autora.

Figura 53– Imagem 1200 – argamassas REF-A (a), ARN (b), ARB (c) e ARA (d)



Fonte: A própria autora.

4.4.7 Estudo da transferência de calor nas argamassas usadas como revestimento

Para a verificação do desempenho das argamassas quando aplicadas como revestimento, conforme pode ser visualizado na Figura 54, foi seguido o procedimento descrito no planejamento experimental 05.

Figura 54– Execução do revestimento de argamassa REF-A, ARN, ARB e ARA nos protótipos



Fonte: A própria autora.

Os protótipos, depois de prontos e já com os equipamentos conectados, foram colocados sobre suportes metálicos com rodízio para facilitar a movimentação, como pode ser visualizado nas Figuras 55, 56, para que pudessem receber a mesma incidência solar em duas situações distintas: caixa cheia d'água e caixa vazia.

Figura 55– Protótipos das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA sobre os suportes metálicos com rodízio



Fonte: A própria autora.

Figura 56– Protótipos das argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA com equipamento *HOBO U30 Station da Onset Computer Corporation*



Fonte: A própria autora.

4.4.7.1 Transferência de calor nos protótipos contendo água

Ao se proceder a coleta dos dados nos protótipos contendo água, constatou-se que a temperatura média verificada externamente nas tampas era superior às temperaturas médias nas laterais das caixas, o que se justifica em função dos ângulos de incidência dos raios solares na superfície analisada em relação ao zênite local, denominado ângulo zenital.

O protótipo que apresentou maior diferença entre essas temperaturas foi o revestido com a argamassa ARN, cuja temperatura da tampa foi 30% superior à das laterais. Sua argamassa de referência, REF-A, apresentou uma diferença de 24%, enquanto que as demais

argamassas, ARB e ARA, apresentaram uma diferença de 20% a mais na temperatura das tampas.

Dessa forma, as temperaturas maiores nas faces externas das tampas ocorreram na argamassa ARN, a qual apresentou maior aquecimento que a argamassa de referência. Já a água nela contida, apresentou valores de temperatura inferiores às registradas nas laterais da caixa, da ordem de 18% e 43% inferiores às temperaturas registradas externamente na tampa.

A temperatura da água contida na caixa revestida com a argamassa REF-A, para o mesmo horário, foi da ordem de 6% inferior à da água contida na caixa revestida com a mesma argamassa com as partículas de alumínio ARN, revelando uma maior capacidade de conservação da temperatura da água ao longo do tempo.

Apesar da argamassa ARN ter apresentado uma maior absorção do calor da radiação solar em relação à REF-A, a diferença percentual entre a temperatura da água foi a mesma para as duas caixas, ou seja, a temperatura da água foi cerca de 58% do valor da temperatura registrada externamente na tampa com REF-A e 53% na tampa com a ARN e 76% da temperatura registrada nas laterais de ambas as caixas. Dessa forma, a argamassa REF-A absorveu menos calor da radiação solar. Portanto, para o aproveitamento da radiação solar visando o aquecimento e a manutenção da temperatura da água em reservatórios, a argamassa ARN apresentou melhor desempenho em função da incorporação de partículas de alumínio.

Nas caixas revestidas com as outras duas argamassas, ARB e ARA, a temperatura da água apresentou reduções muito próximas, ou seja, as temperaturas da água corresponderam a 60% do valor medido nas tampas e 74% da temperatura medida nas laterais.

A temperatura da água contida nas caixas revestidas com as argamassas ARB e ARA, para o mesmo horário, foi muito semelhante, muito embora a argamassa ARA tenha apresentado um aquecimento externo ligeiramente maior frente à radiação solar. Ambas apresentaram um desempenho semelhante quanto à transferência de calor do meio externo para a água, pois a temperatura da tampa na ARB foi 48,00°C e da água 29,00°C, da ARA foi 51,00°C e da água foi 30,00°C. Já a argamassa ARN, apesar de ter apresentado um maior aquecimento externo, não revelou um bom desempenho quanto à transferência de calor para a água, apresentando certo comportamento isolante já que a temperatura externa na tampa foi de 57,00°C e na água 30,00°C.

No Gráfico 7, onde são registradas as curvas referentes à temperatura da água ao longo de seis dias, nos quatro protótipos, observa-se que a água contida no protótipo com a argamassa REF-A apresentou os menores valores de temperatura (28,60°C), a ARB apresen-

tou um valor intermediário (28,80°C), muito próximo dos valores apresentado pela água nos protótipos revestidos com as argamassas ARN (30,37°C) e ARA (30,00°C).

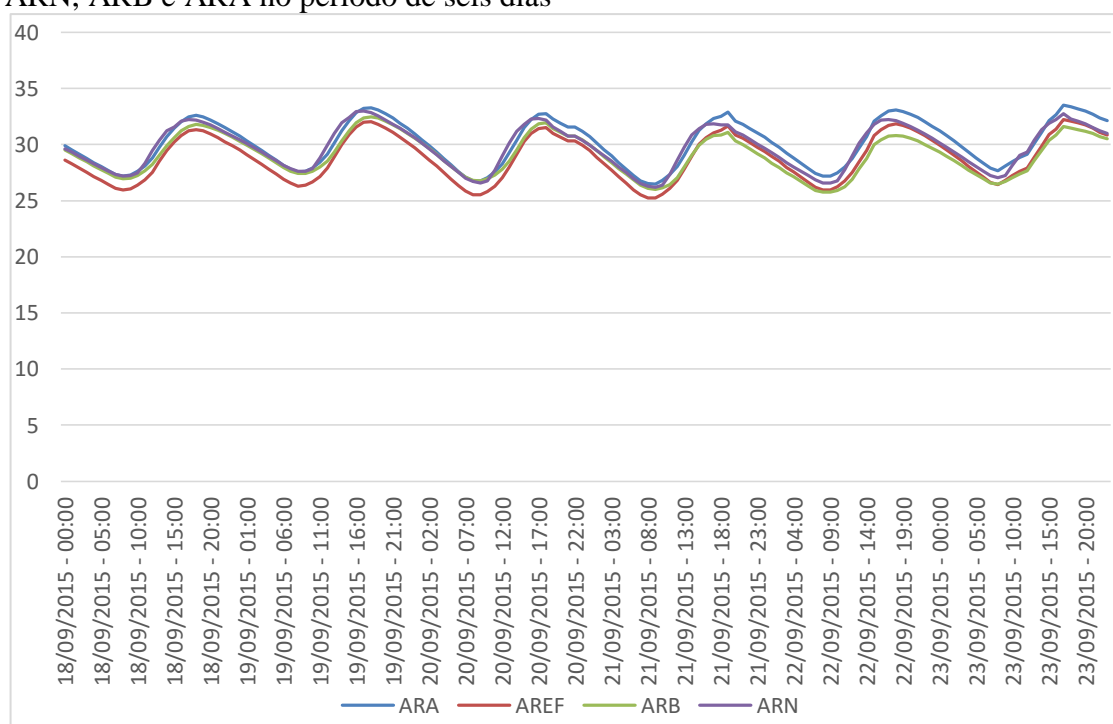
Das três argamassas com partículas de alumínio, a argamassa ARB, por ter absorvido menor taxa do calor incidente, apresentou o desempenho mais desfavorável quanto ao aquecimento da água, conforme mostra a Tabela 28.

Tabela 28 – Médias das temperaturas nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA tampa, laterais e água na jornada de seis dias

| TEMPERATURA °C | REF-A | ARN | ARB | ARA |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| TAMPA | 49,37 | 57,50 | 48,00 | 50,80 |
| LATERAIS | 37,45 | 40,00 | 38,80 | 40,60 |
| ÁGUA MÉDIA | 28,60 | 30,37 | 28,80 | 30,00 |

Fonte: A própria autora.

Gráfico 7 – Temperatura da água contida nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA no período de seis dias



Fonte: A própria autora.

A Tabela 29 apresenta as temperaturas coletadas nos protótipos com água e sem água e também a oscilação da temperatura da cidade de Londrina no período analisado.

Tabela 29 – Temperaturas externas medidas nas superfícies dos protótipos no período de seis dias com a oscilação da temperatura na cidade de Londrina no período analisado

| TEMPERATURA EXTERNA PROTÓTIPOS | | | | | | | | | | | |
|--|---------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|----------------|-------|
| Data | Horário | REF-A °C | | ARN °C | | ARB °C | | ARA °C | | TEMP. DIA (°C) | |
| | | T | L | T | L | T | L | T | L | Máx. | Mín. |
| 18/09 | 13h00m | 50,10 | 35,50 | 56,00 | 39,20 | 50,90 | 40,10 | 53,00 | 40,80 | 37,00 | 23,00 |
| 19/09 | 12h00m | 48,40 | 34,90 | 56,50 | 39,40 | 48,00 | 39,00 | 51,40 | 40,20 | 37,00 | 22,00 |
| 20/09 | 15h00m | 58,70 | 44,30 | 56,40 | 44,00 | 53,60 | 42,00 | 52,60 | 42,50 | 38,00 | 20,00 |
| 21/09 | 12h00m | 42,00 | 34,00 | 56,50 | 38,30 | 45,20 | 37,00 | 51,30 | 41,60 | 36,00 | 19,00 |
| 22/09 | 16h30m | 50,80 | 41,00 | 46,20 | 38,70 | 45,20 | 38,70 | 45,80 | 38,20 | 37,00 | 21,00 |
| 23/09 | 12h10m | 46,20 | 35,00 | 57,50 | 40,80 | 45,50 | 36,00 | 51,00 | 40,30 | 29,00 | 11,00 |
| Temp. média | | 49,37 | 37,45 | 54,80 | 40,00 | 48,00 | 38,80 | 50,80 | 40,60 | 35,60 | 19,30 |
| 18/09/15 a 23/09/15 – dias ensolarados - experimento protótipos com água | | | | | | | | | | | |
| T= tampa e L=lateral | | | | | | | | | | | |
| 15/10 | 14h25m | 50,10 | 40,30 | 52,00 | 40,90 | 51,10 | 41,20 | 52,00 | 41,70 | 36,00 | 23,00 |
| 16/10 | 12h15m | 42,90 | 35,50 | 50,40 | 39,20 | 45,10 | 36,60 | 50,20 | 40,00 | 36,00 | 23,00 |
| 17/10 | 13h00m | 45,70 | 37,00 | 50,50 | 45,10 | 47,80 | 38,60 | 49,60 | 39,90 | 35,00 | 23,00 |
| 18/10 | 12h50m | 47,10 | 32,50 | 53,60 | 36,00 | 47,90 | 34,20 | 47,30 | 35,30 | 32,00 | 19,00 |
| 19/10 | 12h20m | 45,70 | 30,70 | 51,10 | 35,10 | 45,40 | 33,10 | 50,60 | 36,10 | 33,00 | 16,00 |
| 20/10 | 12h30m | 48,70 | 36,60 | 57,00 | 40,00 | 50,50 | 37,90 | 55,00 | 41,20 | 37,00 | 21,00 |
| Temp. média | | 46,70 | 35,43 | 52,43 | 39,38 | 47,96 | 36,93 | 50,78 | 39,03 | 34,80 | 20,80 |
| 15/10/15 a 20/10/15 – dias ensolarados - experimento protótipos sem água | | | | | | | | | | | |
| T= tampa e L=lateral | | | | | | | | | | | |

Fonte: A própria autora.

4.4.7.2 Transferência de calor nos protótipos vazios

A temperatura média verificada externamente na tampa dos protótipos vazios, foi em torno de 24% superior à temperatura média nas suas laterais, o que se justifica em função dos ângulos de incidência dos raios solares na superfície analisada em relação ao ângulo zenital.

O protótipo revestido com a argamassa ARN apresentou temperaturas maiores nas faces externas das tampas em comparação à sua argamassa de referência REF-A.

Já a temperatura nas faces laterais externas de todos os protótipos apresentou um decréscimo em relação à temperatura das respectivas tampas, que variou de 23% a 25%.

A temperatura interna dos protótipos vazios apresentou valores inferiores às registradas nas respectivas laterais externas, da ordem de 15% a 18%. Em relação à tempera-

tura registrada externamente nas tampas, houve um decréscimo de 35% a 38% em relação à temperatura interna do protótipo vazio.

A temperatura interna da caixa vazia revestida com a argamassa ARN, para o mesmo horário, foi da ordem de 9% superior à da caixa revestida com a argamassa sem as partículas de alumínio (REF-A), revelando uma maior capacidade de manter o ambiente interno com temperatura superior ao externo, conservando essa temperatura ao longo do tempo.

Apesar da argamassa ARN ter apresentado uma maior absorção do calor da radiação solar em relação à REF-A, a diferença percentual entre as temperaturas internas e as externas, nas respectivas tampas, foi praticamente a mesma. Ou seja, a temperatura registrada externamente na tampa do protótipo com a argamassa REF-A foi cerca de 62% superior ao valor da temperatura registrada internamente e a temperatura registrada externamente na tampa da caixa com a argamassa ARN foi cerca de 61% superior ao referido valor. A temperatura externa nas laterais de todos os protótipos foi cerca de 17% superior à temperatura registrada no interior dos mesmos.

Portanto, a argamassa REF-A absorveu menos calor da radiação solar, e dessa forma, para o aproveitamento da radiação solar visando o aquecimento e a manutenção da temperatura interna, as argamassas ensaiadas apresentaram melhor desempenho quanto à absorção solar em função da incorporação de partículas de alumínio. Quanto à transmissão de calor para o interior, as caixas apresentaram temperaturas internas muito próximas, ou seja, de 61% a 65% dos valores medidos externamente nas tampas e de 82% a 84% das temperaturas medidas nas laterais, tornando-se evidente a capacidade das argamassas com incorporação de partículas de alumínio de transferir o calor absorvido para o interior do ambiente.

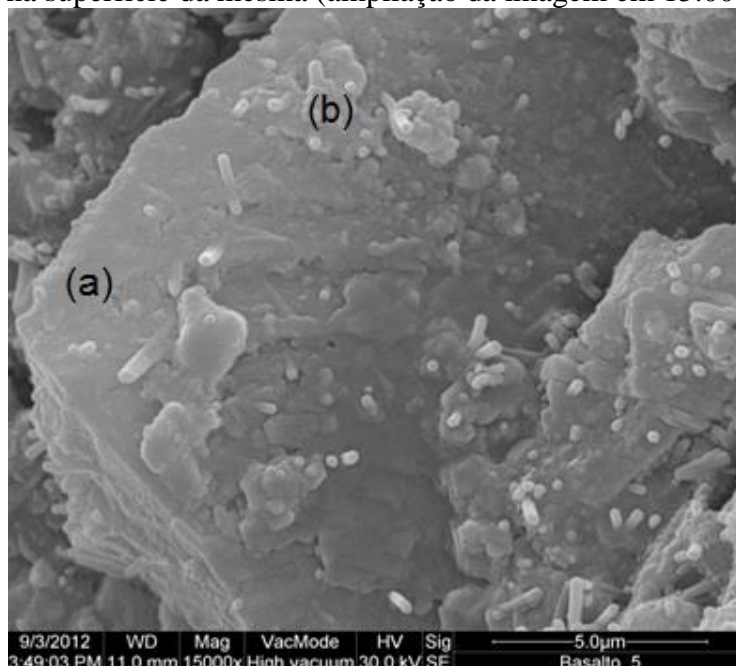
No Gráfico 8, onde são registradas as curvas referentes à temperatura interna ao longo de seis dias nos quatro protótipos, observa-se que o interior do protótipo com a argamassa REF-A apresentou os menores valores de temperatura (29,15°C), enquanto que a caixa revestida com a argamassa ARB apresentou um valor intermediário (31,22 °C), muito próximo dos valores apresentados internamente nos protótipos revestidos com as argamassas ARN (32,17°C) e ARA (31,92°C).

Das três argamassas contendo partículas de alumínio, as argamassas ARN e ARA, absorveram maior radiação solar, porém a argamassa ARB, mesmo tendo absorvido menor energia solar, foi a que conduziu maior quantidade de calor para o interior, uma vez que as temperaturas internas registradas nos protótipos foram muito próximas, como pode ser visualizado na Tabela 30.

Esse comportamento se justifica em função dos picos de alumínio detectados por difração de Raios-X e apresentados nos Gráficos 9, 10 e 12, onde se verificam picos pouco intensos de alumínio nas argamassas ARN e ARA, em função do mesmo ter sido dissolvido pelo meio alcalino, liberando hidrogênio e gerando maior porosidade nessas argamassas, fazendo com que as mesmas transmitissem menor quantidade de calor proveniente da radiação solar. Já na argamassa ARB, pode ser observado um pico bem mais intenso de alumínio, conforme pode ser visualizado no Gráfico 11, evidenciando a maior concentração desse metal na argamassa, o que favoreceu a transmissão de calor pela mesma.

Dessa forma, o agregado de resíduo de basalto, associado às partículas de alumínio, mostrou-se mais favorável para a transmissão de calor, uma vez que nessa argamassa houve menor dissolução das partículas do metal. Associado a isso, verificou-se a ocorrência de um elevado pico de Si na argamassa ARB como mostra o Gráfico 11, caracterizando os finos de basalto, sendo que essa fração finamente moída, presente pode ter contribuído para a ocorrência do efeito de nucleação, conforme a Figura 57, contribuindo ainda mais para a redução da porosidade, o que acentuou a transmissão de calor nessa argamassa.

Figura 57 – Ocorrência do efeito de nucleação em partícula fina de basalto (a) com a formação de cristais (b) na superfície da mesma (ampliação da imagem em 15.000 vezes)



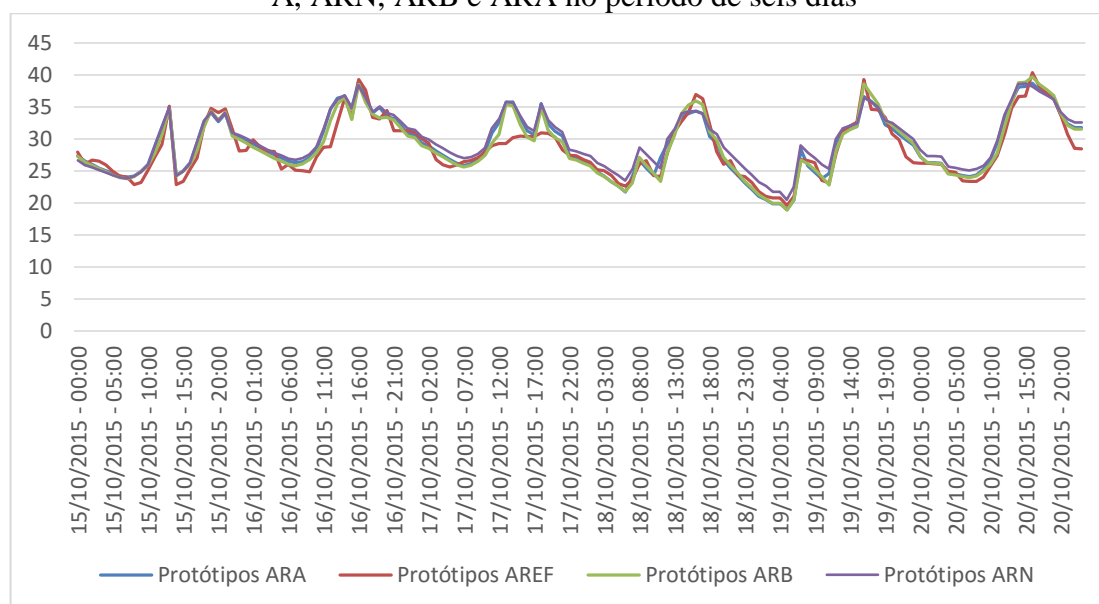
Fonte: Guerra, (2013).

Tabela 30 – Médias das temperaturas nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA tampa, laterais e vazio interior no período de seis dias

| TEMPERATURA °C | REF-A | ARN | ARB | ARA |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| TAMPA | 46,70 | 52,43 | 47,96 | 50,78 |
| LATERAIS | 35,43 | 39,38 | 36,93 | 39,03 |
| INTERIOR VAZIO MÉDIA | 29,15 | 32,17 | 31,22 | 31,92 |

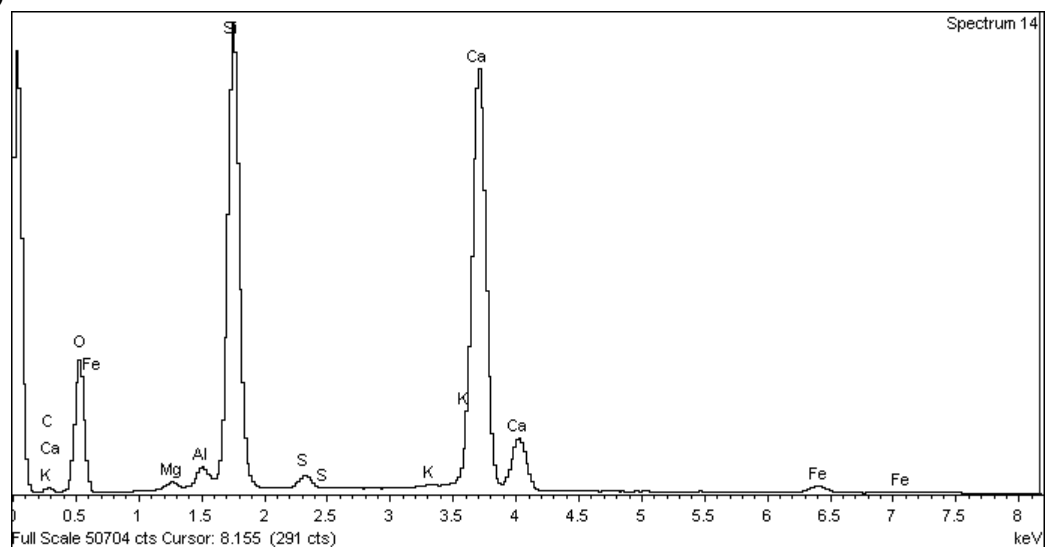
Fonte: A própria autora.

Gráfico 8 – Temperatura interna verificada nos protótipos revestidos com as argamassas REF-A, ARN, ARB e ARA no período de seis dias



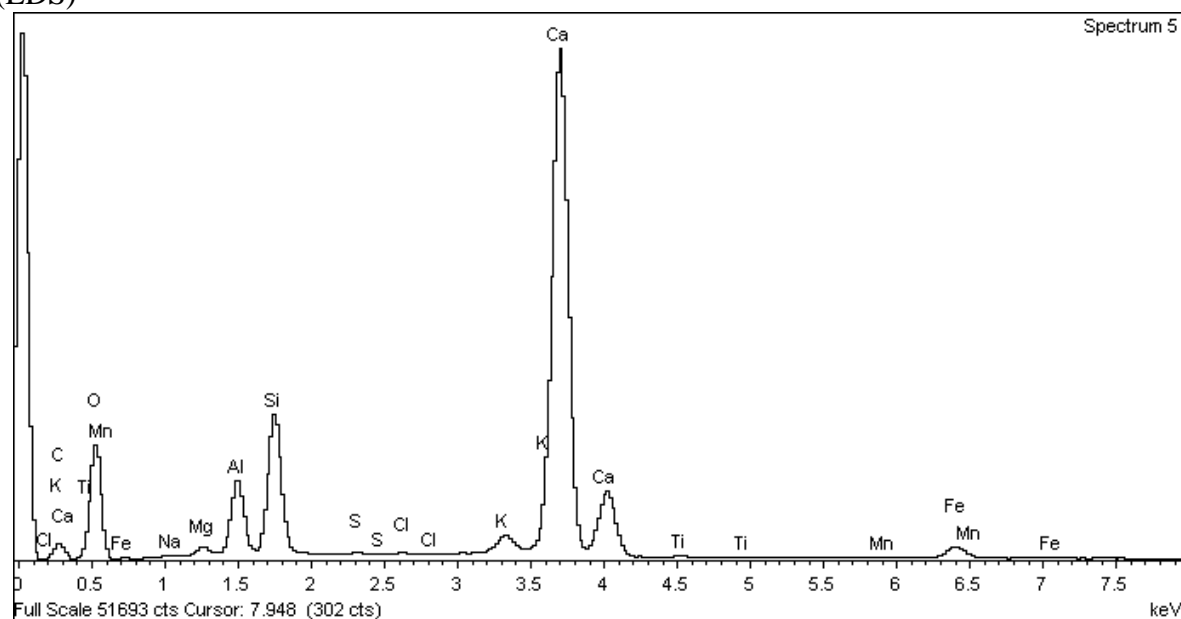
Fonte: A própria autora.

Gráfico 9 – Composição argamassa REF-A realizado por *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS)



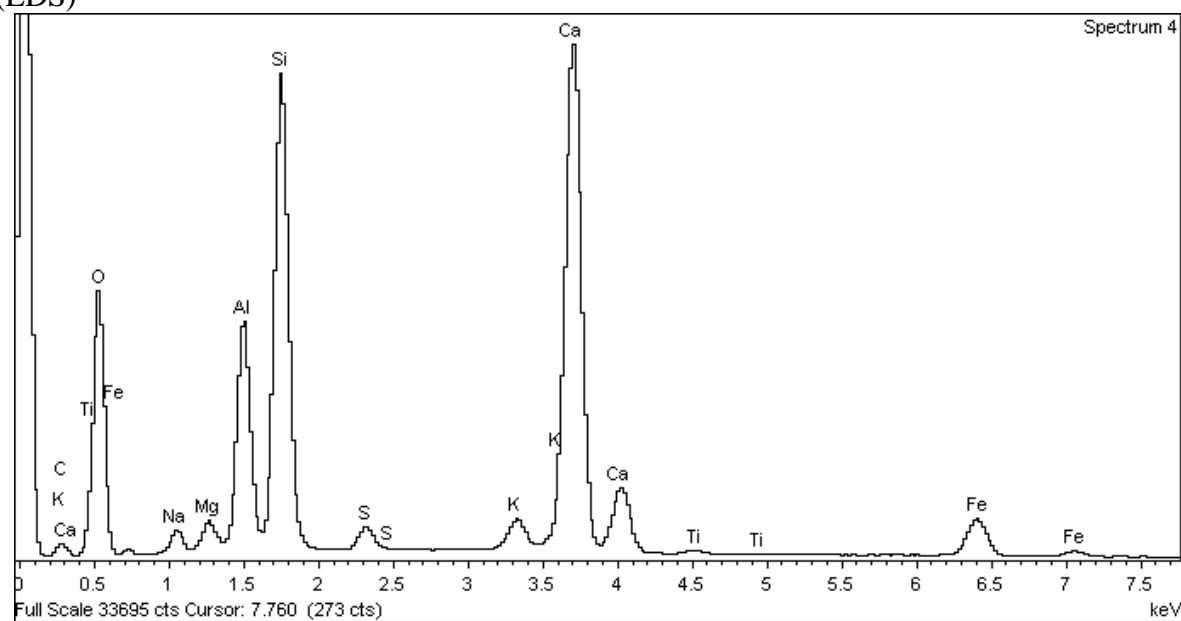
Fonte: A própria autora.

Gráfico 10 – Composição argamassa ARN realizado por *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS)



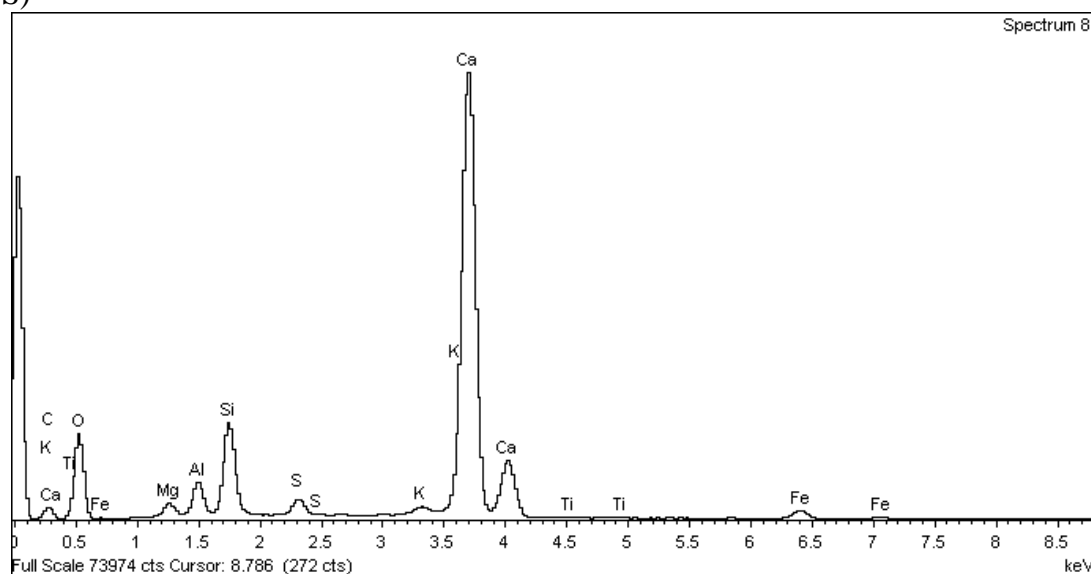
Fonte: A própria autora.

Gráfico 11 – Composição argamassa ARB realizado por *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS)



Fonte: A própria autora.

Gráfico 12 – Composição argamassa ARA realizado por *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS)



Fonte: A própria autora.

4.5 Análise dos componentes químicos das argamassas em estudo – microscopia eletrônica de varredura – (MEV)

Para a identificação dos minerais presentes nas argamassas, foram realizadas análises por microsonda eletrônica e difração de Raios-X, por meio de quatro corpos de prova, um de cada uma das argamassas estudadas, com as dimensões de 2,5 x 5,0 cm. Para isso, os mesmos foram triturados e foram retiradas amostras com dimensão aproximada de 0,5 x 0,5 cm para a confecção de lâminas delgadas recobertas com folha de ouro, conforme especificado no planejamento experimental 06 e apresentado na Figura 58.

Figura 58 – Lâminas das amostras REF-A, ARN, ARB e ARA para a análise no MEV



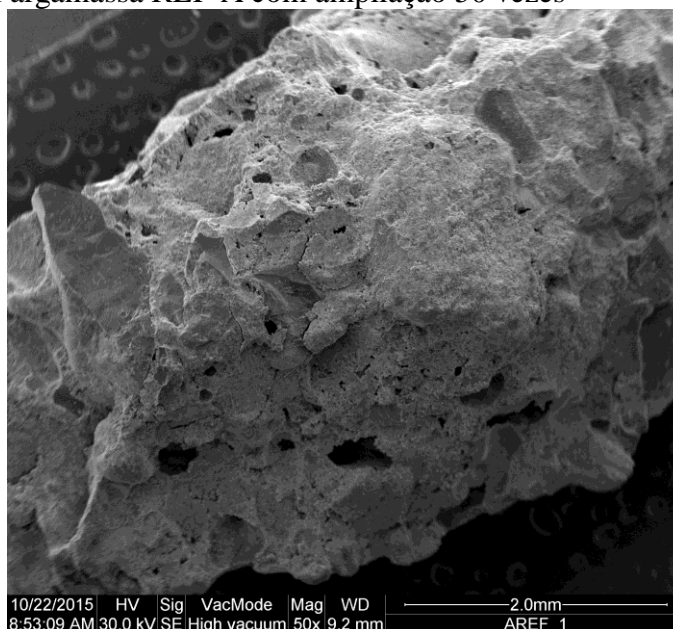
Fonte: A própria autora.

Por meio da microscopia eletrônica de varredura, observou-se a textura e a microestrutura das argamassas, destacando-se a presença de poros que ocorreram após a incorporação das partículas de alumínio. As Figuras 59, 60, 61 e 62, com ampliação de 50 vezes, permitiram observar-se a ocorrência dos poros nas quatro argamassas, destacando-se um aumento da porosidade em relação à argamassa de referência. Verificou-se que houve um aumento considerável na incidência de poros na argamassa ARN em comparação à sua referência REF-A, revelando uma estrutura acentuadamente cavernosa, o que justificou a redução na massa específica de $2,09 \text{ g/cm}^3$ para $1,58 \text{ g/cm}^3$, ou seja, da ordem de 24% e índice de vazios de 19,74%.

A argamassa ARB, ilustrada na Figura 61, apresentou uma granulação mais fina, decorrente do teor de finos presentes na areia de basalto, muito embora o volume de vazios incorporados tenha sido considerável, com índice de vazios de 26,54% e massa específica de $1,74 \text{ g/cm}^3$, 14% inferior à mesma argamassa sem alumínio, indicando que a presença de finos de basalto teve um papel importante.

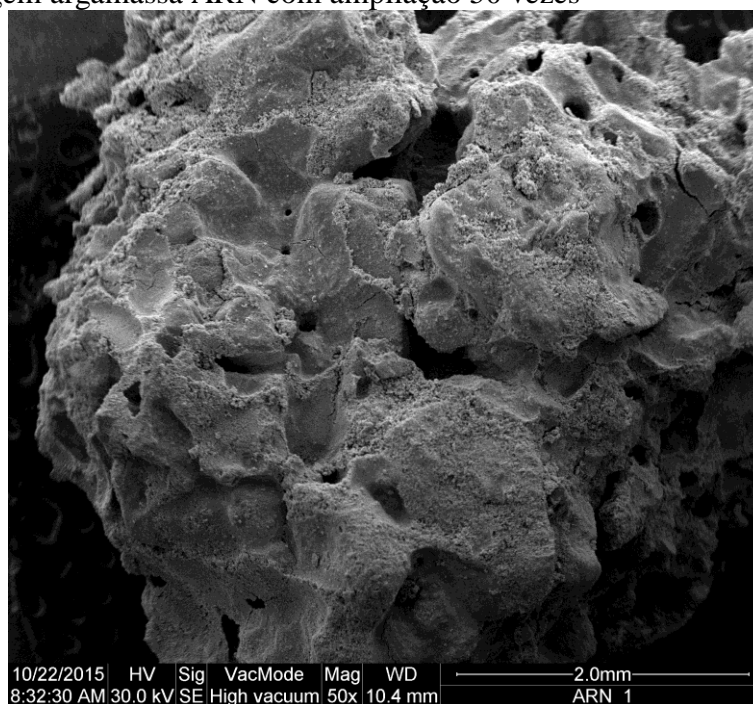
Já a argamassa ARA, conforme a Figura 62, por apresentar partículas mais grosseiras no agregado utilizado, apresentou uma granulação mais grossa, muito embora a sua massa específica igual a $1,75 \text{ g/cm}^3$ tenha sido 30% inferior à argamassa produzida com os mesmos materiais, porém sem a incorporação de alumínio. Da mesma forma que a argamassa ARB, a argamassa ARA apresentou uma microestrutura acentuadamente esponjosa.

Figura 59 – Imagem argamassa REF-A com ampliação 50 vezes



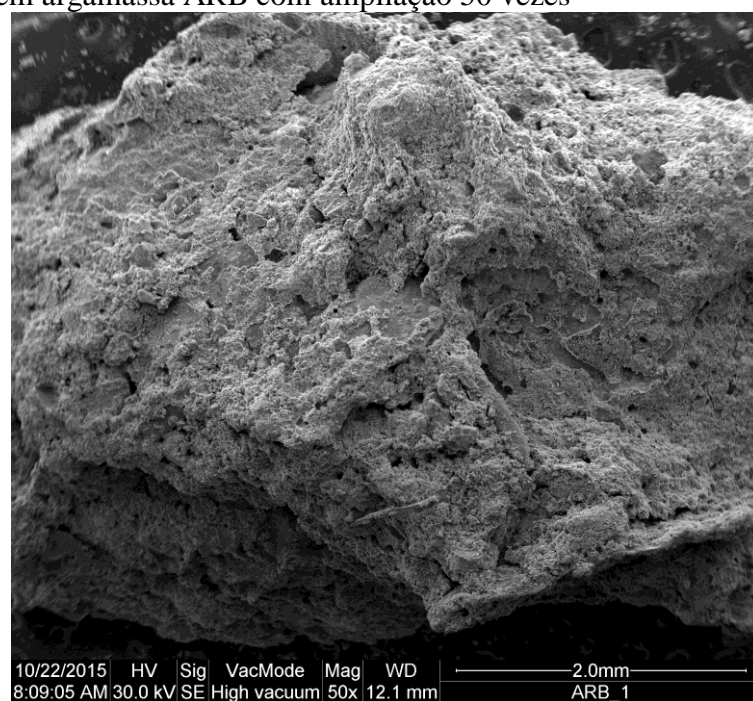
Fonte: A própria autora.

Figura 60 – Imagem argamassa ARN com ampliação 50 vezes



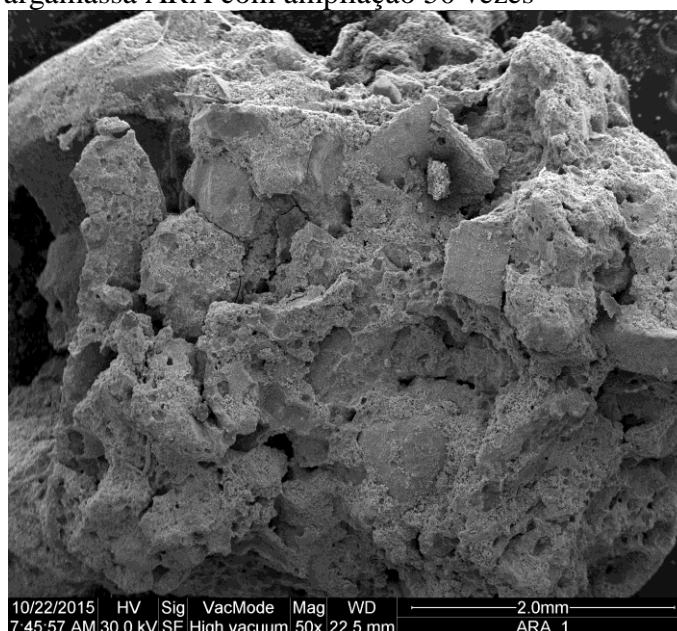
Fonte: A própria autora.

Figura 61– Imagem argamassa ARB com ampliação 50 vezes



Fonte: A própria autora.

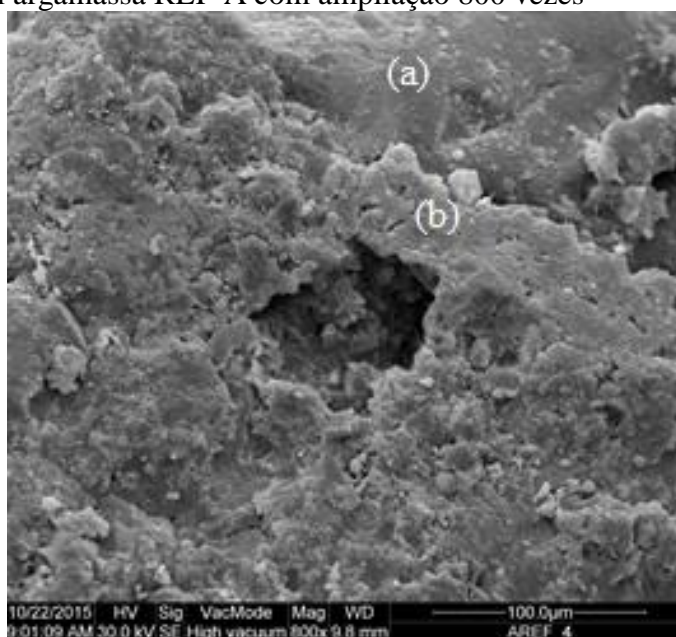
Figura 62– Imagem argamassa ARA com ampliação 50 vezes



Fonte: A própria autora.

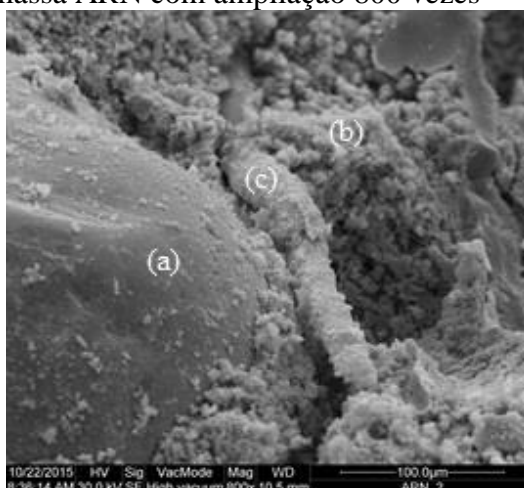
Nas Figuras 63 a 67 é possível diferenciar a presença dos agregados (a) circundados pela ocorrência de C-S-H (b). Nas Figuras 64 e 67, percebeu-se a presença de partículas de alumínio (c) e na Figura 66, a ocorrência de cristais aciculares de etringita (d). Nas Figuras 64, 65 e 66 ficou evidenciada uma maior porosidade na estrutura granular que envolveu os agregados.

Figura 63 – Imagem argamassa REF-A com ampliação 800 vezes



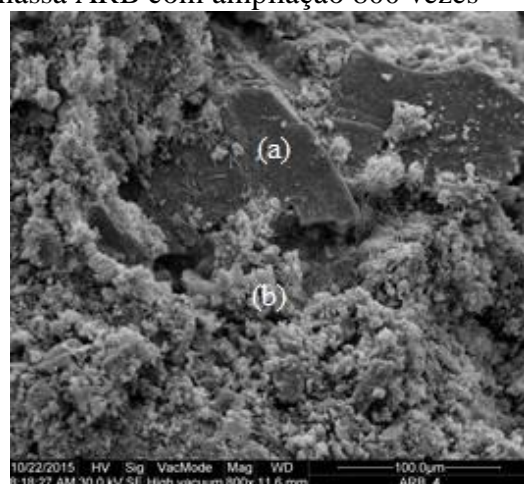
Fonte: A própria autora.

Figura 64 – Imagem argamassa ARN com ampliação 800 vezes



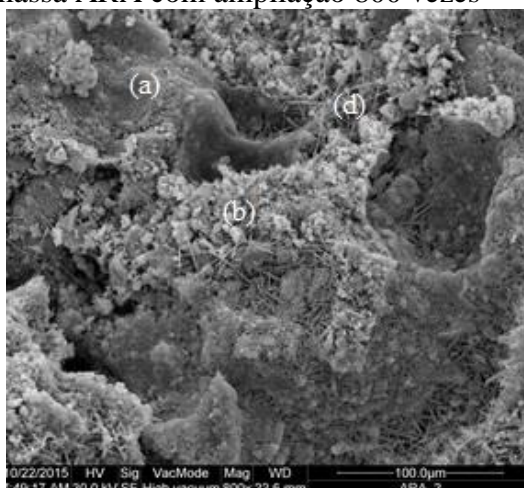
Fonte: A própria autora.

Figura 65 – Imagem argamassa ARB com ampliação 800 vezes



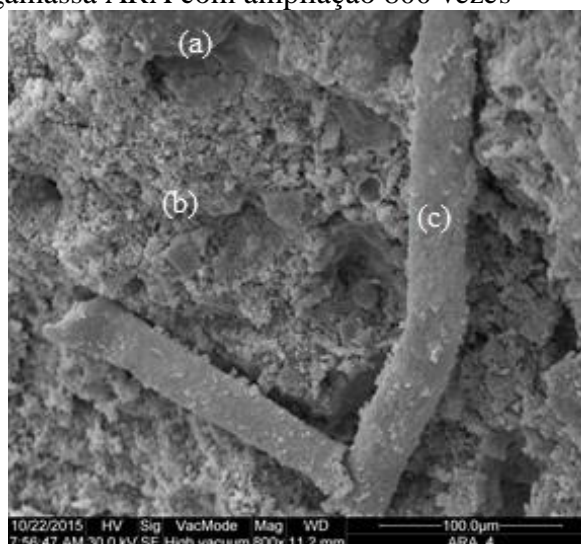
Fonte: A própria autora

Figura 66 – Imagem argamassa ARA com ampliação 800 vezes



Fonte: A própria autora.

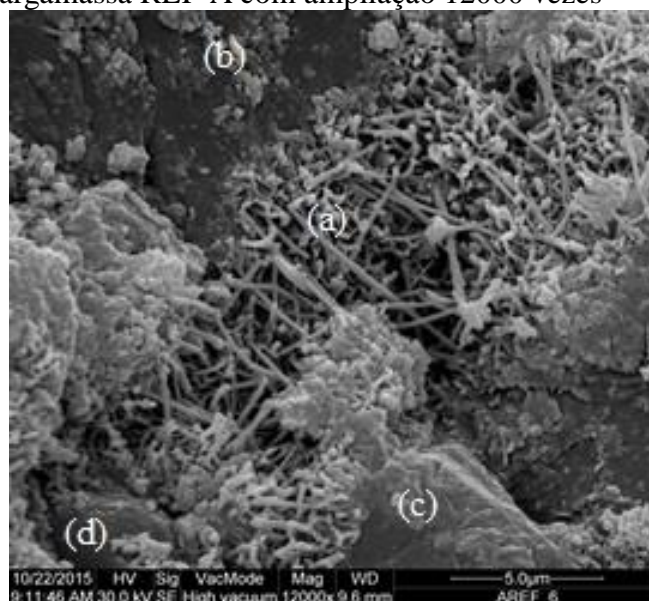
Figura 67 – Imagem argamassa ARA com ampliação 800 vezes



Fonte: A própria autora.

A Figura 68 apresenta a estrutura da argamassa de cimento e areia sem a adição de partículas de alumínio, revelando uma estrutura densa, com as evidências tradicionais desse tipo de argamassa, ou seja, estrutura acicular da etringita (a); estrutura granular do C-S-H (b); estrutura em placas hexagonais da portlandita (c) e grãos de areia quartzosa de rio (d).

Figura 68 – Imagem argamassa REF-A com ampliação 12000 vezes



Fonte: A própria autora.

A Figura 69 apresenta predominância da estrutura acicular da etringita (a) e ocorrência de C-S-H (b), evidenciando um aumento da porosidade em relação à argamassa de referência ilustrada na figura anterior, decorrente da incorporação de partículas de alumínio.

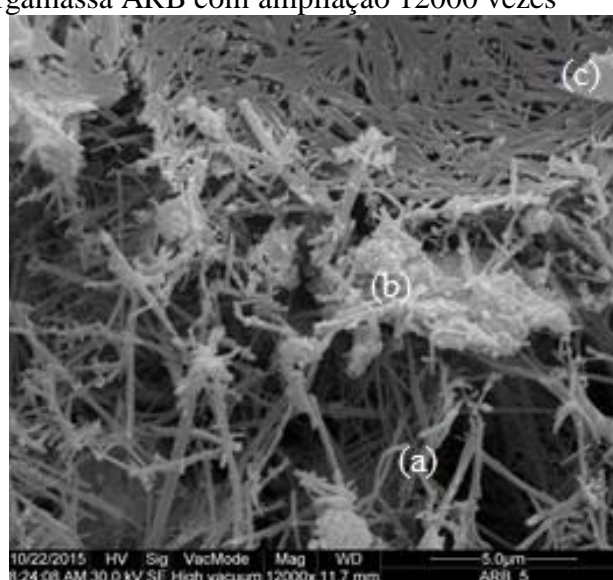
Figura 69 – Imagem argamassa ARN com ampliação 12000 vezes



Fonte: A própria autora.

Na Figura 70 observa-se uma estrutura porosa, decorrente da incorporação de partículas de alumínio na argamassa de areia de basalto, na qual foram identificados cristais de etringita (a), ocorrência de C-S-H (b) e portlandita (c). Nessa argamassa, foi determinado um teor de vazios da ordem de 26%, por meio do ensaio de índice de vazios, superior ao valor encontrado para as outras duas argamassas, as quais apresentaram índices de vazios da ordem de 19%.

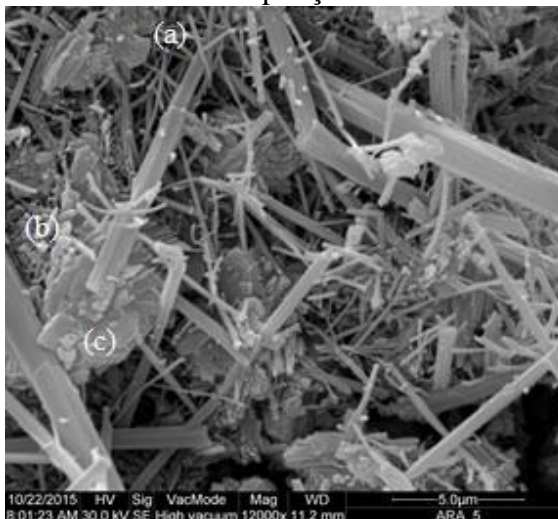
Figura 70 – Imagem argamassa ARB com ampliação 12000 vezes



Fonte: A própria autora.

Na Figura 71 observa-se uma estrutura menos porosa, decorrente da incorporação de partículas de alumínio na argamassa de areia de aciaria, com a ocorrência de estrutura acicular da etringita (a), sinais de C-S-H (b) e portlandita (c).

Figura 71– Imagem argamassa ARA com ampliação 12000 vezes



Fonte: A própria autora.

4.6 Análise dos componentes químicos das argamassas em estudo – ensaio de Difração de Raios-X - (DRX)

Para a identificação dos componentes químicos presentes nas argamassas, foram realizadas análises de difração de Raios-X por meio de amostras coletadas quando do preparo das argamassas (cimento e agregado), bem como de amostras do material triturado após as argamassas endurecidas, como apresentado na Tabela 31.

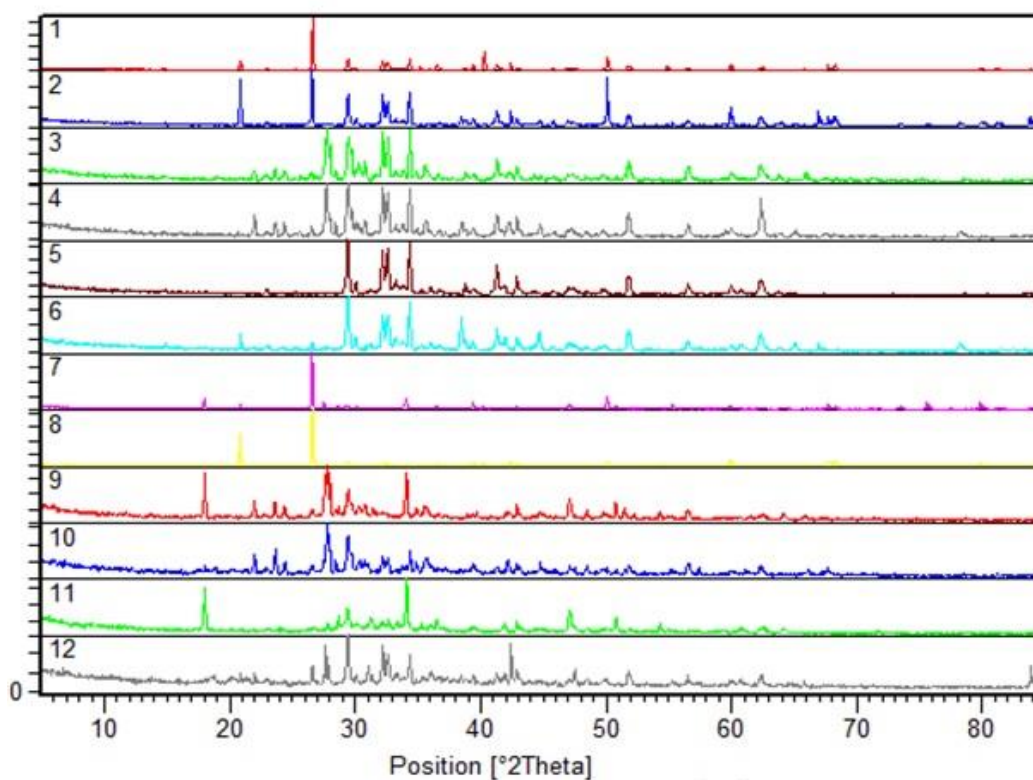
Tabela 31– Material selecionado para ensaio de Difração de Raios-X

| ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X – (DRX) | |
|---------------------------------------|---|
| AMOSTRA | COMPOSIÇÃO |
| 1 | Cimento + areia quartzosa natural de rio |
| 2 | Cimento + areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado |
| 3 | Cimento + areia de basalto |
| 4 | Cimento + areia de basalto + partículas de alumínio reciclado |
| 5 | Cimento + areia de escória de aciaria |
| 6 | Cimento + areia de escória de aciaria + partículas de alumínio reciclado |
| 7 | Argamassa com areia quartzosa natural de rio (REF-A) |
| 8 | Argamassa com areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado (ARN) |
| 9 | Argamassa com areia de basalto (REF-B) |
| 10 | Argamassa com areia de basalto + partículas de alumínio reciclado (ARB) |
| 11 | Argamassa com areia de escória de aciaria (REF- E) |
| 12 | Argamassa com areia de escória de aciaria + partículas de alumínio reciclado (ARA) |

Fonte: A própria autora.

Na Figura 72, podem-se visualizar os difratogramas das amostras ensaiadas, evidenciando-se as respectivas fases cristalinas referentes aos materiais analisados (cimento e agregado miúdo, cimento agregado miúdo e partículas de alumínio reciclado).

Figura 72 – Difratograma das amostras 1 a 12 dos materiais analisados



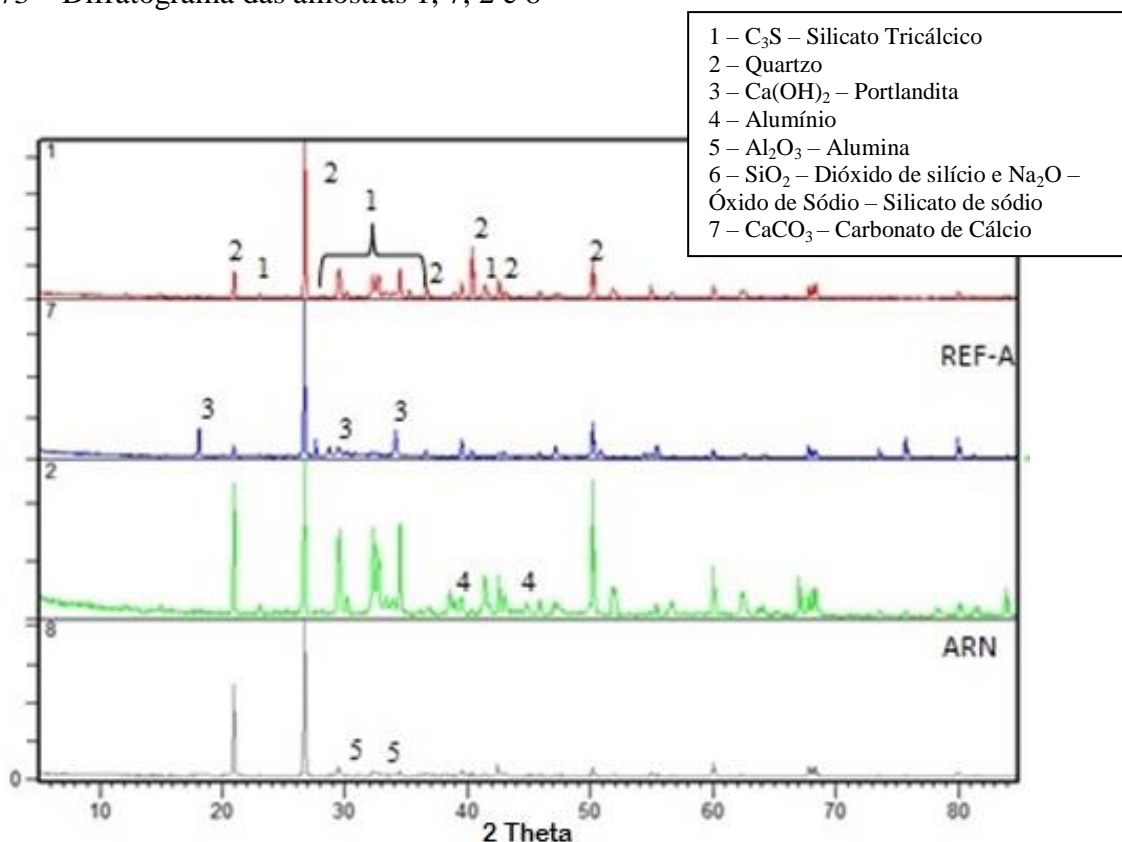
Fonte: A própria autora.

No difratograma da Figura 72, pode-se observar que a amostra 1 é composta pela fase cristalina de C_3S (Silicato Tricálcico) e quartzo. Na argamassa 7 a fase de C_3S quase desaparece e surge a fase $Ca(OH)_2$, Portlandita.

A amostra 2 é idêntica à amostra 1, com exceção da presença de alumínio metálico. Na argamassa 8, a fase C_3S persiste e a sua quantidade com relação ao quartzo é muito reduzida, constatando-se que não há a formação da fase $Ca(OH)_2$.

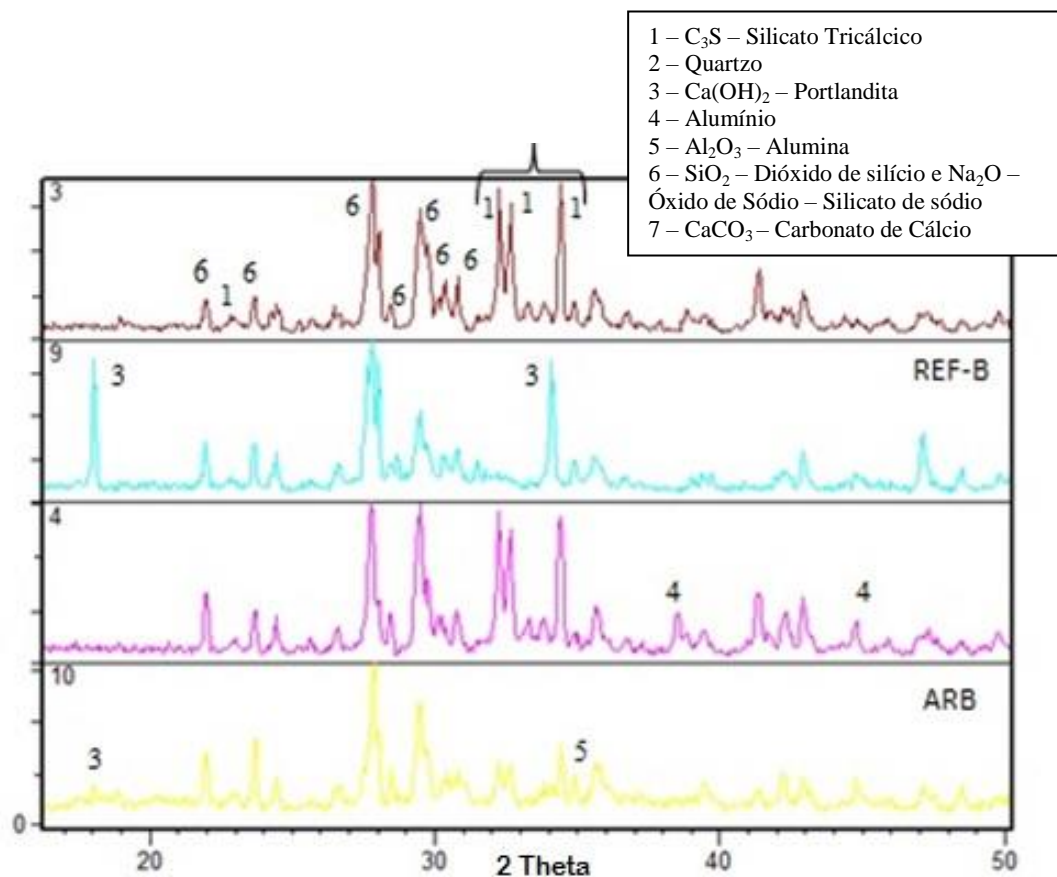
A Figura 73 apresenta o difratograma das amostras 1, 7, 2 e 8, constituídas por: cimento + areia quartzosa natural de rio, argamassa de cimento + areia quartzosa natural de rio (REF-A), cimento + areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado e argamassa de cimento + areia quartzosa natural de rio + partículas de alumínio reciclado (ARN), respectivamente.

Figura 73 – Difratograma das amostras 1, 7, 2 e 8



Fonte: A própria autora.

Figura 74 – Difratoograma das amostras 3, 9, 4 e 10



Fonte: A própria autora.

O difratograma da Figura 74 apresenta as amostras 3, 9, 4 e 10, cimento + areia de basalto, argamassa de cimento + areia de basalto (REF-B), cimento + areia de basalto + partículas de alumínio reciclado e argamassa de cimento + areia de basalto + partículas de alumínio reciclado (ARB) respectivamente.

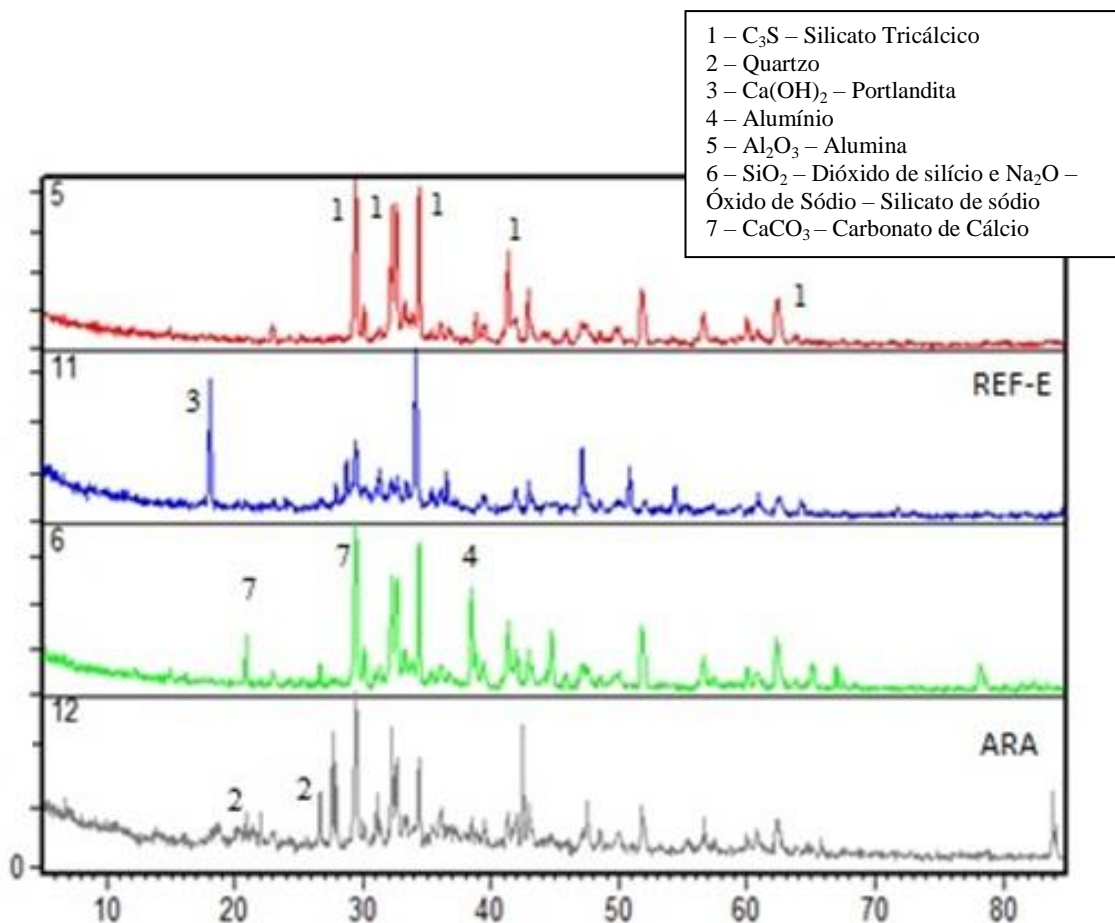
Pode-se verificar que as amostras 3 e 4 são idênticas, sendo que o diferencial é a presença de alumínio metálico na amostra 4.

Na argamassa da amostra 9 a fase C_3S quase desapareceu e a fase $Ca(OH)_2$ tornou-se evidente.

Na argamassa da amostra 10 algumas fases de C_3S desaparecem e a fase da $Ca(OH)_2$ foi identificada, mas não com a mesma intensidade, relativa ao pico em $18,11^\circ$, como na amostra 9, podendo significar que mais hidróxido de cálcio foi formado na reação da argamassa da amostra 9.

Na argamassa da amostra 10 houve indícios de que a fase cristalográfica do alumínio metálico desapareceu e a fase do óxido de alumínio (Al_2O_3) apareceu com um pico em $34,7^\circ$.

Figura 75 – Difratoograma das amostras 5, 11, 6 e 12



Fonte: A própria autora.

O difratograma da Figura 75, apresenta as amostras 5, 11, 6 e 12 cimento + areia de escória de aciaria, argamassa de cimento + areia de escória de aciaria (REF-E), cimento + areia de escória de aciaria + partículas de alumínio reciclado e argamassa de cimento + areia de escória de aciaria + partículas de alumínio reciclado (ARA), respectivamente.

Através do difratograma apresentado na Figura 75, pode-se observar que a amostra 5 é basicamente de C_3S . Já na argamassa da amostra 11, ocorreu a formação da portlandita $Ca(OH)_2$, com a redução de C_3S .

Na amostra da argamassa 6, observa-se a presença de $CaCO_3$ (Carbonato de Cálcio), C_3S e alumínio metálico. Já na argamassa da amostra 12, a fase C_3S se manteve e a fase de quartzo ficou mais evidenciada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Buscando o aumento de fontes de energia sustentáveis e o reaproveitamento de resíduos, o presente estudo tornou possível o desenvolvimento de diferentes argamassas utilizando resíduos de basalto, escória de aciaria elétrica e alumínio reciclado proveniente da operação industrial de torneamento. Os resíduos utilizados em substituição aos agregados miúdos, obtidos por processamento específico para adequação às características físicas desejáveis, foram caracterizados de acordo com as normas da ABNT, de forma a garantir sua granulometria, forma das partículas e demais características que os tornassem compatíveis com a trabalhabilidade e consistências necessárias para a produção das argamassas.

O emprego de todos esses resíduos permitiu concluir que os mesmos são viáveis como materiais para produção de argamassas, muito embora cada um deles apresente suas particularidades. De maneira geral, todos apresentaram desempenho favorável para uso em argamassa de revestimento, sendo que o papel das partículas de alumínio foi fundamental para a produção de uma argamassa expansiva, por meio da liberação de hidrogênio, verificada quando da inserção desse metal em ambiente alcalino.

No geral, as argamassas produzidas apresentaram desempenho compatível com as necessidades de manuseio no estado fresco, ou seja, boa aderência ao substrato na aplicação, coesão, retenção de água satisfatória, facilidade de serem aplicadas e extendidas.

As argamassas no estado endurecido apresentaram características satisfatórias, uma vez que, aplicadas como revestimento na espessura máxima de 2,5 cm, apresentaram superfície coesa, uniforme, não sendo verificada qualquer evidência de fissuras.

Os ensaios com corpos de prova revelaram uma taxa de carbonatação mais intensa que a verificada na argamassa de referência, devido ao aumento da porosidade aberta decorrente da liberação de hidrogênio. A resistência mecânica à compressão das argamassas de referência, ou seja, sem a incorporação de partículas de alumínio, determinada aos 28 dias, apresentou uma média de 30 MPa nas três argamassas de referência, ou seja, sem a incorporação de partículas de alumínio. Já as argamassas com a adição de partículas de alumínio apresentaram uma resistência mecânica à compressão da ordem de 1/3 desse valor, ou seja, 10 MPa. Considerando que uma argamassa convencional de revestimento, segundo o traço em

volume 1:2:9, apresenta uma resistência à compressão da ordem de 5,6 MPa aos 28 dias, conclui-se que os valores obtidos foram mais do que satisfatórios para esse fim.

No que se refere ao comportamento térmico de transferência de calor por condução nas paredes de concreto revestidas com as argamassas estudadas, verificou-se que as três argamassas apresentam capacidade potencial de absorção e transferência da energia solar, muito embora isso seja mais evidente na argamassa com resíduo de basalto.

No caso da argamassa com resíduos de basalto, o comportamento de transferência de calor foi mais intenso, uma vez que, nesse caso, não houve um consumo tão intenso do alumínio como nas outras argamassas, restando uma certa parcela de metal que não sofreu ataque, o que possibilitou que esse compósito apresentasse maior capacidade de condução de calor.

As argamassas com areia de aciaria e areia de rio, nas quais foram incorporadas as partículas de alumínio, apresentaram uma capacidade maior de manutenção da temperatura da água contida nos protótipos.

Dessa forma, a incorporação de partículas de alumínio reciclado em argamassas de diferentes constituições provocou expansão, interferiu na transferência de calor e reduziu as massas específicas quando comparadas com as respectivas argamassas de referência, comprovando a hipótese estabelecida no início desse estudo.

Verificou-se que a expansão foi decorrente do ataque das partículas de alumínio pelo meio alcalino característico das argamassas de cimento *Portland*, ocorrendo a liberação de hidrogênio, o qual agiu como agente expensor.

O estudo tornou possível identificar e atestar o potencial das argamassas expansivas produzidas na pesquisa para revestimento na construção civil, em função de seu desempenho térmico frente à radiação solar, bem como viabilizar a utilização do alumínio reciclado, da areia de basalto e da escória de aciaria elétrica na produção de argamassas de revestimento.

Para a elaboração de projetos que viabilizem o conforto interno de edificações, pode-se utilizar, além da especificação das aberturas e de melhores materiais para fazer a composição da envoltória (paredes e cobertura), argamassas expansivas como revestimento para intensificar a transferência do calor em locais com clima frio (agregados com alto potencial de condutividade térmica) ou servir como isolante térmico para locais com clima quente (agregados com baixo potencial de condutividade térmica), desde que sejam escolhidos os agregados corretos ao uso bem como o teor de alumínio para a composição.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, dando continuidade a esse estudo, indicam-se as seguintes proposições:

Avaliar diferentes teores de adição de partículas de alumínio como agentes de liberação de hidrogênio em argamassas de cimento *Portland*.

Desenvolver estudos para se verificar o fenômeno da incorporação de ar nas argamassas.

Verificar a interferência da dimensão e da forma das partículas de alumínio no processo de liberação de hidrogênio por meio da ação do meio alcalino característico das argamassas de cimento *Portland*.

Estudar a interferência do teor de portlandita Ca(OH)_2 presente na pasta, na corrosão do alumínio e conseqüente liberação de hidrogênio.

Verificar o coeficiente de condutividade térmica da areia quartzosa natural de rio, da areia de basalto e da areia de escória de aciaria elétrica, para avaliar a interferência do mesmo na transferência e no isolamento de calor das argamassas estudadas.

Desenvolver estudos com as argamassas utilizando outros tipos de cimento, como o CP II-F e CP II-E, uma vez que o cimento CP II-F é considerado ideal para o uso em argamassas, por possuir apenas a adição de *filler* calcário, em teores de até 10% (calcário moído à dimensão do cimento, material passante na peneira 0,075mm) e o cimento CP II-E, por ser composto de 90% a 94% de cimento puro, ou seja, clínquer mais gesso com adição de 6% a 10% de material carbonático (*filler*) em massa.

Desenvolver blocos de concreto para alvenaria de vedação utilizando partículas de alumínio e resíduos em substituição ao agregado miúdo.

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. v. 44, ed. 5, p. 997-1004, 2009.

ADENE – **Academia Adene Agência para a Energia** – Disponível em: <http://www.adene.pt>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

ALMEIDA, I. Disponível em: <http://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2012/07/e-preciso-persistencia-diz-nobel-de-quimica-sobre-teoria-dos-quasicristais.html>. Acesso em: 05 de outubro de 2015.

AMBIENTE BRASIL. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/>. Acesso em 30 de maio de 2015.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. **Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2003.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. São Paulo, 2005. 156 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

ANTUNES, G. R. **Estudo de Manifestações Patológicas em Revestimentos de Fachada em Brasília: Sistematização da incidência de casos**. 178p. Dissertação (mestrado). Faculdade de Tecnologia. UnB, Brasília, 2010.

ARCELORMITTAL TUBARÃO – Disponível em <http://www.cst.com.br/index.asp> acesso em novembro de 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. **Anuário Estatístico 2009**. São Paulo: 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO - ABAL. Disponível em: < <http://www.abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio> >. Acesso em: 08 março 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

- _____. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, jul. 1991.
- _____. **NBR 5733**: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, jul. 1991b.
- _____. **NBR 5735**: cimento Portland de alto forno. Rio de Janeiro, jul. 1991.
- _____. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, jul. 1991.
- _____. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas – requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005 - jul. 2009a.
- _____. **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão - especificação. Rio de Janeiro, dez. 1996.
- _____. **NBR 7222**: concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, maio 2011.
- _____. **NBR 7251**: determinação da massa unitária do agregado no estado solto. Rio de Janeiro, 1982.
- _____. **NBR 9776**: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 9778**: determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica – argamassa e concreto endurecidos. Rio de Janeiro, 1987 - 2009.
- _____. **NBR 9935**: agregados – terminologia. Rio de Janeiro, abr. 2005e.
- _____. **NBR 10004**: resíduos sólidos. Rio de Janeiro, nov. 2004a.
- _____. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006**: gestão de qualidade – diretrizes para a qualidade no gerenciamento de projetos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos - critérios para projeto, construção e operação – procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 11578**: cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. **NBR 12094**: espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico - determinação da condutividade térmica - método de ensaio. Rio de Janeiro, set. 1991a.

_____. **NBR 12989**: cimento Portland branco. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

_____. **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 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para Projeto, Implantação e Operação - procedimento. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 13529**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, ago. 2013.

_____. **NBR 13530**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 14081**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentos sem função estrutural. Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

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

_____. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15270**: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação. Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR NM 23: 2000**: cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Riode Janeiro, Jun., 2001.

_____. **NBR NM 26**: agregados – amostragem. Rio de janeiro, set. 2009b.

_____. **NBR NM 45**: agregados - determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, abr. 2006.

_____. **NBR NM 52**: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, nov. 2009c.

_____. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Nov. 2003b.

ASTM C 150 Standard Specification for Portland Cement.

ATKINS, M.; GLASSER, F. P. **Application of Portland cement-based materials to radioactive waste immobilisation**, Waste Management, 12, (1992) pp. 105-131, 1992.

BALATON, V. T.; GONÇALVES, P. S.; FERRER, L. M. **Incorporação de Resíduos Sólidos Galvânicos em Massas de Cerâmica Vermelha**. Cerâmica Industrial, v. 7, n. 6, nov./dez. 2002. Disponível em: <http://www.ceramicaindustrial.org.br/pdf/v07n06/v7n6_07.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2015.

BANFILL, P. F. G. **The reology of fresh cement and concrete – a review**. In: International Cement Chemistry Congress, 11. 2003, Duban. Anais...Duban, 2003.

BARBOSA, M. T. G; COURA, C. V. G.; MENDES, L. de O. **Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 51-60, out./dez. 2008.

BARRIA, I. **Energia Solar nos Edifícios – Mercado Aposta no Desenvolvimento Tecnológico**. Revista Engenharia & Vida, nº34, pp. 64 a 76, Abril 2007.

BARROS, E. V. de. **A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica**. ENGEVISTA, v. 9, n. 1, p. 47-56, junho 2007.

BARROS, H. D. A. de. **Estudo e avaliação das componentes térmicas na utilização de energia em edifícios**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade da Madeira. Funchal. Portugal, 2009.

BASEGIO, T.; BERUTTI, F.; BERNARDES A. **Environmental and technical aspects of the utilization of tannery sludge as a raw material for clay products**. Journal of the European Ceramic Society, v. 22, p. 2251-2259, 2002.

BAUER, E. **Revestimento de argamassa – características peculiares**. Brasília: LEM-Unb. Sinduscon, 92 p. 2005.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, p. 95-105, 2005.

BAYER, R; LUTZ, H; **Dry Mortars – Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Wiley – VCH, Germany, 2003.

BECKSTEAD, M. W. **Correlating aluminum burning times**. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 41: 533-546, 2005.

BEN-ABRAHAM, S.I. **What is a crystal?** Z. Kristallogr., v. 222, p. 310-310, 2007.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007, 211p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BOLTSHAUSER, J. **História da arquitetura**. v. 1. Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, 1963.

BRANCO, J. PAZ; **“Manual do Pedreiro”**, LNEC, Lisboa, 1981.

BUNKER, B. C.; NELSON, G. C.; ZAVADIL, K. R.; BARBOUR, J. C.; WALL, F. D.; SULLIVAN J. P. **Hydration of passive oxide films on aluminum**. J. Phys Chem. B. 106:4705-4713, 2002.

BUTTER, P. L. **Desenvolvimento de um modelo de gerenciamento compartilhado dos resíduos sólidos industriais no sistema de gestão ambiental da empresa.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CAIMEX. **Produtos Kayati SL-CRAS.** Disponível em: www.caimex.com.br. Acesso em maio de 2015.

CALLISTER, JR. W. D. **Materials science and engineering an introduction.** New York: John Wiley & Sons, New York, NY, 1991.

CALLISTER, JR. W. D. **Materials science and engineering an introduction.** New York: John Wiley & Sons, New York, NY, 2007.

CARACELLI, I. **Nobel em química 2011: Descoberta dos quase cristais, uma nova classe de sólidos.** Revista Química Nova na Escola, vol. 33, nº 4, novembro de 2011.

CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, IV., Brasília. Anais... Brasília: ANTAC, 2001. p. 43-67, 2001.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 1. ed. São Paulo: Arte Interativa, Cap. 26, 2007.

CARDOSO, F., A. **Método de reformulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico.** São Paulo, Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-Residenciais.** 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa.** Ambiente Construído, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 37-44, jul/dez. 1997.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. **Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas**. Escola Politécnica de São Paulo- Departamento de Engenharia Civil. Boletim Técnico – serie BT/PCC, São Paulo, EPUSP, 1999.

CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassas compostas a partir de curvas granulométricas**. São Paulo, 1999. 203 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

CARNEIRO, A. P.; BURGOS, P. C.; ALBERTE, E. P. V. **Caracterização do entulho de Salvador visando à produção de agregado reciclado**. In: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Salvador – BA. Anais... Salvador: Antac, v II, p. 932, 2000.

CARVALHO JR., A. N.; BRANDÃO, P. R. G.; FREITAS, J. M. C. **Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, p. 518-529, 2005.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M. N.; GOMES, V.; DELLA, V. P.; HORTZA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. **Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais: Processamento e Aplicações no Setor Cerâmico**. Cerâmica Industrial vol. 13, janeiro/abril de 2008.

CASELATO, L. **Panorama da Escória de Aciaria no Brasil**. Instituto Aço Brasil. Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/chsalgado/lucila-caselato>>. Acesso em: 14 de abr. 2014.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ANTAC, p. 83-94, 2005.

CASTRO A. F. D. de – **Reaproveitamento dos resíduos de usinagem: estudo de caso na indústria automotiva**. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – escola de Engenharia de Materiais – RS, Junho de 2003.

CASTRO, A. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito a carbonatação**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

CENTRO DE INFORMAÇÕES METAL MECÂNICA - CIMM. Disponível em <http://www.cimm.com.br/portal/>. Acessado em 08/03/2015.

CHAGURI JUNIOR, J. J. **Sistemas prediais de aquecimento de água a gás: parâmetros de dimensionamento e gerenciamento.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2009.

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.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Boletim Técnico n. 68, 1995.

CINCOTTO, M. A.; RAGO, F. A. **A reologia da pasta de cimento e a influência da cal.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, I., 1995, Goiânia. Anais...Goiânia: SBTA, 1995.

CLAUSER, C.; HUEGES, E. **Thermal conductivity of rocks and minerals.** Hannover: American Geophysical Union, 1995.

COLLIER, N. C.; MILESTONE, N. B.; SWIFT, P. D. **Immobilisation matrices for intermediate level nuclear wastes using sulphate activated BFS/OPC and PFA/OPC composite cements.** Advances in Applied Ceramics, 109 [5] (2010) pp. 269-274, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.

_____. Resolução 257, 30/06/99, DOU 22/07/99. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

_____. Resolução 258, 30/06/99, DOU 02/12/99. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

_____. Resolução 263, 12/11/99, DOU 22/12/99. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

_____. Resolução 307/02, 05/07/02, Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

_____. Resolução 469/15, 29/07/15, Publicada no DOU nº 144, de 30 de julho de 2015, Seção 1, pag. 109 a 110. Altera art. 3º da Resolução CONAMA nº 307/2002. Que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

CONSTANTINO, V. R. L.; ARAKI, K.; SILVA, D. O.; OLIVEIRA W. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Química Nova, Vol. 25, nº 3, 2002.

COSTA, R. N. A. **Viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais.** Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, 2007.

COUTINHO, A. S.; **Fabrico e propriedades do betão**, Volume II – Propriedades das matérias-primas; Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1997.

COWNDEN, R.; NAHON, M. **Performance modeling and improvements of a solid polymer fuel cell system.** In: **Proceedings of the 2nd International Fuel Cell Conference.** Kobe, Japan, p. 355-358, 1996.

CUCHIERATO, G. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico.** São Paulo, 2000. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000.

CUNHA, E. G. da. **Elementos de arquitetura de climatização natural: método projetual buscando eficiência energética nas edificações.** Passo Fundo: UPF, 2004.

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.

CZECH, E. TROCZYNSKI, T. **Hydrogen generation through massive corrosion of deformed aluminum in water.** Materials Engineering Department, University of British Columbia, 309-6350 Stores Rd., Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada. International Journal of Hydrogen Energy, 35, p. 1029-1037, 2010.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia.** Ed. Livros Técnicos Científicos. São Paulo. Cap.2, p. 4-35, 1969.

DASSAULT SYSTÈMES. The 3D. **Experience Company**. Disponível em: <<http://www.3ds.com/>> Acesso em: 8 set. 2014.

DELTOMBE, E.; POURBAIX, M. **Electrochemical behaviour of aluminum-potential pH diagram of the system Al-H₂O at 25°C**. Corrosion; 14. 496t, 1958.

De PONTE, F.; Di FILIPPO P. **Reference guarded-Hot-plate apparatus for determination properties in agreement with the new international standard**. ISO copyright office, CH-1211, Geneva 2, 1999.

DOVI, V.G., FRIEDLER, F.; HUISINGH, D.; KLEMES, J.J. 2009. **Cleaner energy for sustainable future**. J. Clean. Prod. 17, 889-895.

ECCLESIA. Principais conferências internacionais sobre o meio ambiente e documentos resultantes. Disponível em: www.ecclesia.com.br/biblioteca/fe_e_meio_ambiente/principais_conferencias_internacionais_sobre_o_meio_ambiente_e_documentos_resultantes.html>. Acesso em: 16 mar. 2015.

EDWARDS, B. **O Guia Básico para a Sustentabilidade**. 2ª edição. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

ELLIS, P. R. **Analysis of mortars (to include historic mortars) by differential thermal analysis, in: Historic Mortars, Characteristics and Tests, Proceedings**. RILEM Publications (2000) pp. 133-147, 2000.

EMODICO, **Dicionário Técnico, European Mortar Industry Organization**, 3ª Ed, 22 p.2001.

EPOCANEGÓCIOS. Disponível em: <http://epocanegocios.globo.com/Mundo/noticia/2015/12/nacop-21-principe-charles-elogia-politica-de-combate-ao-desmatamento.html>. Acesso em: 20/12/2015

FAN, M. Q.; XU, F.; SUN, L. X. **Studies on hydrogen generation characteristics of hydrolysis of the ball milling Al-based materials in pure water**. Int Journal Hydrogen Energy, 32: 2809-2815, 2007.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e meio ambiente no Brasil: relatório preparado para o CGEE PNUD** – São Paulo, 2002.

FERREIRA, J. D. L. **Análise de Sensibilidade de Fatores de Desempenho Térmico de Edifícios**. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2012.

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.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: Estudos e procedimento de execução**. 2º edição, Editora Pini, 2009.

FONSECA, M. R. M. **Química geral: físico química**. São Paulo: FTD, 1992.

FOOTE, J. P.; THOMPSON B. R.; LINEBERRY, J. T. **Combustion of aluminum with steam for underwater propulsion**. In: Roy Gabriel D. editor. *Advances in chemical propulsion: science to technology*. Arlington, Virgínia, USA: Office of Naval Research, p. 154-67, 2001.

FOSSATI, M. LAMBERTS, R. **Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C**, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 59-69, abr./jun., 2010.

FRANZONI, F.; MILANI, M.; MONTORSI, L. GOLOVITCHEV, V., **Combined hydrogen production and power generation from aluminum combustion with water: Analysis of the concept**. *International journal of hydrogen energy*, 35; p.1548-1559, 2010.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 3ªed. São Paulo: Studio Nobel, 1999.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL - FEPAM – **Relatório sobre a geração de resíduos sólidos industriais no estado do Rio Grande do Sul**, RS, maio de 2003.

GEHLEN, I. V. Exploração de basalto na região das missões do estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo, 2007.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GEOLOGICAL SOCIETY; **Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes**, Edited by Smith, M.R.; Collis, L.; Geological Society, England, 1993.

GERMANI, D. J. **A mineração no Brasil. Relatório Final.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

GEYER, R.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria elétrica como adição ao concreto.** 2001. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GIFFONE, P. O.; LANGE, L. C. **A utilização de borra de fosfato como matéria prima alternativa para a fabricação de tijolos.** Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, v. 10, n. 2, abr./jun. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522005000200006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 26 fev. 2015.

GLASSER, F. P. **Chemistry of cement-solidified waste forms.** In: R. D. Spence (Eds.), Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms, Lewis Publisher, USA (1993) pp. 1-39, 1993.

GOMES, C. B. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

GONÇALVES, S. R. C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso.** Brasília, 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, 2004.

GONÇALVES, H. I. N. **Revestimento de parede como componente passivo para controlo de humidade ambiente.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. Portugal, 2010.

GONÇALVES, E. V.; LIRA, D. F. de. **O licenciamento ambiental nas atividades de mineração.** In: Âmbito jurídico, Rio Grande, XV, N.102, JUL. 2012. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n_link=revista-artigos_leitura-artigo_id=12009>acesso em junho 2015.

GRAF, H. F. **Diminuição dos impactos ambientais de edificações em áreas de relevante interesse ambiental.** Monografia (pós graduação MBA em Sistema de Gestão Ambiental), Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2008.

GRAF, H. F. **Transmitância térmica e energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR**

12721. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GRAF, H. F.; TAVARES, S. F. **Energia Incorporada dos Materiais de uma Edificação Padrão Brasileira Residencial.** Curitiba: Ed. Universidade Tecnológica do Paraná, 2010. Disponível em: <http://sites.unifebe.edu.br/congressoits2010/artigos/artigos/087-energia_incorporada_dos_materiais_de_uma_edificacao_padrao_brasileira_residencial.pdf>. Acesso em: 10 julho. 2015.

GRAFFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica.** Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GROSJEAN, M. H.; ZIDOUNE, M.; ROUE, L.; HUOT, J. Y. **Hydrogen production via hydrolysis reaction from ball-milled Mg-based materials.** Int Journal Hydrogen Energy, 31: 109-119, 2006.

GUERRA, L. **Viabilidade técnica da adição de finos de basalto na pasta de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, 2013.

GUIA INTERNET BRASIL. Disponível em: <http://www.guianet.com.br/brasil/mapageologia.htm>. Acesso em maio de 2014.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

GUPTA, J. D.; KNELLER, W.A.; TAMIRISA, R.; JANKUN, E.S. **Characterization of base and subbase iron and steel slag aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains.** Transportation Research Record, Washington. D.C. n.1434, P. 08-16, 1994.

HALLIDAY, S. P. **Architecture of habitat: design for life.** The Royal society, London, 1997.

HOFFMANN, P. **Tomorrow's energy: hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet.** 1st ed. USA: MIT Press; p. 141-160; 2002.

HUYNH, M.; LAEFER, D. F. **Expansive cements and soundless chemical demolition agents: state of technology review.** In: 11th Conference on Science and Technology, 2009, Ho Chi Minh.

Anais... Ho Chi Minh: Vietnam Academy of Science and Technology, Vietnam, 2009. Disponível em: <<http://irserver.ucd.ie/dspace/bitstream/10197/2285/1/79.pdf>>. Acesso em: maio de 2015.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e massa**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos LTC, 2003.

INGENITO, A.; BRUNO, C. **Using aluminum for space propulsion**. **Journal of Propulsion and Power**, 20: 1056-1063, 2004.

INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR. Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/site/portugueses/sustentabilidade/relatorio.asp>, 2012. Acesso em março de 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA – IBS. Index. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/index.swf>>. Acesso em: 05 maio. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730: **Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**. 1994.

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.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 113p. Tese Livre Docência, 2000.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, V., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: AN-TAC, p. 47-63, 2003.

JOHN, V. M. **A construção, o meio ambiente e a reciclagem**. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_construcao_e.htm> Acesso em: 25 maio de 2015.

JONES, N. C.; DOBSON, C. J.; HANLEY, P. J. **High quality steel slag aggregate for road construction**. The Slag Reduction Company Ltd, 15p, Australia, 1996.

KATWAL, R.P.S.; SONI, P.L. **Biofuels: an opportunity for socioeconomic development and cleaner environment**. Indian For. 129, 939-949, 2003.

KAWANO, Patente nº 4,316,583. Disponível em <<http://www.patft.uspto.gov>>. Acesso em fevereiro de 2015.

KINOSHITA, H., SWIFT, P., UTTON, C., CARRO-MATEO, B., MARCHAND, G., COLLIER, N. and MILESTONE, N. **Corrosion of aluminum metal in OPC- and CAC-based cement matrices**. Cement and Concrete Research, 50: p. 11-18, 2013.

KLOPROGGE, J. T.; RUAN, H. D.; FROST, R. L. **Thermal decomposition of bauxite minerals: infrared emission spectroscopy of gibbsite, boehmite and diaspore**. J. Mater. Sci., 37 (2002) pp. 1121-1129, 2002.

KOEHLER, E, P.; FOWLER, D. W. **Summary of concrete workability test methods**. ICAR Report 105.1 International Center of Aggregates Research, Austin, 2003.

KUPERMAN, S. C. **Estudos para o desenvolvimento de um concreto expansivo**. Tese doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo, 1992.

KURDOWSKI, W.; GEORGE, C. M.; SORRENTINO, F. P. **Special Cement's. 8 International Congresso in the Chemistry of Cement**. Vol. 1, p. 292-318. Rio de Janeiro, Setembro 1986.

KRAEMER, M. E. P. **A questão ambiental e os resíduos industriais**. XXV ENEGEP Porto Alegre, RS, Brasil, 29 de Outubro a 01 de Novembro de 2005.

KRAUSE, C. B.; SANTOS M. J. O.; NIEMEYER, M. L.; PORTO, M. M.; GOMES, A. M. R. C.; TEIXEIRA, K. C.; GOMES, J. C. P. **Bioclimatismo no projeto de arquitetura: dicas de projeto**. PROARQ - DTC – UFRJ. P. 82, 2005.

KRENZINGER, A.; BLAUTH, Y. B.; WISBECK, J. O. **Seguidor Dinâmico de Máxima Potência para Painéis Solares**; In: XIV Congresso Brasileiro de Automática, 2002, Natal-RN, pp. 985-990, Setembro, 2002.

LALANDE, G. DENIS, M. C.; GUAY, D.; DODELET J. P.; Schuls, R. **Structural and surface characterization of nanocrystalline Pt-Ru alloys prepared by high-energy ball-milling**. J. Alloys Compd, 292: 301-310, 1999.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. Edição, Eletrobras/ Procel, 2014.

LANAS, J.; PÉREZ-BERNAL, J.L.; BELLO, M.A.; ALVAREZ GALINDO, J.I.; **Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars**, Cement and Concrete Research 34 (2004), p. 2191 – 2201, 2004.

LAREX. Laboratório de Reciclagem. **Tratamento de Resíduos e Metalurgia Extrativa**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <http://pmt.usp.br/Larex/pesquisa.html> – acesso 28-08-2015.

LAWSON, R. T. **Aluminum corrosion studies. I potential – ph-temperature diagrams for aluminum**. Aust J. Chem 27:105-127, 1974.

LIMA, N. P.; NASCIMENTO, J. F.; FILHO, V. P. V.; ALBERNAZ, C. A. V. **Pavimentos de alto desempenho estrutural executados com escória de aciaria**. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 10. Uberlândia. Anais, Rio de Janeiro: ABPv, 2000.

LOTT, C. P. M; BESSA, G. D.; VILELA, O. **Reabilitação de áreas e fechamento de minas**. Brasil Mineral - Edição Especial Mineração e Meio Ambiente, São Paulo, n°. 228 - Junho de 2004.

LUCON, O. ; GOLDEMBERG, J. **Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil**, Estudos avançados 23, 2009.

LUZ J. A. M. da; BALAREZO F. J. M.; PEREIRA A. A. **Emprego de argamassa expansiva e termo consolidação de peças em cantaria**. Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP - Revista Escola de Minas de Ouro Preto vol. 56. P. 161-167, julho/setembro, 2003.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2000.

MAHMOODI, K. ALINEJAD, B. **Enhancement of hydrogen generation rate in reaction of aluminum with water**. International journal of hydrogen energy, 35 p. 5227-5232, 2010.

MARANHÃO, F. L.; COSTA E SILVA, A. J.; MEDEIROS, J. S.; BARROS, M. M. S. B. **Influência do tipo de argamassa colante e do revestimento na microestrutura e na resistência de ade-**

rência. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, V. 2003, São Paulo. Anais...São Paulo: SBTA, 2003.

MARCONDES, F. B. S.; CARDOSO, F. F. **Gerenciamento de resíduos de construção e demolição: a experiência de construtoras paulistas.** In: IV Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e I Encontro Latino-americano de Gestão e Economia da Construção, 2005, Porto Alegre, RS. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e I Encontro Latino-americano de Gestão e Economia da Construção, 2005.

MARTINI, L. C. JÚNIOR. **Redução de resíduos industriais, como produzir mais por menos.** Rio de Janeiro. Aquarius, 2005.

MARTINS, J. A. S. M. T. **Análise comportamental do fogo em sistemas de fachada com isolamento pelo exterior.** Dissertação apresentada para a obtenção do grau acadêmico de Mestre em Engenharia Civil na especialidade de Construção pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Portugal, Lisboa, 2009.

MARZO, J.A. **Evolucion en la fabricacion de mortero para la construccion,** Revista Hormigon, 40, 1997.

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.

MASUERO, A. B.; VILELA, A.C.; DAL MOLIN, D. **Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 19 p. 1998.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 264 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

MEHER, T.; BASU, A. K.; GHATAK, S. **Physicochemical characteristics of alumina gel in hydroxyhydrogel and normal form.** Ceramics International, 31 (2005) pp. 831-838, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. – **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MILESTONE, N. B. **Reactions in cement encapsulated nuclear wastes: need for 457 toolbox of different cement types**, *Advances in Applied Ceramics*. 105 [1] , p. 13-20, 2006.

MILLER, T. F.; HERR, J. D.; **Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water**. AIAA paper 2004-4037; 2004.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (BRASIL) - MME. **Balanco Energético Nacional 2009**: Ano base 2008. Rio de Janeiro: EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (BRASIL) - MME. **Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM**. Produção Mineral no Brasil. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68>>. Acesso em: 05/10/2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>. Acesso em 23/03/2015.

MIRANDA, L. M. C. da C. **Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada**. Dissertação de Mestrado em engenharia civil. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro, 2009.

MISRA, C. **Aluminum oxide (alumina), hydrated**. In: Kroschwitz, J. I.; Seidel, A.; Kirk, R. E.; Othmer, D. F., editors. *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, vol. 2. Hoboken: Wiley-Interscience, p. 421-433, 2004.

MOON, S. M.; PYUN, S. I. **The corrosion of pure aluminium during cathodic polarization in aqueous solutions**. *Corrosion Science*, 39 [2] (1997) pp. 399-408, 1997.

MORALES G. **Verificação e avaliação da reatividade pozolânica da cinza de lodo de esgoto da cidade de Londrina**. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica – USP, São Paulo, 1995.

MOROPOULOU, A.; POLIKRETI, K.; BAKOLAS, A.; MICHAILEDIS, P. **“Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics”**, *Cement and Concret Research* 33, p. 891 – 898, 2003.

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; ANAGNOSTOPOULOU, S. “**Composite materials in ancient structures**”, Cement and Concrete Composites 27, p. 295 – 300, 2005.

MOYER, JR. Patente nº 4,205,994. Disponível em <<http://www.patft.uspto.gov>>. Acesso em fevereiro de 2015.

MURADOV, N. Z.; VEZIROGLU, T. N. **Green path from fossil-based to hydrogen economy: na overview of carbon-neutral Technologies**. Int Journal Hydrogen Energy, 33: 6804-6839, 2008.

NAVARRO, F. C. **Caracterização Petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. 88p., 2002.

NEEF, H. J. **International overview of hydrogen and fuel cell Research**. Energy, 34: 327-333, 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2ª ed. PINI, S. Paulo, 1997.

NETO, J. A.; OLIVEIRA, A. I.; PETTER, R. C. O. **A abordagem da economia ambiental no contexto da mineração**. Rev. Esc. Minas. Lisboa, 2005, vol. 58, no. 1, p. 71-75. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370>, 2014.

NUVOLARI, A.; CORAUCCI FILHO, B. **Utilização de Lodos de Esgoto Sanitário em Tijolos Cerâmicos Maciços: Aspectos Tecnológicos e Ambientais**, In: Fórum das Universidades Públicas Paulistas – Ciência e Tecnologia em Resíduos, 1, 2003, São Pedro - S. P. Anais... São Pedro: ICTR, 18-20, p. 729-743, maio 2003.

PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos**. Conjuntura e Planejamento – C&P. Salvador, n.149, p.4-11, Outubro, 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia: micro estrutura e propriedades**. Curitiba: Editora Hemus, 2000.

PAES, R. F. de S. **Materiais de construção e acabamentos para escolas públicas na cidade do Rio de Janeiro: uma reflexão sob critérios de sustentabilidade**. Dissertação de Mestrado em Ciências em arquitetura, área de concentração em sustentabilidade, conforto ambiental e eficiência energética, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

PAIVA, S.N. **Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil**. 110 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

PALMIERI, M. Y. **Transferência de calor em argamassa com adição de fibras de alumínio**. 172 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento - ENGES) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

PAPST, A. L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC. Florianópolis**, 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

PAUL, J.; HOFFMANN, F. M. **Decomposition of H₂O on clean and Oxidized Al (100)**. Journal Phys Chem, 90: 5321-5324, 1986.

PAULO, R. S. V. M. **Caracterização de argamassas industriais**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 2006.

PEDREIRA EXPRESSA: Disponível em: <http://www.pedreiraexpressa.com.br/produto>. Acesso em: abril, 2015.

PENA, D.C. **Avaliação da Expansibilidade da Escória de Aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC / UFES, Vitória, ES, Brasil, 2004.

PEREIRA, E. A. C. **Aspectos técnicos de gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque**. In: Seminário de redução, matérias primas e resíduos na siderurgia. Volta Redonda, RJ. Anais... p. 187-199, Rio de Janeiro, 1994.

PEREIRA, J. A. R., 2001. **Geração de resíduos industriais e controle ambiental**. In Saber. , v.3, 121-139, 2001.

PINHEIRO, J. R. **O emprego da argamassa expansiva na extração de rochas ornamentais**. Rochas de Qualidade, v. 28, n. 145, março/ abril, 1999.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA, M. R. **Caracterização Micro estrutural da Escória de Aciaria**, 2006 – Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v11n4/v11n4a10.pdf>. Acesso: novembro, 2013.

PROGRAMA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm>, 2003.

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

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 192 p., 2007.

REAL, F.; **Portugal das Origens à Época Romana**, Museu Nacional de Arqueologia e Etnologia, Instituto Português do Património Cultural, 2001.

REIS, L. **Apoio à disciplina de Física dos Edifícios**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja. Portugal, 2005.

RIBEIRO, A. **Evolução da responsabilidade governamental no gerenciamento da garimpagem**. Salvador: Secretaria da Indústria Comércio e da Mineração, 2005.

RILEM - MR – 3 - **The complex workability consistence - plasticidade**. St, Ed. France, 1982.

ROAF, S.; FUENTES, M.; THOMAS S.; **Ecohouse – A Casa ambientalmente Sustentável**. 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. - **Formação de Óxidos nos Revestimentos de Alumínio Depositados por Aspersão Térmica** – Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná, 2003.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos - Estudo Laboratorial**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

ROLIM, A. M. **A reciclagem de resíduos de EVA da indústria calçadista**. Porto Alegre: UFRGS, [s.d.] 10 p. 2007. Disponível em: <http://globalsus.net/acervo/art/gr_art_03.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2015.

RUDUIT, F. R. **Contribuição ao estudo de aderência de revestimentos de argamassa e chapiscos em substrato**. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós graduação em engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SABBATINI, F. H. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária.** São Paulo. 1984. 298 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.

SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimentos – aspectos físicos.** In: Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, 3. São Paulo. Anais... São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 69-76, 1986.

SABBATINI, F. H.; SELMO, S. M. S.; ARAÚJO, M. S. **Desenvolvimento tecnológico de métodos construtivos para alvenarias e revestimentos: recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação e tetos.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Relatório Técnico, 1988.

SABBATINI, F. H.; BAÍÁ, L. L. **Projeto e execução de revestimento argamassa,** 4^a ed., Editora: O Nome da Rosa, São Paulo, 2008.

SABBIONI, C; BONAZZA, A.; ZAPPIA, G.; **Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal.** Journal of Cultural Heritage 3, p. 83 – 88, 2002.

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI, A. JR. **Public management of construction and demolition waste in the city of São Paulo.** Ambiente construído, Porto Alegre, 2004.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** São Paulo, 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989.

SERWAY, R. A. vol. I **Mecânica e Gravitação,** vol. II **Ondas Mecânicas e Termodinâmica.** Física – LTC, 3^a ed., 1996.

SETIADI, A.; MILESTONE, N. B.; HILL, J.; HAYES, M. **Corrosion of aluminium and magnesium in BFS composite cements.** Advances in Applied Ceramics, 105 [4] (2006) pp.191-196, 2006.

SHIRO, I. **Study of a Demolition Method Using Non Explosive Demolition Agent.** R & D Laboratório de Novos Produtos, Onada Cement Co., Japão, 2006.

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. **Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005a, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, p. 11-22, 2005.

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. **A influência do filler de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento.** In: Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem II. 2005b, São Paulo. **Anais...** p. 1-12, 2005.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 164p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.

SOUZA, P. A. de. **A dimensão ambiental no planejamento da mineração: um enfoque empresarial.** Bahia Análise & Dados, Salvador, v.10, n.4, p.280-305, março, 2001.

STUDART, A. R.; INNOCENTINI, M.D.M.; OLIVEIRA, I.R.; PANDOLFELLI, V.C. **Reaction of aluminium powder with water in cement-containing refractory castables.** Department of Materials, Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurich CH-8092, Switzerland, Department of Materials Engineering, Federal University of São Carlos, São Carlos, SP 13565-905, Brazil. Article in Journal of the European Ceramic Society, August, 2005.

SURYANARAYAMA, C. **Mechanical alloying and milling.** Prog Mater Sci, 46:1-184, 2001.

SWIFT, P.; KINOSHITA, H.; COLLIER, N.C.; UTTON, C. A. **Phosphate-modified calcium aluminate cement for radioactive waste encapsulation.** Advances in Applied Ceramics, 112 [1] (2013) pp. 1-8, 2013.

SZETU, J. L.; FROST, R. L.; KLOPROGGE, J. T. ; RUSSELL, S. C.; MARTENS, W. **Dehydration and dehydroxylation of alumina gels prepared from tri-sec-butoxyaluminium modified with short chain aliphatic acids.** Thermochemica Acta, 362 (2000) pp. 37- 48, 2000.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to Architectural Science – The Basis of Sustainable Design.** 2ª edição. 2010.

TABRIZI, M. R.; LYON, S. B.; THOMPSON, G. E.; FERGUSON, J. M. **The long-term corrosion of aluminium in alkaline media**. Corrosion Science, 32 (1991) pp. 733-742, 1991.

TAHA, M. M. R.; SHRIVE, N. G. **The use of pozzolans to improve bond and bond strength**. In: Canadian Masonry Symposium, 9th., 2001, Fredericton. **Proceedings...** Fredericton: University of New Brunswick, 2001.

TERRA, R. C. **Levantamento de manifestações patológicas em revestimentos de fachadas das edificações da cidade de Pelotas**. 118 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

TIPLER, P. E.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

TOCCHETTO, M. R. L., **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais**. Departamento de Química – Curso de Química Industrial - CCNE. Universidade Federal de Santa Maria – RS, 2005.

TZIMAS, E.; FILIOU, C.; PETEVES, S. D.; VEYRET, J. B. **Hydrogen storage: state of the art and future perspective**. Petten, the Netherlands: European Commission, Directorate General Joint Research Centre, Institute for Energy. Available at: http://ie.jrc.ec.europa.eu/publications/scientific_publications/2003/P2003-181=EUR20993EN.pdf; 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS – Disponível em: - http://www.ufrgs.br/napead/repositorio/objetos/alvenaria-estrutural/blocos_autoclavados.php. Acesso em: maio 2015.

VARGEL, C. **Corrosion of aluminium**. Elsevier, 2004.

VENUAT, M.; PAPADAKIS, M. **Contrôle et essais Ciment's, mortiers, betons**. Eyrolles, Paris, 1961.

VIEIRA, C. M. F; MONTEIRO, S. N. **Cerâmica argilosa Incorporada com Resíduo Oleoso Proveniente do Setor Petrolífero**. Revista Matéria. v 11. P.217 – 222, 2006.

WARREN, J.; **“Conservation of Brick”**, Cap.12 – Mortars, Renderings and Plasters, Butterworth Heinemann, England, 1999.

WATANABE, M. XIMENG, J.; RYUICHI, S. **Method for generating hydrogen utilizing activated aluminum fine particles.** US, 2004/0208820 a1; 2004.

WEGNER, K.; LY, H. C.; WEISS, R. J.; PRATSINIS, S. E.; STEINFELD, A. **In situ formation and hydrolysis of ZnO/Zn water-splitting thermochemical cycle.** Int Journal Hydrogen Energy, 31: 55-61, 2006.

WESTPHAL, E. H. **Argamassas.** Florianópolis: UFSC. Disponível em www.arq.ufsc.br/~labcon/arq5661/argamassas. Acesso em novembro de 2014.

WHITE, C. M.; STEEPER, R. R.; LUTZ, A. E. **The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review.** International Journal of Hydrogen Energy, 31: 1292-1305, 2006.

WOODALL, J. M.; ALLEN, C. R.; ZIEBARTH, J. T. **Power generation from solid aluminum.** US 2008063597A1; 2008.

YANNAS, S.; MALDONADO, E. **Designing for summer comfort.** Londres: Architectural Association Graduate School, 1995. Cap. 4: Thermal Inertia, Londres, 1995.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M.; BOTTURA, S. de. **Caracterização de argamassas no estado fresco – Peculiaridades da análise de argamassas industrializadas.** In: Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, 1, Goiânia: SBTA, 1995.

YUNUS, A. Ç.; AFSHIN, J. G. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

ZHOU, Q.; MILESTONE, N. B.; HAYES, M. **An alternative to Portland Cement for waste encapsulation - The calcium sulfoaluminate cement system.** J. Hazard. Mater., 136 [1] (2006) pp. 120-129, 2006.

ZHU, B.; FANG, B.; LI, X. **Dehydration reactions and kinetic parameters of gibbsite.** Ceramics International, 36 (2010) pp. 2493-2498, 2010.