UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS – PMT
ESCOLA POLITÉCNICA

RONALDO FEU ROSA PACHECO

**Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas
para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**

São Paulo
2017

RONALDO FEU ROSA PACHECO

**Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas
para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção de título
de Doutor em Ciências.

São Paulo
2017

RONALDO FEU ROSA PACHECO

**Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas
para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção de título
de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Metalúrgica e
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão.

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Pacheco, Ronaldo Feu Rosa

Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer / R. F. R. Pacheco -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
297 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Cimento 2.Escória de aciaria LD 3.Argamassa I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

A meus pais, Joaquim Pacheco dos Santos (In memoriam) e Maria de Alcantara Feu Rosa Pacheco pelo irrefutável exemplo de vida.

A minha esposa Jussara e meus filhos pelo apoio e incentivo que sempre me deram em meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor do Departamento de Engenharia de Metalúrgica e Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), doutor Marcelo Breda Mourão, pela amizade e pelos ensinamentos fundamentais para realização do processo pirometalúrgico da escória de aciaria no Laboratório de Autorredução e Fusão Redução (LABRED).

Aos amigos e técnicos do Laboratório de Tratamento de Minério (LTM) do Departamento de Engenharia Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), em particular ao técnico Alfredo, na orientação durante o ensaio de moagem da escória de aciaria LD e peneiramento.

Aos amigos e técnicos do Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia Minas e de Petróleo (PMI) da Universidade de São Paulo (USP) nos ensaios de fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Aos amigos e técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Márcio e Loriato, pelo apoio na realização dos ensaios de pega, expansibilidade, absorção, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão de argamassas.

Ao engenheiro Flávio Munhoz da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), principalmente pelo apoio nos ensaios de calor de hidratação, do grau de vitrificação e da reatividade da escória de aciaria LD modificada por microscopia de luz transmitida (teste de Michelsen).

Ao engenheiro Sérgio Soares de Lima do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológica (IPT), principalmente pelo apoio nos ensaios de atividade pozolânica pelo método Chapelle, ensaios químicos e análises termogravimétrica (TG/DTG).

À empresa Panalytical, pela oportunidade de realizar ensaios e cursos de difração raios X e fluorescência de raios X.

À fábrica Holcim, em particular ao funcionário Raimundo, por realizar ensaios de área específica das escórias pelo método Blaine.

À CAPES, DINTER, e IFES, pela oportunidade de realizar esta tese na USP.

À empresa Panalytical pelo treinamento nos ensaios de difração e fluorescência de raios X.

Aos colegas do doutorado Dario, Flávio, Marcos, Messias, Leila e outros, pelas discussões e trocas de ideias.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Metalurgia e Materiais.

A meu pai, Joaquim Pacheco dos Santos (*in memoriam*), que está sempre presente em minha lembrança, e a minha mãe, Maria de Alcântara Feu Rosa Pacheco, que sempre me apoia nos momentos mais difíceis da minha vida.

À minha esposa, Jussara, e a meus filhos, Rodrigo e Clarisse, que apoiaram e torceram por mim ao longo desses anos e souberam entender a minha ausência.

A Deus, que me acompanha em todos os passos, do longo ao tortuoso, porém compensador, caminho da vida.

RESUMO

Este trabalho visa estudar o emprego da escória de aciaria a oxigênio (EACN) na construção civil. Para isso, elaborou-se um programa experimental em seis etapas: a primeira compreendeu a caracterização da EACN, do cimento, do clínquer e do gesso; na segunda, a EACN foi cominuída até valores de tamanho de partículas inferiores a 0,075mm; em seguida, caracterizada física, ambiental, química, mineralógica, microestrutural e termicamente, e teve a sua atividade pozolânica determinada; a terceira compreendeu a ativação da escória com hidróxido de sódio; na quarta, foram realizados ensaios de pega, expansibilidade, resistência axial à compressão e durabilidade de argamassas de cimento CP V-ARI com substituição parcial do cimento por EACN; na quinta, obteve-se uma primeira escória de aciaria modificada (EACM1) mediante o processo pirometalúrgico da EACN em forma de pó, para alterar a composição química e estrutura para amorfa, tornando-a mais reativa, sendo submetida aos mesmos ensaios da quarta etapa, à exceção dos ensaios de pega e expansibilidade; na sexta e última, obteve-se uma segunda escória modificada (EACM2) pirometalurgicamente: a composição química próxima da escória de alto-forno e amorfa. A carga desse processo pirometalúrgico foi calculada pelo *software* Factsage. Parte dessa escória modificada foi cominuída adicionalmente, de modo que foram obtidas amostras sem moagem adicional (EACM2a) e com moagem adicional (EACM2b). A escória modificada foi submetida aos ensaios da quinta etapa, mais o grau de vitrificação e a reatividade por microscopia de luz transmitida. Os resultados obtidos mostraram que argamassas em que parte do cimento CP V-ARI é substituída por escórias de aciaria (naturais ou modificadas) atendem às especificações de resistência à compressão nos seguintes casos: escória natural e modificada 1: substituição de até 10% do cimento CP V-ARI; escória modificada 2a, substituição de até 20% de cimento; escória modificada 2b, substituição de até 40% do cimento. Observou-se que a escória modificada 2b apresentou resistência à compressão superior ao traço referência nas idades de 28 dias e 91 dias. Apresenta-se ainda a utilização da EACM2b com o clínquer. Outros ensaios e comparações são apresentados para discutir o comportamento observado das escórias em estudo.

Palavras-chave: cimento, escória de aciaria LD e argamassa.

ABSTRACT

This study aims at employing BOF steel slag (EACN) in civil construction. Thus, the study developed an experimental program in six stages: the first one comprised the characterization of BOF steel slag, cement, clinker and gypsum; in the second stage BOF steel slag was reduced to particles sized less than 0.075mm; then, it was physical, environmental, chemical, mineralogical, microstructural and thermally characterized, it also had its pozzolanic activity determined; the third stage comprised the activation of BOF steel slag with sodium hydroxide; during the fourth stage, we carried out setting time, expansibility, axial compressive strength and durability tests for mortars made with cement CP V-ARI and partial substitution with BOF steel slag; in the fifth stage, we obtained the first modified BOF steel slag (EACM1) through pyrometallurgical process of powdered BOF steel slag so as to alter its chemical and structural makeup, making it more reactive to be submitted to the same tests of the fourth stage, except the setting time and expansibility tests; in the sixth and final stage, we obtained the second pyrometallurgically modified BOF steel slag: chemical makeup close to blast-furnace slag. The load of this pyrometallurgical process was calculated using software Factsage. Part of this modified slag was ground additionally, so that samples without additional grinding (EACM2a) and with additional grinding (EACM2b) were obtained. The modified slag underwent the fifth-stage tests, and the degree of vitrification and transmitted light microscopy reactivity. The results obtained show that mortars in which part of CP V-ARI cement was replaced with BOF steel slag (natural or modified) meet the compressive strength specifications in the following cases: Natural and modified slag 1: substitution of up to 10% of CP V-ARI cement; Modified slag 2a, substitution of up to 20% cement; Modified slag 2b, substitution of up to 40% cement. We observed that modified slag 2b showed higher compressive strength than the reference mix at ages 28 and 91 days. We also present the use of EACM2b as clinker. Other tests and comparisons are presented so as to discuss the observed behaviors of the study slags.

Keywords: Cement, BOF steel slag and mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Composição química de escórias de alto-forno e aciaria LD comparadas com diversos outros produtos.....	33
Figura 1.2 – Emissão de dióxido de carbono na fabricação de cimento Kg CO ₂ /ton de cimento	34
Figura 1.3 – Crescimento econômico x consumo de cimento per capita no Brasil – 1965-2015.....	36
Figura 1.4 – Previsão de crescimento da produção de cimento no Brasil	37
Figura 1.5 – Gráfico sobre a produção de aço bruto	38
Figura 2.1 – Zona de composição C ₃ S - C ₂ S - C ₃ A no diagrama de fase ternária SiO ₂ - CaO - Al ₂ O ₃	48
Figura 2.2 – Esquema com as transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura	50
Figura 2.3 – Diagrama de fases do clínquer do cimento Portland, antes de se misturar com o gesso (composição X temperatura)	51
Figura 2.4 – Cristais de alita com dimensões entre 30mm e 40mm, indicando processo adequado de clinquerização	52
Figura 2.5 – Estrutura cristalina do silicato tricálcico C ₃ S (3CaOSiO ₂).....	53
Figura 2.6 – Influência do teor de C ₃ S na liberação de calor, considerando o teor de C ₃ A aproximadamente constante	54
Figura 2.7 – Relação entre a resistência aos sete dias de pasta de cimentos e o teor de C ₃ S do cimento. Cada símbolo se refere a cimento de uma procedência	54
Figura 2.8 – Esquema de transformação do C ₂ S	56
Figura 2.9 – Evolução da resistência dos compostos puros	58
Figura 2.10 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do C-S-H	64
Figura 2.11 - Micrografia eletrônica de transmissão (MEV) da pasta de cimento Portland com seis meses de idade e a/c de 0,45	65
Figura 2.12 - Micrografia eletrônica de transmissão (MEV) da pasta de cimento Portland com 40 anos de idade e a/c de 0,5.....	65
Figura 2.13 – Influência da composição do cimento no calor de hidratação	66
Figura 2.14 – Influência da finura do cimento na resistência	67
Figura 2.15 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos cristais da portlandita	68

Figura 2.16 – Estrutura cristalina da etringita	70
Figura 2.17 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da etringita	70
Figura 2.18 – Adições usadas na produção de cimento em função do seu tipo	72
Figura 2.19 – Difratoograma de raios X da escória granulada de alto-forno	75
Figura 2.20 – Representação dos principais materiais cimentícios em um diagrama ternário $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$	78
Figura 2.21 – Fluxo simplificado de produção de aço	81
Figura 2.22 - Visão esquemática do alto-forno como um sistema de contracorrente	83
Figura 2.23 – Alto-forno com as respectivas zonas internas	84
Figura 2.24 - Processo de geração da escória de aciaria	88
Figura 2.25 – Diagrama de equilíbrio ternário do sistema CaO-FeO-SiO_2	89
Figura 2.26 – Relação entre a cal residual e a cal precipitada e o total de cal contida na escória de aciaria	94
Figura 2.27 – Fluxograma sobre a expansão do CaO e MgO	96
Figura 2.28 – Pavimento rígido que apresenta deformação devido à expansão da escória de aciaria	97
Figura 2.29 – Fluxograma dos ensaios diretamente aplicados sobre as escórias	98
Figura 2.30 – Molde imerso em água 70°C	100
Figura 2.31 – Fluxograma dos ensaios em uma matriz com escória de aciaria	102
Figura 2.32 - Escória de aciaria com e sem tratamento de ar e água	105
Figura 2.33 – Retração da argamassa de cimento com areia natural e de cimento com escória	108
Figura 2.34 - Difração de raios X dos clínqueres do cimento Portland com escória de aciaria	111
Figura 2.35 – Resistência à compressão dos cimentos produzidos	112
Figura 2.36 – Efeito da interação entre idade e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas	115
Figura 2.37 - Influência da interação do teor e do tipo de escória na resistência à compressão	115
Figura 2.38 - Efeito do teor de EA1 na taxa de absorção das argamassas	116
Figura 2.39 - Resistência à compressão em função da idade dos corpos de prova de argamassas com clínquer e escória granulada	117
Figura 2.40 - Resistência à compressão em função do teor de escória – argamassas com clínquer e escória granulada	118

Figura 2.41 - Resistência à compressão axial da escória de aciaria para diferentes diâmetros	120
Figura 2.42 - Resistência à tração na flexão da escória de aciaria para diferentes diâmetros	120
Figura 2.43 - Influência do teor de SiO ₂ na resistência à compressão a diferentes idades com 5% de NaO ₂ e 0% de Ca(OH) ₂	122
Figura 2.44 - Intervalos de ocorrência de escórias utilizadas marcadas no diagrama de fases de equilíbrio CaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂	124
Figura 2.45 - Resistência à compressão de escória granulada de alto-forno ativada com álcalis	125
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do programa experimental.....	127
Figura 3.2 - Fluxograma da 1. ^a etapa do programa experimental – Coleta da amostra na siderúrgica	128
Figura 3.3 – Fluxograma da 2. ^a etapa do programa experimental – Preparação e caracterização da amostra.....	130
Figura 3.4 - Fluxograma da 3. ^a etapa do programa experimental – Ativação alcalina da escória de aciaria.....	131
Figura 3.5 - Fluxograma da 4. ^a etapa do programa experimental – Argamassas e pasta de cimento CP V-ARI.....	133
Figura 3.6 - Fluxograma da 5. ^a etapa do programa experimental – Processo Pirometalúrgico n.º 1	135
Figura 3.7 - Fluxograma da 6. ^a etapa do programa experimental – Processo pirometalúrgico n.º 2	137
Figura 3.8 - Clínquer antes da moagem.....	140
Figura 3.9 - Clínquer moído.....	141
Figura 3.10 - Mineral antes da moagem.....	142
Figura 3.11 - Moinho de rolos utilizado	148
Figura 3.12 - Peneirador elétrico com peneira de abertura de malha n.º 2,36mm ..	149
Figura 3.13 - Pedacos de aço retirados da amostra.....	149
Figura 3.14 - Pesagem da amostra	150
Figura 3.15 - Moinho de esferas.....	151
Figura 3.16 - Amostras de escória de aciaria moída que passaram na peneira n.º 200.....	151

Figura 3.17 - Homogeneização da amostra de escória de aciaria LD, em pilhas contínuas	152
Figura 3.18 - Repartidor de amostra	152
Figura 3.19 - Espectrômetro Axios FRX (WDXRF) de baixo consumo de energia (1 kW)	155
Figura 3.20 - Difratorômetro multifuncional sistema Empyrean	159
Figura 3.21 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo XL 30 Philips	160
Figura 3.22 - Ensaio de expansibilidade a quente.....	161
Figura 3.23 - Aparelho de Vicat com sonda Tetmajer – Determinação da pasta de consistência normal	162
Figura 3.24 - Misturador	163
Figura 3.25 - Ensaio de Pega – Câmara úmida.....	164
Figura 3.26 - Prensa para ensaio de resistência à compressão LEMAC/UFES.....	165
Figura 3.27 - Pesagem da escória de aciaria LD	167
Figura 3.28 - Pesagem da sílica.....	168
Figura 3.29 - Pesagem da alumina	168
Figura 3.30 - Pesagem do carvão vegetal.....	168
Figura 3.31 - Cadinho de grafite.....	169
Figura 3.32 - Forno de indução	169
Figura 3.33 - Equipamento que gera alta potência no forno	169
Figura 3.34 - (a) Cadinho sendo retirado do forno; (b) Escória vertida em uma lingoteira de ferro fundido.....	170
Figura 3.35 - (a) Escória líquida resfriada dentro da lingoteira; (b) Granulação da escória	171
Figura 3.36 - a) Peneira rotativa (b) Forno elétrico de mufla.....	172
Figura 3.37 - Pelotas retiradas do forno elétrico de mufla.....	173
Figura 3.38 - (a) Forno de indução (Forno Inducto Therm) (b) Lingoteira de ferro fundido	173
Figura 3.39 - Ferro puro	174
Figura 3.40 - Foto da amostra de EACM2a.....	174
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da amostra do cimento CP V-ARI	184
Figura 4.2 – Difratorograma de raios X do cimento CP V-ARI	186
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do tamanho dos grãos do clínquer.....	187
Figura 4.4 – Difratorograma de raios X do gesso	189

Figura 4.5 – Distribuição granulométrica da amostra de EACN	193
Figura 4.6 – Composição química da escória de alto forno e da escória de aciaria de convertedor em relação ao cimento Portland	196
Figura 4.7 – Curvas obtidas nos ensaios térmicos TG e DTG para a escória de aciaria natural (EACN).....	199
Figura 4.8 – Difratoograma de raios X da amostra de escória de aciaria natural.....	203
Figura 4.9 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 2, 3 e 4)	204
Figura 4.10 – Elementos químicos presente no ponto 2: carbono(C), oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca) manganês (Mn)	205
Figura 4.11 – Elementos químicos presentes no ponto 3: carbono(C), oxigênio (O), ferro(Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si) cálcio (Ca)	205
Figura 4.12 – Elementos químicos presentes no ponto 4: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca) e manganês (Mn)	205
Figura 4.13 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 5 e 6)	206
Figura 4.14 – Elementos químicos presentes no ponto 5: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e manganês (Mn)	206
Figura 4.15 – Elementos químicos presentes no ponto 6: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si) e cálcio (Ca)	207
Figura 4.16 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 7 e 8)	207
Figura 4.17 – Elementos químicos presentes no ponto 7: carbono(C), oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), Cálcio (Ca)....	208
Figura 4.18 – Elementos químicos presentes no ponto 8: carbono(C), oxigênio (O), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si), cálcio (Ca) e manganês (Mn)	208
Figura 4.19 – Distribuição granulométrica das amostras de EACM1	215
Figura 4.20 – Distribuição granulométrica das amostras de EACM2a	216
Figura 4.21 – Distribuição granulométrica da amostra de EACM2b.....	217
Figura 4.22 – Composição química da escória da EACN, EACM1 e EACM2a comparadas com outros materiais no diagrama de fases.....	222

Figura 4.23 – Curvas TG/DTG da "Escória de aciaria modificada n.º1" (LMCC N.º 869-15).....	225
Figura 4.24 – Curvas obtidas nos ensaios térmicos TG e DTG para a escória de aciaria modificada 2a (EACM2a).....	226
Figura 4.25 – Difratoograma de raios X da amostra de escória de aciaria modificada	227
Figura 4.26 – Difratoograma de raios X da amostra de escória de aciaria modificada EACM2a	228
Figura 4.27 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4 e 5).....	229
Figura 4.28 – Micrografia da EACM1 com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos de 1 a 6)	230
Figura 4.29 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos de 1 a 7).....	230
Figura 4.30 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6).....	231
Figura 4.31 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8)	232
Figura 4.32 – Micrografia da amostra de escória EACM2a.....	233
Figura 4.33 – Elementos químicos presentes na EACM2a	234
Figura 4.34 – Calor de hidratação do cimento CP V-ARI e CP V-ARI com substituição do clínquer por 40% de EACM2b (J/g)	236
Figura 4.35 – Elevação da temperatura em relação à garrafa de referência	237
Figura 4.36 – Cristalização da gipsita	239
Figura 4.37 – Cristalização das acículas de gipsita.....	239
Figura 4.38 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACN nos teores de 0%, 6%, 10%, 20% e 34% e nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 e 730 dias	243
Figura 4.39 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACM1 nos teores de 0%, e 10% nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias	245
Figura 4.40 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACM2a nos	

teores de 0%, 10% e 20% nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, e
 EACM2b nos teores de 20% e 40%, nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias
248

Figura 4.41 – Representação gráfica da resistência média à compressão de
 argamassa de clínquer + gesso mineral nas idades de 3, 7, 28 e 91
 dias e com adição de 40% EACM2b ao clínquer + gesso mineral250

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Produção Siderúrgica Brasileira (1000t).....	37
Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil	45
Tabela 2.2 – Abreviações dos óxidos individuais e compostos do cimento	47
Tabela 2.3 – Fases polimórficas do C_3S	53
Tabela 2.4 – Fases polimórficas do C_2S	55
Tabela 2.5 - Características das principais fases mineralógicas presentes no cimento Portland	57
Tabela 2.6 – Composição típica dos compostos de vários tipos de cimento Portland disponíveis nos EUA.....	58
Tabela 2.7 - Principais fases do cimento no processo de hidratação.....	71
Tabela 2.8 – Requisitos químicos para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015)	80
Tabela 2.9 – Requisitos físicos para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015)	80
Tabela 2.10 – Composição química da escória de alto-forno de vários países do mundo (% em massa).....	85
Tabela 2.11 – Valores de propriedades físicas das escórias de aciaria	90
Tabela 2.12 – Composição química da escória de aciaria em faixa (%)	91
Tabela 2.13 - Caracterização física e química da escória de aciaria natural LD (EAC) e da escória de aciaria modificada (EACM).....	92
Tabela 2.14 - Produtos formados na oxidação/hidratação do ferro metálico presente nas escórias.....	97
Tabela 2.15 – Distribuição granulométrica de amostras para o ensaio JIS A 5015/92.....	101
Tabela 2.16 - Composição química das escórias modificadas.....	107
Tabela 2.17 – Análise química das matérias-primas para a produção de clínqueres de cimento Portland	109
Tabela 2.18 – Composição da matéria crua para a produção do cimento Portland	109
Tabela 2.19 – Resultados da análise química dos clínqueres produzidos	110
Tabela 2.20 – Composição mineralógica dos clínqueres dos cimentos Portland....	110
Tabela 2.21 – Composição mineralógica dos clínqueres dos cimentos Portland....	111
Tabela 2.22 – Resultado da expansibilidade das amostras	113

Tabela 2.23 – Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias (50% de CP V-ARI RS + 50% de escória) EA1 (diâmetro médio de 54,37 μ .m) e EA1 (diâmetro médio de 10,06 μ .m) e da escória micronizada EA1 (diâmetro médio de 3,37 μ m).....	114
Tabela 2.24 – Composição química de escória de aciaria natural (Tipo BOFS) de diferentes diâmetros (D ₅₀ μ m).....	119
Tabela 2.25 - Histórico de cimentos álcali-ativados de escória.....	121
Tabela 2.26 – Composição química da matéria-prima	122
Tabela 2.27 – Valores da resistência à compressão com mistura preparada com óxido de sódio a 4,5% (Na ₂ O) e módulo de sílica = 2,0	123
Tabela 3.1 - Exigências químicas do cimento CP V-ARI.....	139
Tabela 3.2 - Exigências físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI.....	139
Tabela 3.3 - Exigências físicas e mecânicas (facultativa) do cimento CP V-ARI	140
Tabela 3.4 - Característica do hidróxido de sódio (NaOH) dissolvida em água	143
Tabela 3.5 - Frações granulométricas.....	144
Tabela 3.6 - Quantidade de materiais para preparação de argamassa para seis corpos de prova.....	145
Tabela 3.7 - Espectrômetro Axios FRX (WDXRF) de baixo consumo de energia (1 kW)	157
Tabela 3.8 - Composição química da escória de aciaria natural e a escória de alto-forno da empresa siderúrgica da Serra-ES.....	167
Tabela 3.9 - Tempo decorrido e potências em KW aplicadas ao forno	170
Tabela 4.1 – Finura, área específica Blaine, tempo de início de pega e da expansibilidade a quente e a frio do cimento Portland CP V-ARI ...	183
Tabela 4.2 – Valores de dimensão equivalentes a 10%, 50% e 90% de partículas passantes	184
Tabela 4.3 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI.....	185
Tabela 4.4 – Composição mineralógica do cimento CP V-ARI	185
Tabela 4.5 – Resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias do cimento Portland CP V-ARI	186
Tabela 4.6 – Valores de dimensão equivalentes a 10%, 50% e 90% de partículas passantes do clínquer.....	188
Tabela 4.7 – Composição química do clínquer	188
Tabela 4.8 – Composição mineralógica do gesso.....	189

Tabela 4.9 – Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura da escória de aciaria LD	190
Tabela 4.10 – Massa específica e absorção de água da escória de aciaria LD.....	190
Tabela 4.11 – Massa específica, área específica por BET e Blaine da escória de aciaria natural (EACN).	192
Tabela 4.12 - Áreas específicas usuais de algumas adições minerais (BALE, et, al, 2002).....	192
Tabela 4.13 – Valores e dimensão média equivalente às partículas passantes	194
Tabela 4.14 – Composição química da escória de aciaria LD	195
Tabela 4.15 – Ensaio de caracterização química da escória de aciaria	197
Tabela 4.16 – Atividade pozolânica da escória de aciaria natural (EACN)	197
Tabela 4.17 – Perda de massa em função da temperatura da EACN (LMCC n.º 864-15).....	199
Tabela 4.18 – Teor de constituintes inorgânicos lixiviados	200
Tabela 4.19 – Teor de constituintes inorgânicos solubilizados	201
Tabela 4.20 – Identificação dos compostos na difração de raios X na EACN.....	202
Tabela 4.21 – Quantidade de água (g), porcentagem de água em relação à quantidade de cimento e à distância em (mm) que a sonda tetmajer estacionou da placa base no aparelho de Vicat da pasta de cimento Portland CP V sem adição e o cimento Portland CP V com substituição de 10% por escória de aciaria LD	209
Tabela 4.22 – Tempo de pega do cimento CP V sem adição e do cimento CP V com substituição por 10% de escória de aciaria LD	210
Tabela 4.23 – Expansibilidade das amostras da escória de aciaria LD	211
Tabela 4.24 – Caracterização física do cimento e das escórias de aciaria natural (EACN) e modificadas (EACM1, EACM2a e EACM2b)	213
Tabela 4.25 – Valores e dimensão média equivalente às partículas passantes	214
Tabela 4.26 – Determinação da reatividade do MgO	219
Tabela 4.27 – Composição química das escórias da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF	219
Tabela 4.28 – Exigências químicas para materiais pozolânicos da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF.....	220
Tabela 4.29 – Relação que a composição química da EAF deve obedecer	220

Tabela 4.30 – Caracterização química da perda ao fogo (PF), do anidrido sulfúrico (SO ₃), enxofre (S), óxido de cálcio livre (CaOlivre) e resíduo insolúvel (RI) da EACM1 por métodos de normas brasileiras.....	221
Tabela 4.31 – Resultados de ensaios químicos do material EACM2a	221
Tabela 4.32 – Atividade pozolânica da EACM1 e EACM2a	223
Tabela 4.33 – Perda de massa em função da temperatura da EACM1 (LMCC n.º 864-15).....	224
Tabela 4.34 – Perda de massa em função da temperatura da EACM2a (LMCC n.º 869-15).....	226
Tabela 4.35 – Identificação dos compostos na difração de raios X da escória de aciaria modificada (EACM2a), o ICDD, o nome do composto e fórmula na química mineral.....	227
Tabela 4.36 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4 e 5	229
Tabela 4.37 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6	230
Tabela 4.38 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	231
Tabela 4.39 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6	231
Tabela 4.40 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8	232
Tabela 4.41 – Análise por EDS (Espectrometria por dispersão de energias) para os pontos 1, 2, 3, 4 e 5	233
Tabela 4.42 – Calor de hidratação do cimento CP V-ARI Puro e CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b (J/g)	235
Tabela 4.43 – Grau de vitrificação da amostra de escória Identificação da amostra.....	238
Tabela 4.44 – Avaliação da reatividade	238
Tabela 4.45 – Proporção de escória de aciaria, como clínquer, ativada com silicato de sódio para a elaboração dos traços, de acordo com a NBR 7215:2012	240

Tabela 4.46 – Resultado da resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias da escória de aciaria com adição de hidróxido de sódio (NaOH) e cal (CHI)	240
Tabela 4.47 – Resistência média à compressão das argamassas de cimento com substituição de cimento CP V-ARI por EACN nos teores de 0%, 6%, 10%, 20% e 34%	242
Tabela 4.48 – Resistência média à compressão das argamassas de cimento com substituição de cimento por escória de aciaria LD no teor de 10%.244	
Tabela 4.49 – Resistência à compressão axial de argamassa de traço referência do cimento CP V-ARI com 0% de substituição nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias; substituição de 10% e 20% da EACM2a nas idades de 3, 7, 28, 91 e 270 dias; e substituição do cimento CP V-ARI por EACM2b nos teores de 20% e 40%, nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias ..	248
Tabela 4.50 - Resistência à compressão axial (MPa) das argamassas com adição de 40% de EACM2b ao clínquer e gesso mineral	250
Tabela 4.51 – Absorção, índice de vazios e massa específica de argamassas endurecidas de cimento CP V-ARI puro e com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b	251

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABC	Associação Brasileira de Carvão Mineral
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
BOF	Basic Oxygen Furnace (Forno básico de oxigênio)
D	Distância interplanar
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – Método de Ensaio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DRX	Difração de raios X
DTG	Termogravimetria diferencial
EAF	Eletric Arc Furnace (forno de arco elétrico)
EACN	Escória de Aciaria Natural
EACM1	Escória de Aciaria Modificada 1
EACM2	Escória de Aciaria Modificada 2
EACM2a	Escória de Aciaria Modificada 2 ^a
EACM2b	Escória de Aciaria Modificada 2b
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FEA	Forno de Arco Elétrico
fc	Resistência à compressão
fct	Resistência à tração
FP	Forno Panela
l	Comprimento de onda
IAC	Instituto Aço Brasil
IFES	Instituto Federal do Espírito Santo
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LCT	Laboratório e Caracterização Tecnológica
LD	Linz Donawitz

LF	Ladle furnace (forno panela)
LEMAC	Laboratório de Material de Construção
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
μm	Micrometro
pH	Indicador de pH (acidez)
TG	Termogravimetria
NM	Norma Mercosul
MPa	Mega Pascal
n	Ordem de difração
PMI	Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo (USP)
PMT	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo (USP)
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _m	Temperatura de fusão cristalina
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo de difração
CaO	Óxido de cálcio (cal)
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (alumina)
Fe ₂ O ₃	Hematita
C ₂ S	Silicato de dicálcio (2CaO.Si.O ₂)
C ₃ S	Silicato de tricálcio ou tricálcio (3CaO.Si.O ₂)
MgO	Óxido de magnésio ou periclásio
H ₂ O	Água
C ₃ S.2H ₂ O	Silicato de cálcio hidratado
CaCO ₃	Carbonato de cálcio ou calcita
Ca ₃ SiO ₅	Silicato tricálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio ou cal hidratada
CH	Hidróxido de cálcio (portlandita)
FeO	Óxido de ferro (wustita)
C ₂ AS	Gehlenita (ou 2CaO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂)
Ca ₂ SiO ₄	Silicato dicálcio (larnita)
CaFeO ₂	Óxido de cálcio e ferro
MgFe ₂ O ₄	Magnesioferrita
Fe ₂ Ca ₂ O ₅	Srebrodolskita
SiO ₂	Dióxido de silício (Quartzo)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	31
1.2	OBJETIVOS	38
1.2.1	Objetivo geral	38
1.2.2	Objetivos específicos	39
1.3	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	39
1.4	ESTRUTURA DA TESE	40
2	REVISÃO DA LITERATURA	42
2.1	CIMENTO	42
2.1.1	História do cimento	42
2.1.2	O clínquer Portland	46
2.1.3	Microestrutura do clínquer	51
2.1.4	Estrutura dos principais compostos do clínquer	52
2.1.5	Hidratação do cimento Portland	61
2.2	ADIÇÕES AO CLÍNQUER	71
2.2.1	Gipsita (sulfato de cálcio)	72
2.2.2	Fíler calcário	73
2.2.3	Escória de alto-forno (EAF)	73
2.2.4	Materiais pozolânicos	76
2.2.4.1	Pozolanas naturais	77
2.2.4.2	Pozolanas artificiais	77
2.3	PRODUÇÃO DO AÇO	81
2.3.1	Preparação da carga	82
2.3.1.1	Coqueria	82
2.3.1.2	Sinterização	82
2.3.2	Redução	82
2.3.2.1	Alto-forno	82
2.3.3	Refino	86
2.3.3.1	Aciaria LD	86
2.4	ESCÓRIA DE ACIARIA	88
2.4.1	Características das escórias de aciaria LD	89

2.4.2	Propriedades físicas da escória de aciaria	90
2.4.3	Composição química da escória de aciaria	90
2.4.4	A expansibilidade da escória de aciaria	93
2.4.5	Ensaio físico de avaliação da expansão das escórias de aciaria	97
2.4.5.1	Ensaio de expansibilidade aplicados diretamente sobre as escórias de aciaria	97
2.4.5.2	Ensaio de expansibilidade em uma matriz com escória de aciaria.....	102
2.4.6	Métodos para estabilização das escórias de aciaria	104
2.4.6.1	Método do envelhecimento e cura	104
2.4.6.2	Método do tratamento das escórias líquidas	106
2.4.7	Aplicações da escória de aciaria na construção civil	107
2.4.7.1	Escória de aciaria em argamassas	107
2.4.7.2	Escória de aciaria na produção do clínquer.....	108
2.4.7.3	Escória de aciaria em cimento	112
2.4.8	Influência do tamanho dos grãos da EACN na composição química, resistência à compressão e tração na flexão de argamassas de cimento com escória de aciaria	119
2.4.9	Ativação alcalina da escória.....	121
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	126
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS UTILIZADOS.....	138
3.1.1	Cimento CP V-ARI	138
3.1.2	Clínquer	140
3.1.3	Gesso mineral	141
3.1.4	Hidróxido de sódio (NaOH)	142
3.1.5	Cal hidratada Ca(OH)_2	143
3.1.6	Água	144
3.1.7	Areia quartzosa	144
3.1.8	Escória de aciaria natural LD (EACN).....	145
3.1.9	Escória de aciaria LD modificada 1 (EACM1)	145
3.1.10	Escória de aciaria LD modificada 2a (EACM2a)	146
3.1.11	Escórias de aciaria LD modificada 2b (EACM2b)	146
3.2	MÉTODOS UTILIZADOS	147
3.2.1	Métodos de caracterização da EACN em forma de agregados.....	148
3.2.2	Método para se obter a escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm.	148
3.2.3	Métodos de caracterização da escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm.....	153
3.2.3.1	Caracterização física	153

3.2.3.2	Caracterização química.....	154
3.2.3.3	Atividade pozolânica	156
3.2.3.4	Análise térmica.....	157
3.2.3.5	Caracterização ambiental.....	158
3.2.3.6	Caracterização mineralógica.....	158
3.2.3.7	Caracterização microestrutural	160
3.2.4	Método da expansibilidade da EACN	161
3.2.5	Método de avaliação do tempo de pega da mistura do cimento CP V-ARI com substituição parcial por EACN.....	161
3.2.5.1	Método da pasta de consistência normal.....	162
3.2.5.2	Método da determinação do tempo de pega	163
3.2.6	Método de análise do comportamento mecânico da EACN com ativação com hidróxido de sódio e cal	164
3.2.7	Método de análise do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição parcial por EACN.....	165
3.2.8	Método pirometalúrgico para se obter a escória de aciaria LD modificada M1 (EACM1)	166
3.2.9	Método pirometalúrgico para se obter a escória de aciaria LD modificada M2a(EACM2a)	171
3.2.10	Método para se obter a Escória de aciaria LD modificada M2b (EACM2b)	175
3.2.11	Métodos de caracterização da escória de aciaria LD modificadas EACM1, EACM2a e EACM2b por processo pirometalúrgico	175
3.2.11.1	Caracterização física.....	175
3.2.11.2	Caracterização química.....	176
3.2.11.3	Atividade pozolânica	177
3.2.11.4	Caracterização mineralógica.....	177
3.2.11.1	Caracterização microestrutural	177
3.2.11.5	Análise térmica.....	178
3.2.11.6	Método de avaliação do calor de hidratação de cimento CP V-ARI puro e com substituição do CP V-ARI por 40% EACM2b	178
3.2.12	Método de avaliação do grau de vitrificação da EACM2b por microscopia de luz transmitida polarizada	179
3.2.13	Método de análise do comportamento mecânico da escória de aciaria LD (EACN) com adição de hidróxido de sódio (NaOH) e Cal (CHI)	179
3.2.13.1	Dosagem e traço de argamassa utilizada.....	179

3.2.13.2	Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM1	180
3.2.13.3	Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM2a	180
3.2.13.4	Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM2b	180
3.2.13.5	Método de avaliação do comportamento mecânico do clínquer e gesso com substituição por EACM2b	181
3.2.14	Método de avaliação absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica de argamassas endurecidas de cimento CP V-ARI puro e com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b	181
3.2.15	Método de avaliação da reatividade EACM2b por microscopia de luz transmitida (teste de Michelsen)	182
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	183
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CP V-ARI	183
4.1.1	Caracterização física	183
4.1.2	Caracterização química.....	185
4.1.3	Caracterização mineralógica.....	185
4.1.4	Resistência média à compressão axial	186
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CLÍNQUER.....	187
4.2.1	Caracterização física	187
4.2.2	Caracterização química.....	188
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO	189
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD NATURAL (EACN)	190
4.4.1	Caracterização física	190
4.5	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD NATURAL (EACN) EM FORMA DE PÓ	191
4.5.1	Caracterização física	191
4.5.2	Caracterização química.....	194
4.5.2.1	Composição química	194
4.5.2.2	Perda ao fogo, anidrido sulfúrico, enxofre, óxido de cálcio livre e resíduo insolúvel.....	196
4.5.3	Atividade pozolânica	197
4.5.4	Análise térmica	198
4.5.5	Caracterização física ambiental	199
4.5.6	Caracterização mineralógica.....	201
4.5.7	Caracterização microestrutural	204
4.5.8	Tempo de pega	208

4.5.8.1	Pasta de consistência normal	209
4.5.8.2	Tempo de início e fim de pega	210
4.6	EXPANSIBILIDADE	210
4.7	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 1 (EACM1), ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 2a (EACM2a) e ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 2b (EACM2b) EM FORMA DE PÓ DO PROCESSO PIROMETALÚRGICO	212
4.7.1	Caracterização física	212
4.7.2	Caracterização química	217
4.7.3	Composição química	217
4.7.4	Atividade pozolânica	223
4.7.5	Análise térmica	223
4.7.6	Caracterização mineralógica	226
4.7.7	Caracterização microestrutural	228
4.8	CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CIMENTO CP V-ARI PURO E COM SUBSTITUIÇÃO DE 40% POR EACM2b	234
4.9	AVALIAÇÃO DO GRAU DE VITRIFICAÇÃO DA EACM2b POR MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA POLARIZADA	237
4.10	AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE EACM2b POR MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA (TESTE DE MICHELSEN)	238
4.11	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO REALIZADO COM A ESCÓRIA DE ACIARIA LD COM ADIÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH) e Cal (CHI)	239
4.12	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR EACN	241
4.13	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR EACM1	243
4.14	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR EACM2a e EACM2b	245
4.15	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ARGAMASSAS DE CLÍNQUER E GESSO PURO E COM ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE 40% POR EACM2b	249

4.16	ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DE ARGAMASSAS ENDURECIDAS DE CIMENTO CP V-ARI PURO E COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b ..	250
5	CONCLUSÕES	253
5.1	CONCLUSÕES REFERENTES À EACN	253
5.2	CONCLUSÕES REFERENTES À EACN COM ADIÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO E CAL.....	253
5.3	CONCLUSÕES REFERENTES À EACM1	254
5.4	CONCLUSÕES REFERENTES À EACM2a e EACM2b	255
5.5	PROPOSTA PARA FUTUROS ESTUDOS E PESQUISAS	256
6	REFERÊNCIAS	258
	APÊNDICE A – Ensaios de caracterização.....	268
	APÊNDICE B - Ensaios de calor de hidratação, análise térmica e grau de vitrificação e avaliação da reatividade da escória	281
	APÊNDICE C - Resultados de resistência à compressão	293

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

No mundo, a fabricação do cimento contribui para emitir 5% de CO₂ de origem antrópica do total produzido; porém, no Brasil, esse percentual corresponde a 2,81% de acordo com o Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa de 2014. No Brasil, a previsão é de grande aumento do consumo do cimento, tornando o controle do CO₂ uma questão prioritária para o setor. Cimentos com adições ao clínquer, tais como escórias de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas artificiais e fíler calcário, propiciam a queda da produção do clínquer, o que diminui a queima de combustíveis e a emissão da descarbonatação (KIHARA; VISEDO, 2014). Uma alternativa para diminuir a emissão de CO₂ é utilizar outro subproduto da fabricação de aço, que é a escória de aciaria de convertedor LD (Linz-Donawitz) ou escória tipo BOF (Basic Oxygen Furnace), objeto desta pesquisa, para ser usada como substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.

Para cada tonelada de aço, gera-se na faixa de 100 kg a 150 kg de escória de aciaria LD. Essa variação na produção da escória de aciaria LD natural¹ (EACN) é devida ao tipo de forno utilizado e à matéria-prima empregada na fabricação do aço. Em 2015, produziram-se 33,25 milhões de toneladas de aço no Brasil, e temos produzido 2,99 milhões de toneladas de escória de aciaria LD ou tipo BOF (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2016).

No Brasil, o último dado disponível indica que 44% das escórias de aciaria LD são empregadas em lastros ferroviários, bases e sub-bases rodoviárias e 56% não possuem utilização definida, sendo estocadas nos pátios siderúrgicos (GUMIERI, 2002).

Na China, são produzidos 80 milhões de toneladas de escória de aciaria LD a cada ano, porém só são reaproveitados 22%, sendo esse percentual muito pequeno

¹ A escória de aciaria LD que não passou por nenhum processo pirometalúrgico e, após a sua fabricação, foi denominada de escória de aciaria LD natural, sendo representada pela sigla EACN.

quando se compara com o de países desenvolvidos, como os EUA, o Japão, a Alemanha e a França, onde os índices ficam perto de 100% (QI; LIU, J.; LIU, Q., 2016). A escória de aciaria desperdiçada ocupa uma grande área de terra e, por possuir frações solúveis, pode contaminar o solo com metais pesados, resultando em muitos problemas ambientais graves. Portanto, é imperativo encontrar formas eficazes de utilizar escória de aciaria.

A composição química da escória de aciaria LD muda de acordo com a produção do aço, assim como a composição mineral também varia. As fases que podem surgir são olivina, merwinite, C_3S , C_2S , C_4AF , C_2F , fase RO ($CaOFeO-MnO-MgO$ solução sólida) e CaO livre, que são minerais comuns em escória de aciaria (MALYNOWSKYJ, 2016).

As escórias de aciaria LD tipo BOF das usinas siderúrgicas brasileiras costumam ter, em sua composição química, CaO 35-40%, SiO_2 10-15%, Al_2O_3 1-6%, MgO 9-15%, P_2O_5 1-2% e Ferro total (na forma de Fe^{+2} , Fe^{+3} e Fe^0) da ordem de 19% a 25% (MALYNOWSKYJ, 2016).

A presença de C_3S , C_2S , C_4AF e C_2F faz a escória de aciaria apresentar algumas propriedades hidráulicas. No entanto, o C_3S contido em escória de aciaria LD é muito mais baixo do que em cimento Portland. Assim, a escória de aciaria pode ser considerada um material de baixa atividade hidráulica (KOUROUNIS et al., 2007).

Portanto, no Brasil, no que diz respeito à escória de aciaria LD no estado natural, ainda não existe norma que regulamenta a sua substituição parcial no cimento, em virtude de grandes dificuldades para sua utilização. As principais razões para isso são altamente variáveis, isto é, sua composição química, o baixo teor de compostos de silicato de cálcio reativo e o alto teor de óxidos de cálcio e magnésio livres podem causar problemas de expansão volumétrica. A cal livre, quando hidrata, aumenta em volume, podendo levantar as camadas superiores de pavimentos.

Os pesquisadores Geiseler (1995) e Coomarasamy; Walzak (1995) demonstraram que a influência do óxido de cálcio depende tanto da quantidade presente quanto da forma em que se apresenta e da dimensão do grão. O óxido de cálcio (CaO) pode apresentar-se sob duas formas: a primeira é no estado puro e a segunda é em solução

sólida com o ferro ($\text{CaO} + X\% \text{FeO}$ – onde $0 < X < 10\%$ em massa). Pode também ocorrer a expansão devido ao MgO não reagido, pelo polimorfismo do silicato de cálcio e pela oxidação e corrosão do ferro metálico presentes nas escórias de aciaria (GOLDRING; JUCKES, 1997). O MgO cristalino formado a altas temperaturas é menos reativo com a água do que o CaO cristalino exposto às mesmas condições de temperatura.

A escória de alto-forno é a mais usada na produção de cimento Portland de alto-forno CP III, de acordo com a ABNT NBR 5733 (ABNT, 1991), que permite a utilização de 35% a 75% de escória granulada de alto-forno em sua composição. Já no cimento Portland composto CP II-E, de acordo com a ABNT NBR 11578 (ABNT, 1997), a sua utilização fica de 6% a 34% de escória granulada, em virtude de sua composição química ser próxima à do cimento Portland Figura 1.1 e ter boa reatividade (MALYNOWSKYJ, 2016). Porém, foram necessários muitos anos até ocorrer a utilização da escória de alto-forno no cimento.

Figura 1.1 – Composição química de escórias de alto-forno e aciaria LD comparadas com diversos outros produtos

Fonte: Monshia; Asgaranib (1999, p.1374).

Sabe-se que cada tonelada de cimento Portland produzido gera uma quantidade similar de dióxido de carbono, que é o responsável pela emissão dos gases de efeito estufa; então, a substituição do clínquer por escória de aciaria possibilita a diminuição do calcário que é utilizado na fabricação do clínquer.

No Brasil, conforme mostra o gráfico da Figura 1.2, verifica-se que a emissão de dióxido de carbono na fabricação de cimento em Kg CO₂/ton cimento em 2012, em relação à dos demais países, é a mais baixa, isso é devido à utilização de adições no Brasil, que tem sido uma alternativa na redução das emissões de CO₂.

Com base nesse contexto, nasce o interesse em avaliar o emprego da EACN sólida, comercializada pela usina siderúrgica, quando submetida ao tratamento pirometalúrgico, que foi a técnica utilizada para alcançar a modificação da composição química EACN sólida, para a composição química final ser similar à da escória de alto-forno (EAF) para substituição parcial do cimento Portland, ou como adição ao clínquer, possibilitando a redução do consumo de matéria-prima que gera grande quantidade de CO₂ para fabricar o clínquer.

Figura 1.2 – Emissão de dióxido de carbono na fabricação de cimento Kg CO₂/ton de cimento

Fonte: Battagin (2016,p.5).

Alguns pesquisadores, como Dongxue et al. (1997); Meadowcroft; Barr (1997); Monshia; Asgaranib (1999); Xuequan et al. (1999); Shi e Qian (2000); Masuero (2001); Altun; Yilamaz (2002); Gumieri (2002); Rai et al. (2002); Shi e Hu (2003); Polisseni (2005); Kourounis (2007); Araújo (2008); Tsakirids et al. (2008); Muhmood; Vitta; Venkateswaran (2009); Wang; Yan (2010); Arrivabene (2012); Pinto Júnior (2012); César (2014); Mahoutian et al. (2015); Murphy; QI; LIU, J.; LIU, Q. (2016), estudaram a escória de aciaria para ser utilizada em cimento, procurando alternativas para a utilização da escória de aciaria que não fosse como um agregado, porém não conseguiram eliminar os efeitos negativos da escória de aciaria que são os teores elevados de FeO, CaO livre e MgO todos expansivos.

Como agregado, a escória de aciaria foi estudada para o uso em bases de estradas (QASRAWI, 2014; SHEN et al., 2009), lastro de ferrovias e asfalto (ASI; QASRAWI; SHALABI, 2007; HAININ et al., 2012; PASETTO; BALDO, 2012; SORLINI; SANZENI; RONDI, 2012; YOSHIDA; SUGISAKO, 2011) e concreto (NASCIMENTO, 2007; WANG et al., 2013. Esses autores não eliminaram os efeitos negativos da escória de aciaria que são os teores elevados de FeO, CaO livre e MgO, todos expansivos.

Pesquisas para a substituição de parte do cimento por escória de aciaria têm sido encontradas em estágio mais avançado na China, onde se fabrica desde 1970, um tipo de cimento que contém 30% a 45% de escória de aciaria, 30% a 45% de escória de alto-forno, 20% a 35% de clínquer e 5% a 7% de gesso (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006).

A Siderúrgica ArcelorMittal em Vitória-ES Brasil vende a escória de aciaria não como resíduo sólido industrial, e sim como coprodutos, que passam por controle de umidade e granulometria logo após a obtenção da escória de aciaria, com a finalidade de serem usados no segmento de rodovias e pátios. As siderúrgicas têm feito esforços para aumentar o uso da escória de aciaria, porém ainda 60% são armazenados e sem utilização imediata.

Essa utilização depende da estabilização das escórias de aciaria, pois são altamente expansivas. Como agregados, já existem normas do Departamento Nacional de

Infraestrutura e Transportes (DNIT) que possibilitam a sua utilização, desde que a expansibilidade seja no máximo de 3% para emprego em base e sub-base.

Em 2015, o consumo de cimento na China atingiu a cifra de 2.566,1 milhões de toneladas e, no Brasil, no mesmo período, 64,81 milhões de toneladas de janeiro de 2015 a dezembro de 2015 (Figura 1.3). No Brasil, o consumo em 2015 foi aproximadamente de 320 kg por habitante, porém estamos bem abaixo do consumo aproximado mundial de 575 kg por habitante, que gera a necessidade maior de escória de alto-forno para os cimentos com adição. Verifica-se, na Figura 1.3, o aumento do consumo do cimento desde 2005 e uma queda a partir de 2015.

Figura 1.3 – Crescimento econômico x consumo de cimento per capita no Brasil – 1965-2015

Fonte: SNIC (2016, p.10).

A partir de 2025, existe uma previsão de aumento do consumo de cimento conforme Figura 1.4.

Figura 1.4 – Previsão de crescimento da produção de cimento no Brasil

Fonte: SNIC, 2016 apud Battagin (2016, p.16).

Esse aumento do consumo do cimento esperado em 2025 vai gerar a necessidade maior de escória de alto-forno para os cimentos com adição, porém o aumento da disponibilidade da escória de alto-forno não está ocorrendo em virtude da produção do aço não ter aumentado nos últimos anos, conforme podemos observar na Tabela 1.1 e na Figura 1.5.

Tabela 1.1 – Produção Siderúrgica Brasileira (1000t)

Produção/t	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
	25.506	32.820	35.183	34.682	34.163	33.912	33.256	30.214

Fonte: Adaptado Instituto Aço Brasil (2016, p.6).

Figura 1.5 – Gráfico sobre a produção de aço bruto

Fonte: Instituto Aço Brasil (2016, p.6).

Com base nos dados apresentados, verifica-se a necessidade de suprir a falta da escória de alto-forno por outro resíduo de produtos siderúrgicos. Portanto, este trabalho visa utilizar a escória de aciaria LD, que também é um resíduo siderúrgico, no cimento ou no clínquer; porém, não na forma que é obtida, pois torna-se expansiva quando em contato com a água.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Contribuir para o conhecimento da escória de aciaria LD como material cimentício em argamassas de três maneiras: escória de aciaria natural LD (EACN) em substituição parcial do cimento Portland, escória de aciaria LD submetida a processo de ativação alcalina (EACA) em substituição total do cimento Portland e escória de aciaria LD modificada por tratamento pirometalúrgico (EACM) em substituição parcial do cimento Portland CP V-ARI ou no clínquer Portland, comparando propriedade mecânica e de

durabilidade com esses materiais e determinando os limites de adição de cada uma desses materiais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar, do ponto de vista físico, ambiental, químico, mineralógico, microestrutural e térmico, bem como da atividade pozolânica, as escórias de aciaria LD coletadas na usina (EACN), para avaliar a possibilidade de produzir cimento.
- Verificar a propriedade mecânica da EACN após a ativação alcalina.
- Realizar processos pirometalúrgicos até que se obtenha uma escória de aciaria modificada com composição química similar à escória de alto-forno.
- Caracterizar do ponto de vista físico, químico, mineralógico, microestrutural e térmico, bem como da atividade pozolânica, a escória de aciaria modificada 1 (EACM1), a escória de aciaria modificada 2a (EACM2a) e a escória de aciaria modificada 2b (EACM2b).
- Realizar os ensaios de calor de hidratação, do grau de vitrificação e da reatividade por microscopia de luz transmitida da escória de aciaria modificada 2b EACM2b.
- Realizar ensaios mecânicos e de durabilidade da EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b.
- Comparar as exigências física, química e mecânica de normas brasileiras do cimento Portland CP II E-32, CP II E-40, CP III e CP V-ARI com as do cimento produzido com substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.

1.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os ensaios apresentados se referem à amostra coletada, podendo ser diferentes de resultados já apresentados por outros autores, tendo em vista que a escória de aciaria LD natural muda as suas características químicas e mineralógicas em função do tipo de aço que está sendo fabricado e do tempo de cura no pátio. Todos esses fatores são de controle da usina siderúrgica.

Em virtude de a quantidade total de material obtido no processo pirometalúrgico em laboratório ter sido pequena, ela apresenta algumas limitações:

- Os ensaios foram realizados em argamassas e não em concretos.
- Não se avaliaram as propriedades reológicas das argamassas de cimento com substituição parcial por escórias com aditivos.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, inicialmente, neste capítulo, apresentam-se a abrangência da pesquisa, a justificativa do trabalho e a importância do tema, o objetivo geral e os específicos. Os demais capítulos foram apresentados da seguinte forma:

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura sobre o tema estudado, ressaltando-se os trabalhos científicos, dissertações e teses, diretamente relacionados com esta pesquisa.

No capítulo 3, trata-se da metodologia do programa experimental, em que são descritos os materiais utilizados, os métodos de caracterização física, ambiental, química, mineralógica, microestrutural, análise térmica, atividade pozolânica, calor de hidratação grau de vitrificação e avaliação da reatividade da escória, bem como os métodos usados com argamassas de cimento com substituição parcial por escória de aciaria de expansibilidade, de tempo de pega, o comportamento mecânico, a absorção, o índice de vazios e a massa específica para a obtenção dos resultados e *software* utilizado para a análise da quantidade de materiais a ser usada no processo pirometalúrgico.

No capítulo 4, estão apresentados os resultados obtidos no programa experimental. A princípio caracterizam-se: o cimento CP V-ARI, o gesso, a escória de aciaria natural LD (EACN), a escória de aciaria modificada n:1 (EACM1), escória de aciaria modificada n:2 (EACM2a), e (EACM2b). E, em seguida, apresentam-se os ensaios de resistência à compressão axial, de absorção, de índice de vazios, de massa específica com argamassas de cimento CP V-ARI, EACN, EACM1, EACM2a, EACM2b e o grau de vitrificação e avaliação da reatividade da escória EACM2b. Também se realizam

ensaios de resistência à compressão axial de argamassa com clínquer e (EACM2_b), e todos os resultados encontrados são comparados com as exigências das normas brasileiras de cimento Portland composto com escória CP II-E, cimento Portland de alto-forno CP III e cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões do programa experimental empreendido e propõem-se novos estudos ou pesquisas.

No capítulo 6, seguem as referências.

Ao final do trabalho, seguem os apêndices: A – com os ensaios de caracterização; B – ensaios de calor de hidratação, análise térmica e grau de vitrificação e avaliação da reatividade da escória; e C – resultados de resistência à compressão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CIMENTO

2.1.1 História do cimento

A seguir apresenta-se uma pequena história do cimento Portland até a utilização de adições no cimento.

O nome cimento é proveniente do latim *caementu*, que significa união. A história do cimento é de 4.500 anos atrás, quando os egípcios tinham uma mistura de gesso calcinado que usavam nos seus monumentos antigos.

Os gregos e os romanos iniciaram usando o calcário calcinado² nas suas argamassas e posteriormente conseguiram fazer o primeiro concreto da história misturando cal, água, areia e pedra borrifada, porém verificaram que a cal no concreto e nas argamassas não tinha endurecimento debaixo d'água, o qual era necessário para as construções sob a água.

Conseguiram resolver esse problema quando passaram a triturar a cal com cinzas vulcânicas ou a queimar telhas de argila finamente moídas.

A presença da sílica ativa e alumina da cinza vulcânica ou das telhas queimadas deu origem ao cimento pozolânico, tendo este nome devido à cidade de Pozzuoli, perto de Vesúvio, na Itália, onde foi encontrada, pela primeira vez, cinza vulcânica. A grande vantagem desse cimento é que tinha endurecimento mesmo imerso em água. O nome cimento pozolânico ainda hoje é usado para cimento obtido, de forma simples, pela trituração de materiais naturais à temperatura normal. Esse cimento pozolânico foi usado nas argamassas do Panteón e Coliseu de Roma, onde permanecem até hoje (NEVILLE, 1982).

² Calcário Calcinado: é o nome dado à reação química de decomposição térmica, usada para transformar o calcário (CaCO_3) em cal virgem (CaO), liberando gás carbônico (CO_2).

O grande passo no desenvolvimento do cimento ocorreu, em 1756, com o engenheiro inglês John Smeaton, que foi o responsável pela construção do farol de Eddystone ao largo da costa de Corn (França) e descobriu uma argamassa melhor quando realizou uma mistura de pozolana com calcário contendo grande quantidade de argila. Desse modo, descobriu a importância da argila para a fabricação do cimento, até então considerada indesejada (NEVILLE, 1982).

Em 1824, Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland com a patente n.º 5022, que recebeu do rei George IV da Inglaterra. Era uma mistura de argila e calcário duro, a qual era colocada em um forno para eliminar todo o gás carbônico.. O produto obtido tinha cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhante ao das rochas da ilha britânica de Portland.

Em seguida, em 1845, Isaac Johnson cria o protótipo do cimento moderno, que foi uma mistura de argila e greda (nome antigo de um tipo de calcário) até a formação do clínquer. No passado o cimento era produzido em fornos verticais, cujo processo industrial só começou com a invenção do forno rotativo horizontal, que foi patenteado pelo engenheiro inglês Frederik Ransone em 1855. Esse forno possuía uma pequena inclinação, fazendo com que o material a ser calcinado entrasse numa extremidade e caminhasse até outra. Já em 1902, Thomas A. Edson lançou o primeiro forno longo de cimento, e atualmente continuam sendo usados os fornos rotativos horizontais e longos.

No Brasil, as primeiras tentativas para fabricação de cimento foram por intermédio do comendador Antônio Proost Rodovalho, que instalou uma fábrica na fazenda Santo Antônio de sua propriedade em Sorocaba-SP, com o nome de usina Rodovalho. Sua primeira produção de cimento foi em 1897, com a marca de cimento Santo Antônio, porém interrompeu suas atividades em 1904. Voltou em 1907, mas teve problemas de qualidade, encerrando definitivamente em 1918. Nesse mesmo período, o engenheiro brasileiro Luís Felipe Alves da Nóbrega, que estudara na França, realizou o projeto de uma fábrica de cimento na ilha de Tíri, na Paraíba, construída em 1890, que produziu um cimento de baixa qualidade, que o levou ao fracasso, funcionando apenas por três meses. O governo do Espírito Santo, em 1912, inaugurou uma fábrica

de cimento em Cachoeiro de Itapemirim, que funcionou até 1924, devido à baixa produção de cimento: apenas de 8.000 toneladas por ano. Em 1935, volta a funcionar depois de ter passado por uma modernização. Atualmente essa fábrica tem o nome de Fábrica Itabira, que foi fundada por João Pereira dos Santos, e fabrica o cimento de marca Nassau em homenagem ao holandês Maurício de Nassau. Porém, o marco da produção de cimento no Brasil ocorreu em 1924, com a implantação de uma fábrica em Perus-SP (ABCP, 2009). No entanto, o consumo no Brasil, na década de 1930, era alto e a produção interna não atendia ao consumo, favorecendo a entrada do cimento Liz de Portugal. Em 1969, construíram sua primeira fábrica na cidade de Lagoa Santa, Vespasiano-MG. Atualmente a empresa de cimento Liz é uma das principais produtoras de cimento do Brasil.

O nome Portland se mantém até os dias de hoje para cimentos misturados com calcários e argilas ou outros materiais que contêm sílica, alumina e óxido de ferro, em que se aquece tudo até uma temperatura de clínquerização, moendo-se o clínquer resultante.

Existem dois processos para obter o cimento por via úmida e via seca: o mais usado é por via seca, por ter consumo de combustível bem menor, quando se compara com o processo de via úmida (NEVILLE, 1982).

De acordo com a ABNT NBR 11172 (ABNT, 1990), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico artificial, resultado da moagem de clínquer, que é constituído, em sua maior parte, de silicatos e aluminatos de cálcio hidráulicos, que são originados desde a queima até a fusão parcial de uma mistura uniforme e dentro de certas proporções, tendo principalmente calcário e argila. No Brasil, o cimento Portland é comercializado com as siglas e denominações, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos de cimento Portland comercializados no Brasil

ABNT	Sigla	Denominação	Clínquer + gesso	CONTEÚDO DOS COMPONENTES (%)		
				Escória de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
	CP I	Portland comum	100	0	0	0
NBR 5732	CP I-S	Portland comum com adição de escórias granuladas de alto- forno, materiais pozolânicos e/ou materiais carbonáticos	99-95	1-5	1-5	1-5
	CP II E	Portland composto com escória	94-56	6-34	-	0-10
NBR 11578	CP II Z	Portland composto com pozolana	94-76	-	6-14	0-10
	CP II F	Portland composto com fíler	94-90	-	-	6-10
NBR 5735	CP III	Portland de alto-forno	65-25	35-70	-	0-5
NBR 5736	CP IV	Portland pozolânico	85-45	-	15-50	0-5
NBR 5733	CP V	Portland de alta resistência inicial	100-95	-	-	0-5
NBR 12989	CPB*	Portland branco estrutural	100-75	-	-	0-25
NBR 12989	CPB	Portland branco não estrutural	74-50			26-50

Fonte: Normas Brasileiras de Cimento (2016).

* (Classe de resistência 25, 32 e 40MPa).

Além desses cimentos citados na Tabela 2.1, existem cimentos de baixo calor de hidratação, que devem ser designados pela sigla e classe originais do seu tipo (CP I, CP II, CP III, CP IV ou CP V-ARI), acrescidas de BC, por exemplo, CP III-40 BC (NBR 131161(ABNT, 1994)); o cimento Portland resistente a sulfatos, que é designado pela sigla original de seu tipo (CP I, CP II, CP III, CP IV ou CP V-ARI), acrescidos da sigla RS, por exemplo, CP III 40 RS. Os cimentos serão considerados resistentes aos sulfatos, quando o teor de C_3A do clínquer for igual ou inferior a 8% e o teor de adições carbonáticas for igual ou inferior a 5% da massa total do aglomerante; no caso do cimento Portland de alto-forno, o teor de escória granulada de alto-forno estiver entre 60% e 70%; no cimento pozolânico (CP IV), o teor de materiais pozolânicos estiver entre 25% e 40% (NBR 5737 (ABNT, 1992)); cimento Portland branco não estrutural (CPB); e o cimento para Poços Petrolíferos (CPP) – classe G. Outros subtipos de cimentos existem em virtude da natureza da adição e classes de resistência. A fabricação de cada tipo de cimento apresentado na Tabela 2.1 depende da disponibilidade de matérias-primas e adições, além dos equipamentos de moagem e

armazenamento regional. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que possuiu certificação ISO 9001 e acreditação no Instituto Nacional de Metodologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), é o centro de referência para a indústria de cimento e seus consumidores.

2.1.2 O clínquer Portland

O clínquer Portland é um material obtido do cozimento de mistura pré-dosada de calcário e argila, contendo os quatro óxidos principais – CaO , SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 –, podendo utilizar matérias-primas corretivas para garantir a composição química da mistura e sendo aquecido a altas temperaturas, quando se obtêm nódulos de 5mm a 25mm de diâmetro de material sinterizado (MEHTA; MONTEIRO, 2004).

O clínquer de cimento Portland é formado no intervalo de temperatura de 1.300°C a 1.500°C. O cimento é o resultado do clínquer misturado com 4%-5% de gesso para controlar a pega e moído até obter um pó fino com diâmetro médio de 10 μm (RAMACHANDRAN, 1969).

Os insumos necessários à produção de uma tonelada de clínquer são 1.250kg de calcário, 300kg de argila, 14kg de minério de ferro, 60kg a 130kg de combustível e 110kWh a 130kWh de energia elétrica (BATTAGIN, F; BATTAGIN, S, 2010).

O cimento Portland consiste em vários compostos de cálcio, porém os resultados das análises químicas de rotina são expressos em termos de óxidos dos elementos presentes. Também é costume expressar os óxidos individuais e compostos do cimento com o uso das seguintes abreviações, conforme mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Abreviações dos óxidos individuais e compostos do cimento

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
SiO_2	S	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
MgO	M	$4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$	$\text{C}_4\text{A}_3\overline{\text{S}}$
SO_3	$\overline{\text{S}}$	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$
H_2O	H	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	CSH_2

Fonte: Metha; Monteiro (2014, p. 220).

A preparação da composição química das matérias-primas, em termos de CaO, SiO_2 e Al_2O_3 , é corrigida de tal modo, que a mistura cai no triângulo da composição limitado C_3S , C_2S e C_3A do diagrama de fase ternária SiO_2 -CaO- Al_2O_3 , conforme ilustra a Figura 2.1, na qual se verifica que, somente nessa área, as três fases podem existir simultaneamente. Nesse diagrama, o óxido de ferro não aparece, porém, sem ele, o cimento Portland iria ser calcinado a uma temperatura elevada. Sendo assim, o óxido de ferro é adicionado à composição da matéria-prima com o objetivo de abaixar a temperatura de queima. Portanto, para simplificar uma fase, adota-se que o Fe_2O_3 e o Al_2O_3 desenvolvem papéis similares. As matérias-primas corretivas para SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , contidas na argila e necessárias para o ajuste do clínquer, são areia, bauxita e óxido de ferro, respectivamente (AITCIN, 2000).

Figura 2.1 – Zona de composição C_3S - C_2S - C_3A no diagrama de fase ternária SiO_2 - CaO - Al_2O_3

Fonte: Osborn; Muau 1960 apud Aitcin (2000, p. 114).

Na fase do forno, ocorre a formação dos principais compostos do clínquer: alita C_3S ($3CaO \cdot SiO_2$), belita C_2S ($2CaO \cdot SiO_2$), que são as duas fases de silicatos bem cristalizados. Entre os cristais de alita e belita, surge a terceira fase denominada intersticial composta – C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) e C_4AF ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) – mais ou menos cristalizada, em que também surgem impurezas, que são o periclásio (MgO), óxido de cálcio calcinado endurecido (CaO) e sulfatos alcalinos: langbeinita ($(K_2Ca_2(SO_4)_3)$), aphetitalita ($K_3Na(SO_4)_2$), arcanita (K_2SO_4) entre outros que afetam a qualidade do produto final. A langbeinita ($K_2Ca_2(SO_4)_3$) e a arcanita (K_2SO_4) são encontradas em clínqueres que têm a presença de K_2O e SO_3 . Os sulfatos alcalinos aparecem como compostos de menores proporções, porém podem apresentar efeitos de grande importância, como o aumento da solubilidade das fases em geral nas reações iniciais de hidratação (CENTURIONE, 1993).

O óxido de cálcio, CaO , que forma a cal livre, aparece na farinha por não ter reagido completamente. A cal livre no cimento deve ficar entre 1% e 2%, pois, quando absorve água, libera calor e provoca expansão da massa de cimento Portland após a sua

hidratação. O periclásio aparece devido à utilização de calcário dolomítico e pode provocar sua lenta expansão no decorrer de anos, após a hidratação do cimento.

O controle das matérias-primas para a fabricação do clínquer é com base em módulos químicos³ empiricamente criados, de modo que mantenha as estreitas relações entre os quatro componentes principais, CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, para que possibilitem a formação dos minerais do clínquer. Os mais usuais são o fator de saturação de cal (FSC) Equação 2.1, o módulo de sílica (MS) Equação 2.2 e módulo de alumina (MA) Equação 2.3 (CENTURIONE, 1993).

$$FSC = \frac{CaO \cdot 100}{2,8SiO_2 + 1,2Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad \text{Equação 2.2}$$

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad \text{Equação 2.3}$$

Os valores do fator de saturação de cal (FSC) habitualmente ficam entre 92 e 98 para cimentos com clínqueres cinza e, quando se trata de clínqueres de cimentos brancos, o intervalo fica entre 98 e 110. O módulo de sílica (MS) regula a quantidade de silicatos que se formam para cimentos cinza no intervalo de 2 a 3 e cimentos brancos de 4 a 5. O módulo de alumina (MA) fica no intervalo de 1 a 4 para cimentos cinza e de 8 a 25 para cimentos brancos (GOBBO, 2003).

Verifica-se, na Figura 2.2, o papel das fases aluminato tricálcico (C₃A) e ferro aluminato tetracálcico (C₄AF), que, quando líquidas, provocam uma redução da temperatura de formação do C₃S, fazendo que os íons Ca⁺⁺ se difundam mais rápida e facilmente no C₂S, facilitando a sua transformação em C₃S.

³ Os módulos químicos foram criados com o objetivo de controlar as matérias-primas durante o processo industrial e de manter a homogeneidade do clínquer (KIHARA; CENTURIONE, 2005, in ISAIAS, 2005, p. 298).

O aumento da fase intersticial⁴ provoca a diminuição da temperatura de queima, porém do ponto de fabricação a quantidade ótima deverá ficar entre 12% e 20% da massa total do clínquer, pois, se existir em excesso, criará um anel dentro do forno, que poderá bloqueá-lo provocando ataque aos refratários. Se existir menos, a difusão dos íons Ca^{++} no C_2S tornar-se-á difícil e, assim, o clínquer terá menos C_3S e óxido de cálcio não combinado em demasia. Depois de o clínquer passar pela zona de clinquerização no forno, conforme se mostra na Figura 2.2, o resfriamento deverá ser rápido, para que o clínquer solidifique as diferentes fases nas suas formas a alta temperatura, não permitindo que elas sigam a natural transformação de fase, que ocorrerá sob o resfriamento lento.

Figura 2.2 – Esquema com as transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura

Fonte: Wolter (1985) apud Kihara; Centurione (2005), In: Isaia (2005, p. 301, vol. 1).

Na Figura 2.3, apresenta-se o diagrama de fases $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ do cimento Portland, antes de se misturar com o gesso. Esse sistema foi estudado e pesquisado pelo Geophysical Laboratory-Carnegie Institute de Washington, de 1906 a 1915.

⁴ A fase intersticial é o material que ocupa os espaços entre os cristais de alita e belita, sendo o material que se funde durante o processo de clinquerização. É a fase formada por aluminatos e ferro aluminatos cálcicos em solução sólida (KIHARA; CENTURIONE, 2005, in ISAIAS, 2005, p. 302).

Figura 2.3 – Diagrama de fases do clínquer do cimento Portland, antes de se misturar com o gesso (composição X temperatura)

Fonte: Thomaz (Acesso em 30 jul. 2015).

2.1.3 Microestrutura do clínquer

As características e propriedades do clínquer são influenciadas pela pirotecnologia dos materiais que formam o clínquer com a mesma composição química que tenham características microestruturais muito diferentes. Também dois clínqueres podem apresentar a mesma composição de fases e ter propriedades hidráulicas diferentes, isto é, provocadas pelo resfriamento rápido, cujos tamanhos médios dos cristais de alita podem ser diferentes de um clínquer para o outro. Essa característica que ocorre na formação do clínquer influencia fortemente a sua reatividade e resistência após a moagem (AITCIN, 2000). Na Figura 2.4, apresentam-se cristais de alita com dimensões entre $30\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$, indicando processo adequado de clínquerização.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a partir de uma seção polida de uma amostra clínquer, constatou-se que o C_3S aparece como cristais hexagonais e C_2S arredondados.

Figura 2.4 – Cristais de alita com dimensões entre 30mm e 40mm, indicando processo adequado de clinquerização

A – Alita
B – Belita
E – C_3A e C_4AF

Fonte: Battagin; Silva Battagin (2010, p. 777).

2.1.4 Estrutura dos principais compostos do clínquer

A-1) *Silicato tricálcico (C_3S)*

O silicato tricálcico (C_3S), abreviação de $3CaOSiO_2$ ou Ca_3SiO_5 , também chamado de alita, é o principal constituinte do clínquer e constitui cerca de 50% a 65% de sua massa. A alita não é pura, pois contém pequenas quantidades de impurezas de elementos secundários, tais como íons de Al, Fe, Mg, Na, K, Cr, Ti, Mn, P, entre outros, sob a forma de soluções sólidas. Essas impurezas estruturais explicam a instabilidade do C_3S , em água (MELO, 2000).

A estrutura dos cristais de alita exibe uma série de transições polimórficas R (romboédrica), T1 (Triclínica) e M3 (monoclínica), de acordo com a Tabela 2.3, quando aquecido desde a temperatura ambiente até sua fusão. Essa estrutura é realizada a partir de cátions de Ca^{2+} , tetraedros isolados de SiO_4^{4-} e íons de O_2 , que se ligam aos íons de Ca_2 como no CaO (Bigare et al., 1967, Guinier e Regourd, 1969).

Tabela 2.3 – Fases polimórficas do C_3S

Forma Cristalina	Temperatura de Transição (°C)
Romboédrica (R)	1050
Monoclínica II (MII)	990
Monoclínica I (MI)	980
Triclínica III	920
Triclínica II	600
Triclínica I	

Fonte: Kihara (1973).

Segundo Lea apud Mehta, Monteiro (2014), em virtude de os íons de oxigênio se juntarem de um lado de cada íon de cálcio, a coordenação dos íons de oxigênio em torno do cálcio se torna irregular, provocando a existência de grandes vazios estruturais, os quais são os responsáveis pela alta reatividade do C_3S (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Estrutura cristalina do silicato tricálcico C_3S ($3CaOSiO_2$)

Fonte: Mehta (2014, p. 223).

As análises dos problemas que podem ocorrer no processo de produção do clínquer são observadas por meio do formato, tamanho e grau de aparecimento de cristais de C_3S . Portanto, silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) é considerado o principal mineral do clínquer e o responsável pela resistência à compressão (f_c) nas primeiras idades, quando misturado com água. O aumento do teor de C_3S no cimento eleva o calor liberado durante a hidratação (Figura 2.6) e a resistência à compressão (Figura 2.7). O silicato tricálcico também libera grande quantidade de hidróxido de cálcio e alto calor de hidratação.

A velocidade de hidratação é controlada pela velocidade de difusão dos íons por meio das camadas sobrejacentes do produto hidratado e reação rápida com a água (TAYLOR, 1992 apud MAGALHÃES, 2007).

Figura 2.6 – Influência do teor de C_3S na liberação de calor, considerando o teor de C_3A aproximadamente constante

Fonte: Neville (1982, p. 40).

Figura 2.7 – Relação entre a resistência aos sete dias de pasta de cimentos e o teor de C_3S do cimento. Cada símbolo se refere a cimento de uma procedência

Fonte: Neville (1982, p. 43).

A-2) Silicato dicálcico (C_2S)

O silicato dicálcico, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ou Ca_2SiO_4 , constitui-se de 15% a 25% do clínquer, abreviado por C_2S , que, durante o cozimento da mistura do calcário com argila, forma o primeiro complexo de cal e sílica, é mais estável a baixas temperaturas que o C_3S . O C_2S apresenta cinco formas polimórficas bem definidas, que dependem das condições de temperatura no interior do forno (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Fases polimórficas do C_2S

FORMAS	SISTEMA CRISTALINO
$\alpha\text{C}_2\text{S}$	Trigonal
$\alpha'_\text{H}\text{C}_2\text{S}$	Ortorrômbico
$\alpha'_\text{L}\text{C}_2\text{S}$	Ortorrômbico
$\beta\text{C}_2\text{S}$	Monoclínico
$\gamma\text{C}_2\text{S}$	Ortorrômbico

Fonte: GUINIER ; REGOURD apud COSTA (2016, p. 28).

$\beta\text{C}_2\text{S}$ - sistema cristalino monoclínico é considerado como metaestável e não é obtido pelo aquecimento da forma γ . Pelo resfriamento de α'_L é obtido à temperatura entre 680°C e 630°C . O mineral puro inverte para a forma γ à temperatura de aproximadamente 500°C . Possui densidade de 3,28 e é geralmente descrito pelo nome mineral larnita (GUMIERI, 2002).

Ramachandran (1969) cita que as propriedades hidráulicas da forma β dependem do estabilizador usado, indicando que o melhor é o P_2O_5 .

A sequência das transformações durante o resfriamento é $\alpha \rightarrow \alpha'_\text{H} \rightarrow \alpha'_\text{L} \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ e durante o aquecimento é $\gamma \rightarrow \alpha'_\text{L} \rightarrow \alpha'_\text{H} \rightarrow \alpha$.

Na Figura 2.8 apresentam-se as transformações do C_2S em função da temperatura dentro do forno.

Figura 2.8 – Esquema de transformação do C_2S

Fonte: Guinier; Regourd (1968) apud Kihara (1973, p.15).

A forma impura do C_2S é conhecida como belita, pois contém pequenas quantidades de impurezas de elementos secundários, tais como íons de Al, Fe, Mg, Na, K, Cr, Ti, Mn, P, entre outros, sob a forma de soluções sólidas, conhecidas como belita (MELO, 2000). A estrutura da belita no cimento é irregular e influencia pouco na resistência à compressão inicial do cimento, porém colabora no crescimento da resistência final (METHA; MONTEIRO, 2014).

A belita tem uma estrutura cristalina básica de tetraedros independentes de SiO_2 , ligados entre si por meio de íons de cálcio. Reage lentamente com a água, pois tem uma estrutura mais estável que o C_3S , liberando menos calor que a alita.

No retículo do C_2S , pode ocorrer que certos elementos, tais como Mg, Al, Na, Ba, Ti, substituam o Ca e Si dentro de certos limites, acarretando desordens reticulares, estabilizando as diferentes formas de C_2S nas condições ambientais e provocando também variações nas suas propriedades (ABCP, 1984).

A-3) Aluminato tricálcico (C_3A)

O aluminato tricálcico, $3CaO \cdot Al_2O_3$ ou $Ca_3Al_2O_6$, constitui-se de 6% a 10% do clínquer, abreviado por C_3A , e faz parte da fase intersticial entre os cristais de alita e belita. O C_3A , quando puro, cristaliza-se no sistema cúbico, porém, quando estão presentes grandes quantidades de álcalis (sódio e potássio), principalmente Na, pode, durante o resfriamento lento, formar um composto do tipo $Na_2O \cdot 8CaO \cdot 3Al_2O_3$, fazendo a mudança da simetria cúbica para ortorrômbica. Essas estruturas possuem grandes

vazios que colaboram para alta reatividade. O C_3A é o responsável pela pega do cimento⁵ e influencia na resistência entre um e três dias, após a mistura de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A-4) Ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF)

O ferro-aluminato tetracálcico C_4AF , abreviação de $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ou $Ca_4.Al_2.Fe_2.O_{10}$, constitui-se de 3% a 8% do clínquer do cimento.

O C_4AF é uma solução sólida de C_2A e C_2F , sendo a razão molar de A/F próxima a 1. Porém, o C_4AF , em algumas situações, pode estar próximo do C_2A e do C_2F ou conter cristais de C_6A_2F e ser mais ou menos reativo no momento em que ocorre a hidratação do cimento Portland (AITCIN, 2000).

O C_4AF tem pequeno valor hidráulico e contribui pouco para a resistência à compressão do cimento. A sua característica principal é a resistência à corrosão química e também o responsável pela coloração cinzenta do clínquer devido à presença de ferro (SHUKUZAWA et al. apud MAGALHÃES, 2007).

Na Tabela 2.5, apresentam-se algumas características das principais fases mineralógicas presentes no cimento Portland e, na Tabela 2.6, mostra-se uma composição típica dos compostos de vários tipos de cimento Portland disponíveis nos EUA.

Tabela 2.5 - Características das principais fases mineralógicas presentes no cimento Portland

PROPRIEDADES	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Resistência	Boa	Boa	Fraca	Fraca
Intensidade de reação	Média	Lenta	Rápida	Rápida
Calor de hidratação ⁶	Médio	Pequeno	Grande	Pequeno

Fonte: Petrucci (1987, p. 11).

⁵ O termo pega se refere à solidificação da pasta plástica do cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

⁶ O calor de hidratação é o calor gerado quando a água e o cimento Portland reagem. O calor de hidratação é influenciado tanto pela proporção de C_3S e C_3A no cimento quanto pela relação água/cimento, finura e temperatura da cura (COSTA E SILVA et al., 2009).

Tabela 2.6 – Composição típica dos compostos de vários tipos de cimento Portland disponíveis nos EUA

Tipo da ASTM ¹⁴ C150	Descrição geral	Variação da proporção dos componentes (%)			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
I	Emprego geral	45-55	20-30	8-12	6-10
II	Emprego geral com moderada resistência aos sulfatos e moderado calor de hidratação	40-50	25-35	5-7	6-10
III	Alta resistência inicial	50-65	15-25	8-14	6-10
IV	Resistência a sulfato	40-50	25-35	0-4	10-20

Fonte: Gobbo (2009, p. 32).

Segundo Neville (1982) e conforme se mostra na Figura 2.9, o C₃S puro é o responsável pela resistência das quatro primeiras semanas e o C₂S da quarta semana em diante. Após um ano, tanto o C₃S e o C₂S têm aproximadamente a mesma resistência em torno de 70 MPa. O C₃A e C₄AF quase não influenciam na resistência.

Figura 2.9 – Evolução da resistência dos compostos puros

Fonte: Neville (1982, p. 42).

Segundo Jawed, Skalny, Young 1983 (apud Quarcione, 2008), a hidratação dos compostos C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF obedece a uma taxa de hidratação durante os primeiros dias, na seguinte ordem aproximada: C₃A > C₃S > C₄AF > C₂S.

A-5) Óxido de magnésio (MgO) ou periclásio

O óxido de magnésio (MgO) é proveniente da dolomita ($\text{CaCO}_3\cdot\text{MgCO}_3$), que é uma impureza na maioria dos calcários. Até 2% de MgO podem entrar na solução sólida dos compostos do cimento citados anteriormente. O que estiver acima de 2% será o MgO cristalino, que é o periclásio. O periclásio tem uma hidratação para o hidróxido de magnésio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), que é uma reação lenta e expansiva e pode causar fissuras e expansão em produtos do cimento. O MgO cristalino, durante a hidratação, é expansivo, com um aumento de volume de 11,8%, e, na fase vítrea, é não expansivo (NEVILLE, 1982). O efeito expansivo do MgO foi, pela primeira vez, observado em 1884, quando pontes e viadutos construídos com concreto armado foram ao colapso dois anos após a sua construção. Os cimentos usados na época tinham de 16% a 30% de MgO.

A-6) Óxido de cálcio (CaO) livre

Nos cimentos Portland atuais, os teores de óxido de cálcio livre estão presentes em pequenas quantidades. A presença de CaO livre é devida à proporção inadequada da farinha, da temperatura ou do tempo de permanência insuficiente na zona de calcinação no forno. O CaO cristalino hidrata lentamente, cuja reação como o MgO é expansiva, danificando os produtos à base de cimento. A estrutura do CaO é cúbica, sendo cada íon de cálcio circundado por seis átomos de oxigênio em um octaedro regular. No cimento atual, o teor de CaO livre ou não combinado não passa de 1%, pois, acima desse valor, prejudica a estabilidade em volume das argamassas e concreto.

A-7) Óxido de titânio (TiO_2)

Nas matérias-primas do cimento, pode estar presente até 1% e, em matérias-primas secundárias, esse valor pode ser superior a 1%.

A-8) Pentóxido de fósforo (P_2O_5)

O fósforo e o fosfato estão presentes no calcário, na argila e nas areias de rocha. O fósforo está presente nas escórias de alto-forno, escória de aciaria e cinza volantes.

A-9) Trióxido de manganês (Mn_2O_3)

O manganês (Mn) vem das matérias-primas principais e secundárias, e o calcário pode conter até 2% de Mn_2O_3 . Confere-se a cor marrom ao cimento.

A-10) Flúor (F)

O flúor (F) pode estar presente no calcário, na argila/xisto e no carvão, além de exercer um papel importante na fabricação do cimento. Na mistura crua, aceita-se 0,06% em peso. O fluoreto de cálcio (CaF_2) visa baixar a temperatura de queima e acelerar a formação de C_3S .

A-11) Anidrido sulfúrico (SO_3)

Os sulfatos e sulfetos estão presentes nos calcários e em alguns óleos combustíveis. O sulfato, quando adicionado ao clínquer Portland moído na forma de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemidrato ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2} H_2O$) ou anidrita ($CaSO_4$), tem a função de retardar a pega rápida do clínquer devido à alta reatividade do C_3A (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A-12) Óxido de sódio (Na_2O) e óxido de potássio (K_2O)

Os álcalis (sódio e potássio), juntos, ocorrem nas matérias-primas para a fabricação do cimento, principalmente nos compostos da argila. Cerca da metade dos álcalis na mistura crua é volatilizada entre 800°C e 1000°C. Na ausência de SO_3 , o Na_2O se incorpora preferencialmente na fase de C_3A , diminuindo a reatividade dessa fase; porém, a reatividade global do clínquer é aumentada pelos álcalis. O teor de álcalis no cimento normalmente está entre 0,2% e 1,5% de Na_2O equivalente. O teor de

álcalis é limitado devido a reações químicas álcali-agregadas que levam à expansão, à fissuração e à diminuição da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto. Na literatura atual, é chamado de reação álcali-sílica (RAS). Esse fenômeno foi publicado, pela primeira vez, por Standon em 1940, quando investigou estruturas de concreto deterioradas. A ASTM C 50 classificou cimentos com menos de 0,6% de Na_2O como cimentos de baixa alcalinidade e aqueles com mais de 0,6% de Na_2O como cimentos de alta alcalinidade. Os agregados reativos aos álcalis são os silicatos ou minerais de sílica.

A sílica hidratada (opala) ou formas amorfas (obsidiana, vidro de sílica) podem reagir com as soluções alcalinas, porém existe um grande número de minerais que reagem apenas em grau insignificante, os quais são feldspatos, piroxênios, anfibólios e micas, que são minerais constituintes do granito, gnaisse, xisto, arenito e basalto, classificados como inócuos. Agora os minerais opala, obsidiana, cristobalita, tridimita, calcedônia, chert, andisita, riolito e quartzo tensionado ou metamórfico são considerados reativos e estão em ordem decrescente de reatividade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.5 Hidratação do cimento Portland

A-1) Introdução

Hidratação são reações que ocorrem quando o cimento Portland entra em contato com a água, fazendo que os silicatos e aluminatos presentes no cimento formem produtos de hidratação que, com o decorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e dura: a pasta de cimento endurecido (NEVILLE, 1982).

As reações químicas que ocorrem na hidratação do cimento são complexas, que vão muito além da transformação de espécies químicas anidras em hidratos correspondentes (TAYLOR, 1998 apud QUARCIONE, 2008).

Segundo Nonat (2014), o estudo da hidratação do cimento apresenta as seguintes complexidades:

- As fases constituintes do cimento reagem de forma diferente.
- As fases hidratadas produzidas possuem características amorfa ou nanocristalina, tornando-as difíceis de caracterizar.
- A hidratação de cada fase altera a solução que reage com outras fases.
- As reações ocorrem em uma solução de volume pequeno e confinado.

A seguir serão discutidos o mecanismo de hidratação e as fases do cimento Portland.

A-2) Mecanismo de hidratação

Segundo Mehta e Monteiro (2014), existem dois mecanismos de hidratação: a hidratação por dissolução-precipitação e a hidratação no estado sólido ou topoquímico de cimento. O primeiro mecanismo, que é dissolução-precipitação, compreende a dissolução de compostos anidros em seus componentes iônicos, a formação de hidratos em solução, e, tendo em vista sua baixa solubilidade, pode ocorrer a precipitação de hidratos resultantes da solução supersaturada. Esse mecanismo ocorre mais nos estágios iniciais da hidratação do cimento. Durante a hidratação do cimento, o mecanismo dissolução-precipitação visa a uma completa reestruturação dos integrantes dos compostos originais.

O segundo mecanismo de hidratação é denominado hidratação no estado sólido ou topoquímico do cimento, cujas reações acontecem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro, sem que os compostos entrem em solução. A hidratação no estado sólido ocorre em estágios posteriores, em que a locomobilidade iônica na solução fica restrita e podem ocorrer reações no estado sólido (reação topoquímica).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os cimentos industriais não possuem a composição química somente pelas fórmulas frequentemente usadas: C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , porque, durante a composição do clínquer a altas temperaturas, os elementos presentes no sistema, além das impurezas, tais como magnésio, sódio, potássio e enxofre, apresentam a capacidade de incorporação aos compostos do cimento no clínquer, em uma “solução sólida”. Essas impurezas podem alterar a estrutura

cristalina e a reatividade quando presentes em grandes quantidades. Outras características, tais como dimensão da partícula e a temperatura de hidratação, alteram a reatividade dos compostos do cimento Portland com água e essa reatividade depende da estrutura cristalina.

As propriedades adesivas do cimento só ocorrem quando ele é misturado com água, quando se dá a reação de hidratação, porém nem todos se hidratam à mesma velocidade. O aluminato de cálcio C_3A reage rapidamente com a água e cristaliza-se em poucos minutos, sendo responsável pelas características de enrijecimento (perda de consistência) e pega (solidificação). Sua velocidade de reatividade é a maior de todas as outras fases do clínquer. Porém, a fase C_3A deve ser discutida junto com a fase ferroaluminato, pois, quando o ferroaluminato reage com a água e na presença do sulfato (gipsita), formam-se produtos de hidratação, que são estruturalmente similares àqueles produzidos pelo C_3A (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A-3) Hidratação dos silicatos

A grande parte da fase ligante da pasta de cimento é constituída do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é o resultado da hidratação do C_3S e β - C_2S que possuem estruturas semelhantes, porém apresentam diferente relação de cálcio/sílica e também o teor de água quimicamente combinada. O C_3S e β - C_2S , por apresentarem a mesma estrutura, possuem as mesmas propriedades, todavia as suas características físicas sofrem efeitos diferenciados devido às diferenças existentes na relação cálcio/sílica e no teor de água (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Atualmente o gel C-S-H é referido como compostos amorfos que, de fato, são compostos nanocristalinos constituídos de partículas nanométricas agregadas umas às outras, conforme se observa na Figura 2.10.

Identificam-se os C-S-H pela sua morfologia e, em particular, os C-S-H externos (*out product*) de morfologia, na sua maioria, fibrilares, os quais crescem na superfície dos grãos anidros e nos poros da pasta (NONAT, 2014).

Figura 2.10 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do C-S-H

Fonte: Nonat (2014, p. 28).

Na Figura 2.11, apresenta-se MEV com seis meses de idade da pasta de cimento Portland com relação água/cimento de 0,45. O C-S-H externo na metade inferior à esquerda da é tipo folha ou finamente fibroso, e o C-S-H interno está na parte central da superior à direita, com fibras mais finas. A fronteira entre os dois produtos é bem discreta. Já a Figura 2.12 apresenta MEV da pasta de C3S com 40 anos e o C-S-H externo apresenta fibras longas e lineares, que se desenvolvem a partir da superfície dos grãos anidros nos poros da pasta, e o C-S-H interno é de morfologia mais compacta. A fronteira entre os dois produtos é bem definida (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2.11 - Micrografia eletrônica de transmissão (MEV) da pasta de cimento Portland com seis meses de idade e a/c de 0,45

Fonte: Mehta; Monteiro (2014, p.229).

Figura 2.12 - Micrografia eletrônica de transmissão (MEV) da pasta de cimento Portland com 40 anos de idade e a/c de 0,5

Fonte: Mehta; Monteiro (2014, p. 229).

A composição química dos silicatos de cálcio hidratados nas pastas de cimento diversifica em função das relações água/cimento, com a temperatura e a idade de hidratação, sendo normalmente conhecidos como C-S-H, que não implica uma

composição fixa. No final, a composição do material é o $C_3S_2H_3$. A seguir, apresentam-se as reações estequiométricas para as pastas de C_3S (Equação 2.4) e C_2S (Equação 2.5), em temperaturas menores que 100°C , totalmente hidratados, cujos produtos de hidratação para os dois constituintes da fase de silicatos consistem em silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio cristalino, este conhecido como portlandita (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar de os produtos de reação serem semelhantes para as duas reações do C_3S e do C_2S , deve-se observar que, nos cálculos estequiométricos, C_3S produz 61% de $C_3S_2H_3$ e 39% de hidróxido de cálcio; já o C_2S produz 82% de $C_3S_2H_3$ e 18% de hidróxido de cálcio. A composição química do cimento influencia na resistência à compressão e no calor de hidratação. Caso se desejem resistências iniciais aos 3, 7 e 28 dias elevadas, o cimento deve ter quantidades elevadas de C_3S e C_3A . Agora, caso se deseje cimento com resistência inicial baixa, então ele deve conter uma proporção maior de C_2S .

Na Figura 2.13, verifica-se a influência da composição química do cimento no calor de hidratação, em que se constata que o cimento com resistência inicial alta, isto é, com elevados teores de C_3S e C_2A , libera grande quantidade de calor nas idades iniciais.

Figura 2.13 – Influência da composição do cimento no calor de hidratação

CIMENTO N.	COMPOSIÇÃO			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
I	49	25	12	8
II*	30	46	5	13
III	56	15	12	8

*Cimento II corresponde ao cimento Portland Tipo IV da ASTM

Fonte: Mehta; Monteiro (2014, p. 242).

Na Figura 2.14, verifica-se que, quanto maior a finura⁷ do cimento, maior será resistência à compressão.

Figura 2.14 – Influência da finura do cimento na resistência

Fonte: Mehta; Monteiro (2014, p.242).

Bogue e Lerch (1934 apud RAMACHANDRAN, V. S., PHIL, 1969, p. 128), determinaram que a resistência à compressão de pastas de C_3S hidratadas alcançaram 100% aos 2 anos. Nas datas de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 28 dias, 3 meses, 6 meses e 1 ano, as resistências à compressão são, respectivamente, 12,8%, 24,8%, 52,7%, 62,8%, 85,8% e 91,2%. No caso do C_2S , a correspondente resistência da pasta são 0,00 – 0,1%, 1,0%, 6,3%, 36,0%, 52,7% e 71,4%.

A-4) Portlandita

Portlandita é o nome do hidróxido de cálcio cristalino $Ca(OH)_2$ ou CH e possui estrutura cristalina do tipo hexagonal. Esse termo deriva certamente do fato de ser ela encontrada no cimento Portland hidratado em concentração em torno de 15% a 20%. É a fase mais solúvel da pasta de cimento hidratada (NONAT, 2014). Na Figura 2.15, verifica-se o MEV da portlandita.

⁷ A finura do cimento é determinada como superfície específica, observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento compactada, de dimensões e porosidade especificadas (NBR NM 76: 1998).

Figura 2.15 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos cristais da portlandita

Fonte: Nonat (2014, p. 28).

A-5) Hidratação dos aluminatos

Quando se mistura o C_3A com água sem a presença da gipsita, a reação é imediata, formando-se cristalinicos como C_3AH_6 , C_4AH_{19} e C_2AH_8 , que liberam grande quantidade de calor. Portanto, o cimento Portland não poderá ser usado se não houver algo que retarde sua reação inicial imediata. Normalmente se adiciona a gipsita, que retarda a pega do cimento, tornando os estudos da reação do C_3A puro e C_3A com a gipsita importantes para o cimento.

Normalmente se adiciona o gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) para regular a pega do cimento, com valores de 3% a 5% no clínquer. A solubilidade do C_3A é diminuída na presença de íons de hidroxila, sulfato e álcalis e, dependendo da concentração de aluminato e íons de sulfato na solução, o produto cristalino na precipitação é trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou o monossulfoaluminato de cálcio hidratado.

Em soluções saturadas com íons de cálcio e hidroxila, o primeiro se cristaliza com pequenas agulhas prismáticas, que são chamadas pela denominação mineralógica de etringita ($C_6AS_3H_{32}$), e o monossulfato ($2C_4ASH_{12}$) se cristaliza como finas placas hexagonais. As reações de hidratação do aluminato estão representadas pela Equação 2.6, na qual se forma o trissulfoaluminato de cálcio (etringita) e pela Equação 2.7, em que se forma o monossulfato.

A Equação 2.6 ocorre quando todos os íons sulfatos são consumidos pelo aluminato. A etringita que ocorre na forma de agulha se torna instável devido ao aumento de íons aluminato, com a nova hidratação do C_3A e C_4AF , tornando a etringita instável, transformada para a fase monossulfato, que é o final da hidratação do C_3A e C_4AF em cimentos Portland, que possuem mais de 5% de C_3A (MIRANDA, 2008).

O aluminato tricálcico (C_3A) é o responsável pelas propriedades reológicas da pasta de cimento e no incremento inicial da resistência do cimento solidificado.

A-6) Etringita

A estrutura da etringita é constituída de colunas de cátions coordenados pelos oxigênios dos hidróxidos e das moléculas de água, conforme se ilustra na Figura 2.16. Os íons sulfatos estão localizados nos canais criados pelas colunas catiônicas, não participam mais da coordenação dos cátions e garantem apenas a eletroneutralidade ou equilíbrio de cargas.

Figura 2.16 – Estrutura cristalina da etringita

Fonte: Nonat (2014, p. 31).

A seguir, na Figura 2.17, apresenta-se a micrografia eletrônica de varredura da etringita, de cristais aciculares de etringita formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e sulfato de cálcio.

Figura 2.17 – Micrografia eletrônica de varredura (MEV) da etringita

Fonte: Nonat (2014, p. 31).

Existem outros compostos no clínquer que influenciarão a hidratação do cimento, um dos quais é a presença da bassanita no cimento, que surge devido ao aumento da temperatura durante a moagem, que provoca o fenômeno conhecido da falsa pega na hidratação do cimento. Na Tabela 2.7 apresenta-se a importância das principais fases do cimento no processo de hidratação (GOBBO, 2003).

Tabela 2.7 - Principais fases do cimento no processo de hidratação

Composto do cimento	Fórmula	Importância/Influência no cimento
Alita	C_3S	Resistência inicial
Belita	C_2S	Resistência a idades mais elevadas
Aluminato de tricálcio	C_3A	Início de pega
Ferroaluminato	C_4AF	Resistência aos sulfatos, ausentes em CBs
Mayenita	$C_{12}A_7$	Aceleração do tempo de pega
Arcanita	K_2SO_4	Resistência inicial, redução no tempo de pega
Langbeinita cálcica	$K_2SO_4 \cdot 2CaSO_4$	Resistência inicial, redução no tempo de pega
Cal Livre	CaO	Hidratação expansiva [$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$]
Periclásio	MgO	Hidratação expansiva [$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$]
Calcita/dolomita	$(Ma, Ca) CO_3$	Carbonatação
Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Retardador/controlador de pega
Bassanita	$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$	Falsa pega
Anidrita	$CaSO_4$	Pega lenta
Óxido de sódio	Na_2O	Reação álcali-sílica (RAS)
Óxido de potássio	K_2O	Reação álcali-sílica (RAS)

Fonte: Gobbo (2003).

2.2 ADIÇÕES AO CLÍNQUER

São as matérias-primas adicionadas ao clínquer na fase de moagem, que possibilitam a fabricação de diversos tipos de cimento Portland, atualmente disponíveis no mercado brasileiro. Essas adições ao clínquer surgiram com o objetivo de reduzir custos, melhorar algumas características dos materiais cimentícios e preservar o meio ambiente. As adições usadas atualmente no Brasil são o sulfato de cálcio, escória de alto-forno, os materiais pozzolânicos (cinza volante e argilas calcinadas) e os materiais carbonáticos (fíler). Na Figura 2.18, observa-se que o cimento CP I ou CP V tem como adição a gipsita. O fíler está presente no CP II-F, a escória de alto forno no CP II-E, CP III ou CP V-RS e a pozolana no CP II-Z, CP IV ou CP V-RS.

Figura 2.18 – Adições usadas na produção de cimento em função do seu tipo

Fonte: Isaia (2010, p. 778).

Um dos fatores que provavelmente deram origem ao desenvolvimento do cimento com adições foi o fator economia de custo. Outro fator importante foi a viabilidade do consumo de resíduos industriais, dando a eles um emprego nobre. Também em certos aspectos, os cimentos com adições têm desempenho melhor que o cimento Portland sem adição. As adições minerais no cimento Portland possibilitam produzir concretos com menos tensão e viscosidade. Na Europa e Ásia, os cimentos compostos com calcário, escória e pozolanas tiveram a produção superior à dos cimentos puros; já nos EUA, ainda se inicia a produção de cimentos compostos (METHA; MONTEIRO, 2008).

A seguir serão comentados cada tipo de adição ao clínquer.

2.2.1 Gipsita (sulfato de cálcio)

O uso da adição do sulfato de cálcio no clínquer é monitorar o tempo de pega do cimento, quando entra em contato com água; caso contrário, a pasta de cimento endureceria quase que instantaneamente. Essa é a causa de ser usado sulfato de cálcio em todos os tipos de cimentos Portland. A quantidade usada gira em torno de 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (BATTAGIN, F.; BATTAGIN, S., 2010).

Na construção civil, o gesso é o sulfato de cálcio na forma de hemidratado de bassanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Na fabricação do cimento como produto de adição final que, além de usado na forma de hemidratado, pode ser encontrado nas formas de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e anidrita (CaSO_4). A indústria cimenteira utiliza o fosfogesso e fluorgesso, subprodutos de processos industriais da fabricação do ácido fosfórico e fluorídrico, principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil, pois o gesso natural vem de jazidas do Nordeste, encarecendo o produto.

2.2.2 Fíler calcário

O fíler calcário ou material carbonático é a matéria-prima utilizada na fabricação do cimento e possui ação predominantemente física. Devido ao seu tamanho e formato, confere maior compacidade, melhor trabalhabilidade e menor tendência à fissuração em argamassas e concretos que o utilizam. A NBR 11578 (ABNT, 1997) define o intervalo de utilização do fíler calcário de 0% a 10% para o cimento Portland composto com escória (CP II-E) e para o cimento Portland composto com pozolana (CP II-Z). Já para o cimento Portland composto com material carbonático CP II-F, o intervalo é de 6% a 10% de material carbonático. Também se utiliza material carbonático no intervalo de 0% a 5% para o cimento Portland de alto-forno CP III NBR 5735 (ABNT, 1991), no cimento pozolânico CP IV NBR 5736 (ABNT, 1991) e no cimento de alta resistência inicial CP V-ARI NBR 5733 (ABNT, 1999).

2.2.3 Escória de alto-forno (EAF)

A escória de alto-forno possui silicatos e aluminossilicatos de cálcio e outras bases, sendo o produto não metálico. A composição química das EAF está entre as das pozolanas e do cimento Portland. Essa composição das EAF pode ser classificada por meio da relação CaO/SiO_2 em escórias de alto-forno básicas ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 1$) e escórias de alto-forno ácidas ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 1$). As escórias ácidas são produzidas em alto-forno a carvão vegetal e as escórias de alto-forno básicas são produzidas em alto-forno de carvão de coque. Como adição mineral ao clínquer, utilizam-se as escórias de alto-forno básicas por possuírem excelentes propriedades hidráulicas. A escória de alto-forno a ser apresentada neste trabalho é a básica, portanto será usada apenas a palavra escória de alto-forno ou abreviatura granulada EAF. Para obter essa EAF

com propriedades hidráulicas, é necessário que, depois de fundida, seja resfriada rapidamente com jato de água ou pela imersão em água (SILVA, 2006).

O processo, para obter a EAF, é fundamental, pois a composição química e o resfriamento vão definir a organização atômica da EAF. Por exemplo, no resfriamento lento, até atingir temperaturas inferiores a 800C ou 900C, a EAF forma uma solução sólida de cristais de merwinita, melilita entre outros (SMOLCZIK, 1980; REGOURD, 1986). A estrutura, assim obtida, é cristalina, não possuindo capacidade aglomerante. Porém, se resfriada rapidamente, os íons têm mobilidade reduzida, impedindo que se organize e forme uma estrutura cristalina. Esse processo de redução rápida da temperatura é conhecido como granulação, em virtude de a EAF ficar reduzida a grãos similares aos da areia natural. A estrutura atômica da EAF equivale a uma cadeia formada de átomos de silício conectados através de ligações covalente, a quatro átomos de oxigênio (SiO_2), formando um tetraedro. Portanto, todo silício e uma parte variável do alumínio e do magnésio são formadores de cadeia. O cálcio e uma parcela variável do alumínio e do magnésio são os principais modificadores da cadeia, que conferem reatividade ao vidro da EAF (CINCOTTO; JOHN, 1995). Portanto, a reatividade das EAF depende, em primeiro lugar, da organização atômica, sendo a fração vítrea a única a hidratar-se. A composição química dessa fração vítrea é que responde pela velocidade da dissolução do vidro em um determinado meio. Os módulos de hidráulidade de uma forma geral expressam a solubilidade da EAF a partir da composição química, mesmo tendo a referência a partir dos módulos de hidráulidade.

Na Figura 2.19 é apresentado o resultado da análise por difração de raios X de uma EAF. A fração vítrea da escória de alto-forno cria um halo centrado em $28^\circ 2\theta$, podendo estar sobrepostos picos de fração cristalina. A difração de raios X de uma escória de alto-forno apresenta componentes amorfos e fases cristalinas quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e silicato de cálcio ($\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{O}_z$) foram identificadas com base nas posições dos picos principais em 3,34, 2,78 e 3,02Å (distância interplanar), respectivamente (SILVA, 2010).

Figura 2.19 – Difratoograma de raios X da escória granulada de alto-forno

Fonte: Silva (2010, p.798).

A escória de alto-forno granulada finamente moída é autocimentante, portanto não precisa do hidróxido de cálcio para produzir produtos cimentícios, como C-S-H. Porém, quando a escória de alto-forno se hidrata sozinha, não é capaz de produzir uma quantidade de produtos cimentantes necessários para uso, como cimento em concreto para estrutura de concreto armado (METHA; MONTEIRO, 2008). Hoje em dia, a escória fundida é granulada diretamente pelos jatos de água a alta pressão (mais ou menos 0,60MPa). Utilizam-se bocais especiais em locais onde o vapor e a fumaça são gerados para evitar a poluição pelo H_2S e SO_2 e realiza-se esse processo em local totalmente fechado com uma chaminé de ventilação (SHI et al., 2006).

A escória de alto-forno, resfriada a uma velocidade mais alta, vai produzir uma estrutura desordenada e assim será mais reativa. Habitualmente as partículas menores que $10\mu m$ contribuem para a resistência inicial do concreto até 28 dias; partículas de $10\mu m$ a $45\mu m$ contribuem para a resistência em idades superiores a 28 dias; e partículas maiores de $45\mu m$ são difíceis de hidratar. No processo de granulação, a escória é gráuda e também úmida; por isso, após o processo de granulação, a escória é seca e pulverizada em partículas abaixo de $45\mu m$, o que

corresponde a um intervalo de 400m²/kg a 500m²/kg de área superficial (METHA; MONTEIRO, 2008).

A adição de escória de alto-forno aumenta a produção de C-S-H que, segundo numerosos autores, tem uma porosidade mais fina e, com envelhecimento da pasta de cimento, tem uma tendência a densificá-la. O aumento da compacidade é a primeira consequência que provoca uma diminuição da permeabilidade que proíbe a entrada de água que também vai dificultar a formação do gel. Essa diminuição da difusão foi observada por Uchikawa et al. apud Metha; Monteiro, que preparou uma mistura com 50% de cimento e 50% de escória granulada, observou que essa mistura tem coeficiente de difusão de Na⁺ muito inferior aos da pasta de cimento que sofreram a mesma cura.

De forma resumida, os fatores que afetam a hidraulicidade das escórias de alto-forno são grau de vitrificação, composição química, composição mineralógica e finura (moagem).

Segundo Battagin e Esper, 1988, a composição química e o grau de vitrificação são os fatores de que mais depende a atividade hidráulica das escórias.

A escória granulada de alto-forno, quando presente no cimento utilizado nos concretos, apresenta as seguintes propriedades: boa durabilidade, alta resistência a meios sulfatados, menor calor de hidratação e maior ganho de resistência mecânica em longo prazo (METHA, MONTEIRO, 2014).

A escória de alto-forno é usada no intervalo de 35% a 70% no cimento Portland de alto-forno CP III NBR 5735 (ABNT, 1991), no cimento Portland de alto-forno (CP II-E) com consumo no intervalo de 6% a 34%.

2.2.4 Materiais pozolânicos

São materiais silicosos ou sílico-aluminosos que não têm propriedade de um ligante hidráulico, mas, quando estão em uma granulometria fina, reagem com o hidróxido de cálcio, que é liberado durante a hidratação do clínquer para formar os mesmos

compostos que são produzidos pela hidratação do cimento Portland. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), os materiais pozolânicos são divididos em naturais e artificiais.

2.2.4.1 Pozolanas naturais

Os materiais pozolânicos naturais, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO₂) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica.

2.2.4.2 Pozolanas artificiais

Os materiais pozolânicos artificiais, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), são resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica. A seguir, apresentam-se materiais pozolânicos artificiais:

- Argilas calcinadas

Materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C e 900°C, de modo a garantir a sua reatividade com hidróxido de cálcio.

- Cinzas volantes

Materiais finamente divididos que resultam da combustão de carvão pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.

- Outros materiais

Materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de materiais vegetais, rejeito de carvão mineral.

Os materiais pozolânicos que são normalmente adicionados ao clínquer são: argilas calcinadas e cinzas volantes.

Os materiais pozolânicos que fazem parte da indústria cimenteira como adições minerais para o concreto são os seguintes: sílica ativa, cinza volante, pozolana natural, metacaulim e argila calcinada (BATTAGIN, F.; BATTAGIN, S., 2010).

O diagrama ternário SiO_2 – Al_2O_3 – CaO , usado na composição química e de fases do cimento Portland, utilizado para situar o cimento Portland, as pozolanas, a escória de alto-forno e o vidro. Verifica-se, no diagrama adiante, que a área coberta pelas pozolanas e a escória são grandes, isto é, por serem subprodutos industriais que possuem composição química menos definida quando comparados com o cimento Portland. Além disso, a composição em fases da escória pode não corresponder, pois somente parte desses óxidos foi fundida durante o processo de queima em que eles foram formados. Porém, o diagrama SiO_2 – CaO – Al_2O_3 considera-se resfriamento lento, de espécimes cristalizadas de uma mistura fundida dos três óxidos (Figura 2.20) (AITCIN, 2000).

Figura 2.20 – Representação dos principais materiais cimentícios em um diagrama ternário SiO_2 – CaO – Al_2O_3

Fonte: Aitcin (2000, p. 156).

Para avaliar a atividade pozolânica existem diversos métodos de ensaio químicos e de resistência mecânica. Os métodos químicos são o cimento Portland – Ensaio pozolanicidade para cimento Portland pozolânico de acordo com a NBR 5753 (ABNT, 2010), o ensaio Chapelle, modificado de acordo com a ABNT NBR 15895: 2010 – determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado na amostra e o ensaio de Luxan (1989), que mede a atividade química da amostra por meio da avaliação da reatividade do material.

Os métodos de resistência à compressão são de acordo com a NBR 5751 (ABNT, 2015) – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com a cal aos sete dias e a NBR 5752 (ABNT, 2014) – Materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.

De acordo com Pozolline (2005), as pozolanas, além de fixarem o hidróxido de cálcio, promovem:

- diminuição da alcalinidade, tendo como resultado a eliminação de possíveis reações de expansão;
- redução do calor de hidratação, produzindo concretos com menos fissuras de origem térmica;
- aumento da resistência e química, quando comparado com concretos produzidos somente com cimentos Portland.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) classifica os materiais pozolânicos em três classes: N, C e E de acordo com os requisitos químicos e físicos, conforme a Tabela 2.8 e a Tabela 2.9. A classe N são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. A classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas. A classe E são as pozolanas cujos atributos diferem das classes anteriores.

Tabela 2.8 – Requisitos químicos para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥70	≥70	≥50	NBR NM 22 (ABNT, 2012)
SO ₃	≤4	≤5	≤5	NBR NM 16 (ABNT, 2012)
Teor de umidade	≤3	≤3	≤3	NBR NM 24 (ABNT, 2003)
Perda ao fogo	≤10	≤6	≤6	NBR NM 18 (ABNT, 2012)
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤1,5	≤1,5	≤1,5	NBR NM 25 (ABNT, 2003)

Fonte: NBR 12653 (2015).

(*) Os métodos de ensaio devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Tabela 2.9 – Requisitos físicos para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
Material retido na peneira 45µm	≤34%	≤34%	≤34%	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥75%	≥75%	≥75%	
Atividade pozolânica	≥6MPa	≥6MPa	≥6MPa	NBR 5751 (ABNT, 2015)

Fonte: NBR 12653 (2015).

(*) Esse método deve ser adaptado substituindo-se o *metaculim* pelo material pozolânico.

A ABNT NBR 12653 (ABNT, 2015) estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pastas. Esta norma não se aplica a sílica ativa e *metacaulim*.

Nesta pesquisa, utilizou-se ensaio Chapelle para avaliar a atividade pozolânica, tendo em vista que é método que utiliza uma pequena quantidade de amostra, pois as quantidades de EACM1 e EACM2 foram, respectivamente, de 800 gramas e 3000 gramas, sendo necessário realizar vários ensaios, principalmente o de resistência à compressão.

2.3 PRODUÇÃO DO AÇO

O aço é uma liga de ferro e pequenas quantidades de carbono, cuja fabricação é realizada em quatro etapas (Figura 2.21): preparação das matérias-primas (coqueificação e sinterização), redução (produção de ferro gusa), refino (produção do aço) e laminação (conformação mecânica) (CALMON, 2010).

Figura 2.21 – Fluxo simplificado de produção de aço

Fonte: Instituto Aço Brasil⁸ (2015).

Nesta seção, serão descritas as etapas de preparação da carga, redução e refino com a utilização da aciaria LD, pois são as que estão diretamente relacionadas ao trabalho.

⁸ <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>. Acesso em: 22 jul. 2015.

2.3.1 Preparação da carga

2.3.1.1 Coqueria

A coqueificação da primeira etapa da produção do aço consiste em aquecer o carvão mineral em fornos, na ausência do ar, em um tempo estabelecido. Inicialmente os carvões se fundem passando para o estado plástico, incham e se ressolidificam produzindo uma massa sólida. Ocorrem alterações físicas e químicas e simultaneamente se dá a liberação de gás de coqueria, alcatrão e outros produtos químicos. No final, o sólido que sobra é chamado de coque.

A classe de carvão bastante utilizada na siderurgia é o carvão betuminoso (carvão macio); porém, caso ele não amoleça nem se agregue ao aquecimento, é chamado de carvão não coqueifável.

2.3.1.2 Sinterização

A sinterização é usada para aglomeração dos finos do minério de ferro, transformando-os em uma carga para o alto-forno. Os materiais utilizados para sinterização compreendem finos de minério com diâmetro inferior a 10mm, coque com diâmetro inferior a 3mm, finos de calcário e dolomita com diâmetro inferior a 3mm, entre outros rejeitos metalúrgicos (PINHO; PANONI, 2010).

2.3.2 Redução

2.3.2.1 Alto-forno

O processo de fabricação do ferro-gusa no alto-forno consiste na conversão do óxido de ferro a ferro líquido. Para que isso ocorra, é necessário um agente redutor, pode ser o coque ou o carvão vegetal, sendo este utilizado em alto-forno de pequeno porte.

No alto-forno, ocorrem os seguintes processos: primeiro, a secagem, preaquecimento e ejeção da água de hidratação; segundo, a redução indireta; depois, a redução direta; e, por último, a fusão.

A redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, originados da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras, conforme se ilustra na Figura 2.22 (MACHADO, 2009).

Figura 2.22 - Visão esquemática do alto-forno como um sistema de contracorrente

Fonte: Machado (2009).

Quando o forno atinge a temperatura de 400°C a 500°C, a água de hidratação é ejetada e ocorre redução indireta pelo CO em temperaturas abaixo de 1000°C. Quando a temperatura é superior a 1000°C, os óxidos de ferro que não foram reduzidos a ferro são reduzidos diretamente. Logo após ocorre a fusão, e o processo é encerrado quando o metal líquido flui por meio das camadas de coque (PINHO, PANNONI, 2010).

A seguir, na Equação 2.8 e Equação 2.9 apresentam-se, respectivamente, as reações de redução indireta e redução direta.

O ferro-gusa produzido tem composição básica aproximada de 94% Fe, 4,5% C, 0,5% Si, 0,5% Mn, 0,030% S e 0,100% P. Além do ferro-gusa produzido, sai a escória. Os dois materiais (gusa e escória) são extraídos do forno pelo furo de gusa e separados no canal principal por diferença de massa específica (gusa 7,8 t/m³ e escória 2,5 t/m³) aproximadamente (Figura 2.23).

Figura 2.23 – Alto-forno com as respectivas zonas internas

Fonte: Lingardi, 2004 apud Silva (2006, p.20).

- **Composição química da escória de alto-forno**

A composição química da escória de alto-forno depende do tipo de ferro fabricado e do tipo de minério usado, que podem ser representados por um diagrama quaternário CaO – SiO₂ – Al₂O₃ – MgO. Para a produção de ferro-gusa consistente, a carga da

matéria-prima precisa ser controlada para obter uma pequena margem das composições químicas das escórias de alto-forno. Entretanto, a composição química da escória varia com o minério e a operação do forno, podendo variar dentro de um intervalo amplo (SHI et al., 2006). Apresenta-se, na Tabela 2.10, a relação de análise química de escória de alto-forno de vários países. Verifica-se, ainda na Tabela 2.10, que as escórias têm conteúdo de SiO_2 e CaO muito similares, mas têm uma diferença em conteúdo de Al_2O_3 , MgO e TiO_2 .

Tabela 2.10 – Composição química da escória de alto-forno de vários países do mundo (% em massa)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	S	TiO_2	MnO	Origem	Referência
35.04	13.91	0.29	39.43	6.13	0.34	0.39	0.44	0.42	0.43	Austrália	Collins and Sanjayan (2001a)
35.3	9.9	0.6	34.7	14.6	0.3	0.4	1.0	0.5		Canadá	Shi (1992)
36.23	9.76	1.99	39.4	10.5				0.7		China	Shi et al. (1991b)
36	9	1.3	41	8			1.1	0.9	0.85	Finlândia	Gjorv (1989)
35.4	12.9	0.3	41.8	6.8	0.26	0.38	1.0	1.65	0.42	Japão	Sato et al. (1986)
35	13.5	2.3	36.5	7.5			0.6	2.0	1.25	Noruega	Gjorv (1989)
35.3	9.4	1.1	39.7	10.03	0.98		1.16	0.72	0.98	Suécia	Byfors et al. (1989)
34.9	7.12	1.02	42.87	10.30	0.24	0.50	1.16	0.39		USA	Hogan and Rose (1986)
34.2	11.3	1.17	41.6	8.21	0.26	0.4	0.48	0.77	0.25	UK	Osborne and Singh (1995)

Fonte: Shi et al. (2006, p.32).

- **Escória de alto-forno resfriada lentamente**

O resfriamento lento da escória de alto-forno fundida leva a um sólido estável, que basicamente tem silicatos de Ca – Al – Mg. O mineral mais comum, após o resfriamento lento, é a melilita, que é uma solução sólida de gehlenita C_2AS ($2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$) e akermanita C_2MS_2 ($2\text{CaO}.\text{MgO}.2\text{SiO}_2$).

- **Resfriamento rápido da escória de alto-forno**

Para que a escória de alto-forno tenha propriedades cimentícias, é necessário o resfriamento rápido. A escória sai do alto-forno numa temperatura aproximada de 1500°C, sendo conduzida ao granulador por canais. Ao entrar no granulador, a escória recebe jatos de água pressurizada, tornando-se pulverulenta. Para evitar a poluição atmosférica pela H₂S e SO₂, a água deve ser jateada por bocais especiais, em um local totalmente fechado e com uma chaminé de ventilação. Uma tonelada de escória consome mais ou menos três metros cúbicos de água. Essa água deve ser recirculada e a pressão necessária pode ser gerada por uma bomba. A escória de alto-forno resfriada rapidamente é utilizada como matéria-prima na fabricação do cimento. Para ser usada como adição no cimento, a sua composição química deve atender à relação da Equação 2.10, conforme exigência da ABNT NBR 5735 (ANBT, 1991).

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1 \quad \text{Equação 2.10}$$

2.3.3 Refino

2.3.3.1 Aciaria LD

As escórias de aciaria são geradas no processo de refino do aço em que se controla a percentagem de carbono e se elimina o excesso de impurezas que possam afetar a qualidade do produto. Há tipos diferentes de escórias de aciaria que são caracterizadas pelo emprego também de distintos tipos de fornos de refino, tais como: o LD (Linz Donawitz) ou BOF (Basic Oxygen Furnace), que utiliza o conversor a oxigênio; o elétrico ou EAF (Eletric Arc Furnace), que utiliza o forno de arco elétrico; e OH (Open Heart), que utiliza o forno Siemens-Martin (MACHADO, 2000).

A escória de aciaria, utilizada neste trabalho, foi gerada na fabricação do aço em um conversor a oxigênio do processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (Basic Oxygen Furnace), que não precisa de fonte de calor externa. No Brasil, cerca de 75% a 80%

da produção de aço bruto provém de conversores LD. Essa tecnologia é a mais utilizada na siderurgia mundial e foi originalmente desenvolvida na metade do século passado pela siderúrgica Austríaca Voest-Alpine. Por ter sido empregada inicialmente nas usinas Linz e Donawitz, dessa forma ficou conhecida como aciaria LD (SIDERURGIA, 2010).

A escória de aciaria conversor a oxigênio do processo LD é obtida da seguinte forma (Figura 2.24): reclinase o conversor, coloca-se a sucata metálica por meio de uma calha ou por vagão basculador e, em seguida, o gusa líquido que veio do alto-forno. Após a alimentação da carga metálica na proporção de aproximadamente 80% de ferro-gusa e 20% de sucata, coloca-se o conversor na posição vertical e posiciona-se a lança de oxigênio. Injeta-se o oxigênio gasoso a alta velocidade (ARAÚJO, 1997). Após a fusão do metal, adicionam-se a cal virgem e a cal dolomítica. O objetivo é diminuir os teores de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre da carga por meio da oxidação desses elementos. Ao injetar o oxigênio, ocasiona diferenças de temperatura, concentração e massa específica, gerando uma enérgica movimentação do banho e uma imediata e violenta reação com o metal líquido. Finalmente são gerados o aço e a escória de aciaria, que ficam separados graças à diferença de densidade. Esse processo de conversor a oxigênio visa reduzir tanto os teores de carbono de ferro-gusa, de 4% para 1%, quanto os elementos indesejados (MACHADO, 2000).

Figura 2.24 - Processo de geração da escória de aciaria

Fonte: www.cst.com.br (2016).

2.4 ESCÓRIA DE ACIARIA

O uso maior das escórias de aciaria é como material para base e sub-base de estradas e pode ser utilizada camada mais finas para base e sub-base para uma mesma capacidade de suporte. Quando corretamente selecionada e processada, a escória de aciaria fornece ao engenheiro rodoviário muitas qualidades necessárias para o atendimento da vida útil de projeto e redução nos custos de manutenção preventiva e corretiva. Existe também o benefício ambiental na utilização da escória de aciaria em substituição a recursos naturais, areia e brita, que não são renováveis.

Utilização da escória de aciaria em base e sub-base deve atender às normas do DNIT, pois já ocorreram casos de expansão após alguns anos de utilização, o que provavelmente pela expansão do MgO pode ocorrer após dois anos.

Neste trabalho, tem por finalidade utilizar a escória de aciaria LD no cimento ou no clínquer.

2.4.1 Características das escórias de aciaria LD

As características das escórias de aciaria LD dependem da matéria-prima usada, do processo de produção, do revestimento do conversor, do tipo de aço produzido, da forma de resfriamento e sua armazenagem.

O processo LD tem como um dos objetivos formar rapidamente uma escória reativa e rica em CaO, para evitar o ataque excessivo do revestimento refratário e acelerar as reações de desfosforação e dessulfuração, influenciando tanto na cinética das reações quanto na composição química final do aço (CAMPOS, 1985).

A formação da escória durante a produção do aço no processo LD está representada no diagrama de equilíbrio ternário do sistema CaO-FeO-SiO₂, compreendida entre área de saturação do 2CaO.SiO₂ (C₂S), do 3CaO.SiO₂ (C₃S), e a do CaO, conforme se ilustra na Figura 2.25.

Figura 2.25 – Diagrama de equilíbrio ternário do sistema CaO-FeO-SiO₂

Fonte: Arrivabene (2012).

2.4.2 Propriedades físicas da escória de aciaria

Proctor et al. (2002 apud OLIVEIRA e SOUZA, 2007) atestaram que as partículas de escória de aciaria possuem uma textura superficial grosseira e uma forma angular que lhes permite intertravamento. As escórias são mais suscetíveis à retenção de umidade por possuírem uma textura superficial mais porosa quando comparadas aos agregados naturais. A massa específica é mais elevada que a dos agregados naturais, e tais escórias apresentam um moderado índice de absorção de água. A de retenção de água com a presença de óxidos hidratáveis provoca a instabilidade volumétrica da escória de aciaria. A textura porosa da superfície da escória de aciaria favorece o consumo maior de cimento asfáltico em misturas asfálticas. Na Tabela 2.11, mostram-se os valores especificados para propriedades físicas das escórias de aciaria a serem aplicadas em camadas de pavimento.

Tabela 2.11 – Valores de propriedades físicas das escórias de aciaria

Ensaio	Valor	Norma
Absorção de água	1% a 2%	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa específica	3 g/cm ³ a 3,5 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa unitária	1,5 kg/dm ³ a 1,7 kg/dm ³	NBR NM 45 9ABNT, 2006)

Fonte: DNER-EM (1994).

2.4.3 Composição química da escória de aciaria

A composição química da escória de aciaria é formada por óxidos básicos, resultantes da agregação de elementos que não estarão presentes na composição do aço. Os tipos e quantidades dos óxidos presentes na escória de aciaria dependem da matéria-prima utilizada, do tipo de aço que se pretende obter e até mesmo do forno e seu revestimento (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006).

Segundo Campos (1985 apud Gumieri, 2002), um dos principais objetivos no refino LD é a formação rápida de uma escória reativa e rica em CaO, de maneira a evitar o ataque excessivo do revestimento refratário e acelerar as reações de desfosforação e dessulfuração.

A evolução de sua composição deve seguir um caminho adequado, a fim de possibilitar a correta formação da emulsão. A evolução da composição da escória ao longo do sopro será influenciada pela variação das velocidades de oxidação do Fe, Si e Mn e da dissolução da cal (MUNDIN, 1985).

Na Tabela 2.12 (SHI; KRIVENKO; ROY, 2006, p. 47), é possível verificar que a composição química na produção do aço carbono da escória de aciaria do tipo BOF (convertedor) é bem próxima à da escória da aciaria de um forno elétrico, porém, na fabricação de uma liga de aço inoxidável no FEA, é bem diferente da fabricação de uma liga do aço carbono BOF. O FEA tem baixo conteúdo de FeO e muito alto de Cr, quando comparados com o BOF. A composição da escória da panela é bem diferente daquela da escória do convertedor, pois tem baixo teor de FeO.

Tabela 2.12 – Composição química da escória de aciaria em faixa (%)

Componentes	BOF	FEA (aço carbono)	FEA (aço inoxidável)	Panela (PF)
SiO ₂	8-20	9-20	24-32	2-35
Al ₂ O ₃	1-6	2-9	3.0-7.5	5-35
FeO	10-35	15-30	1-6	0.1-15
CaO	30-55	35-60	39-45	30-60
MgO	5-15	5-15	8-15	1-10
MnO	2-8	3-8	0.4-2	0-5
TiO ₂	0.4-2	N/A	N/A	N/A
S	0.05-0.15	0.08-0.2	0.1-0.3	0.1-1
P	0.2-2	0.01-0.25	0.01-0.07	0.1-0.4
Cr	0.1-0.5	0.1-1	0.1-20	0-0.5

Fonte: Shi et al. (2006, p. 47).

Apresenta-se na Tabela 2.13 a composição química do cimento, da EAF e da EACN. Verifica-se na Tabela 2.13 que o valor de SiO₂ na EAF é superior a EACN. Esse trabalho tem como objetivo aproximar a composição química da EACN a da EAF, utilizando-se para isso um processo pirometalúrgico que será apresentado no capítulo 3.

Tabela 2.13 - Caracterização física e química da escória de aciaria natural LD (EACN)

Propriedades determinadas		CIMENTO CPV ARI	Escória de alto- forno (EAF) (%)	Escória de Aciaria (EACN)	Limite NBR 12653 [36]
Componentes químicos (%)	SO ₃	3,488	0,32	0,324	≤ 5,0
	MgO	5,119	7,95	9,6	-
	SiO ₂	16,015	33,65	8,54	-
	FeO	3,504	0,45	25,10	-
	Al ₂ O ₃	4,198	12,42	7,41	-
	CaO	61,283	41,60	38,0	-
	Na ₂ O	0,189	0,083	0,104	-
	K ₂ O	-	-	0,0936	-
Análise química	Resíduo insolúvel (RI)	-	-	13,21	-
	Óxido de cálcio Livre (CaO)	-	-	4,55	-
	Enxofre – S	-	-	0,08	-
	Perda ao fogo	-	-	5,20	≤ 6,0
Basicidade – CaO/SiO ₂		-	1,24	4,45	
Índices de atividade pozolânica (Método Chapelle modificado) (mg) de Ca(OH) ₂ /g		-		<1	≥ 330

Segundo Malynowskyj (2016), a composição mineral da escória de aciaria LD pode possuir uma parte amorfa e outra cristalina. A parte cristalina da escória, pode conter soluções e precipitados sólidos. As principais soluções encontradas são:

- Solução sólida de Olivina na forma de Monticelita (CaMgSiO₄), Forsterita (Mg₂SiO₄), Faialita (Fe₂SiO₄), Tefroita (Mn₂SiO₄), Kirschsteinita (CaFeSiO₄) e Larnita (Ca₂SiO₄)
- Solução de Melilita na forma de Gehlenita (Ca₂Al₂SiO₇), Akermanita (Ca₂MgSi₂O₇), Ferro-Akermanita (Ca₂FeSi₂O₇) e Ferro-Gehlenita (Ca₂Fe₂SiO₇).
- Solução sólida de Monóxidos, conhecida também como Fase RO, na forma de Wüstita (FexO), Cal (CaO), Periclásio (MgO), Magnésio-Wüstita (MgO-FexO), Mangano-Wüstita (Mn-Fe)xO, e Manganosita (MnxO).

Nesta porção cristalina, em proporções variáveis, pode existir também:

- Solução sólida de Espinélio (Spinel), na forma de: Espinélio (MgAl_2O_4), Magnetita (Fe_3O_4), Hercinita (FeAl_2O_4) e Magnésio - Ferrita (MgFe_2O_4).
- Solução sólida de óxidos de Wolastonita, CaSiO_3 , com MgSiO_3 , FeSiO_3 e MnSiO_3 em solução, geralmente rica em CaSiO_3
- Solução sólida de Belita Alfa ($\text{C}_2\text{S}-\alpha$), Ca_2SiO_4 , e $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + (\text{Mg}_2\text{SiO}_4, \text{Fe}_2\text{SiO}_4, \text{Mn}_2\text{SiO}_4, \text{em quantidades diluídas})$, com a condição de que Ca_2SiO_4 esteja presente.

Os principais precipitados sólidos puros que podem ser observados dentro de uma escória LD são:

- Merwinita, $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$,
- Belita ou Silicato Bicálcico, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$,
- Alita ou Silicato Tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$
- Alumino- Ferrita Tetracálcio. $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$),
- Ferrita Bicálcico, $2\text{CaO} \cdot \text{FeO}$,
- CaO-livre,
- MgO-livre,
- Brownmillerita, $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})_2\text{O}_5$ e
- Srebrodolskita, $\text{Ca}_2\text{Fe}^{+3}\text{O}_5$.

Outros, p. ex.: Wolastonita (CaSiO_3), Akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), Rankinita ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$), Pseudowolastonita ($\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$), Monticelita (CaMgSiO_4) et al.

2.4.4 A expansibilidade da escória de aciaria

A expansibilidade da escória de aciaria ocorre principalmente pela presença de óxido de cálcio livre, de óxido de magnésio reativo, da metaestabilidade do silicato dicálcico e do óxido de ferro (MASUERO, 2001).

O CaO e MgO são incorporados no conversor para que ocorram as reações de refino e evite o desgaste do refratário na fabricação do aço. Ocorre uma reação entre o CaO e o MgO com os óxidos de silício, fósforo, manganês e ferro, gerados durante o sopro

de oxigênio sobre o gusa e os materiais metálicos que estão a altas temperaturas no forno. No final, obtêm-se a escória de aciaria e o aço que são separados da densidade. Isso explica os altos teores de óxidos de cálcio e magnésio das escórias de aciaria, pois, quando adicionados, o CaO e o MgO precipitam-se ou permanecem, sem que se dissolvam (MASUERO, 2001). Portanto, a cal livre das escórias de aciaria de conversor a oxigênio vem de duas fontes: cal residual livre da matéria-prima e cal precipitada da escória fundida.

Segundo Wachsmurth et al. (1999 apud Shi et al., 2006).), existe uma relação entre a cal livre residual, a cal precipitada e o teor de cal livre total (Figura 2.26).

Figura 2.26 – Relação entre a cal residual e a cal precipitada e o total de cal contida na escória de aciaria

Fonte: Shi et al. (2006, p. 49).

Geiseler e Schlosser, apud Masuero, 2001, também identificaram a cal livre sob duas formas, residual e precipitada: a primeira com o consumo de refratário e o grau de desfosforação; e a segunda tem a sua formação durante a solidificação e resfriamento da escória.

O óxido de cálcio livre (CaO), quando encontrado na escória de aciaria e na presença de umidade, transforma-se em hidróxido de cálcio, que pode causar expansão volumétrica e simultaneamente desagregação do material (MATHUR et al., 1999; EMERY, 1977 apud ROHDE, 2002).

A cal dolomítica e o desgaste das paredes do forno à base de magnésia, durante o refino do aço, são responsáveis pela presença do óxido de magnésio (MgO) na escória. O óxido de magnésio (MgO) na forma livre e na presença de umidade hidrata-se lentamente formando o hidróxido de magnésio ou brucita (Mg(OH)₂). O CaO e o MgO, quimicamente combinados em solução sólida com outros elementos, normalmente não sofrem expansão.

O óxido de cálcio, quando livre na escória, é o responsável pela expansão em curto prazo, devido às reações de hidratação, conforme Equação 2.11, mas o óxido de magnésio hidrata-se lentamente, conforme Equação 2.12, expandindo-se por um longo período (ROHDE, 2002).

Equação 2.11

Equação 2.12

Luo apud Montgomery e Wang (1991) apud Geyer (2001) propuseram a Equação 2.13 como forma de verificar a estabilidade do MgO. A maioria das escórias apresenta a relação da Equação 2.13 menor que 1, tornando o MgO estável. Se a cal ou a dolomita forem usadas, deverão possuir a granulometria menor possível, facilitando a dissolução e a reação completa, assim minimizando os efeitos expansivos do CaO e MgO.

$$I_e = \frac{MgO}{FeO + MnO}$$

Equação 2.13

OBS.: Quando $I_e < 1$, MgO é estável; e, quando $I_e > 1$, o MgO não é estável.

Vilela (2006) apresenta, em forma de fluxo (Figura 2.27), a expansão do CaO e MgO e realça a importância de não misturar a escória de aciaria com resíduos de refratário à base de MgO.

Figura 2.27 – Fluxograma sobre a expansão do CaO e MgO

Fonte: Vilela (2006).

O silicato dicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) ou C_2S também pode levar à expansibilidade da escória de aciaria, pois, muitas vezes, está presente na forma $\beta\text{-C}_2\text{S}$ na escória de aciaria. Quando submetido à umidade, sofre reações de hidratação passando para fase γ (calco-olivina). Essa mudança é devida ao C_2S , quando, na forma β , apresenta o poliedro de coordenação do íon cálcio irregular e tem ligações Ca-O, que são mais longas, facilitando a hidratação. Isso ocorre durante o resfriamento ou mesmo a temperaturas ambientais, o que produz um aumento de volume causando o fenômeno de esfrelamento (MASUERO, 2001).

O C_2S da escória de aciaria, durante o resfriamento, passa por quatro modificações da sua estrutura cristalina:

- α - estrutura trigonal (estável entre 1447°C e 2130°C);
- α' - (bredigita): ortorrômbico (estável entre 1147°C e 830°C);
- β - (larnita): monoclinico (instável abaixo de 670°C);
- γ - (calco-olivina): ortorrômbico (estável até 830°C).

A expansibilidade da escória devido à presença de wustita (FeO) ocorre pela oxidação do ferro metálico em produto de corrosão, sendo acompanhado do aumento de volume que, dependendo do estado de oxidação, pode ser da ordem de 600% em relação ao metal original (METHA, MONTEIRO, 2014). As reações e formação dos produtos estão apresentadas na Tabela 2.14. A Figura 2.28 é uma foto ilustrativa de um pavimento deformado.

Tabela 2.14 - Produtos formados na oxidação/hidratação do ferro metálico presente nas escórias

Formação – Reações de oxidação	Produto formado
$\text{Fe}^0 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	Wustita
$2\text{Fe}^0 + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
$3\text{Fe}^0 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	Magnetita
$\text{Fe}^{2+} + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso
$4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$	Hidróxido férrico

Fonte: Martini (2015).

Figura 2.28 – Pavimento rígido que apresenta deformação devido à expansão da escória de aciaria

Fonte: Vilela (2006).

2.4.5 Ensaios físicos de avaliação da expansão das escórias de aciaria

A seguir será apresentado o controle da expansibilidade da escória de aciaria de duas formas: a primeira diretamente sobre a escória de aciaria (seção 2.4.5.1) e a segunda em uma matriz com escória de aciaria (seção 2.4.5.2).

2.4.5.1 Ensaios de expansibilidade aplicados diretamente sobre as escórias de aciaria

No fluxograma da Figura 2.29, apresentam-se os ensaios diretamente aplicados sobre a escória.

Figura 2.29 – Fluxograma dos ensaios diretamente aplicados sobre as escórias

Fonte: Adaptado de Vilela (2006).

Em seguida, serão comentados todos os ensaios citados no fluxograma da Figura 2.29.

A medida da expansão da escória, de aciaria de acordo com o DNIT 113/2009 Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria – Método de ensaio, consiste na compactação da escória de aciaria que passa na peneira de 19mm de abertura de malha em três corpos de prova de cilíndrico com 15,20cm de diâmetro interno e 17,80cm de altura em três camadas iguais com 56 golpes por camada, sendo o primeiro no ramo seco, o segundo no ramo úmido e o terceiro na umidade ótima determinada de acordo com DNIT 49/94.

Ao término da compactação, submergir totalmente os três corpos de prova em água preaquecida a 38°C e, em seguida, transportá-los para estufa a uma temperatura de 71°C ± 3°C por um período de sete dias, sendo feitas leituras diárias de variação volumétrica em função da altura do corpo de prova.

Após o período de sete dias, a água deve ser parcialmente removida do recipiente, mantendo os três corpos de prova na estufa, a uma temperatura de $71^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por mais sete dias, sendo mantidos na condição saturada, mais não completamente submersos, por adição diária de água e medidas de expansão realizadas. A porcentagem de expansão total é calculada com base na variação de altura do corpo de prova ao final do ensaio, ou seja, 14 dias.

O limite estabelecido no Brasil para o ensaio DNIT 113/2009, de acordo com a especificação da norma DNER-PRO 263/94, é de 3%.

O método de ensaio ASTM D 4792/00 é o procedimento da ASTM – *American Society for Testing and Materials* para determinar o potencial de expansão volumétrica de agregados densamente compactados que contêm componentes, como óxidos de cálcio e magnésio, susceptíveis à hidratação e ao aumento de volume e comuns em alguns coprodutos industriais.

O procedimento do ensaio segue a norma ASTM D 1883/05 – Método de ensaio para determinação do Índice de Suporte Califórnia de solos compactados em laboratório.

São moldados três corpos de prova em três camadas de 56 golpes com soquete de 2,5Kg com escória de aciaria (cilindros de $152,4\text{mm} \pm 0,7\text{mm}$ de diâmetro e $177,8\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ de altura). Na Figura 2.30, mostra-se o molde para o ensaio e a sua imersão.

Após a compactação, a escória é submersa em água a $70^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, por no mínimo sete dias. Caso não ocorra queda na taxa de expansão nesse prazo, mantém-se o ensaio para obter dados adicionais por mais sete dias.

Ao final do ensaio, após o acompanhamento da variação de altura, é calculado o valor da expansão em relação ao volume inicial.

A norma ASTM D 2940/03 – *Standard specification for graded aggregate material for base or subbase for highways or airports* – estabelece que o limite para agregados que contenham compostos sujeitos à hidratação, como é o caso da escória de aciaria, seja de 0,5% de expansão aos sete dias, quando testados de acordo com o método ASTM D 4792/00.

A determinação da expansão pelo método da Pensilvânia PTM 130/78 foi desenvolvida por Emery (1984) em Ontario, Canadá, na Mac Master University. Nesse método, segue-se o ensaio de compactação da ASTM D 698/00 e são moldados três corpos de prova em forma cilíndrica com $152,4\text{mm} \pm 0,7\text{mm}$ de diâmetro e com $177,8\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$ de altura, sendo usados para compactar a energia de 100% do Proctor normal.

Após a compactação, o cilindro com o solo compactado é submerso em água à temperatura de $71 \pm 3^\circ\text{C}$, e instala-se um extensômetro na parte superior de cilindro para acompanhar a expansão vertical, conforme se ilustra na Figura 2.30.

Figura 2.30 – Molde imerso em água 70°C

Fonte: Oliveira (2006).

Durante os sete primeiros dias, são feitas leituras diárias com a amostra ainda submersa. Após esse período, a amostra é levada à estufa $71^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ e fica mantida numa condição saturada, mas não submersa, fazendo-se as leituras de expansão por mais sete dias.

De acordo com a especificação do Departamento de Transportes da Pensilvânia na Publication 408/2003 – Highway Construction Specifications, o limite do potencial de expansão, determinado pelo PTM 130/78 é 0,5%.

Por meio do método de ensaio da JIS – JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, JIS A 5015/92 – são moldados três corpos de prova cilíndricos com escória de aciaria que passou por cura ao ar livre, por um período superior a seis meses. A granulometria da

escória deve estar de acordo com a Tabela 2.15, sendo esse método o único que especifica uma granulometria para escória.

Os corpos de prova são submersos em água e sujeitos a ciclos de aquecimento diários de seis horas, com temperatura de 80°C, repetindo-se o processo por dez dias.

O limite de expansão é de 2%. Esse método é utilizado no Japão quando se usa a escória de aciaria em pavimentos (OLIVEIRA, 2006).

Tabela 2.15 – Distribuição granulométrica de amostras para o ensaio JIS A 5015/92

Peneira de abertura de malha (mm)	31,5	26,5	13,2	4,75	2,36	0,425	0,075
Porcentagem que passa %	100	97,5	70	47,3	35	20	6

Fonte: Jisa (1992) apud Poline (2007).

No método Belga, que se baseia no ensaio PTM 130, os procedimentos de moldagem são similares, porém os corpos de prova ficam submersos em água à temperatura de 80°C e possuem uma instalação de uma sobrecarga sobre o solo compactado no cilindro de 1kg a 4,5kg (MASUERO, 2001).

O método BS EN 1744-1/1998 *Steam Test* (EUROPEAN STANDAR, 1998) foi desenvolvido por pesquisadores que perceberam que a expansão em imersão em água obtinha resultados menores quando comparados com os das amostras que tinham permanência em câmara de vapor. Isso se deve ao fato de as moléculas de vapor serem menores do que as de água, tendo maior velocidade de penetração e hidratação. Portanto, esse teste tem por princípio que a expansibilidade das escórias de aciaria para utilização em pavimentação se deve principalmente à reação entre o vapor d'água e CaO e/ou MgO (GEISELER, 2001 apud OLIVEIRA, 2006).

Segundo Motz e Geiseler (2001), o tempo de ensaio das amostras deve ser relacionado ao teor de óxido de magnésio, que é responsável pela expansão tardia. Os autores sugerem que, para amostras de escória LD com teores de MgO acima de 5%, o ensaio deve ser realizado com 168 horas.

O método Inglês consiste em compactar uma amostra de escória de aciaria com 60% da granulometria no intervalo dos grãos entre 5mm e 20mm e o restante 40% com diâmetros inferiores a 5mm. Coloca-se amostra compactada com um peso metálico na parte superior na câmara climatizada a 80°C e umidade de 90% por um período de 14 dias. A avaliação é feita por medidas e perda de massa da amostra (JUCKES, 1991).

2.4.5.2 Ensaios de expansibilidade em uma matriz com escória de aciaria

Os ensaios realizados em uma matriz com escória estão apresentados no fluxograma da Figura 2.31.

Figura 2.31 – Fluxograma dos ensaios em uma matriz com escória de aciaria

Fonte: Adaptado de Vilela (2006).

Em seguida, serão comentados todos os ensaios citados no fluxograma da Figura 2.31:

O método ASTM C 151 (1993) é uma norma americana referente à expansão de cimentos em autoclave. Esse método é adaptado para determinar a expansão da escória de aciaria em argamassas com cimento. Moldam-se três corpos de prova prismáticos de dimensões 25mm x 25mm x 250mm com argamassa composta de 50%, em massa de escória e 50% de cimento. Com um dia de idade, esses corpos de

prova são colocados em autoclave submetidos à pressão de 2 MPa e temperatura de 216°C, durante três horas. Calcula-se a expansão em porcentagem em relação ao comprimento inicial do corpo de prova (POLISSENI, 2006).

O método ASTM C 1260 (1994) *Standart Test Method for potencial álcali reactivity of aggregates mortar-bar method* foi adaptado para verificar a expansão das escórias de aciaria em argamassas com cimento. O método original é feito para investigar a relação álcali-agregado por meio da variação de comprimento de barras de argamassas. No método adaptado para medir a expansão das escórias de aciaria, a argamassa é composta de 50%, em massa, de escória moída, que passa na peneira n.º 200 (0,075mm de abertura de malha), e 50% de cimento. O agregado miúdo a ser utilizado é areia lavada. Prepara-se a argamassa e molda-se o corpo de prova nas dimensões 25mm x 25mm x 285mm, de acordo com a ABNT NBR 15577-4: 2008 (Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado). Os corpos de prova permanecem em câmara úmida por 24 horas e, em seguida, procedem à desforma deles. Os corpos de prova devem ficar imersos em água dentro de um recipiente hermeticamente fechado e mantido na estufa à temperatura de $(80\pm 2)^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas, pelo período de duas semanas. As variações de comprimento das barras de argamassa devem ser determinadas diariamente por meio de um relógio comparador ou micrômetro comparador, capaz de medir pelo menos variações totais de 5mm, de forma que sua menor divisão permita uma leitura de 0,01mm. Para a comparação, é necessário realizar o mesmo ensaio com argamassa de cimento e agregado miúdo.

Na NBR 11582 (2012) Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier, este método está descrito na seção 3.2.4, adaptado para utilização de escória de aciaria em substituição parcial do cimento.

O método de Jean-Pera avalia a expansibilidade por meio do ensaio de perda de massa quando se moldam barras de argamassa de cimento, escória e areia na consistência normal, conforme a ABNT NBR NM 43: 2003, com a substituição do cimento por escória nos percentuais de 0%, 5%, 10%, 25% e 40%. Moldados após 28 dias, esses corpos de prova são submetidos a ciclos de calor e frio, da seguinte forma: cinco dias imersos em água e depois são retirados e colocados em uma estufa à

temperatura média de 70°C, por mais três dias. Pesam-se as barras de argamassa antes da entrada e depois da saída da estufa, para a determinação da perda de massa ou deformações devido à presença de escória (GEYER, 2001).

E o método de blocos Marshall avalia a expansão de blocos de mistura asfáltica confeccionados com escória.

2.4.6 Métodos para estabilização das escórias de aciaria

Existem alguns métodos para estabilizar as escórias de aciaria. O primeiro método que vem sendo bem usado na Siderúrgica de Vitória-ES visa à estabilização dos óxidos expansivos durante um período de envelhecimento ou tratamento com água intercalada (cura) das pilhas de escória de aciaria

Um segundo método bem menos usado é o tratamento das escórias líquidas no momento em que sai do convertedor, adicionando-se redutores ou estabilizantes, para assegurar a melhoria das propriedades delas.

2.4.6.1 Método do envelhecimento e cura

Na Siderúrgica de Vitória-ES, a escória de aciaria de convertedor LD, depois de ter sido obtida, é britada e separada em faixas granulométricas adequadas e submetida a um tratamento para a redução da expansão. Esse processo consiste em acelerar a reação dos óxidos livres mediante a reação deles com o ar e a água, por meio de um processo de umectação e aeração da escória durante certo período de tempo. O controle da expansão é feito conforme a norma DNIT 113/2009-ME – Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria no diâmetro de 0mm a 19mm. Esse método de ensaio descreve a determinação do potencial de expansão da escória de aciaria, quando compactada e testada em laboratório. A determinação é realizada pela média do potencial de expansão de três corpos de prova, medido pelo ensaio definido pela norma DNIT

113/2009-ME – Avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria e deve ser inferior a 3%.

Apresenta-se no gráfico (Figura 2.32) abaixo a escória de aciaria com e sem tratamento de ar e água.

Figura 2.32 - Escória de aciaria com e sem tratamento de ar e água

Fonte: Arcellor Mittal (2017).

Existem outros ensaios que são realizados, como o ensaio de Abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/94), que mede o desgaste do agregado graúdo quando submetido à máquina Los Angeles, que deve ser inferior a 40% e o módulo de resiliência na umidade ótima (DNERME 131/94), que deve ser igual ou superior a 300 MPa. Esses ensaios são feitos diretamente com a escória de aciaria, porém existem outros quando a escória de aciaria é misturada com solos para a estabilização granulométrica para ser usada em sub-base.

A grande vantagem da escória de aciaria de convertedor LD tratada em relação a outros agregados pétreos é o seu elevado módulo de elasticidade do pavimento, quando comparado com módulo de elasticidade do pavimento de agregados pétreos, permitindo a diminuição da espessura do pavimento.

No Japão e na Alemanha, algumas siderúrgicas utilizam o tratamento a vapor para acelerar as reações de hidratação das escórias de aciaria. O vapor pode reduzir rapidamente a expansão em uma escória nova e também estabilizar a expansão residual em escórias envelhecidas. O tempo de estabilização pode ser reduzido de meses para apenas alguns dias (GEISELER, 2001).

2.4.6.2 Método do tratamento das escórias líquidas

Malynowskyj (2016) fundiu a escória de aciaria LD, à temperatura de 1680°C e 1700°C e adicionou a diversos tipos de aditivos e estabilizantes granulados para ajuste da composição química, modificando assim a sua basicidade e teor de alumina. O processo de modificação foi por pirometalurgia de escória de aciaria LD e foram realizados oito ensaios de modificação de escória de aciaria LD, com taxa de resfriamento diferenciada que levaram a todos os resultados a redução parcial dos óxidos de ferro e aumento no teor de SiO_2 e Al_2O_3 , em comparação com a escória inicial conforme a Tabela 2.16, porém os teores Fe_2O_3 permaneceram elevados e também não houve formação de fases com propriedades cimentícias como alita e belita, não possibilitando esses novos produtos à sua utilização no cimento; no entanto, houve diminuição do CaO livre e MgO livre podendo ser usada como agregado.

Tabela 2.16 - Composição química das escórias modificadas

Elementos (%)	Escória inicial	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Corrida 4	Corrida 5	Corrida 6	Corrida 7	Corrida 8
Fe (Total)	23,94	12,43	21,21	20,03	17,61	14,74	14,87	17,12	20,49
Fe ₂ O ₃	13,60	3,63	8,24	6,02	4,41	3,56	3,58	4,87	5,46
FeO	18,3	11,6	19,1	19,4	17,2	14,8	14,2	16,0	20,4
Fe (metálico)	0,20	0,85	0,55	0,68	1,11	0,71	1,29	1,23	0,76
CaO	38,10	35,17	25,79	29,89	32,13	33,84	33,85	32,80	29,81
K ₂ O	0,27	0,09	0,71	0,60	0,20	0,18	0,19	0,28	0,24
S	0,10	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,04
SiO ₂	9,90	32,25	37,17	26,33	29,62	30,98	31,34	31,83	32,67
Al ₂ O ₃	1,70	3,07	3,67	4,63	2,96	4,03	3,58	2,35	2,22
MgO	8,60	9,03	5,98	7,78	8,37	8,09	8,29	7,36	7,20
TiO ₂	0,30	0,27	0,23	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,23
Cr ₂ O ₃	0,06	0,07	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,05	0,05
MnO	4,40	4,29	3,13	3,60	3,83	3,95	3,96	3,58	3,53
SrO	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06
ZnO	0,002	0,002	0,004	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
P ₂ O ₅	1,30	1,22	0,96	1,03	1,10	1,14	1,15	1,03	0,99

Fonte: Malynowskyj (2016).

2.4.7 Aplicações da escória de aciaria na construção civil

A seguir serão apresentadas várias formas de aplicação da escória de aciaria que já vêm sendo utilizadas por pesquisadores e empresas de engenharia.

2.4.7.1 Escória de aciaria em argamassas

Wang et al. (2012) realizaram ensaios de resistência à tração na flexão para argamassas no traço 1:3 (cimento e areia) e de argamassas no mesmo traço com substituição parcial por escória de aciaria de forno de oxigênio (BOF) nos teores de 22,5%, 45% e 60%. Concluíram que o aumento da substituição por escória de aciaria em argamassas com a/c de 0,34, 0,42 e 0,50 para cargas de ruptura de 30 MPa a 70 MPa diminuía a resistência à tração na flexão para uma mesma resistência à compressão.

Maslehuddin et al. (2002) compararam a retração da pasta de cimento com agregado miúdo com a da pasta de cimento com escória de aciaria com agregado miúdo.

Constataram que a retração da pasta de cimento com agregado miúdo natural é maior que a de cimento feito com agregado miúdo de escória de aciaria, o que pode ser constatado mediante os resultados obtidos pelo autor e apresentados na Figura 2.33.

Figura 2.33 – Retração da argamassa de cimento com areia natural e de cimento com escória

Fonte: Maslehuddin (2002, p. 110).

2.4.7.2 Escória de aciaria na produção do clínquer

Tsakiridis et al. (2008) desenvolveram um programa experimental para investigar a possibilidade de usar a escória de aciaria de forno de arco elétrico como matéria-prima para a produção de um típico clínquer de cimento Portland. Utilizaram duas amostras de matérias-primas, uma das quais apenas com matérias comuns, chamada amostra de referência ((PC)_{Ref}), e a outra com 10,5 de escória de aciaria ((PC)_{s/s}). A composição química das matérias-primas utilizadas para as amostras ((PC)_{Ref}) e ((PC)_{s/s}) estão apresentadas na Tabela 2.17.

Tabela 2.17 – Análise química das matérias-primas para a produção de clínqueres de cimento Portland

Óxidos	Teor de matérias-primas (%)				
	Calcário	Areia	Argila	Bauxita	Escória de alto-forno
SiO ₂	0,25	81,03	60,53	3,11	17,53
Al ₂ O ₃	0,08	8,34	14,30	52,35	6,25
Fe ₂ O ₃	0,06	3,34	4,99	22,64	26,36
CaO	55,06	0,58	7,23	7,64	35,70
MgO	0,12	1,10	0,80	0,09	6,45
K ₂ O	0,02	1,63	0,78	0,76	0,26
Na ₂ O	0,01	0,14	1,18	0,15	0,2
TiO ₂	-	0,33	0,47	1,35	0,76
MnO	-	-	-	-	2,50
ZnO	-	-	-	-	0,85
LOI ₁₀₀₀	43,37	3,26	9,62	11,35	2,24

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

A escória de aciaria foi misturada com as matérias-primas do clínquer, tais como calcário, argila, areia e bauxita, em proporções para produzir a matéria crua do clínquer do cimento Portland. A amostra de referência ((PC)_{Ref}) sem escória de aciaria foi realizada para comparação. A composição das duas amostras com e sem escória de aciaria para os clínqueres está apresentada na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 – Composição da matéria crua para a produção do cimento Portland

Matérias cruas	Composição das matérias cruas (%)				
	Calcário	Areia	Argila	Bauxita	Escória de aciaria
((PC) _{Ref})	78,00	14,40	3,70	3,90	-
((PC) _{s/s})	70,80	12,70	3,50	2,50	10,50

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

Ambas as amostras ((PC)_{Ref}) e ((PC)_{s/s}) foram sinterizadas a 1450°C para a produção dos dois tipos de clínqueres de cimento Portland. Em seguida, os clínqueres foram misturados com CaSO₄.2H₂O industrial, para que os cimentos produzidos em laboratório tivessem 2,5% de SO₃ solúvel total. Na Tabela 2.19, apresenta-se a análise química dos clínqueres produzidos.

Tabela 2.19 – Resultados da análise química dos clínques produzidos

Óxidos	Composição dos clínques de cimento produzidos (%)	
	(PC) _{Ref}	(PC) _{s/s}
SiO ₂	21,85	21,32
Al ₂ O ₃	5,82	5,28
Fe ₂ O ₃	2,78	3,85
CaO	67,85	66,35
MgO	0,53	1,37
K ₂ O	0,35	0,43
Na ₂ O	0,13	0,13
TiO ₂	0,18	0,17
SO ₃	0,20	0,13
CaO _f	1,15	1,05
LOI	0,22	0,24

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

Na Tabela 2.20, apresenta-se a composição mineralógica dos clínques dos cimentos ((PC)_{Ref}) e ((PC)_{s/s}) produzidos. O C₄AF maior do clínquer do ((PC)_{s/s}) atribui-se à substituição argila e areia por escória de aciaria.

A análise de difração de raios X dos clínques produzidos está apresentada na Figura 2.34, em que constatarem que, em ambos os clínques, as fases C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF foram bem formadas.

Tabela 2.20 – Composição mineralógica dos clínques dos cimentos Portland

Fases Mineralógicas	Composição dos clínques do cimento	
	(PC) _{Ref}	(PC) _{s/s}
C ₃ S	61,75	62,24
C ₂ S	16,15	14,26
C ₃ A	10,72	7,49
C ₄ AF	8,45	11,70

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

Figura 2.34 - Difração de raios X dos clínqueres do cimento Portland com escória de aciaria

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

Os valores de tempo de pega, consumo de água e expansão da amostra ((PC)_{Ref}) foram similares ao da amostra ((PC)_{s/s}), conforme se ilustra na Tabela 2.21.

Tabela 2.21 – Composição mineralógica dos clínqueres dos cimentos Portland

Propriedades físicas	(PC) _{Ref}	(PC) _{s/s}
Início de pega (min)	150	170
Fim de pega (min)	180	205
Água de consistência normal	26,8	26,1
Expansão (mm)	2,5	2,0

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

A resistência à compressão da amostra com adição da escória de aciaria ((PC)_{s/s}) foi tão alta quanto a amostra da referência ((PC)_{Ref}), como se ilustra na Figura 2.35.

Figura 2.35 – Resistência à compressão dos cimentos produzidos

Fonte: Tsakiridis et al. (2008).

Desse modo, os autores concluíram que a escória de aciaria pode ser usada como matéria-prima na produção do cimento Portland, permitindo sua redução de custo.

2.4.7.3 Escória de aciaria em cimento

Polisseni (2005) estudou o emprego da escória de aciaria elétrica micronizada, de uma siderúrgica na região de Juiz de Fora-MG, com o objetivo de ser usada como material cimentício. A micronização reduz a escória de aciaria para diâmetros em torno de 10µm. Essa metodologia compreende a aplicação de ar comprimido, filtrado, em alta pressão dentro do moinho, que provoca sucessivos choques entre as partículas da escória, reduzindo os diâmetros e mantendo a uniformidade no tamanho. Trabalhou com três períodos distintos de estocagem: recém-estocada (E_1), estocada há seis meses (E_2) e com estocagem superior a 24 meses (E_3). Procurou também conhecer as mudanças ocorridas nas propriedades das escórias em razão desses períodos de estocagem. Para verificar a expansibilidade, trabalhou inicialmente com escória de aciaria sem ser micronizada, com diâmetro menor que 19mm. O ensaio foi feito pelo método PTM 130 Modificado/DER-MG, que segue o ensaio do Departamento de Transporte da Pensilvânia – EUA – Pennsylvania Test Method –

PTM 130 (1982), cujo objetivo é determinar o grau de expansão volumétrica das escórias. O ensaio compreende a compactação em cilindros com diâmetro interno de $15,24\text{cm} \pm 0,13\text{mm}$ e altura de $17,78\text{cm} \pm 0,013\text{mm}$, em três camadas e 56 golpes por camada. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.22, para a expansão aos 14 dias. Verificou-se que as amostras E₂ e E₃ ficaram com expansão inferior a 3%, atendendo ao limite máximo exigido pela norma.

Tabela 2.22 – Resultado da expansibilidade das amostras

Escória	Estocagem (meses)	Expansão (%)
E ₁	0	4,06
E ₂	6	1,82
E ₃	24	1,33

Fonte: Polisseni (2005).

Em seguida, o autor analisou o comportamento da expansão da escória de aciaria gerada a 72 horas (E_{A1}) com três diâmetros diferentes. A primeira, moída em moinho de bolas, por um período de 150 minutos, diâmetro médio de $54,37\mu\text{m}$; a segunda também moída em moinhos de bola, por um período de 210 minutos, com diâmetro médio de $10,06\text{mm}$; e a terceira amostra obtida, moída pelo processo de micronização, com diâmetro médio de $3,37\mu\text{m}$. Misturou cerca de 50% de CP V-ARI RS e 50% de escória de aciaria (E_{A1}) e verificou a expansão pelo método ASTM C151 (1993) – Tabela 2.23, quando constatou que a escória de aciaria micronizada apresentou a menor expansão entre as três analisadas e a escória moída por 210 minutos apresentou menor expansão quando comparada à amostra moída por 150 minutos.

Tabela 2.23 – Expansibilidade pelo método da autoclave (ASTM C 151, 1993) das escórias (50% de CP V-ARI RS + 50% de escória) EA1 (diâmetro médio de 54,37 μ m) e EA1 (diâmetro médio de 10,06 μ m) e da escória micronizada EA1 (diâmetro médio de 3,37 μ m)

Amostra	Água de consistência normal (%)	Expansão média (%)
CP V-ARI RS ϕ médio = 12,13 μ m	28,6	0,027
EA1 (50/50) ϕ médio = 54,37 μ m	22,1	1,175
EA1 (50/50) ϕ médio = 10,6 μ m	25,2	1,169
EA1 (50/50) ϕ médio = 3,37 μ m	30,1	0,168

Fonte: Polisseni (2005).

A mistura EA1 (50/50), que foi micronizada com diâmetro médio de 3,37 μ m, apresentou expansão média de 0,168%, estando abaixo do limite máximo de 0,8%, que é previsto pela ASTM C 157 Standard Performance Specification for Blended Hydraulic Cement. As outras duas amostras de escória de aciaria que foram moídas no moinho de bola não atenderam à norma ASTM C 157 do ponto de vista da expansão. Polisseni (2005) concluiu que a escória de aciaria, quando micronizada, não precisa ficar estocada por longos períodos, e sim estabilizada quando decorridas 72 horas com diâmetros de 3,37 μ m. Do ponto de vista da resistência à compressão para uma mesma idade, à medida que ocorreu o aumento do teor de adição de escória de aciaria micronizada na argamassa, ocorreu a diminuição da resistência. Na Figura 2.36, verifica-se que, na idade de sete dias, substituindo-se 10,0% e 34,0% de adição, ocorreu a redução de 27,4% e 43,31%, respectivamente, em relação ao traço de referência, isto é, 100% de CP V-ARI RS. Para a idade de 28 dias, fazendo os mesmos teores de substituição de escória de aciaria, ocorreu a redução de 18,70% e 40,00%, respectivamente, em relação ao traço de referência.

Figura 2.36 – Efeito da interação entre idade e teor de EA1 na resistência à compressão das argamassas

Fonte: Polisseni (2005).

Na Figura 2.37, apresenta-se a substituição de 10% ao CP V-ARI com escória de alto-forno (EGAF) e verifica-se que a resistência à compressão é 18,26% maior que a resistência à compressão com adição do mesmo percentual de escória de aciaria micronizada (EM) para um mesmo traço. Com a substituição de 34% do CP V-ARI RS, a resistência à compressão de EGAF é 32,26% maior que a de EA1.

Figura 2.37 - Influência da interação do teor e do tipo de escória na resistência à compressão

Fonte: Polisseni (2005).

Do ponto de vista ambiental, o ensaio de solubilização (ABNT NBR 10006: 2004) à argamassa constituída de escória EA1 (66/34) é considerado inerte. De acordo com a ABNT NBR 10004: 2004, considera-se resíduo IIB (não perigoso e inerte).

Relativamente à absorção capilar das argamassas de escória de aciaria com substituição de 10% e 34% de EA1, ocorre uma redução de 23,76% e 28,82% na taxa de absorção das argamassas, conforme se mostra na Figura 2.38.

Figura 2.38 - Efeito do teor de EA1 na taxa de absorção das argamassas

Fonte: Polisseni (2005).

Gumieri (2002) estudou a viabilidade técnica do uso da escória LD como adição em cimentos. O estudo foi dividido em duas etapas: na primeira, trabalhou com escória resfriada lentamente (RL) para emprego em concreto, e as amostras de resfriamento lento (RL) não foram usadas para adição em cimentos, portanto não serão citadas; na segunda, utilizou o método de estabilização das escórias LD pelo processo de granulação por resfriamento brusco (RB), em que verificou as características e propriedades da escória após a granulação e, em seguida, o seu emprego em cimento. Essa amostra que foi resfriada dentro da caçamba com água e granulada foi identificada como RB1. O processo de granulação tornou as escórias (RB1) estabilizadas e bastante friáveis, não sendo possível sua utilização como agregado. Então, concentrou os estudos na fabricação de cimento. No resfriamento brusco, trabalhou com três amostras (RB1, RB2 e RB3), sendo RB1 resfriada na usina e RB2 e RB3 refundidas no laboratório, à temperatura de 1450°C, durante 30 e 90 minutos,

respectivamente. As escórias RB2 e RB3 não foram usadas como adição ao cimento, tendo em vista que a quantidade usada em laboratório no processo de refusão era de 500 gramas. Com a amostra RB1, realizaram-se ensaios de resistência à compressão nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias de acordo com a ABNT NBR 7215: 1996, com a substituição de 0%, 6%, 20% e 34% de clínquer por escória granulada. Apresentaram-se esses resultados no gráfico da Figura 2.39, em que se verifica que todas as argamassas com percentual de 6% de substituição de clínquer apresentam os mesmos níveis de resistência que o traço de referência nas idades de 28 e 91 dias. As argamassas com substituição de 20% e 34% tiveram uma redução de 15,8% e 14,7%, respectivamente, para as idades de 28 e 91 dias. A mesma situação ocorreu com a substituição de 34% do clínquer, quando houve redução 19,0% e 17,4% aos 28 e 91 dias. Apesar da redução da resistência, as argamassas atingiram as resistências mínimas de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento Portland composto.

Figura 2.39 - Resistência à compressão em função da idade dos corpos de prova de argamassas com clínquer e escória granulada

Fonte: Gumieri (2002).

Na Figura 2.40, verifica-se a diminuição da resistência à compressão das argamassas com o aumento do teor de escória de aciaria. Essa influência diminui a partir do teor de 20% adição de escória de aciaria, principalmente nas idades de 28 e 91 dias.

Figura 2.40 - Resistência à compressão em função do teor de escória – argamassas com clínquer e escória granulada

Fonte: Gumieri (2002).

As escórias de resfriamento brusco (RB) apresentaram grãos de formas cúbicas, aglomeradas e esféricas. As escórias de resfriamento lento têm forma próxima à cúbica e arestas vivas, sendo similares aos agregados para a construção civil. O resfriamento brusco RB1 permitiu a eliminação do MgO na forma de periclásio, reduziu CaO livre e também a eliminação do $\beta\text{C}_2\text{S}$, sendo todos eles causadores da expansão da escória de aciaria. O alto teor de basicidade da escória LD dificultou a formação da estrutura vítrea e a separação metálica após o resfriamento.

As amostras de escória de aciaria refundida no laboratório, RB2 e RB3, tiveram a redução de CaO livre e eliminação do MgO. Essas amostras permaneceram com frações metálicas e não metálicas aderidas, da mesma forma que a amostra de escória de aciaria resfriada na usina (RB1).

2.4.8 Influência do tamanho dos grãos da EACN na composição química, resistência à compressão e tração na flexão de argamassas de cimento com escória de aciaria

Zhang et al. (2011) verificaram a influência do tamanho dos grãos da escória de aciaria tipo BOF, na composição química, na resistência à compressão axial e na resistência à tração na flexão. Os autores verificaram que a diminuição do tamanho dos grãos, conforme a Tabela 2.24, teve como resultado o aumento dos teores de cal, sílica e alumina, já o teor de ferro diminuiu. Os autores também realizaram cinco traços de argamassas no traço 1:3:0,5 (aglomerante (70% de cimento e 30% de escória de aciaria:areia:água)), para determinar a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão de argamassas, e a única variável dos cinco traços foi o tamanho dos grãos ($D_{50} = 1.43, 5.74, 15.17, 30.79$ e $60.24\mu\text{m}$). Concluíram que, à medida que houve a diminuição do tamanho dos grãos, de acordo com a Figura 2.41 e Figura 2.42 a resistência à compressão axial e a resistência à tração na flexão aumentaram, exceção para o diâmetro de 1,43mm.

Tabela 2.24 – Composição química de escória de aciaria natural (Tipo BOF) de diferentes diâmetros ($D_{50}\mu\text{m}$)

$D_{50}(\mu\text{m})$	Composição química (%)								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	PF	Outros
60,24	38,85	14,03	3,18	9,53	28,48	0,1	2,11	1,67	5,35
30,79	39,12	14,45	3,31	9,62	26,70	0,15	2,10	1,35	5,90
15,17	40,56	15,68	4,09	9,86	22,25	0,17	2,07	1,38	3,94
5,74	42,21	16,61	4,86	9,16	17,72	0,23	1,77	2,49	4,95
1,43	44,07	18,09	5,53	7,36	8,64	0,36	0,92	11,9	3,06
								7	
Clínquer de cimento Portland tipo I	65,47	22,52	4,59	1,70	2,42	0,15	-	0,84	2,31

Fonte: Zhang et al. (2011, p. 50).

Na Figura 2.41 apresenta-se a resistência à compressão axial de escória de aciaria para diferentes diâmetros.

Verifica-se na Figura 2.41 que a diminuição dos grãos da escória de aciaria para diâmetros $D=1,43$ a resistência à compressão axial da escória de aciaria na idade de 3 dias é superior à das idades de 28 dias e 91 dias.

Figura 2.41 - Resistência à compressão axial da escória de aciaria para diferentes diâmetros

Fonte: Zhang et al. (2011, p. 52).

Na Figura 2.42, apresenta-se a resistência à tração na flexão da escória de aciaria para diferentes diâmetros.

Verifica-se na Figura 2.42 que a diminuição dos grãos da escória de aciaria para diâmetros $D=1,43$ a resistência à tração na flexão da escória de aciaria na idade de 3 dias e superior à das idades de 28 dias e 91 dias.

Figura 2.42 - Resistência à tração na flexão da escória de aciaria para diferentes diâmetros

Fonte: Zhang et al. (2011, p. 52).

2.4.9 Ativação alcalina da escória

Apresenta-se na Tabela 2.25 o desenvolvimento histórico de cimentos álcali-ativados de escórias.

Tabela 2.25 - Histórico de cimentos álcali-ativados de escória

Ano	Autor	País	Trabalho
1930	Kuhl	Alemanha	Estudou o comportamento da escória em presença de hidróxido de potássio.
1937	Chassevent	Desconhecido	Avaliou a reatividade da escória usando hidróxido de potássio e soda cáustica.
1940	Purdon	Bélgica	Foi o primeiro a produzir um cimento cujo clínquer era composto de escória e soda cáustica ou escória e álcalis cáusticos produzidos por uma base e um sal alcalino.
1957	Glukhovsky	URSS	Fez a primeira descoberta da produção de ligantes usando níveis baixos de cálcio (argilas) e soluções de metais alcalinos.
1982	Davidovits	França	Produziu ligantes por meio da mistura de álcalis com caulinita queimada, calcário e dolomita, denominando a mistura de ligantes geopolímeros, por possuir uma estrutura polimérica.
1986	Malek et al.	-	Identificaram tipos de materiais de cimento formado na solidificação de certos resíduos radioativos.
1989	Roy e Langton	USA	Mostraram algumas analogias de cimento formado na solidificação de certos resíduos radioativos com concretos antigos.
1994	Krivenko	-	Demonstrou que os álcalis e sais metais alcalinos, bem como silicatos, sais de alumínio e silicatos de alumínio, exibem reação em meio aquoso alcalino, quando a concentração alcalina é suficiente.

Fonte: Shi; Krivenko; Roy (2006).

John (1995) estudou a influência da ativação da escória granulada de alto-forno por silicatos de sódio. O objetivo foi esclarecer os principais mecanismos de ação desses silicatos, isolados ou em contribuição com a cal hidratada, sobre a escória. Procurou também conhecimento sobre alguns dos principais indicadores do cimento assim produzido. Na sua revisão bibliográfica, verificou que a produção dos cimentos de escória sem clínquer foi praticamente abandonada na década de 1950, à exceção dos cimentos de escória ativada com álcalis. Segundo o autor, a baixa resistência inicial e o fato da degradação durante a estocagem do cimento foram a causa principal desse abandono. Na parte experimental da sua tese, em um dos muitos estudos da influência do SiO_2 , concluiu que a elevação de teor de SiO_2 nas argamassas de escória a resistência à compressão aumentava 300%. Isso pode ser verificado por meio da

Figura 2.43 , em que a resistência à compressão aos sete dias da argamassa com 0% de SiO_2 é 20MPa, passando para 60MPa aos sete dias com a adição de 5% de SiO_2 . Verifica-se, ainda na mesma Figura 2.43, a queda da resistência à compressão para valores acima de 7% de Na_2O .

Figura 2.43 - Influência do teor de SiO_2 na resistência à compressão a diferentes idades com 5% de Na_2O e 0% de Ca(OH)_2

Fonte: John (1995).

Vlcek, Tomková, Babková e Vavro (2009) compararam a resistência à compressão após a ativação alcalina da escória de alto-forno granulada, cinza das usinas, e quatro diferentes composições químicas de escórias de aciaria de forno elétrico. Conforme se mostra na Tabela 2.26, as escórias de aciaria são representadas por (A), (B), (C) e (D). Tanto as escórias de aciaria como a de alto-forno e a cinza de usinas foram obtidas na ArcelorMittal da República Checa, Europa.

Tabela 2.26 – Composição química da matéria-prima

	Escória de alto-forno	Escória de aciaria (A)	Escória de aciaria (B)	Escória de aciaria (C)	Escória de aciaria (D)	Cinza das usinas
CaO	37,65	37,52	46,10	51,847	57,74	3,40
SiO ₂	38,07	31,93	23,80	17,30	3,50	50,38
Al ₂ O ₃	5,87	7,24	11,80	18,85	35,76	27,85
MgO	10,61	7,10	11,40	7,44	2,10	3,00
FeO / Fe ₂ O ₃	0,28	8,16	1,38	3,88	0,66	7,90

Fonte: Vlcek J.; Tomková V.; Babková P.; Vavro (2009).

Para a seleção de matérias-primas para os experimentos, deu-se ênfase ao estado vítreo, que é assegurado pelo esfriamento rápido das amostras, garantindo a hidraulicidade latente das escórias. As matérias-primas passaram pelo processo de moagem até obter a área superficial específica de $320 \pm 20 \text{ m}^2/\text{kg}$, de acordo com o método Blaine.

As amostras de escórias foram homogeneizadas com o ativador alcalino (Na_2O) e água e moldadas em recipientes de $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$. A hidratação foi realizada em ambiente úmido (99% de umidade). Realizaram-se ensaios de compressão nas idades de 2, 7, 28 e 50 dias após a moldagem.

Na Tabela 2.27, apresenta-se composição para homogeneização das escórias de aciaria (A), (B) e (C), (D) sem adição e também as mesmas escórias de aciaria com adições de escória de alto-forno e cinzas de usina. Essas adições tiveram por objetivo mudar a composição química das misturas iniciais, tendo como resultados diferentes processos de endurecimento e diferentes resistências à compressão. Todas essas misturas foram comparadas com a amostra de referência, com 100% de escória de aciaria. Verificaram, conforme se ilustra na Tabela 2.27, que as escórias de aciaria com e sem adição dos tipos A e B apresentaram resistência à compressão superior às do tipo C e D. Isso se deve à quantidade superior de SiO_2 nas escórias tipo A e tipo B. Concluíram que a adição levou ao aumento de resistência para escória do tipo A.

Tabela 2.27 – Valores da resistência à compressão com mistura preparada com óxido de sódio a 4,5% (Na_2O) e módulo de sílica = 2,0

Tipo de escória de aciaria	Componentes da mistura (%)			Resistência à compressão (MPa)			
	Escória de aciaria	Escória de alto-forno	Cinzas de usina	2 dias	7 dias	28 dias	50 dias
A	100	0	0	20,8	41,3	51,3	68,0
	50	50	0	33,8	47,5	55,0	76,0
	50	25	25	25,4	46,3	54,9	77,3
	100	0	0	27,6	54,2	73,4	76,0
B	50	50	0	29,6	45,8	60,0	72,3
	50	25	25	16,8	46,2	53,4	57,1
	100	0	0	21,3	33,0	41,3	45,7
	50	50	0	23,8	37,5	45,0	51,2
C	50	25	25	8,8	20,0	27,5	34,6
	100	0	0	-	17,8	20,0	27,8
	50	50	0	12,6	28,4	36,3	47,7
	50	25	25	10,5	15,9	24,7	33,6

Fonte: Vlcek J.; Tomková V.; Babková P.; Vavro, M. (2009).

Figura 2.45 - Resistência à compressão de escória granulada de alto-forno ativada com álcalis

Fonte: Vlcek J.; Tomková V.; Babková P.; Vavro, M. (2009).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta tese foi todo realizado com a utilização da escória de aciaria (EACN) do processo LD (Linz Donawitz) ou BOF (Basic Oxygen Furnace), coproduto de uma siderúrgica da Grande Vitória-ES. Na etapa inicial, realizou-se diretamente a ativação alcalina da EACN, porém os valores encontrados para a resistência à compressão axial foram muito baixos. Com base nesses resultados negativos da ativação alcalina, verificou-se a resistência à compressão axial de argamassas utilizando-se como aglomerante o cimento CP V-ARI com substituição parcial por EACN, nos percentuais de 0%, 6%, 10%, 20% e 34%. Nessa etapa, os valores obtidos para resistência à compressão foram comparados com as exigências do cimento CP V-ARI e CP II-E, verificando-se a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica da argamassa endurecida. Os valores de resistência à compressão foram inferiores ao traço de referência sem uso de EACN, e os inconvenientes da utilização da EACN não foram eliminados como os teores elevados de ferro, $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e de MgO cristalino, que provocam a expansão da EACN. Em seguida, optou-se por uma metodologia que reduzisse os teores elevados de ferro, $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e de MgO cristalino da EACN. A metodologia adotada foi o processo pirometalúrgico para alterar a composição química e a estrutura da EACN para aproximá-la da composição química e estrutura da escória de alto-forno, tornando-a reativa, com a finalidade de ser usada como substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer. Foram necessários dois processos metalúrgicos, pois, no primeiro processo pirometalúrgico, atingiu-se a temperatura de 1600°C , a carga carregada fundiu-se e foi vazada totalmente na lingoteira e resfriada rapidamente, porém a composição química ficou distante da escória de alto-forno, sendo necessário um segundo processo pirometalúrgico, durante o qual se adotou outra metodologia para determinar a carga.

Para que esse programa experimental fosse possível, dividiu-se em seis etapas (Figura 3.1): 1.^a – Coleta da amostra e caracterização física da EACN em forma de

agregado⁹, do cimento, do clínquer e do gesso; 2.^a – Preparação da amostra e caracterização em forma de pó; 3.^a – Ativação alcalina; 4.^a – Argamassas de cimento CP V-ARI com substituição parcial por escória de aciaria LD; 5.^a – Primeiro processo pirometalúrgico; 6.^a – Segundo processo pirometalúrgico.

Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do programa experimental

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A primeira etapa (Figura 3.2) compreendeu a coleta de lotes específicos de escórias de aciaria tipo LD na usina siderúrgica do Espírito Santo, em forma de agregado, no intervalo de 0mm a 19mm, e os ensaios de caracterização física: a composição granulométrica com determinação da dimensão máxima características e módulo de finura, a determinação da massa específica e a absorção de água. Esses ensaios foram realizados pelo autor da tese no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes). Procede-se à coleta de amostra do cimento CP V-ARI, clínquer e gesso e em seguida a caracterização física, química e mineralógica das amostras.

⁹ Material inerte que não entra em complexas reações químicas com a água. Por isso, tem sido comumente tratado como material de enchimento inerte do concreto (dependendo da mineralogia do agregado, pode ocorrer a reação álcali-agregada) (METHA; MONTEIRO, 2014).

Figura 3.2 - Fluxograma da 1.^a etapa do programa experimental – Coleta da amostra na siderúrgica

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A segunda etapa (Figura 3.3) compreendeu ensaios de preparação da amostra e de caracterização física, ambiental, química, mineralógica, microestrutural e termicamente, bem como teve sua atividade pozolânica determinada. Essa preparação da amostra da EACN foi realizada pelo autor desta tese no prédio de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da EPUSP e visou à redução da amostra da escória de aciaria do intervalo granulométrico inicial de 0mm a 19mm para valores inferiores a 0,075mm. Para atingir esse objetivo, utilizaram-se o moinho de rolos reduzindo para valores inferiores a 2,36mm e o moinho de esferas (bolas) reduzindo para valores inferiores a 0,075mm. Em seguida, o peneiramento de toda a amostra por meio da peneira de n.º 200 ou 0,075mm de abertura de malhas. Por último, obteve-se uma amostra representativa por meio da redução da amostra para ensaios de laboratório.

A caracterização física compreendeu a determinação da massa específica, a área específica por Blaine e a granulometria a laser da amostra abaixo de 75 μm .

A caracterização ambiental foi realizada de acordo com a NBR 10006 (ANT, 2006) (Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos) e a ABNT NBR 10005 (ABNT, 2004) (Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido).

A caracterização química compreendeu a composição química que possibilitou quantificar os elementos químicos majoritários e a quantificação de elementos de traços específicos (V e Cr). A técnica de fluorescência de raios X (FRX), realizada na empresa Panalytical em São Paulo (SP), foi o método utilizado para quantificar elementos químicos. No laboratório da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), realizaram-se ensaios químicos para determinar os teores de óxido de cálcio livre (CaO), resíduo insolúvel (RI), perda ao fogo (PF), anidrido sulfúrico (SO_3) e enxofre (S).

Enquanto a caracterização mineralógica usou a técnica de difração de raios X, a microestrutural utilizou a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ambas foram realizadas por técnicos no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP. A análise térmica foi feita por termogravimetria (TG) e termogravimetria diferencial (DTG) no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

A determinação da atividade pozolânica da EACN foi feita pelo método Chapelle modificado e foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Figura 3.3 – Fluxograma da 2.^a etapa do programa experimental – Preparação e caracterização da amostra

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A terceira etapa (Figura 3.4) foi a ativação alcalina da escória de aciaria LD, quando se adicionou hidróxido de sódio e cal para verificar o desempenho mecânico da mistura. Para isso, realizou-se a moldagem e cura de oito corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5cm x 10cm. Em seguida, os ensaios de resistência à compressão (f_c) nas idades de 28 dias e 91 dias e comparou-se com os valores exigidos pela norma NBR 11578 (ABNT, 1997) para cimento CP II-E 32 e CP II-E 40. A ativação alcalina foi realizada, no Laboratório de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC/UFES), pelo autor com a equipe do laboratório.

Figura 3.4 - Fluxograma da 3.^a etapa do programa experimental – Ativação alcalina da escória de aciaria

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A quarta etapa (Figura 3.5) compreendeu a avaliação de argamassa com substituição parcial do cimento CP V-ARI por escória de aciaria LD (EACN) obtida na etapa 2, isto é, na granulometria inferior a 0,075mm, ensaios de pega de acordo com a NBR NM 65 (ABNT, 2003) e expansibilidade de acordo com a NBR NM 11582 (ABNT, 2016). Com a argamassa endurecida, realizaram-se os ensaios de resistência à compressão axial de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), absorção de água, índice de vazios e massa específica de cimento com substituição parcial por EACN de acordo com a

NBR 9778 (ABNT, 2009). Para o ensaio de resistência à compressão, prepararam-se argamassas com substituição do cimento em teores de 6%, 10%, 20% e 34% por EACN. Preparou-se também uma argamassa de cimento CP V-ARI sem adição como referência. Nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, realizou-se o ensaio de resistência à compressão da argamassa de referência, enquanto, nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, o das argamassas com substituição do cimento por escória de aciaria LD. Compararam-se os valores obtidos da resistência à compressão das argamassas com substituição do cimento com teores de 6%, 10%, 20% e 34% por escória de aciaria LD com os exigidos pela NBR 11578 (1997) para cimento CP II-E32, CP II-E 40 e CP V-ARI. Avaliou-se o fenômeno da expansão pelos métodos das agulhas de Le Chatelier. Analisou-se a expansibilidade da escória de aciaria LD a quente e a frio, conforme a NBR 11582 (ABNT, 2012), utilizando-se uma argamassa com 70% de escória de aciaria e 30% de cimento CP V. Os ensaios de resistência à compressão, de expansibilidade e de absorção de argamassa de cimento puro e com substituição, foram realizados no Laboratório de Material de Construção Civil da UFES (LEMAC/UFES).

Figura 3.5 - Fluxograma da 4.^a etapa do programa experimental – Argamassas e pasta de cimento CP V-ARI.

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A quinta etapa (Figura 3.6) teve por objetivo modificar a escória de aciaria a oxigênio natural que estava no estado sólido, representada pela sigla EACN, por meio de um processo pirometalúrgico, adicionando-se carvão em forma de pó, calculado de modo a ser capaz de reduzir totalmente os óxidos de ferro presentes. Adiciona-se também sílica e alumina determinada com base no diagrama de fases, com o objetivo de obter temperatura *liquidus* adequada, para que, ao final do processo obter um material granular, com baixo teor de ferro, amorfo e pouco cristalino, e com composição similar à da escória de alto-forno.

Esse produto obtido é representado pela sigla (EACM1), que significa escória de aciaria LD modificada número um. Procedeu-se ao resfriamento rápido para torná-la menos cristalina. Essa etapa ocorreu no Laboratório de Autorredução e Fusão Redução (LABRED) no prédio da Engenharia Metalúrgica e de Materiais (PMT) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Os ensaios físicos de finura foram determinados pelos métodos Blaine e BET; o Blaine foi realizado na fábrica de cimento Holcim e o BET no PMT USP. A granulometria dos grãos foi realizada com o granulômetro laser na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). A massa específica foi realizada no laboratório de construção civil da UFES (LEMAC/UFES). Os ensaios de resistência à compressão axial e de durabilidade das argamassas foram realizados na UFES; os de caracterização mineralógica, química, microestrutural, térmica e índice de pozolanicidade nas empresas Panalytical, ABCP e no PMI.

Figura 3.6 - Fluxograma da 5.^a etapa do programa experimental – Processo Pirometalúrgico n.º 1

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A sexta etapa (Figura 3.7) foi necessária, tendo em vista que, na quinta etapa, a EACM1 obtida não alcançou todos os objetivos desejados, a composição química não ficou próxima da escória de alto-forno, o teor de ferro permaneceu elevado e a EACM1 não ficou reativa como se pretendia. Portanto, a sexta etapa também teve por objetivo modificar a EACN por meio de um processo pirometalúrgico, adicionando sílica, alumina e carvão, e inicialmente passou por um processo de sinterização que visa à aglomeração de partículas formando pelotas para que, em seguida, vá ao forno para fusão/redução carbotérmica e metalotérmica e, ao final do processo, a nova composição da escória modificada se aproxime da composição química da escória de alto-forno, a qual, neste trabalho, é apresentada como escória de aciaria LD modificada pelo processo pirometalúrgico número dois, sendo representada pela sigla EACM2. A determinação das quantidades de sílica, alumina e carvão foi realizada com a utilização de um *soft facstage* nas instalações do IPT e procedeu-se ao resfriamento rápido para torná-la menos cristalina. Essa etapa ocorreu no Departamento da Engenharia Metalúrgica de Materiais da USP os ensaios físicos de finura foram determinados pelos métodos Blaine e BET; o Blaine foi realizado na fábrica de cimento Holcim e o BET no PMT USP. A granulometria dos grãos foi realizada com o granulômetro laser na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP); a massa específica foi realizada no laboratório de construção civil da UFES (LEMAC/UFES); realizou-se com a EACM2b ensaios de calor de hidratação e avaliação do grau de vitrificação no IPT; os ensaios de resistência à compressão axial e de durabilidade das argamassas foram realizados na UFES; os de caracterização mineralógica, química, microestrutural, térmica e índice de pozolanicidade nas empresas Panalytical, ABCP e no PMI.

Figura 3.7 - Fluxograma da 6.^a etapa do programa experimental – Processo pirometalúrgico n.º 2

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E MÉTODOS UTILIZADOS

A seguir serão apresentados materiais e métodos de coleta, preparação de amostra e de caracterização do cimento areia quartzosa CP V-ARI, clínquer, gesso, hidróxido de sódio, cal, água; métodos de caracterização da EACN em forma de agregados; método para obter a escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm; métodos de caracterização da escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm, compreendendo caracterização física, química, atividade pozolânica, análise térmica, ambiental, mineralógica e microestrutura; método da expansibilidade da EACN escória de aciaria LD natural (EACN), escória de aciaria LD natural modificada 1 (EACM1), escória de aciaria natural LD modificada 2a (EACM2a), escória de aciaria LD natural modificada 2b (EACM2b), para a realização dos ensaios físicos, ambientais, químicos, mineralógicos, térmicos e resistência à compressão axial avaliar o desempenho mecânico de argamassas com ativação alcalina diretamente na EACN sem cimento, somente com NaOH e Cal; métodos para avaliar a propriedade mecânica e de durabilidade de argamassa de cimento com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b.

A EACM2 será denominada pelas siglas EACM2a e EACM2b, por apresentarem área específica diferente. A inovação deste trabalho é a produção da uma escória de aciaria LD modificada (EACM2) por meio de um processo pirometalúrgico, que apresenta estrutura e composição química similar à da escória de alto-forno (EAF), isto é, uma estrutura vítrea e com baixos teores de óxido de ferro, de óxido cálcio livre e o MgO, mudando de estrutura cristalina para vítrea.

3.1.1 Cimento CP V-ARI

Escolheu-se o CP V-ARI, pois esse cimento pode apresentar, em sua composição, somente materiais carbonáticos como adição e foi coletado pelo processo de amostragem em sacos de 50kg, diretamente na indústria cimenteira. Para a realização dos ensaios físicos, químicos, mineralógicos e de calor de hidratação, procedeu-se ao sistema de redução da amostra de cimento pelo processo de repartidor de amostra, para obter a quantidade necessária a cada ensaio.

A caracterização física compreendeu a finura, a massa específica, o tempo de início de pega e da expansibilidade a quente e a frio do cimento CP V-ARI e foi realizada pela equipe do Laboratório de Construção Civil da UFES (LEMAC/UFES), e a caracterização física da área específica pelo método Blaine foi realizada na fábrica de cimento HOLCIM – Vitória-ES. Já a caracterização química e mineralógica desse cimento foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O calor de hidratação do cimento CP V-ARI foi realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

A massa específica cimento CP V-ARI foi 3,01kg/dm³, determinada de acordo com a NM 23 (ABNT, 2001).

Apresentam-se, na Tabela 3.1, as características químicas e, na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3, as exigências físicas e mecânicas desse cimento.

Tabela 3.1 - Exigências químicas do cimento CP V-ARI

Determinações químicas	Limites (% da massa)
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 1,0
Perda ao fogo (PF)	≤ 4,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO ₃)	
- Quando C ₃ A do clínquer < 8%	≤ 3,5
- Quando C ₃ A do clínquer > 8%	≤ 4,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	≤ 3,0

Fonte: NBR 5733 (ABNT, 1991, p. 2).

Nota: O cálculo da porcentagem do aluminato de tricálcio contido no clínquer deve ser feito pela seguinte fórmula: $(C_3A\%) = 2,65 \times (Al_2O_3\%) - 1,692 \times (Fe_2O_3\%)$

Tabela 3.2 - Exigências físicas e mecânicas do cimento CP V-ARI

Características e propriedades		Unidade	Limites
Finura	Resíduo na peneira 75µm	%	≤ 6,00
	Área específica	m ² /kg	≥ 300
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5
Resistência à compressão	1 dia de idade	MPa	≥ 14,0
	3 dias de idade	MPa	≥ 24,0
	7 dias de idade	MPa	≥ 34,0

Fonte: NBR 5733 (ABNT, 1991, p. 2).

Tabela 3.3 - Exigências físicas e mecânicas (facultativa) do cimento CP V-ARI

Características e propriedades	Unidade	Limites
Expansibilidade a frio	mm	≤ 5
Teor de material carbonático	%	≤ 5
Tempo de fim de pega	h	≤ 10

Fonte: NBR 5733 (ABNT, 1991, p. 3).

3.1.2 Clínquer

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e argila e foi obtido de uma fábrica de cimento localizada no município da Serra, na região da Grande Vitória-ES, com grãos com diâmetro médio de 20mm, conforme se ilustra na Figura 3.8

Figura 3.8 - Clínquer antes da moagem

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Esse clínquer foi para o moinho de esferas de aço (moinho de bolas) durante noventa minutos, conforme se ilustra na Figura 3.9. Em seguida, procedeu-se ao peneiramento na peneira de abertura de malha n.º 0,075mm. O material retido na peneira de abertura de malha n.º 0,075mm retorna ao moinho de esferas aço (moinho de bolas) até que todo o clínquer passe na referida peneira.

Figura 3.9 - Clínquer moído

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Para a realização dos ensaios físicos, químicos e mineralógicos, recorreu-se ao sistema de redução da amostra de clínquer pelo processo de repartidor de amostra, para obter a quantidade necessária a cada ensaio.

Realizou-se a caracterização física do clínquer no Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) e a caracterização química e mineralógica foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

3.1.3 Gesso mineral

O gesso é o mineral gipsita (Figura 3.10) abundante na natureza, que tem como substância determinante o sulfato de cálcio hidratado, cuja fórmula química é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Neste trabalho, utilizou-se o de uma fábrica de cimento localizada no município da Serra, na região da Grande Vitória-ES.

Figura 3.10 - Mineral antes da moagem

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

O gesso foi obtido com grãos de diâmetros médio de 20mm. Esse gesso foi para o moinho de esferas aço (moinho de bolas) até que todo material passasse na peneira de abertura de malha n.º 0,075mm. De todas as adições ao clínquer, o gesso não pode deixar de ser adicionado, pois controla a pega e endurecimento do cimento, e as demais adições (escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) conferem ao cimento uma qualidade a mais (resistência a sulfatos, maior durabilidade ao concreto e impermeabilidade).

Para a realização dos ensaios físicos, químicos, mineralógicos, procedeu-se ao sistema de redução da amostra de gesso pelo processo de repartidor de amostra, para obter a quantidade necessária a cada ensaio.

Realizou-se a composição química e mineralógica do gesso no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.1.4 Hidróxido de sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio como ativador alcalino da escória de aciaria natural LD (EACN) surgiu como a primeira tentativa para empregar a EACN como concreto em estrutura

de concreto armado, com base na tese de John (1995), que observou, em sua pesquisa, que o aumento do hidróxido de sódio na escória de alto-forno significava aumento da resistência à compressão e era mais significativo quando o teor de Ca(OH)_2 fosse maior que zero

Não foi necessário realizar ensaio para determinar a composição química do hidróxido de sódio (NaOH), pois foi fornecida pelo fabricante.

A composição química do hidróxido de sódio (NaOH), ou soda cáustica, dissolvida em água, é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Característica do hidróxido de sódio (NaOH) dissolvida em água

	Soda cáustica (%)
Na_2O	37,97
H_2O	62,04

Fonte: Empresa VETEC Química Fina Ltda. (2014).

Adotaram-se 18,72 gramas de (NaOH), o que corresponde a 3% de 624 gramas, que é a quantidade de cimento para realizar o ensaio de resistência à compressão de axial e moldar duas séries de seis corpos de prova de 5cm de diâmetro e 10cm de altura.

3.1.5 Cal hidratada Ca(OH)_2

A cal hidratada é o pó obtido da hidratação da cal virgem, constituído essencialmente 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.

O óxido de cálcio é obtido por decomposição térmica de calcário (900°C), segundo a transformação representada pela equação química Equação 3.1.

Equação 3.1

O cálcio pode ser aplicado em ligas de chumbo e de alumínio como agente redutor na obtenção de outros metais, por intermédio dos seus óxidos, como desoxidante para o ferro, aço, cobre e suas ligas. A cal hidratada utilizada foi do tipo CHI, adquirida no comércio de Vitória-ES.

A quantidade de cal de 31,2 gramas passou antes por um processo de redução pelo quarteador de amostra, até obter a quantidade necessária. Isso corresponde a 5% de 624 gramas para a moldagem de seis CP'S de 50mm x 100mm, para realizar o ensaio de resistência à compressão.

3.1.6 Água

Utilizou-se a água procedente da rede pública da Companhia Espírito-Santense de Saneamento (CESAN). De acordo com a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), não foi necessária a análise química da água, pois é proveniente de rede pública de água potável. A quantidade de água utilizada foi 300ml para cada traço de argamassa, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), nos ensaios de resistência à compressão de axial, quando se utilizaram hidróxido de sódio e cal, EACN, EACM1 e EACM2a e EACM2.

3.1.7 Areia quartzosa

A areia quartzosa, referenciada nesta pesquisa, foi extraída do rio Tietê nas frações, conforme se mostra na Tabela 3.5, na região do município de São Paulo, Brasil, produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2012), para a produção de argamassa de cimento com escória de aciaria natural e modificada na confecção de corpos de prova de cimento, para determinar a resistência à compressão axial.

Tabela 3.5 - Frações granulométricas

Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Denominação
2,4mm e 1,2mm	Grossa
1,2mm e 0,6mm	Média grossa
0,6mm e 0,3mm	Média fina
0,3mm e 0,15mm	Fina

Fonte: NBR 7214 (ABNT, 1982).

A quantidade de cimento, água e areia normal, para realizar argamassa e moldar seis corpos de prova cilíndricos diâmetro interno de $(50 \pm 0,2\text{mm})$ e altura de $(100 \pm 0,5\text{mm})$ para o ensaio de resistência à compressão, foi especificada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), conforme se ilustra na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Quantidade de materiais para preparação de argamassa para seis corpos de prova

Material	Massa para mistura (g)
Cimento Portland	$624 \pm 0,4$
Água	$300 \pm 0,2$
Areia normal	
Fração grossa	$468 \pm 0,3$
Fração média grossa	$468 \pm 0,3$
Fração média fina	$468 \pm 0,3$
Fração fina	$468 \pm 0,3$

Fonte: NBR 7215 (ABNT, 1996).

3.1.8 Escória de aciaria natural LD (EACN)

A EACN foi obtida em uma empresa que está localizada na Serra, na região da Grande Vitória-ES.

Os estudos de caracterização, desempenho das propriedades mecânicas das argamassas e expansão do cimento CP V-ARI foram realizados com a escória com uma granulometria inferior a $0,075\text{mm}$. Também foi utilizado no processo pirometalúrgico para obter a EACM1 e EACM2.

3.1.9 Escória de aciaria LD modificada 1 (EACM1)

Foi adotada a sigla EACM1 para EACN modificada por um processo pirometalúrgico, que altera suas características químicas, mineralógicas e sua estrutura, na tentativa de ficar similar à escória de alto-forno. A EACN na granulometria inferior a $0,075\text{mm}$ foi a matéria-prima usada no cadinho e aquecida até o ponto de fusão junto com a sílica, alumina e carvão. Após o processo de fusão, foi resfriada bruscamente. Esse processo será detalhado na metodologia da EACM1.

3.1.10 Escória de aciaria LD modificada 2a (EACM2a)

A escória de aciaria LD modificada 2a (EACM2a) foi necessária, tendo em vista que EACM1 não alcançou a composição química similar à da escória de alto-forno. A EACM2a também foi obtida por um processo pirometalúrgico. A matéria-prima usada no cadinho para o processo de fusão a EACN ocorreu em forma de pelotas, obtida pelo processo de sinterização da EACN com a sílica, alumina e carvão. Após o processo de fusão, foi resfriada bruscamente. Esse processo será detalhado na metodologia da EACM2a.

3.1.11 Escórias de aciaria LD modificada 2b (EACM2b)

A escória de aciaria LD modificada 2b (EACM2b) foi necessária, tendo em vista que EACM2a não atendeu à área específica que ficou inferior à do cimento. A EACM2b possui área específica dos grãos maior que a EACM2a, e utilizou-se o moinho de bolas para o aumento dessa área específica. Esse processo será detalhado na metodologia da EACM2b.

A seguir serão apresentados métodos adotados para a coleta, preparação e caracterização do cimento, clínquer, gesso, hidróxido de sódio, cal, água, areia quartzosa, EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b; métodos para avaliar o desempenho mecânico de argamassas com ativação alcalina diretamente na EACN sem cimento, somente com NaOH e Cal; métodos para avaliar a propriedade mecânica e de durabilidade de argamassa de cimento com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b. Verificam-se a expansibilidade, a pega da EACN, a atividade pozolânica e a análise térmica da EACN, EACM1, EACM2a. Determinam-se também o calor de hidratação, o grau de vitrificação e reatividade da EACM2b; por último, a metodologia para utilizá-la como adição ao clínquer e avalia-se a propriedade mecânica de argamassas com clínquer com adição de 40% de EACM2b.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

A escória de aciaria LD natural, coproduto de uma siderúrgica da Grande Vitória-ES, depois de britada e separada em faixas granulométricas adequadas, é submetida a um tratamento para redução de expansão, o qual consiste em incentivar a reação dos óxidos livres mediante a reação destes com o ar e a água, por meio de um processo de umectação e aeração da escória durante três meses. Após o resfriamento, os coprodutos são encaminhados até a Planta de Beneficiamento para a separação do material metálico e fração granulométrica. Durante o período de tratamento para a redução da sua capacidade de expansão, a escória de aciaria é permanentemente monitorada mediante ensaios de laboratório e testes previstos pelo método de ensaio, para determinar o potencial de expansão da mistura, determinado pela norma DNIT 113/2009 ME – Pavimentação Rodoviária – Agregado artificial Avaliação do Potencial de Expansão da Escória de Aciaria – Método de Ensaio. O limite estabelecido no Brasil para o ensaio DNIT 113/2009 ME, de acordo com a especificação da norma DNER-PRO 264/94, é de 3%. Ao atingir um valor de expansão que atenda às normas técnicas, o processo é interrompido e o material é disponibilizado para o mercado – Escória de Aciaria com Redução de Expansão.

Esse foi o material de interesse deste trabalho, o qual passou por ativação alcalina e por processos metalúrgicos, no intuito de torná-la própria para o uso como substituto parcial do cimento ou como adição ao clínquer. O termo natural usado para a escória de aciaria LD foi adotado por ser um material disponível no pátio da indústria siderúrgica após a etapa do convertedor a oxigênio, denominada escória de aciaria da produção de aço, que passou por britagem e umidificação intercalada, ficando no intervalo de granulometria de 0mm a 19mm, sendo comercializada a R\$ 3,00 (três reais) a tonelada. Esse preço viabiliza a sua reutilização em processos siderúrgicos, pois o preço de venda das escórias de alto-forno é R\$ 60,00 (sessenta reais) a tonelada. Nos dois preços, não está incluído o preço do frete para transporte. Portanto, a coleta foi feita no pátio da siderúrgica. Em seguida, pagou-se a uma transportadora para levar amostra de 12 sacos de 50kg de escória, de Vitória-ES para o Laboratório de Tratamento de Minério do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da USP, São Paulo.

3.2.1 Métodos de caracterização da EACN em forma de agregados

A caracterização física foi realizada com a escória processada em forma de agregado, com granulometria de 0mm a 19mm, de acordo com o produto vendido pela usina siderúrgica. Realizou-se o ensaio de composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), no qual se determinaram a dimensão máxima do agregado e o módulo de finura. Os ensaios de massa específica e absorção de água da escória em forma de agregados foram realizados de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

3.2.2 Método para se obter a escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm.

A amostra de 50kg com granulometria de 0mm a 19mm, de acordo com o produto vendido pela usina siderúrgica, inicialmente foi toda seca em estufa a 105°C e, em seguida, foi para moagem, a fim de reduzir a granulometria para valores inferiores a 0,075mm, sendo o material a ser utilizado para os ensaios de caracterização e para o processo pirometalúrgico, para obter a EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b. Inicialmente, passou-se toda a amostra no moinho de rolos (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Moinho de rolos utilizado

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Realizou-se o peneiramento no peneirador elétrico (Figura 3.12) de abertura de malha n.º 2,36mm.

Figura 3.12 - Peneirador elétrico com peneira de abertura de malha n.º 2,36mm

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

O material retido na peneira n.º 2,36mm voltou para o moinho de rolos até que toda a amostra passasse no peneirador elétrico de peneira n.º 2,36mm. Verificou-se que 1% da amostra era aço puro (Figura 3.13) e que não teve como fazer a redução da amostra no moinho de rolos. Os pedaços de aço foram retirados da amostra.

De posse da escória de aciaria com diâmetro inferior a 2,36mm, distribuiu-se toda a amostra sobre a bancada de concreto para proceder à homogeneização da amostra. Desta amostra espalhada, procedeu-se à coleta em saco plástico com 2,5kg, conforme se ilustra na Figura 3.14. Obtiveram-se 20 sacos da amostra.

Figura 3.13 - Pedacos de aço retirados da amostra

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.14 - Pesagem da amostra

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Colocou-se, em seguida, um saco de 2,5kg da amostra obtida na etapa anterior no moinho de esferas de aço (moinho de bolas – Figura 3.15) durante 30 minutos, conforme se ilustra. Decorridos 30 minutos, procedeu-se ao peneiramento na peneira de abertura de malha n.º 0,075mm.

Pesou-se o material que passou e foram obtidos 801,5 gramas, o que corresponde a 32,06% da amostra inicial. A segunda amostra de escória de aciaria de 2,5kg foi colocada no moinho de esferas por 60 minutos e foram obtidos 39,34%, passando na peneira n.º 0,075mm de abertura de malha. O material que ficou retido na peneira 0,075mm das duas amostras iniciais retornou para o moinho de esferas, até que toda a amostra passasse na peneira de abertura de malha 0,075mm. Procedeu-se, dessa forma, até que a amostra inicial de 50kg passasse totalmente pela peneira de 0,075mm de abertura de malha. Na Figura 3.16, apresentam-se três tonalidades de escória moída no moinho de esferas: (a) mais clara, que foi a que primeiro passou na peneira 200; (b) e (c) apresentam coloração mais escura por terem ferro aderido as suas partículas e foram obtidas da moagem da escória que ficou retida na peneira 0,075mm na primeira, segunda ou terceira etapas.

Figura 3.15 - Moinho de esferas

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.16 - Amostras de escória de aciaria moída que passaram na peneira n.º 200

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Ao final do processo, a mostra inicial de 50kg foi guardada em sacos com 2,5kg. A escória contida nos sacos foi homogeneizada, espalhando-a sobre a bancada de concreto, umas sobre as outras, formando uma pilha contínua, conforme se mostra na Figura 3.17. Retirou-se da parte central da pilha uma amostra representativa de 2,5kg, que passou pelo repartidor de amostra (Figura 3.18), até reduzir a quantidade de 50 gramas), para a realização dos ensaios de difração FRX, DRX, MEV, análise química e análise térmica.

Figura 3.17 - Homogeneização da amostra de escória de aciaria LD, em pilhas contínuas

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.18 - Repartidor de amostra

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

3.2.3 Métodos de caracterização da escória de aciaria LD (EACN) com granulometria inferior a 0,075mm.

3.2.3.1 Caracterização física

Na caracterização física da EACN com granulometria inferior a 0,075mm, realizaram-se os ensaios de:

- finura de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012) – determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n.º 200);
- finura pela área específica determinada pelos métodos Blaine;
- granulometria dos grãos, realizada com o granulômetro a laser;
- massa específica.

A finura por meio da peneira 75 μm determina o percentual retido na peneira 75 μm em relação à massa inicial de 50 gramas após uma sequência de peneiramento de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012). Todavia, esse ensaio não foi realizado tendo em vista que toda amostra passa na peneira 75 μm ;, portanto, a finura é zero por esse método.

A finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine), que mede a área específica com base em um fluxo contínuo de ar, limitando-se a superfície externa das partículas de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015) – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Esse ensaio de finura pelo método de permeabilidade ao ar foi realizado no laboratório da fábrica de cimento HOLCIM, situada no município da Serra-ES.

Determinou-se a curva granulométrica da amostra de EACN, como granulômetro a *laser* modelo CILAS – Modelo 1064. Essa técnica baseia-se no princípio de que, quanto menor o tamanho da partícula, maior é o ângulo de difração de um feixe luminoso que atravessa um grupo de partículas. O cálculo do tamanho das partículas é feito com transformações matemáticas complexas (transformada de Fourier inversa)

utilizando uma estatística de distribuição de tamanhos desse grupo de partículas (DAL MOLIN, 2010). Esse ensaio de granulometria a *laser* foi realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

A massa específica foi determinada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001) (Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica). Nesse ensaio, utiliza-se o frasco volumétrico de Le Chatelier, em que se coloca o xilol, e, em seguida, realiza-se a leitura da diferença de volume provocada pela adição de cimento. A massa específica é determinada pela divisão de massa em gramas inicial de cimento colocada no frasco volumétrico de Le Chatelier pela diferença de volume em cm^3 provocada.

3.2.3.2 Caracterização química

A composição química da amostra das escórias EACN foi realizada pelo método de fluorescência de raios X (FRX), realizada na empresa Panalytical, em São Paulo-SP. O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento que determina quantitativamente os elementos contidos em uma determinada amostra, através da aplicação de raios X na superfície da amostra e posterior análise dos fluorescentes. A preparação das amostras a serem analisadas ocorre primeiramente por meio da pulverização do material e secagem deste em estufa, por 24 horas, a uma temperatura média de 100°C . Passada essa fase, o material foi misturado com uma resina, em uma proporção de 7g de material para 1,4g de resina, e prensado em forma de pastilhas que são analisadas por feixes de raios X no equipamento Axios, que é um espectrômetro de fluorescência de raios X de comprimento de onda dispersivo, que permite a identificação dos elementos presentes e a quantificação (Figura 3.19). Utilizaram-se os seguintes programas: Super Q – para a construção de aplicações utilizando curvas de calibração; Ommian – para a análise semiquantitativa; e, por último, WROXI – para a análise de óxidos em uma grande variedade de minerais.

Figura 3.19 - Espectrômetro Axios FRX (WDXRF) de baixo consumo de energia (1 kW)

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Determinou-se o teor de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ presente na escória pela NBR NM 13 (ABNT, 2012) – Determinação do óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol. O ensaio de resíduo insolúvel foi realizado de acordo com a NBR NM 15 (ABNT, 2012) – Determinação de resíduo insolúvel. O teor de anidrido sulfúrico SO_3 foi determinado pela NBR NM 16 (ABNT, 2012). A determinação da perda ao fogo foi de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012). Nessa perda ao fogo, as matérias-primas foram pulverizadas e colocadas em estufa a 100°C - 110°C , por 24 horas. Após secos, os materiais foram pesados em cadinhos de porcelana e submetidos à mufla à temperatura de 990°C - 1010°C , por 24 horas, e pesados novamente depois de passado esse tempo. Determina-se a perda ao fogo pela diferença de massa do material contido no cadinho de porcelana antes e depois de submetido à mufla, dividido pela massa seca, depois de sair do cadinho, em porcentagem.

O teor de enxofre – S determinado pela NBR NM 19 (ABNT, 2012).

Esses ensaios de análise química foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Os ensaios de anidrido sulfúrico (SO_3) e de perda ao fogo (PF) foram também determinados no ensaio de fluorescência de raios X (FRX).

3.2.3.3 Atividade pozolânica

A atividade pozolânica da EACN foi feita pelo método Chapelle modificado. Nesse método, o resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico (mg CaO/g pozolana) de acordo com a NBR 15895 (ABNT, 2010), para verificar a sua aplicação pela indústria de cimento.

O ensaio consiste em colocar 2g de CaO, 1g da escória de aciaria e 250ml de água fervente (100°C) isenta de CO₂ dentro de um recipiente por aproximadamente 16 horas, para que o CaO reage com a escória de aciaria, pois a reação é muito lenta à temperatura ambiente (duração em torno de duas semanas). Após esse tempo, a quantidade de CaO livre é determinada por meio de extração de sacarose e titulação com solução de HCl. Quanto maior o consumo de CaO, mais pozolânico é o material. De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), o valor mínimo de fixação de Ca(OH)₂ em 1g da escória deve ser superior ou igual a 330mg para ser considerado material pozolânico.

A NBR 12653 (ABNT, 2015) define pozolana como material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividida e à presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

As pozolanas são usadas nos cimentos com adições chamados de cimento Pozolânico denominado no Brasil de CP IV, conforme se observa na Tabela 2.1.

A determinação da atividade pozolânica foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

3.2.3.4 Análise térmica

A análise térmica é conceituada como uma série de técnicas para aferir as propriedades físicas dos materiais em função da temperatura, quando estes são submetidos a um ciclo térmico. As propriedades físicas dos materiais incluem massa, temperatura, entalpia, dimensão, características dinâmicas e outras (RAMACHANDRAN, 1969). Na Tabela 3.7, apresentam-se os parâmetros medidos e as técnicas utilizadas.

Tabela 3.7 - Espectrômetro Axios FRX (WDXRF) de baixo consumo de energia (1 kW)

Parâmetro medido	Definição técnica
Massa	Termogravimetria (TG)
Variação de massa (dm/dt)	Termogravimetria diferencial (DTG)
Temperatura (T_o-T_r)	Análise termodiferencial (DTA)
Entalpia (dH/dt)	Calorimetria diferencial exploratória (DSC)
Deformação (volume ou comprimento)	Análise termomecânica (dilatometria)
Condutividade térmica	Deteção de gases envolvidos (EGD)
Espectrometria ou cromatografia	Análise de gases envolvidos (EGA)

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Na análise térmica da EACN, utilizaram-se as técnicas termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG). A análise termogravimétrica (TG) é utilizada para determinar mudanças na massa de uma amostra, originada de uma transformação química ou física, em função da temperatura ou tempo. Os principais itens medidos nessa técnica são evaporação, sublimação, decomposição, oxidação, redução e adsorção e dessorção do gás (RAMACHANDRAN, 1969).

A derivada termogravimétrica (DTG) é usualmente calculada pela taxa de mudança de massa com o tempo, dm/dt, para que a curva termogravimétrica seja interpretada de forma mais eficaz. Esse ensaio de análise térmica diferencial e termogravimétrica simultânea (TG/DTG) da EACN foi realizado com base em diretrizes gerais da ASTM E 794/06 (2012) – Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-093) no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

A análise térmica da EACN permite auxiliar no método titulométrico para o cálculo do teor de CaO livre e avaliar outros fenômenos que ocorrem durante essas análises. O equipamento utilizado foi o NETZSCH Thermal Analysis STA 449 F3 Jupiter, empregando-se material passante na peneira n.º 200 (0,075mm) NBR 11579 (ABNT, 2013), cadinho de alumina sem tampa, com fluxo de gás de 50 ml/min de nitrogênio de aquecimento de 10°C/min até 1000°C.

O teor de CaO livre presente na escória EACN foi obtido pelo método proposto na NBR NM 13 (ABNT, 2012) – Cimento Portland – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol. Nesse método, não se dissocia o Ca(OH)_2 do CaO livre total, pois o solvente etilenoglicol dissolve tanto o CaO livre como o $[\text{Ca(OH)}_2]$; portanto, pelas curvas de TG/DTG da análise térmica, determina-se o teor de cálcio ligado ao $[\text{Ca(OH)}_2]$ e, em seguida, calcula-se CaO livre dissociado do $[\text{Ca(OH)}_2]$.

3.2.3.5 Caracterização ambiental

As análises de lixiviação e solubilização da EACN serão realizadas de acordo com a norma NBR 10005 (ABNT, 2004) – Procedimento para a obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos – e pela norma NBR 10006 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos. A classificação do resíduo será pela NBR 10004 (ABNT, 2004) – Resíduos sólidos – classificação. Esses ensaios de análises de lixiviação e solubilização foram realizados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

3.2.3.6 Caracterização mineralógica

As fases mineralógicas foram feitas por difração de raios X (DRX) que representam a ocorrência de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos integrantes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Em um material em que os átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, característica das estruturas cristalinas, o fenômeno da

difração de raios X ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a Lei de Bragg (CULLITY, 1978).

Realizou-se a análise das fases mineralógicas da EACN utilizando o difratômetro multifuncional sistema Empyrean, de acordo com a Figura 3.20. O difratômetro é constituído basicamente por um tubo de raios X, um porta-amostra em que incide a radiação e um detector móvel. O detector utilizado para as medidas é o Pixcel, que pode ser utilizado em modo linear com a tecnologia RTMS (Real Time MultipleStrip) e permite a aquisição de um difratograma até uma centena de vezes mais rápido quando comparado a um detector pontual.

A difratometria é uma técnica que verifica a eficiência do resfriamento da escória, pois, quando a escória é cristalina, apresenta vários picos cristalinos.

Os programas que se seguem foram utilizados para as análises das amostras estudadas:

- Data Collector 5.2 para o controle do difratômetro e coleta dos dados.
- Data Viewer 1.3b para a visualização rápida dos difratogramas (este programa é livre).
- High Score Plus 4.0 tanto para a identificação das fases (utilizando a base de dados PDF4+ 2013, PAN-ICSD e COD) quanto para a análise por Rietveld.

Esse ensaio de análise das fases mineralógicas foi realizado na empresa Panalytical, Santo Amaro, São Paulo.

Figura 3.20 - Difratômetro multifuncional sistema Empyrean

Fonte: Empresa Panalytical (2015).

Esse ensaio de análise das fases mineralógicas foi realizado na empresa Panalytical, Santo Amaro, São Paulo.

3.2.3.7 Caracterização microestrutural

Utilizou-se a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo XL-30 Philips (Figura 3.21), para observar na EACN a morfologia e textura das partículas, e também se utilizou a microsonda EDS (Sistema de Dispersão de Energia), que fornece a microanálise da composição química em um determinado ponto da amostra.

O princípio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons para examinar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas repetidas, e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Entre os 12 sinais emitidos, os mais utilizados para a obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e/ou dos elétrons retroespalhados (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Figura 3.21 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo XL 30 Philips

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

3.2.4 Método da expansibilidade da EACN

Realizou-se a expansibilidade da escória de aciaria LD (EACN) a quente e a frio, para comparar com o ensaio de expansibilidade do cimento CP V-ARI puro. A amostra da EACN tinha diâmetro inferior a 0,075mm. O ensaio seguiu a NBR 11582 (ABNT, 2012) – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Esse método é usado para medir a expansão em cimentos e, nesta pesquisa, foi adaptado para as escórias. A pasta para EACN foi feita com 70% de escória de aciaria natural e 30% de cimento CP V-ARI. Antes de realizar o ensaio de expansibilidade, determina-se a pasta de consistência normal de acordo com a NBR NM 43 (ABNT, 2003), em que se obtém a quantidade de água necessária para realizar o ensaio de expansibilidade.

Moldaram-se seis agulhas de Le Chatelier, das quais três para o ensaio a frio e três para o ensaio a quente (Figura 3.22), os quais foram realizados pela equipe do Laboratório de Construção Civil da UFES (LEMAC/UFES).

Figura 3.22 - Ensaio de expansibilidade a quente

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

3.2.5 Método de avaliação do tempo de pega da mistura do cimento CP V-ARI com substituição parcial por EACN

Para determinar o tempo de pega do cimento (início e fim de pega), é necessário primeiramente determinar a quantidade de água para adicioná-la ao cimento Portland e elaborar a pasta de cimento. Essa quantidade de água é obtida no ensaio de pasta de consistência normal.

3.2.5.1 Método da pasta de consistência normal

A NBR NM 43 (ABNT, 2003) estabelece o procedimento para determinar a pasta de consistência normal do cimento Portland. De acordo com essa norma, define-se pasta de cimento de consistência normal quando a sonda Tetmajer do aparelho de Vicat (Figura 3.23) estacionar a (6 ± 1) mm da placa de PVC. Essa pasta de cimento é preparada com $(500 \pm 0,5)$ gramas de cimento, adicionando-se massa de água por tentativa.

Figura 3.23 - Aparelho de Vicat com sonda Tetmajer – Determinação da pasta de consistência normal

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

A mistura realiza-se no misturador (Figura 3.24), despeja-se primeiramente o cimento na cuba e, em seguida, adiciona-se água e deixa em repouso por 30 segundos. Mistura-se durante 30 segundos, em velocidade lenta, desliga-se o misturador e raspa as paredes da cuba com espátula de borracha, para que toda a pasta aderida nas paredes fique no fundo. Tal operação deve ser realizada em 15 segundos. Em seguida, liga-se o misturador durante um minuto, à velocidade rápida.

Figura 3.24 - Misturador

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Transfere a pasta de cimento preparada para o molde. Coloca-se o molde no aparelho de Vicat e desce a sonda de Tetmajer até que o extremo da sonda entre em contato com a superfície da pasta e se fixe nessa posição. Solta-se a sonda por 30 segundos; em seguida, realiza-se a leitura para verificar se a sonda estacionou a (6 ± 1) mm da placa de PVC (Figura 3.23). Caso não tenha ficado nesse intervalo, elabora-se outra pasta de cimento com mais ou menos água em função do resultado da sonda Tetmajer. Realiza-se o número necessário de pasta de cimento até que atenda à exigência da norma: estacionar a (6 ± 1) mm da placa de PVC.

3.2.5.2 Método da determinação do tempo de pega

Realizaram-se ensaios de tempo de pega para a pasta de cimento CP V (início e fim de pega) com e sem substituição parcial do cimento por EACN. A norma brasileira NBR NM 65 (ABNT, 2000) estabelece a determinação do tempo de pega da pasta de cimento em duas etapas.

Na primeira etapa, que compreende a determinação do início de pega, prepara-se uma pasta de cimento da seguinte forma: pesam-se 500 gramas de cimento e despejam-se no misturador (Figura 3.24). Em seguida, adiciona-se água que foi determinada para a pasta de consistência normal e realiza-se a mistura no misturador. Enche-se o molde com a pasta de cimento e instala no aparelho de Vicat (Figura 3.25) com a placa base. Deixa descer a agulha até que encoste à pasta de cimento e trave. Destrave a agulha para que a agulha desça rapidamente de tal forma, que a agulha penetre verticalmente na pasta. Realizar a leitura após 30 segundos do instante um

que a agulha foi solta. Se a leitura não estiver entre 4 ± 1 mm, repetir o ensaio de penetração a cada 10 minutos no mesmo corpo de prova, em posições que estejam afastadas 10 mm da borda do molde e entre elas. Manter o aparelho de Vicat na câmara úmida durante todo o ensaio de início e fim de pega (Figura 3.25).

Figura 3.25 - Ensaio de Pega – Câmara úmida

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Ao aproximar do início de pega, reduzir o tempo de leitura para 5 minutos. Registram-se todas as leituras e, por interpolação, determina-se o início de pega, isto é, quando a agulha estacionar a (4 ± 1) mm da placa base.

A segunda etapa compreende a determinação do fim de pega. Inverte-se o molde cheio, utilizado para o início de pega, e procede-se à descida da leitura no aparelho de Vicat, cujo intervalo entre leituras pode ser de 30 minutos. O fim de pega ocorre quando a agulha penetra 0,5 mm na pasta. Quando estiver próximo ao fim de pega, reduz-se o intervalo de tempo entre leituras da penetração da agulha do aparelho de Vicat.

3.2.6 Método de análise do comportamento mecânico da EACN com ativação com hidróxido de sódio e cal

Avaliou-se a resistência à compressão da escória de aciaria LD, ativada com hidróxido de sódio e cal, por meio do ensaio de resistência à compressão especificada na NBR

7215 (ABNT, 1996), e comparou-se com o traço de referência feito com cimento e areia normal. Utilizou-se o cimento CP V-ARI, que tem 5% de material carbonático.

Compararam-se os valores obtidos da resistência à compressão das argamassas com substituição do cimento com teores de 6%, 10%, 20% e 34% com os exigidos pela NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento CP II-E 32 e CP II-E 40.

3.2.7 Método de análise do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição parcial por EACN

Avaliou-se a substituição do cimento por escória pelo desempenho mecânico, com ensaios de resistência à compressão das argamassas de cimento CP V-ARI de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Preparou-se corpo de prova cilíndrico de 5cm x 10cm de argamassas com substituição do cimento em teores de 6%, 10%, 20% e 34% por escória de aciaria LD. Preparou-se também uma argamassa de cimento CP V-ARI sem adições como referência. Nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, realizou-se o ensaio de resistência à compressão da argamassa de referência, enquanto, nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, o das argamassas com substituição do cimento na prensa do laboratório LEMAC/UFES (Figura 3.26).

Figura 3.26 - Prensa para ensaio de resistência à compressão LEMAC/UFES

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Compararam-se os valores obtidos da resistência à compressão das argamassas com substituição do cimento com teores de 6%, 10%, 20% e 34% com os exigidos pela

NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento Portland composto CP II-E 32 e CP II-E 40 e, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991), para o cimento de Alta Resistência Inicial CP V-ARI.

3.2.8 Método pirometalúrgico para se obter a escória de aciaria LD modificada M1 (EACM1)

Foi adotada a sigla EACM1 para EACN modificada por um processo pirometalúrgico, que altera suas características químicas, mineralógicas e sua estrutura, na tentativa de ficar similar à escória de alto-forno.

O processo pirometalúrgico tem o objetivo de obter um material granular, com baixo teor de ferro, amorfo e pouco cristalino, e com composição similar à da escória de alto-forno. Para isso, deve-se promover a redução dos óxidos de ferro a ferro metálico, que deve ser separado da escória, de modo que devem ambos estar na forma líquida. A fim de atingir esses objetivos, o processo escolhido foi a redução carbotérmica dos óxidos de ferro, seguida de ajuste da composição, fusão da carga e, finalmente, vazamento da carga líquida em condições de resfriamento rápido. A escória de aciaria (EACN) apresenta alta temperatura *liquidus*, em torno de 1800°C, como determina o *software* FactSage©. Se os óxidos de ferro dessa escória forem removidos sem nenhum ajuste de composição, a escória obtida terá temperatura *liquidus* acima de 2.000°C, impossibilitando sua fusão em equipamentos convencionais, o que torna necessária a adição de componentes com o objetivo de adequar a temperatura *liquidus* ao equipamento disponível (forno de indução).

A quantidade em massa das adições de sílica e alumina foi calculada com base no diagrama de fases, com o objetivo de obter temperatura *liquidus* adequada e aproximar composição química da escória de aciaria LD da composição química da escória de alto-forno, conforme Tabela 3.8. A quantidade de carvão foi calculada de modo a ser capaz de reduzir totalmente os óxidos de ferro presentes.

Tabela 3.8 - Composição química da escória de aciaria natural e a escória de alto-forno da empresa siderúrgica da Serra-ES

	Óxido	Abreviatura	Escória aciaria LD	Escória de alto-forno
Cal	CaO	C	38,00	41,60
Sílica	SiO ₂	S	8,54	33,65
Alumina	Al ₂ O ₃	Al	7,41	12,42
Ferro	FeO	F	25,1	0,45
	Fe ₂ O ₃			
Magnésio	MgO	M	9,6	7,95
Sódio	Na ₂ O	N	0,104	
Potássio	K ₂ O	K	0,0536	
Enxofre	SO ₃	S	0,324	
Anidrido fosfórico	P ₂ O ₅	P	1,44	
Manganês	MnO	Mn	3,4	
Titânio	TiO ₂	Ti	0,381	0,73
Vanádio	V ₂ O ₅	V	0,102	
Cromo	Cr ₂ O ₃	Cr	0,224	
Níquel	NiO			
Estrôncio	SrO			
Zircônio	ZrO ₂			
Nióbio	NB ₂ O ₅			
Potássio	K ₂ O			
Cloro	Cl			
Perda ao fogo	PF		5,20	
Basicidade			4,45	1,24

Fonte: Elaborada pelo autor (2015).

Para 1000 gramas de escória de aciaria LD que passou na peneira de 0,075mm (Figura 3.27), determinaram-se, pelo diagrama de fases CaO, SiO₂ e Al₂O₃, 150 gramas de sílica (Figura 3.28), 350 gramas de alumina (Figura 3.29) e 60 gramas de carvão vegetal (Figura 3.30).

Figura 3.27 - Pesagem da escória de aciaria LD

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.28 - Pesagem da sílica

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.29 - Pesagem da alumina

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.30 - Pesagem do carvão vegetal

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Em seguida, misturou-se a escória com a sílica, alumina e o carvão mineral e procedeu-se à homogeneização. Colocou-se a mistura no cadinho de grafite (Figura 3.31), que funciona como susceptor da indução, e este foi colocado entre as bobinas

do forno de indução (Forno Inducto Therm), conforme se ilustra na Figura 3.32. Na Figura 3.33, mostra-se o equipamento que gera alta potência no forno.

Figura 3.31 - Cadinho de grafite

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.32 - Forno de indução

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Figura 3.33 - Equipamento que gera alta potência no forno

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Na Tabela 3.9, apresentam-se o tempo decorrido e a potência aplicada ao forno, com mistura de escória de aciaria LD, mais alumina, sílica e carvão. Observa-se que a potência foi mantida em níveis baixos na primeira hora da carga no forno, para permitir

a ocorrência da reação de redução dos óxidos de ferro pelo carbono do carvão, em temperaturas abaixo da temperatura de fusão da carga. A reação, ocorrendo ainda no estado sólido, acima de 900°C , permite que os gases gerados (CO , CO_2 e matéria volátil do carvão) sejam eliminados sem grandes problemas. Se a escória fundir antes do fim da reação, os gases causarão a espumação da escória e sérios problemas operacionais.

Na prática, observou-se que, a temperaturas acima de 1.100°C , ocorre intensa evolução gasosa, com arraste de material fino para fora do forno, o que pode ter causado diferenças entre a composição final objetivada e aquela obtida.

Tabela 3.9 - Tempo decorrido e potências em KW aplicadas ao forno

Tempo em minuto	Potência	Temperatura
0	12KW	
48	15KW	1100°C
57	22KW	1280°C
64	22KW	1440°C
69	22KW	1505°C
72	22KW	1550°C
75	24KW	1600°C

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Ao atingir a temperatura de 1600°C , o cadinho foi retirado do forno e o metal e a escória foram vazados em lingoteira de ferro fundido, como se ilustra na Figura 3.34: (a) e (b).

Figura 3.34 - (a) Cadinho sendo retirado do forno; (b) Escória vertida em uma lingoteira de ferro fundido

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Depois de ter sido despejada a escória líquida dentro da lingoteira, lançou-se água até o resfriamento total da escória e prosseguiu com sua granulação, conforme se mostra na Figura 3.35.

Figura 3.35 - (a) Escória líquida resfriada dentro da lingoteira; (b) Granulação da escória

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

A fração metálica corresponde a 4,6% da amostra final. Observou-se que uma parte da fração metálica apresentava-se aglomerada a partículas não metálicas da escória e que grande parte da partícula metálica estava presa aos grãos da não metálica, dificultando a sua separação.

A amostra, em seguida, foi seca em estufa à temperatura de 105°C a 110°C pelo período de 24 horas, e resfriada à temperatura ambiente. Levou-se a amostra para a moagem no moinho de esferas, até que todo o material passasse na peneira 0,075mm.

3.2.9 Método pirometalúrgico para se obter a escória de aciaria LD modificada M2a(EACM2a)

Para obter a EACM2a, foi preciso determinar a quantidade de sílica, alumina e carvão necessário para mudar a composição química da EACN para EAF (Tabela 3.8). Para isso, utilizou-se o *software* Factsage versão 6.4 do LPP-DIMET-IPT. O Factsage é um programa com uma série de módulos de informação, banco de dados termodinâmico integrado, cálculo e manipulação que acessam várias substâncias puras e bancos de dados de solução da EACN. No referido programa, utilizou-se a composição química da EAF (CaO=41,60%, SiO₂=33,65%, Al₂O₃=12,42%, FeO=0,45%, MgO=7,95% e

TiO=0,73%) produzida pela siderúrgica, na qual foi coletada a amostra da EACN, realizando pequenos ajustes, tendo em vista que foram utilizados apenas os óxidos CaO, SiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO e MnO.

Os valores encontrados, com o auxílio do *software*, necessários para obter a EACM2a com composição química similar à da escória de alto-forno (EAF), considerando 3000 gramas EACN, foram Alumina Al₂O₃ = 123(g), Sílica SiO₂= 705(g) e Carvão = 136,5 (g).

Procedeu-se à homogeneização da mistura EACN com alumina, sílica e carvão para, em seguida, realizar o processo de pelletização de EACN com alumina, sílica e carvão, em uma peneira rotativa (Figura 3.36(a)), com o objetivo de obter pelotas, um aglomerado de finos. Depois as pelotas são colocadas no cadinho de grafite e transportadas para o forno elétrico de mufla, onde as pelotas permaneceram por cinco horas a uma temperatura de 1070°C. A câmara do forno elétrico de mufla foi circulada por nitrogênio (N₂) passante, que teve como objetivo reduzir os óxidos do ferro pelo carbono, conferindo às pelotas alta resistência mecânica e características metalúrgicas, conforme se ilustra na Figura 3.36(b).

Figura 3.36 - a) Peneira rotativa (b) Forno elétrico de mufla

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

No final do processo de pelletização, obtiveram-se 2.715,00 (g) de pelotas, de acordo com a Figura 3.37.

Figura 3.37 - Pelotas retiradas do forno elétrico de mufla

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Parte das pelotas, 1.650g, foi colocada no cadinho de grafite até enchê-lo completamente. Em seguida, o cadinho é transportado para o forno de indução (Forno Inducto Therm), conforme se ilustra na Figura 3.38a. O forno é aquecido a 1.600 graus para a escória atingir o ponto de fusão. A escória de aciaria LD modificada (EACM2a) líquida obtida foi vazada em uma lingoteira de ferro fundido (Figura 3.38(b)). Depois de ter sido despejada a escória líquida dentro da lingoteira, lançou-se água até o resfriamento total da escória (EACM2a) e prosseguiu-se com a sua granulação.

Figura 3.38 - (a) Forno de indução (Forno Inducto Therm) (b) Lingoteira de ferro fundido

Fonte: Elaborada pelo autor (2014).

Dando sequência ao processo metalúrgico, colocou-se o restante das pelotas (1065 gramas) no cadinho já aquecido dentro do forno; em seguida, quando a escória ficou líquida, despejou-se na lingoteira e procedeu-se ao resfriamento e granulação, conforme foi descrito no parágrafo anterior. Realizou-se a separação manual do ferro obtido, sendo encontrados inicialmente 340 gramas de ferro puro. Em seguida, com a ajuda de um ímã, procedeu-se à procura de pedaços de ferro menores. Ao final desse processo, a quantidade de ferro encontrada passou para 435 gramas (Figura 3.39). A

quantidade final de EACM2a encontrada foram 2.280 gramas, já descontados os 435 gramas de ferro puro.

Figura 3.39 - Ferro puro

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

A amostra de EACM2a foi seca em estufa à temperatura de 105°C a 110°C, pelo período de 24 horas, e resfriada à temperatura ambiente. Levou-se a amostra para a moagem no moinho de esferas, até que todo o material passasse na peneira número de abertura de malha 0,075mm. Essa moagem teve um tempo operacional bem menor quando comparada com a escória de aciaria de convertedor natural (EACN). Isso se deve à redução do teor de ferro pelo processo metalúrgico, apresentando maior friabilidade quando comparada com EACN de resfriamento lento. A cor final da EACM2a após a moagem foi cinza (Figura 3.40), bem próxima à cor do cimento Portland comercial.

Figura 3.40 - Foto da amostra de EACM2a

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

3.2.10 Método para se obter a Escória de aciaria LD modificada M2b (EACM2b)

A escória de aciaria LD modificada 2b (EACM2b) foi necessária, tendo em vista que EACM2a não atendeu à área específica, que ficou inferior à do cimento. A EACM2b possui área específica dos grãos maior que a EACM2a, e utilizou-se o moinho de bolas para o aumento dessa área específica. Esse processo será detalhado na metodologia da EACM2b.

3.2.11 Métodos de caracterização da escória de aciaria LD modificadas EACM1, EACM2a e EACM2b por processo pirometalúrgico

3.2.11.1 Caracterização física

Na caracterização física da EACM1, EACM2a e EACM2b em forma de pó, realizaram-se os ensaios de:

- finura por meio da peneira 75µm (nº 200) NBR 11579 (ABNT, 2012) realizada no IFES;
- finura pela área específica determinada pelos métodos Blaine e BET; o Blaine foi realizado na fábrica de cimento Holcim e o BET no PMT USP;
- granulometria dos grãos foi realizada com o granulômetro a *laser* na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP);
- massa específica.

A finura por meio da peneira 75µm determina o percentual retido na peneira 75µm em relação à massa inicial de 50 gramas após uma sequência de peneiramento de acordo com a NBR 11579 (ABNT, 2012). Contudo, esse ensaio não foi realizado para EACM1, EACM2a e EACM2b, tendo em vista que todas as amostras passam por peneira 75µm (n.º 200); portanto, a finura é zero para EACM1, EACM2a e EACM2b.

Realizou-se a finura pelo método BET também para determinar a área específica com resultados superiores, quando comparado com o método Blaine, pois considera também a superfície interna dos poros abertos e interconectados. O método BET (Brunauer-Emmett-Teller), ou ainda Teoria de Adsorção Multimolecular, é uma teoria matemática com o objetivo de descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida e serve como base para uma técnica de análise importante para a medição de área superficial específica de um material. Foi determinado por adsorção física de nitrogênio e indica a área acessível ou detectável da superfície do sólido pulverizado por unidade de massa do material. Esses dados são ferramentas na interpretação dos resultados dos ensaios de evolução da hidratação nas idades iniciais. A cinética da reação das escórias depende da superfície específica, bem como da relação molar CaO/SiO_2 , da natureza dos materiais silicosos e das condições de cura (TAYLOR, 1997; KALOUSEK, 1968). A análise foi realizada em um analisador de partículas Micromeritics modelo ASAP 2010 através do método BET.

Todos os ensaios de caracterização física da EACM1, EACM2a e EACM2b seguiram os procedimentos da EACN.

3.2.11.2 Caracterização química

A composição química da amostra das escórias EACM1 e EACM2a foram realizadas pelo método de fluorescência de raios X (FRX), realizada na empresa Panalytical em São Paulo-SP. O espectrômetro de fluorescência de raios X foi o mesmo usado no ensaio de FRX da EACN. A preparação das amostras a serem analisadas seguiram os mesmos procedimentos da EACN.

Determinaram-se os teores de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ presentes nas escórias EACM1 e EACM2a, seguindo os procedimentos da EACN. Os ensaios de anidrido sulfúrico (SO_3) e de perda ao fogo (PF) foram também determinados no ensaio de fluorescência de raios X (FRX). Não se realizou nenhum ensaio químico para a escória EACM2b, pois essa escória é a EACM2a com área específica maior.

3.2.11.3 Atividade pozolânica

A atividade pozolânica das EACM1 e EACM2a foram feitas pelo método Chapelle modificado (NBR 15894-1, ABNT 2010). A determinação da atividade pozolânica foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Neste método, o resultado é expresso pela quantidade de óxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material pozolânico (mg CaO/g pozolana). O método Chapelle modificado permite caracterizar uma pozolana, pela taxa de reação da cal, após um tempo de contato padronizado. O ensaio consiste em colocar uma determinada quantidade de material supostamente pozolânico e de CaO para reagir na presença de água fervente (100°C), pois a reação é muito lenta à temperatura ambiente (duração em torno de duas semanas). A mistura é mantida reagindo por algumas horas (em geral 16 horas). Após esse tempo, a quantidade de CaO livre é determinada por meio de extração de sacarose e titulação com solução de HCl. Quanto maior o consumo de CaO, mais pozolânico é o material.

3.2.11.4 Caracterização mineralógica

Realizaram-se as análises das fases mineralógicas da EACM1 e EACM2a na empresa Panalytical em São Paulo e EACM2a no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade São Paulo, São Paulo-SP, utilizando-se o mesmo equipamento e procedimento da EACN.

3.2.1.1 Caracterização microestrutural

Utilizou-se a técnica da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo XL-30 Philips, para análise da EACM1 e EACM2a. Essas análises foram feitas no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi utilizada

a microsonda EDS (Sistema de Dispersão de Energia), que fornece a microanálise da composição química em um determinado ponto da amostra.

3.2.11.5 Análise térmica

A análise térmica da EACM1 e EACM2a compreendeu as técnicas termogravimétricas (TG) e derivadas termogravimétrica (DTG). O equipamento utilizado foi o NETZSCH Thermal Analysis STA 449 F3 Jupiter, empregando-se material passante na peneira n.º 200 (0,075mm) NBR 11579 (ABNT, 2013).

Esse ensaio de análise térmica diferencial e termogravimétrica simultânea (TG/DTG) da EACM1 e EACM2a foi realizado com base em diretrizes gerais da ASTM E 794/06 (2012) – Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-093) no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas em São Paulo.

3.2.11.6 Método de avaliação do calor de hidratação de cimento CP V-ARI puro e com substituição do CP V-ARI por 40% EACM2b

Esse ensaio foi realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), de acordo com a NBR 12006 (ABNT, 1990) – Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa Langavant. Esse ensaio é feito por meio de calorímetro semiadiabático, conhecido como garrafa Langavant. O método de ensaio dessa norma consiste em medir continuamente o calor de hidratação por meio de um calorímetro semiadiabático conhecido como garrafa de Langavant, comparando os valores obtidos com os máximos especificados pela NBR 13116 (ABNT, 1994) para cimento Portland de baixo calor de hidratação, que são 260 J/g e 300 J/g para as respectivas idades. Esse calor de hidratação é uma informação importante para acompanhamento das taxas de reações químicas de hidratação do cimento CP V-ARI, e da substituição do cimento CP V-ARI por 40% de EACM2b.

3.2.12 Método de avaliação do grau de vitrificação da EACM2b por microscopia de luz transmitida polarizada

O grau de vitrificação representa a porção vítrea da EACM2b e foi realizado na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), de acordo com o procedimento PO-GT-5004 rev. 05 – Avaliação do Grau de Vitrificação de Escórias de Alto-Forno por microscopia de luz transmitida polarizada.

A avaliação do grau de vitrificação compreendeu a contagem dos grãos parcial e totalmente cristalizados com a utilização do microscópio óptico de luz transmitida polarizada. Quanto menor o seu grau de vitrificação, menor será a sua potencialidade hidráulica.

O teor de fase vítrea comanda a reatividade da escória de alto-forno. Essa fase pode ser estimada por contagem da fração cristalina por microscopia óptica ou por difração de raios X, em que esse material apresenta um halo vítreo na proximidade de 30° (2θ).

Agopyan et al. 1990, apud Junior H.S, apresentam, em seus estudos, resultados do grau de vitrificação de escórias de alto-forno de 97,7%, 95,3%, 97,1%, respectivamente, para as siderúrgicas CSN, COSIPA E USIMINAS.

3.2.13 Método de análise do comportamento mecânico da escória de aciaria LD (EACN) com adição de hidróxido de sódio (NaOH) e Cal (CHI)

3.2.13.1 Dosagem e traço de argamassa utilizada

Realizou-se a mistura da escória de aciaria LD com o hidróxido de sódio e cal (CHI) para a elaboração do traço. A areia utilizada para a produção da argamassa com escória de aciaria foi areia normal para o ensaio de cimento de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2012). A escória utilizada tinha granulometria inferior a 0,075mm. A proporção foi 3,0% de hidróxido de sódio, 5,0% de cal em relação a 624 gramas de

escória de aciaria e 1872 gramas de areia normal nas frações de acordo com a NBR 7214 (ABNT, 2012).

3.2.13.2 Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM1

Avaliou-se a resistência à compressão de argamassas com substituição do cimento em 10% por EACM1 nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996), substituição somente com 10% foi necessária, tendo em vista que, no processo pirometalúrgico, foi obtida uma pequena quantidade de EACM1 que também foi usada em outros ensaios de caracterização. Essa avaliação foi realizada com ensaio de resistência à compressão da argamassa com cimento CP V-ARI, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Compararam-se os resultados obtidos com um traço, referência feita com CP V-ARI sem adição de escória.

3.2.13.3 Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM2a

Avaliou-se a resistência à compressão de argamassas com substituição do cimento em 10% e 20% por EACM2a nas idades de 3, 7, 28, 91 e 270 dias, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Compararam-se os resultados obtidos com um traço, referência feita com CP V-ARI sem adição de escória e também com os exigidos pela NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento Portland composto CP II-E 32 e CP II-E 40 e, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991), para o cimento de Alta Resistência Inicial CP V-ARI.

3.2.13.4 Método de avaliação do comportamento mecânico do cimento CP V-ARI com substituição por EACM2b

Avaliou-se a resistência à compressão de argamassa com substituição do cimento em 20% e 40% por EACM2b, nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias. Compararam-se os

resultados obtidos com um traço, referência feita com CP V-ARI sem adição de escória e também com os valores mínimos exigidos pela NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento Portland composto CP II-E 32 e CP II-E 40 e, de acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991), para o cimento de alto-forno CP III; e, por último, com a NBR 5733 (ABNT, 1991), para o cimento de Alta Resistência Inicial CP V-ARI.

3.2.13.5 Método de avaliação do comportamento mecânico do clínquer e gesso com substituição por EACM2b

Avaliou-se a resistência à compressão de argamassa com substituição do clínquer e gesso em 40% por EACM2b nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Compararam-se os resultados obtidos com um traço, referência feita com o cimento CP III, de acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991); e, por último, com a NBR 5733 (ABNT, 1991), para o cimento de Alta Resistência Inicial CP V-ARI.

3.2.14 Método de avaliação absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica de argamassas endurecidas de cimento CP V-ARI puro e com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b

A absorção de água por imersão em argamassas endurecidas foi realizada nos corpos cilíndricos de 50mm de diâmetro e 100mm de altura de argamassas de cimento puro de CP V-ARI e com substituição parcial do cimento por EACN, EACM1 EACM2a e EACM2b, utilizados antes do ensaio de resistência à compressão. Esse ensaio é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis da argamassa endurecida. A água penetra nos poros permeáveis e se estabelece a relação com a sua massa em estado seco. O índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. A massa específica da amostra seca é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros impermeáveis. A massa específica real é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. Esses ensaios foram realizados de acordo com NBR 9778 (ABNT, 2005) – Argamassa e concretos

endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

3.2.15 Método de avaliação da reatividade EACM2b por microscopia de luz transmitida (teste de Michelsen)

O teste de Michelsen avalia o grau hidráulico da EACM2b medindo o tempo decorrido em minutos para a cristalização da gipsita sob as condições padronizadas. Quanto menor for esse tempo, mais reativa será a escória. O teste de Michelsen é composto de duas análises: uma referente a uma amostra de reconhecida reatividade; a outra da amostra em estudo.

Para realizar esse teste, utilizou-se uma pequena fração da EACM2b moída e peneirada com granulometria entre 62 µm e 53 µm, que foi pulverizada sobre uma lâmina de vidro com duas a cinco gotas de solução aquosa de sulfato de alumínio Al_2SO_4 a 4% em água, pingando-as sobre a amostra. A contagem do tempo foi feita com um cronômetro no momento em que a primeira gota da solução de sulfato de alumínio entra em contato com a amostra. Homogeneizou-se a mistura com o auxílio de uma espátula metálica. Em seguida, o material é recoberto com uma lamínula de vidro. Utilizando-se o microscópio polarizador de luz transmitida, anota-se o tempo para a formação dos cristais de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), isto é, a reação dos íons de Ca da escória com os íons de SO_4 da solução, segundo a reação:

Agopyan et al. 1990, apud Junior H.S, apresentam, em seus estudos, resultados de grau hidráulico de escórias de alto-forno moídas pelo teste de Michelsen, de 3min36s, 3min15s, 3min42s, respectivamente, para as siderúrgicas CSN, COSIPA E USIMINAS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados encontrados durante a fase experimental desta pesquisa, estando de acordo com a metodologia do capítulo 3.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO CP V-ARI

4.1.1 Caracterização física

Na Tabela 4.1, apresentam-se os resultados da finura, da área específica Blaine, da massa específica, do tempo de início de pega e da expansibilidade a quente e a frio do cimento CP V-ARI, cujos valores encontrados atendem aos limites exigidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991). Esse cimento foi utilizado em argamassas e pastas com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b, para verificar propriedades mecânicas, durabilidade, expansibilidade, calor de hidratação e propriedades térmicas.

Tabela 4.1 – Finura, área específica Blaine, tempo de início de pega e da expansibilidade a quente e a frio do cimento Portland CP V-ARI

Propriedades determinadas	Método de ensaio	unid.	Cimento CP V-ARI	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Finura (%) (peneira 75µm)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	(%)	0,50	≤ 6,00
Área específica –Blaine – (cm ² /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	(cm ² /g)	4812	≥ 3000
Massa específica	NM 65 (ABNT, 2001)	(g/cm ³)	3,10	-
Tempo de início de pega	NM 65 (ABNT, 2002)	h	2,40	≥1
Expansibilidade a quente	NBR 11582 (ABNT, 2012)	mm	2,76	≤5
Expansibilidade a Frio		mm	1,45	≤5

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.2, apresentam-se os resultados de D10 μ m, D50 μ m e D90 μ m obtidos na granulometria a laser do cimento.

Tabela 4.2 – Valores de dimensão equivalentes a 10%, 50% e 90% de partículas passantes

Identificação das amostras	Diâmetro das partículas em $\mu\text{m}^{(*)}$			
	Dimensão média (μm)	D10	D50	D90
Cimento CP V-ARI	10.71	1	8,56	23,77

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

(*) D10, D50 e D90 representam diâmetro de partículas em que, respectivamente, 10%, 50% e 90% do total das partículas estão abaixo dos valores indicados.

No ensaio de granulometria *laser*, determinou-se a curva granulométrica do cimento CP V-ARI, que está apresentada na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da amostra do cimento CP V-ARI

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.1.2 Caracterização química

A composição química desse cimento é apresentada na Tabela 4.3 e foi realizada na empresa Panalitycal, em São Paulo.

Os valores do MgO e SO₃ do cimento CP V-ARI obtidos na análise química, conforme se verifica na Tabela 4.3, atendem às exigências da composição química do referido cimento de acordo com a Tabela 3.1, seção 3.

Tabela 4.3 – Composição química do cimento Portland CP V-ARI

Componentes químicos (%)	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	MnO
	61,283	16,015	5,119	4,198	3,504	3,488	0,22	0,198	0,189	0,112

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.1.3 Caracterização mineralógica

A composição mineralógica desse cimento está apresentada na Tabela 4.4 e foi realizada por difratograma (Figura 4.2), mediante o método do pó e o emprego de raios X com detector sensível à posição.

Tabela 4.4 – Composição mineralógica do cimento CP V-ARI

ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Mineral	Obs.
01-073-0599	Silicato de cálcio	Ca ₃ (SiO ₄)O		
01-086-2339	Calcita	CaCO ₃	Calcita	
00-042-1469	Óxido de alumínio, cálcio e ferro	Ca ₂ Al _{1,38} Fe _{0,62} O ₅		
00-049-1673	Silicato de cálcio	Ca ₂ SiO ₄		
01-076-1746	Gipso	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	Gipso	
00-038-1429	Óxido de alumínio e cálcio	Ca ₃ Al ₂ O ₆		pp

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Nota: PP = possível presença

A difratometria de raios X apresenta como resultado as fases cristalinas do material de forma rápida e precisa.

A estrutura do CP V-ARI é tipicamente cristalina (Figura 4.2) e apresenta picos identificados no difratograma pelas fases C₃S, C₂S, C₃A, calcita e gesso.

Figura 4.2 – Difratoograma de raios X do cimento CP V-ARI

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.1.4 Resistência média à compressão axial

Os valores da resistência média à compressão nas idades 1, 3, 7, 28 e 91 dias do cimento CP V-ARI, utilizado no traço referência, estão apresentados na Tabela 4.5 e são superiores aos limites mínimos exigidos para resistência à compressão axial do cimento CP V-ARI, nas idades 1, 3 e 7 dias, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991) Cimento Portland de alta resistência inicial.

Tabela 4.5 – Resistência à compressão axial nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias do cimento Portland CP V-ARI

Propriedades determinadas	Método de ensaio	Idades (dias)	Cimento CP V-ARI	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Resistência à compressão (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1996)	1	24,1	≥ 14,0
		3	36,2	≥ 24,0
		7	39,5	≥ 34,0
		28	47,0	-
		91	52,6	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CLÍNQUER

A utilização do clínquer visou verificar se a EACM2b pode ser usada como adição ao clínquer da mesma forma que a escória de alto-forno no cimento CP III. Escolheu-se a EACM2b na adição ao clínquer, pois os valores da resistência à compressão, quando utilizados na substituição do cimento do CP V-ARI, foram superiores ao traço referência.

4.2.1 Caracterização física

No ensaio de granulometria a laser, obteve-se a curva da distribuição granulométrica do tamanho dos grãos do clínquer (Figura 4.3) e $D_{10\mu m}$, $D_{50\mu m}$ e $D_{90\mu m}$ (Tabela 4.6). Verifica-se que o tamanho dos grãos D_{10} , D_{50} e D_{90} do clínquer (Figura 4.3) é maior que o dos grãos do cimento (Tabela 4.6). Portanto, a área específica do cimento CP V-ARI é superior à do clínquer, levando a reatividade do CP V-ARI a ser superior à do clínquer.

Figura 4.3 – Distribuição granulométrica do tamanho dos grãos do clínquer

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Tabela 4.6 – Valores de dimensão equivalentes a 10%, 50% e 90% de partículas passantes do clínquer

Identificação das amostras	Diâmetro das partículas em $\mu\text{m}^{(*)}$		
	D10	D50	D90
Clínquer	4,292	20,607	54,997

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

(*) D10, D50 e D90 representam diâmetro de partículas em que, respectivamente, 10%, 50% e 90% do total das partículas estão abaixo dos valores indicados.

4.2.2 Caracterização química

Na Tabela 4.7, apresentam-se os resultados encontrados para a composição química do clínquer utilizado com o gesso no ensaio de resistência à compressão axial, para avaliar a utilização da EACM2b como adição ao clínquer.

Os valores do MgO e perda ao fogo do clínquer obtidos na análise química (Tabela 4.7) atendem às exigências da composição química do cimento CP V-ARI, de acordo a Tabela 3.1, seção 3. Escolheu-se o cimento CP V-ARI para comparação, em virtude de só ter como adição materiais carbonáticos até 5%.

Tabela 4.7 – Composição química do clínquer

Nº LCT	5063
Amostra	Clínquer
CaO (%)	64,7
MgO (%)	1,87
SiO ₂ (%)	20,6
Al ₂ O ₃ (%)	4,63
Fe ₂ O ₃ (%)	3,64
Na ₂ (%)	0,23
K ₂ O (%)	0,36
P ₂ O ₅ (%)	0,11
TiO ₂ (%)	0,21
SrO (%)	0,20
MnO (%)	<0,10
S (%)	0,37
PF (%)	1,29

Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO

A composição mineralógica do gesso está apresentada na Tabela 4.8 e foi realizada por difratograma (Figura 4.4), mediante o método do pó e o emprego de raios X com detector sensível à posição.

Tabela 4.8 – Composição mineralógica do gesso

ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Obs.
74-1433	Gipso	$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})$	
79-1910	Quartzo	SiO_2	
47-1743	Calcita	CaCO_3	
72-0916	Anidrita	CaSO_4	
06-0263	Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	

Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

Na Figura 4.4, apresenta-se o difratograma altamente cristalino do gesso, e os picos identificados no difratograma representam as fases gipso, quartzo, calcita, anidrita e muscovita.

Figura 4.4 – Difratograma de raios X do gesso

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD NATURAL (EACN)

Apresentam-se os ensaios físicos da EACN natural, resfriada lentamente, em forma de agregado com granulometria de 0 a 19mm.

4.4.1 Caracterização física

Na Tabela 4.9, apresentam-se a composição granulométrica, a dimensão máxima característica e o módulo de finura da EACN, pelo método da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 4.9 – Composição granulométrica, dimensão máxima característica e módulo de finura da escória de aciaria LD

Peneira (mm)	% Média acumulada
25	-
19	1
12,5	10
9,5	18
6,3	27
4,8	33
2,4	50
1,2	65
0,6	81
0,3	93
0,15	98
Fundo	100
Dimensão máxima Característica (mm)	19
Módulo de finura	4,39

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Na Tabela 4.10, apresentam-se a massa específica e a absorção de água que foram realizadas de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Tabela 4.10 – Massa específica e absorção de água da escória de aciaria LD

Massa específica	Absorção
$d = 3,24 \text{ g/cm}^3$	$A = 4,27 \%$

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Com base nos resultados encontrados, pode-se dizer que:

- podemos classificar como 33% de agregado graúdo e 67% de agregado miúdo;
- a massa específica da escória é elevada quando comparada com a massa específica dos agregados de origem rochosa, utilizados na construção civil; essa elevada massa específica é devida ao elevado teor de ferro contido nas escórias.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA LD NATURAL (EACN) EM FORMA DE PÓ

A seguir, serão apresentadas a análise da composição física, química, microestrutural, atividade pozolânica, as análises térmica, ambiental, mineralógica e a microestrutural da EACN com granulometria inferior a 0,075mm, para verificar a possibilidade de serem usadas no estado natural como substitutas parciais do cimento CP V-ARI e, em seguida, modificadas por dois processos pirometalúrgicos (EACM1 e EACM2), para serem usadas como substitutas parciais do cimento CP V-ARI ou como adição ao clínquer (EACM2b).

4.5.1 Caracterização física

Os valores determinados na caracterização física da EACN da massa específica, de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001) e a área específica pelo método de Blaine NBR 16372 (ABNT, 2015), estão apresentados na Tabela 4.11 e são comparados com os limites estabelecidos para o cimento CP II-E 40 NBR 11578 (ABNT, 1997), pois, para esse cimento, a adição da escória granulada de alto-forno está, respectivamente, nos intervalos 6%-34%. Nesta pesquisa, ocorreu a substituição do cimento CP V por escória de aciaria LD (EACN) nos intervalos de 6%, 10%, 20% e 34% e pela escória de aciaria LD modificada nos teores 10%, 20%, 40%.

Na Tabela 4.11, verifica-se que a massa específica da EACN de 3,21 (g/cm³) é superior à massa específica do cimento que fica em torno de 3,10 (g/cm³),

influenciando no ensaio de abatimento¹⁰ do concreto, pois, ao adicionar ao cimento materiais com massa específica acima da massa específica do cimento, leva ao aumento do abatimento de concreto (MASUERO, 2001).

Tabela 4.11 – Massa específica, área específica por BET e Blaine da escória de aciaria natural (EACN).

Propriedades determinadas	Método de ensaio	EACN	Limite NBR 11578 (ABNT, 1997) CP II-E
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	3,21	-
Área específica Blaine (cm ² /g)	--- NBR 16372 (ABNT, 2015)	3936,0	- 2800

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

O valor encontrado na Tabela 4.11 para a área específica da EACN pelo método de Blaine de 3936 (cm²/g) está um pouco abaixo do valor da área específica escória de alto forno e inferior a valores de área específica de adições minerais, tais como sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, de acordo com a Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Áreas específicas usuais de algumas adições minerais (BALE, et, al, 2002)

Adições minerais	Área específica (cm ² /g)
Escória de alto-forno	5000
Pozolana	2000-3000
Sílica ativa / metacaulim	200000
Cinza de casca de arroz	600000
Fly-ash (cinza volante)	3000-4000

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

No ensaio de granulometria a *laser*, determinou-se a curva granulométrica da EACN, que está apresentada na Figura 4.5

¹⁰ O abatimento do concreto é determinado pela moldagem do concreto em uma forma tronco cônica em três camadas, e cada camada é adensada como uma haste de ferro com 25 golpes; em seguida, determina-se a consistência do concreto fresco por meio da operação de retirar o molde, a qual deve ser realizada de 5s a 10s após a moldagem, com um movimento constante para cima, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral. O método é aplicável aos concretos plásticos e coesivos que apresentem um assentamento igual ou superior a 10mm e deve estar de acordo a NBR NM 67 Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Figura 4.5 – Distribuição granulométrica da amostra de EACN

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na indústria do cimento, considera-se que partículas maiores de $45\mu\text{m}$ possuem hidratação lenta e as maiores de $75\mu\text{m}$ podem nunca hidratar-se completamente (METHA; MONTEIRO, 1994). No caso de escória de alto-forno, partículas inferiores a $10\mu\text{m}$ contribuem para a resistência inicial do concreto até 28 dias; e partículas entre $10\mu\text{m}$ e $45\mu\text{m}$ colaboram para resistências após 28 dias. Porém, partículas acima de $45\mu\text{m}$ são difíceis de hidratar (METHA; MONTEIRO, 1994). Na Tabela 4.13, apresenta-se a granulometria *laser* da amostra da EACN, e foram determinados os valores e a dimensão média equivalente das partículas passantes nos diâmetros D10, D45, D50 e D90 para EACN. Verifica-se que a EACN apresenta 10%, 45%, 50%, e 90,0% do total das partículas que estão abaixo dos valores, respectivamente, dos diâmetros de $1,8\mu\text{m}$, $18,7\mu\text{m}$, $22,3\mu\text{m}$ e $57,2\mu\text{m}$.

Se considerássemos a EACN uma estrutura vítrea similar a uma escória de alto-forno, teríamos, com base no resultado de granulometria laser, 32,13% dos grãos inferiores

a 10µm influenciando até 28 dias, 45,92% dos grãos entre 10µm e 45µm influenciando na resistência à compressão axial para idades acima de 28 dias e 21,95% dos grãos que estão acima de 45µm dificilmente vão hidratar.

Tabela 4.13 – Valores e dimensão média equivalente às partículas passantes

Identificação das amostras	Diâmetro das partículas em µm ^(*)				
	Dimensão média (mm)	D10	D45	D50	D90
EACN – Escória de aciaria natural	26,1	1,8	18,7	22,3	57,2

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

(*) D10, D45, D50 e D90 representam diâmetro de partículas em que, respectivamente, 10%, 45%, 50% e 90% do total das partículas estão abaixo dos valores indicados.

4.5.2 Caracterização química

A caracterização química compreendeu a composição química por *fluorescência de raios X* (FRX) e análise química, para determinar os teores de perda ao fogo, anidrido sulfúrico, enxofre, óxido de cálcio livre e resíduo insolúvel da EACN.

4.5.2.1 Composição química

A composição química da EACN é apresentada na Tabela 4.14 e foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX).

Observa-se, na Tabela 4.14, que a EACN é constituída basicamente de CaO, FeO, SiO₂ e Al₂O₃. O índice de basicidade (CaO/SiO₂) é 4,45, sendo considerado básico e superior aos valores encontrados para a escória de aciaria elétrica e escória de alto-forno, respectivamente, 2,0 e 1,1, obtidos por Geiseler (1995). Segundo Lea (*apud* MONTGOMERY e WANG, 1991), quando a relação MgO/(FeO + MnO) < 1, pode-se considerar que MgO é estável. Pode-se verificar que a substituição dos valores

obtidos na Tabela 4.14 e na Equação 4.1 resulta em um valor igual a 0,34. Porém, o valor de MgO igual a 9,6% da EACN está maior que o exigido pela NBR 11578 (ABNT, 1997), que limita em inferior ou igual a 6,5%.

$$\frac{\text{MgO}}{(\text{FeO} + \text{MnO})} = \frac{9,6}{(25,1 + 3,4)} = 0,34 \quad \text{Equação 4.1}$$

Tabela 4.14 – Composição química da escória de aciaria LD

Composição	Fluorescência FRX	Composição	Fluorescência FRX
	Conc. %		Conc. %
O	0.0143	V ₂ O ₅	0.102
Na ₂ O	0.104	Cr ₂ O ₃	0.224
MgO	9.6	MnO	3.4
Al ₂ O ₃	7.41	FeO	25.1
SiO ₂	8.54	CuO	0.0139
P ₂ O ₅	1.44	ZnO	0.0112
SO ₃	0.324	SrO	0.0899
K ₂ O	0.0536	ZrO ₂	0.018
CaO	38	Nb ₂ O ₅	0.0128
TiO ₂	0.381		

Fonte: Empresa Panalytical (2015).

O valor do requisito químico para material pozolânico da EACN de 41,05, somatório dos compostos químicos SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (%), é inferior ao mínimo de 50,00 exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015); portanto, não tem características químicas de material pozolânico.

De acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991), a escória de alto-forno deve atender à expressão $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 1$. Os valores encontrados por essa expressão para a EACN é 6,44, que atende à exigência da expressão de composição química da referida norma.

Verifica-se que a área delimitada da EACN fica próximo da área delimitada para a escória de aciaria de convertedor no diagrama de fases (Figura 4.6) com os resultados encontrados da composição química da Tabela 4.14.

Figura 4.6 – Composição química da escória de alto forno e da escória de aciaria de convertedor em relação ao cimento Portland

Fonte: Monshia; Asgaranib (1999, p.1374).

4.5.2.2 Perda ao fogo, anidrido sulfúrico, enxofre, óxido de cálcio livre e resíduo insolúvel

Na Tabela 4.15, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da EACN, em que se verificou que o teor de CaO livre está dentro dos valores obtidos por GUMIERI (2002). Verifica-se também que os valores de perda ao fogo (4,66%), anidrido sulfúrico (0,19%) estão com teores menores que os exigíveis pela NBR 11578 (ABNT, 1997) para o cimento CP II-E. O resíduo insolúvel RI (13,21%) está com valor

bem acima de 2,5%, aceito pela NBR 11578 (ABNT, 1997). O resíduo insolúvel indica a quantidade de componentes não hidráulicos no cimento.

Tabela 4.15 – Ensaaios de caracterização química da escória de aciaria

Ensaio	Métodos de ensaio	Teores (%)	Limites NBR 11578(1997) CP II E
Perda ao fogo – PF	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	4,66	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico – SO ₃	NBR NM 16 (ABNT, 2012)	0,19	≤ 4,0%
Enxofre – S	NBR NM 19 (ABNT, 2012)	0,08	-
Óxido de cálcio livre – CaO (livre)	NBR NM 13 (ABNT, 2012)	4,55	-
Resíduo insolúvel	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	13,21	2,5%

Fonte: ABCP (2014).

4.5.3 Atividade pozolânica

O resultado do ensaio de atividade pozolânica da EACN obtido pelo método Chapelle modificado é apresentado na Tabela 4.16. Verifica-se que o valor da atividade pozolânica encontrado da EACN menor que um (Tabela 4.16) demonstra que é um material não reativo com o Ca(OH₂) liberado pelo cimento na reação com a água. Os principais ativadores da escória de alto-forno são hidróxido de cálcio, sulfato de cálcio e cimento Portland, os quais vão acelerar o processo de dissolução e posteriormente vai ocorrer a precipitação dos produtos hidratados. Quanto ao hidróxido de cálcio, a EACN é não reativa. Segundo Jonh (1995), a diferença no princípio de dissolução da escória e do clínquer é que a primeira é por ataque hidroxílico, ou seja, por íons de OH⁻, enquanto a do clínquer é por ataque hidrolítico, decorrente da ação das moléculas da água (JOHN, 1995). Eles vão acelerar o processo de dissolução e posteriormente vai ocorrer a precipitação dos produtos hidratados.

Tabela 4.16 – Atividade pozolânica da escória de aciaria natural (EACN)

Propriedades determinadas	Método de ensaio	EACN	Limite NBR 12653 (ABNT, 2015)
Índices de atividade pozolânica (Método Chapelle modificado) (mg) de Ca(OH) ₂ /g	NBR 15895 (ABNT, 2010)	<1	≥ 330

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.5.4 Análise térmica

Na Tabela 4.17, apresentam-se as perdas de massas em função da temperatura das curvas TG/DTG da EACM1. Esse ensaio foi realizado de acordo com ASTM E794/06(2012) – Standard Test Method for Melting Crystallization Temperatures by Thermal Analysis (CT – OBRAS – LMCC – Q – PE – 093).

O valor encontrado do teor de cal livre pela análise química (Tabela 4.15) foi 4,55%, valor em que está incluído o do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Para determinar somente o teor de CaO (avaliar o potencial expansivo da escória), faz-se necessário usar a técnica de análise térmica (TG e DTG), além de determinar a quantidade de Ca(OH)_2 com grande precisão.

Na análise termogravimétrica (TG), determinam-se as perdas de massa pelas curvas de (TG), e o intervalo de temperatura da ocorrência de perda de massa foi obtido pelas curvas de (DTG). Na Tabela 4.17, determina-se a perda de massa entre 412°C e 540°C, que é de 1,06%, correspondente ao Ca(OH)_2 . Calcula-se estequiometricamente o percentual de CaO em Ca(OH)_2 pela Equação 4.2.

$$\text{CaO}/56 = \Delta\text{H}_2\text{O} / 18 \quad \text{Equação 4.2}$$

Os valores de 56 e 18 são as massas moleculares dos componentes CaO e H_2O , respectivamente.

O valor de $\Delta \text{H}_2\text{O} = 1,06$ refere-se à perda de massa determinada pela curva TG entre 412°C e 540°C.

$$\text{CaO}/56 = 1,06/18 \quad \text{CaO} = 3,3\% \quad \text{Equação 4.3}$$

O valor de CaO livre na EACN será a diferença de 4,55%, resultado obtido, no ensaio de etilenoglicol, do valor obtido na Equação 4.3, que foi o de 3,3%, sendo este o valor

do CaO livre devido à desidroxilação do Ca(OH)_2 . Logo, o CaO livre não hidratado é de 1,25%, que será considerado para avaliar o potencial expansivo da EACN.

Verifica-se na Tabela 4.17, que a perda de massa da EACN foi de 5,91%, demonstrando que a EACN apresenta pequena perda de massa até a temperatura de 1000 °C.

Tabela 4.17 – Perda de massa em função da temperatura da EACN (LMCC n.º 864-15)

Faixa de temperatura da EACN (°C)	23-220	220-320	320-412	412-540	540-760	760-918	Perda total
Perda de massa (%)	1,50	0,68	0,86	1,06	2,47	-0,66*	5,91

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Nota 2: O material apresenta ganho de massa.

Figura 4.7 – Curvas obtidas nos ensaios térmicos TG e DTG para a escória de aciaria natural (EACN)

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.5.5 Caracterização física ambiental

Os ensaios dos constituintes inorgânicos lixiviados da EACN estão apresentados na Tabela 4.18 e foram obtidos de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004). Os resultados

encontrados apresentam valores abaixo dos limites máximos exigidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Com esses resultados, a EAC é considerada não perigosa.

Tabela 4.18 – Teor de constituintes inorgânicos lixiviados

Constituinte			Teor	Limite de Quantificação (mg/L)	NBR 10004 Limite máximo (mg/L)
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	0,025	5,0
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	0,025	1,0
Bário	(Ba)	(mg/L)	0,14	0,010	70,0
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	0,003	0,5
Cromo	(Cr)	(mg/L)	N.D.	0,010	5,0
Chumbo	(Pb)	(mg/L)	N.D.	0,025	1,0
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	0,025	1,0
Mercúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	0,0002	0,1
Fluoreto	(F ⁻)	(mg/L)	2,68	0,100	150,0
pH	-	-	12,40	-	-

N.D. – Não detectado; significa que os teores estão abaixo do limite de quantificação

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.19, apresentam-se os constituintes inorgânicos solubilizados da EACN de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004), sendo considerada inerte, por apresentar valores dos constituintes inorgânicos solubilizados inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 4.19 – Teor de constituintes inorgânicos solubilizados

Constituinte			Teor	Limite de Quantificação (mg/L)	NBR 10004/04 máximo (mg/L)
Prata	(Ag)	(mg/L)	N.D.	0,025	0,05
Alumínio	(Al)	(mg/L)	0,066	0,010	0,2
Arsênio	(As)	(mg/L)	N.D.	0,008	0,01
Bário	(Ba)	(mg/L)	0,52	0,010	0,7
Cádmio	(Cd)	(mg/L)	N.D.	0,003	0,005
Cromo	(Cr)	(mg/L)	N.D.	0,010	0,05
Cobre	(Cu)	(mg/L)	0,015	0,010	2,0
Ferro	(Fe)	(mg/L)	N.D.	0,010	0,3
Manganês	(Mn)	(mg/L)	N.D.	0,005	0,1
Chumbo	(Pb)	(mg/L)	N.D.	0,007	0,01
Selênio	(Se)	(mg/L)	N.D.	0,008	0,01
Zinco	(Zn)	(mg/L)	N.D.	0,003	5,0
Mercúrio	(Hg)	(mg/L)	N.D.	0,0002	0,001
Sódio	(Na)	(mg/L)	11,06	0,060	200,0
Sulfatos	(SO ₄) ²⁻	(mg/L)	3,71	0,5	250,0
Nitratos	(N)	(mg/L)	3,90	0,5	10,0
Cloretos	(Cl ⁻)	(mg/L)	3,24	0,05	250,0
Fluoretos	(F ⁻)	(mg/L)	1,38	0,02	1,5
Cianetos	(CN ⁻)	(mg/L)	N.D.	0,05	0,07
Fenóis	-	(mg/L)	N.D.	0,01	0,01
pH	-	-	12,62	-	-

N.D. – Não detectado; significa que os teores estão abaixo do limite de quantificação

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.5.6 Caracterização mineralógica

Utilizou-se a difração de raios X para a determinação das principais fases cristalinas presentes na EACN. Essas fases são obtidas por comparação do difratograma da amostra com bancos de dados: International Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – Panalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007). Na Tabela 4.20, encontram-se os ICDD, os compostos minerais e a fórmula química de cada um deles, que foram encontrados na EACN.

Tabela 4.20 – Identificação dos compostos na difração de raios X na EACN

ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
01-078-0315	Portlandita	Ca(OH)_2	Portlandita
01-078-0430	Periclásio	MgO	Periclásio
01-086-0174	Calcita	CaCO_3	Calcita
00-033-0302	Larnita	Ca_2SiO_4	Larnita
00-021-0917	Óxido de cálcio e ferro	CaFeO_2	
01-079-1906	Quartzo	SiO_2	Quartzo
01-088-1937	Magnesioferrita	MgFe_2O_4	Magnesioferrita
01-074-1860	Srebrodolskita	$\text{Fe}_2\text{Ca}_2\text{O}_5$	Srebrodolskita
01-084-0303	Wustita	$\text{Fe}_{0,909}\text{O}$	Wustita

Fonte: LCT – PMI (2014).

De acordo com o difratograma da Figura 4.8, a amostra da EACN apresenta estado cristalino, isto é, devido ao processo de resfriamento lento das escórias. Os picos identificados são fases cristalinas que principalmente apresentam portlandita, periclásio, calcita, larnita, quartzo, wustita, óxido de cálcio e ferro, magnésio ferrita e srebrodolskita, a portlandita corresponde a hidratação do $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e a calcita é decorrente de sua carbonatação.

A difratometria de raios X (Figura 4.8) confirmou a presença de alguns compostos expansivos: periclásio $\text{MgO}_{\text{livre}}$, carbonato de cálcio na forma de calcita CaCO_3 e óxido de ferro FeO na forma de Wustita todos compostos expansivos. A portlandita corresponde a hidratação do $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e a calcita é decorrente de sua carbonatação.

O CaO livre (Tabela 2.14) na forma cristalina e quando em contato com água é um composto expansivo, porém não apareceu entre as principais fases cristalinas presentes na EACN, isto foi devido ao baixo teor CaO livre, que foi de 1,25% conforme seção 4.5.4 O MgO livre periclásio, na forma cristalina, quando, em contato com água, forma hidróxido tornando-se expansivo e inofensivo quando componente de silicatos ou na forma vítrea. O MgO vem da dolomita usada na produção do aço e também do refratário, que é usado no revestimento do forno. A presença do mineral larnita Ca_2SiO_2 , que é o silicato de dicálcio (C_2S) ou $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$, é atribuída ao resfriamento lento da EACN; quando presente na forma $\beta\text{-C}_2\text{S}$, é expansiva tendo pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, mas tem propriedades mecânicas, podendo ser usada como agregado (KOUROUNIS et al., 2005).

Quanto à presença de wustita (FeO) em contato com água, ocorre a oxidação do ferro metálico em produto de corrosão, sendo acompanhado do aumento de volume que, dependendo do estado de oxidação, pode ser da ordem de 600% em relação ao metal original (METHA, MONTEIRO, 2014). A falta de silicato tricálcico (C_3S) e a presença de wustita limitam a escória de aciaria natural para ser usada como material cimentício. Os óxidos CaO, MgO e MnO, em conjunto com o FeO, geram soluções sólidas de wustita, originadas de escória de resfriamento lento.

Figura 4.8 – Difratoograma de raios X da amostra de escória de aciaria natural

Fonte: LCT – PMI (2014).

4.5.7 Caracterização microestrutural

Realizaram-se as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) da EACN, com o objetivo de identificar as fases que fazem parte das escórias e se estas eram coerentes com os elementos compostos identificados via análise química e de fases cristalinas. Observou-se a morfologia das partículas por EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia), o qual fornece a microanálise da composição química em um determinado ponto da amostra. As imagens da amostra são apresentadas na Figura 4.9, Fonte: LCT-PMI (2014).

Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12. Os números indicados mostram os pontos submetidos à análise por EDS. Verifica-se, pela análise do MEV, alta concentração de alumínio (Al), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e silício (Si).

Na Figura 4.9, mostra-se a micrografia da amostra de escória EACN, em que se realizaram análises por EDS em três pontos da mesma amostra, indicados pelos números 2, 3 e 4. A textura apresentada é rugosa em sua superfície, bastante semelhante à dos agregados convencionais.

Figura 4.9 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 2, 3 e 4)

Fonte: LCT-PMI (2014).

Figura 4.10 – Elementos químicos presente no ponto 2: carbono(C), oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca) manganês (Mn)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.11 – Elementos químicos presentes no ponto 3: carbono(C), oxigênio (O), ferro(Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si) cálcio (Ca)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.12 – Elementos químicos presentes no ponto 4: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca) e manganês (Mn)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Na Figura 4.13, a micrografia da amostra de escória EACN, em que se realizaram análises por EDS em dois pontos da mesma amostra, indicados pelos números 5 (Figura 4.14) e 6 (Figura 4.15). A textura apresentada é também rugosa em sua superfície.

Figura 4.13 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 5 e 6)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.14 – Elementos químicos presentes no ponto 5: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e manganês (Mn)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.15 – Elementos químicos presentes no ponto 6: oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si) e cálcio (Ca)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Na Figura 4.16, mostra-se a micrografia da amostra de escória EACN, em que se realizaram análises por EDS em dois pontos da mesma amostra, indicados pelos números 7 e 8. A textura apresentada é também rugosa em sua superfície.

Figura 4.16 – Micrografia da amostra, com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 7 e 8)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.17 – Elementos químicos presentes no ponto 7: carbono(C), oxigênio(O), ferro (Fe), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), Cálcio (Ca)

Fonte: LCT – PMI (2014).

Figura 4.18 – Elementos químicos presentes no ponto 8: carbono(C), oxigênio (O), ferro (Fe), magnésio (Mg), silício (Si), cálcio (Ca) e manganês (Mn)

Fonte: LCT – PMI (2014).

4.5.8 Tempo de pega

A norma brasileira NBR NM 65 (ABNT, 2000) estabelece a determinação do tempo de pega da pasta de cimento em duas etapas. Na primeira, determina-se a quantidade de água para adicioná-la ao cimento Portland, para elaborar a pasta de consistência normal. De posse dessa quantidade de água, inicia-se a segunda etapa: coloca-se a pasta obtida no aparelho de Vicat e realiza-se o ensaio de pega.

4.5.8.1 Pasta de consistência normal

Na Tabela 4.21, apresentam-se os valores da quantidade de água em gramas, porcentagem de água em relação à massa de cimento e à distância em mm que a sonda Tetmajer do aparelho de Vicat estacionou sobre a placa PVC, de acordo com procedimento descrito na seção 3.2.5.1 para misturas do cimento CP V–ARI sem adição e outra com 10% de adição por porcentagem maior de substituição que atendem aos requisitos mínimos para resistência à compressão exigidos pela NBR 11578 (ABNT, 1997).

Verifica-se, na Tabela 4.21, que a pasta de consistência normal com substituição de 10% de escória natural LD teve um consumo de água inferior quando se compra com a pasta de cimento CP V sem adições. Isso pode ser explicado em virtude de a massa específica da escória de aciaria LD ser superior à do cimento CP V. Com isso, o volume de escória de aciaria LD utilizado é inferior ao do cimento CP V para uma mesma massa. A NBR NM 43 (ABNT, 2003) estabelece uma massa de 500 gramas para realização do ensaio de pasta de consistência normal; portanto, na substituição de 500 gramas de cimento para realizar o ensaio de pasta de cimento de CP V por escória de aciaria, o volume a ser adicionado é inferior. Quanto à distância do fundo da placa de PVC, deve estar entre 6 ± 1 mm.

Tabela 4.21 – Quantidade de água (g), porcentagem de água em relação à quantidade de cimento e à distância em (mm) que a sonda tetmajer estacionou da placa base no aparelho de Vicat da pasta de cimento Portland CP V sem adição e o cimento Portland CP V com substituição de 10% por escória de aciaria LD

	Pasta de consistência Normal NBR NM 43 (ABNT, 2002)		
	Água (g)	% água	Distância (mm)
CPV sem adição	165	33	5
CPV com substituição de 10% por escória de aciaria LD	158	31,60	6

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.5.8.2 Tempo de início e fim de pega

Na Tabela 4.22, apresentam-se os valores de início e fim de pega da pasta de consistência normal de acordo com procedimento descrito na seção 3.2.5.2 do cimento CP V puro e do cimento CP V com substituição de 10% por escória de aciaria LD. Verifica-se, na Tabela 4.22, que o início de pega para o cimento com 10% de escória de aciaria LD foi maior em 22 minutos que o tempo de pega da pasta de cimento CP V sem adição. Pode-se explicar o tempo de maior pega para a pasta de cimento CP V com 10% de escória de aciaria LD devido à presença de matérias-primas inertes (não reativas) na escória de aciaria, por exemplo, a wustita (FeO) e a estrutura EACN ser cristalina, isto é, pouco reativa.

Tabela 4.22 – Tempo de pega do cimento CP V sem adição e do cimento CP V com substituição por 10% de escória de aciaria LD

	CP V SEM ADIÇÃO	CP V COM SUBSTITUIÇÃO DE 10% POR ESCÓRIA DE ACIARIA LD
Início de pega (hora)	9:00	9:10
Fim de pega (hora)	11:40	12:12
Tempo decorrido (hora)	2:40	3:02

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.6 EXPANSIBILIDADE

A expansibilidade foi feita com a pasta de consistência normal de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2002), que consistiu em preparar várias pastas de cimento CP V-ARI e água. Dos 500 gramas previstos para o cimento CP V-ARI, 70% foram substituídos por escória de aciaria LD, sendo considerada normal quando a sonda Tetmajer do aparelho de Vicat (seção 3.2.4) descer sobre uma pasta feita de cimento e a água estacionar a 6mm $\pm$ 1mm da placa de PVC.

A expansibilidade observada nas escórias de aciaria LD está apresentada na Tabela 4.23, na qual se verifica que os valores encontrados para a expansibilidade a quente e a frio atendem às exigências da NBR 11578 (ABNT, 1997), que limita a expansibilidade no máximo a 5mm, tanto a quente quanto a frio.

Pode-se explicar a baixa expansibilidade ao baixo teor de CaO livre da EACN obtido na seção 4.5.4 que foi 1,25%. Logo, o teor de 1,25% de CaO livre, em contato com água, forma hidróxidos, sendo essa reação expansiva. A expansibilidade fica controlada devido a esse teor baixo. Outro fator que contribuiu para baixa expansibilidade foi a granulometria inferior 0,075mm que torna EACN pouca expansiva.

A influência da granulometria na expansão da EACN foi apresentada na revisão bibliográfica pelos autores César (2004) e Polissene (2005), que verificaram que a diminuição do tamanho dos grãos da EACN é acompanhada pela diminuição da expansibilidade.

Verifica-se, na Tabela 4.23, que o percentual de 25,6% de água em relação a 500 gramas, para determinar a pasta de consistência normal da pasta com 70% de escória de aciaria natural e 30% de cimento CP V-ARI, é inferior a 31,6% da pasta de cimento CP V com 10% de escória de aciaria LD (Tabela 4.21). Isso pode ser explicado, pois a pasta de cimento CP V-ARI com 70% de escória de aciaria LD necessita de menos água em virtude de seu teor de ferro ser maior que a pasta de cimento CP V-ARI com substituição por 10% de escória de aciaria LD levando a um consumo menor de água.

Tabela 4.23 – Expansibilidade das amostras da escória de aciaria LD

Expansibilidade		Consistência normal
A quente	A frio	
2,76mm	1,45mm	25,6%

Fonte: LEMAC – UFES (2015).

4.7 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 1 (EACM1), ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 2a (EACM2a) e ESCÓRIA DE ACIARIA MODIFICADA 2b (EACM2b) EM FORMA DE PÓ DO PROCESSO PIROMETALÚRGICO

As análises da composição física, química, mineralógica, microestrutural, atividade pozolânica e a análise térmica foram realizadas com a EACM1 e EACM2a com granulometria inferior a 0,075mm. Com a EACM2b, realizou-se a caracterização da finura por Blaine, não sendo necessárias as análises química, mineralógica, microestrutural, atividade pozolânica e a análise térmica, pois a EACM2b é a EACM2a moída novamente para a obtenção de uma área superficial maior. Em relação às escórias EACM1, EACM2a e EACM2b, verifica-se a possibilidade de serem usadas como substitutas parciais do cimento CP V-ARI. A EACM2b foi a única a ser usada como substituição parcial ao clínquer. Não se realizou a caracterização ambiental, tendo em vista a pequena quantidade de cada amostra para EACM1, EACM2a e EACM2b.

4.7.1 Caracterização física

Os valores determinados na caracterização física da EACM1, EACM2a e EACM2b estão apresentados na Tabela 4.24 e são comparados com os limites estabelecidos para o cimento CP II-E 40 NBR 11578 (ABNT, 1997), pois, para esse cimento, a adição da escória granulada de alto-forno está no intervalo de 6%-34%. O resultado desse método de área superficial BET (Brunauer-Emmett-Teller) da EACM2b é apresentado na Tabela 4.24.

Os valores determinados na caracterização física da EACM1, EACM2a e EACM2b estão apresentados na Tabela 4.24, a massa específica de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), o método de área superficial BET (Brunauer-Emmett-Teller) e a área específica pelo método de Blaine NBR 16372 (ABNT, 2015) são comparados com os limites estabelecidos para o cimento CP II-E 40 NBR 11578 (ABNT, 1997), exceção à área específica pelo método BET, que não é estabelecido pela NBR 11578 (ABNT,

1997), pois, para esse cimento, a adição da escória granulada de alto-forno está, respectivamente, no intervalo 6%-34%. Nesta pesquisa, ocorre a substituição do cimento CP V por escória de aciaria LD (EACN) nos intervalos de 6%, 10%, 20% e 34% pela escória de aciaria LD modificada nos teores 10%, 20%, 40%.

Na Tabela 4.24, verifica-se que a massa específica da EACM1, EACM2a e EACM2b está próxima da massa específica do cimento que fica em torno de 3,10 (g/cm³), não influenciando no ensaio de abatimento do concreto, pois, ao adicionar ao cimento materiais com massa específica acima da massa específica do cimento, leva ao aumento do abatimento de concreto (MASUERO, 2001).

O valor encontrado na Tabela 4.24 para a área específica da EACM2a pelo método Blaine de 1749 (cm²/g) está bem abaixo de alguns valores de área específica de adições minerais, tais como escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, de acordo com a Tabela 4.12, e também bem inferior ao mínimo exigido para a área específica para o cimento CP II-E 40, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997), que é de 2800 cm²/g.

Tabela 4.24 – Caracterização física do cimento e das escórias de aciaria natural (EACN) e modificadas (EACM1, EACM2a e EACM2b)

Propriedades determinadas	CIMENTO CP V-ARI	EACN	EACM1	EACM2a	EACM2b	Limite NBR 11578 (ABNT, 1997) CPII-E
Massa específica (g/cm ³)	3,1	3,21	3,19	3,05	3,04	-
Área específica BET (cm ² /g)	13562	-	-	3517	11429	-
Área específica Blaine (cm ² /g)	4812	3936	3884	1749	4371	2800

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Verifica-se, na Tabela 4.25, que a EACM1, EACM2a e EACM2b apresentam 10% das partículas passantes nos diâmetros D10%, respectivamente, de 2,03µm, 4,5 µm e 1,886µm; 50% das partículas passantes nos diâmetros D50, respectivamente, de 22,45µm, 31,8µm e 11,637 µm; e 90% das partículas passantes nos diâmetros D90, respectivamente, 57,2µm, 69,4µm e 41,01µm. Conclui-se que a EACM2b apresenta

grãos menores que a EACM1 e EACM2a, tornando-a mais reativa do ponto de vista da área superficial, porém EACM2b apresenta porcentagem dos grãos maiores que a do cimento e inferiores à do clínquer.

Considerando que a EACM2a e a EACM2b têm a mesma composição química, que é similar à composição química da escória de alto-forno (EACN), diferenciando-se pela granulometria, conclui-se, com base nos resultados da granulometria *laser* da EACM2a e a EACM2b, que têm, respectivamente, 19,16% e 45,28% com grãos inferiores a 10 μ m. A EACM2b tem maior número de grãos que contribuem para a resistência inicial até os 28 dias, quando se compara com a EACM2a, pois, segundo Metha e Monteiro (1994), os grãos inferiores a 10 μ m contribuem para a resistência até os 28 dias. Isso pode ser confirmado na Tabela 4.49, quando se comparam os valores da resistência à compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias para a substituição do cimento Portland CP V-ARI por 20% de EACM2a e EACM2b.

Tabela 4.25 – Valores e dimensão média equivalente às partículas passantes

Identificação das amostras	Dimensão média (μ m)	Diâmetro das partículas em μ m (*)			
		D10	D45	D50	D90
Cimento CP V-ARI		1,0		8,56	23,0
Clínquer	25,612	4,292		20,607	54,997
EACN– Escória de aciaria natural	26,1	1,8	18,7	22,3	57,2
EACM1 – Escória de aciaria modificada 1	26,55	2,03		22,45	57,95
EACM2a – Escória de aciaria modificada 2a	35,0	4,5	28,2	31,8	69,4
EACM2b- Escória de aciaria modificada 2b	-	1,886	-	11,637	41,011

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

(*) D10, D45, D50 e D90 representam diâmetro de partículas em que, respectivamente, 10%, 45%, 50% e 90% do total das partículas estão abaixo dos valores indicados.

Na Figura 4.19, apresentam-se a curva granulométrica e o histograma da distribuição do tamanho de partículas EACM1. Observa-se, pelo histograma da Figura 4.19 e pelos resultados da granulometria a laser da EACM1, que 32,8% dos grãos estão abaixo do diâmetro de 10 μ m, colaborando para a resistência à compressão axial nos primeiros 28 dias. No intervalo de 10 μ m a 45 μ m, tem uma concentração de 46,8% dos grãos contribuindo para a resistência à compressão acima de 28 dias (METHA; MONTEIRO, 1994). A contribuição da reatividade da EACM1 (Tabela 4.48) é inferior

quando comparada com a EACM2b (Tabela 4.49) analisando a resistência à compressão, pois a composição química da EACM1 distanciou-se da composição química da EAF.

Figura 4.19 – Distribuição granulométrica das amostras de EACM1

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Figura 4.20, apresentam-se a curva granulométrica e o histograma da distribuição do tamanho das partículas EACM2a. Verifica-se que o histograma da EACM1 apresenta o somatório das áreas das colunas um pouco inferior que o das áreas das colunas EACM2a, concluindo-se que a EACM1 tem grãos menores que EACM2a. A mesma conclusão se chega pela Tabela 4.25.

Figura 4.20 – Distribuição granulométrica das amostras de EACM2a

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Figura 4.21, apresenta-se a curva granulométrica da distribuição das partículas EACM2b em volume acumulado no eixo das ordenadas para cada tamanho de grãos. Verifica-se que a EACM2b tem grãos menores que a EACM2a.

Observa-se pelo histograma da Figura 4.21 e pelos resultados da granulometria *laser* da EACM2b, que 45,28% dos grãos estão abaixo do diâmetro de 10 μ m, colaborando para a resistência à compressão axial nos primeiros 28 dias. No intervalo de 10 μ m a 45 μ m, a EACM2b tem uma concentração de 47,29% dos grãos contribuindo para a resistência à compressão acima de 28 dias (METHA; MONTEIRO, 1994). A contribuição da reatividade da EACM2b (Tabela 4.49) é superior quando comparada com a EACM2a (Tabela 4.49), pois o tamanho dos grãos da EACM2b é inferior ao dos grãos da EACM2a.

Figura 4.21 – Distribuição granulométrica da amostra de EACM2b

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.7.2 Caracterização química

A caracterização química compreendeu a composição química por FRX e a análise química para a determinação dos teores de perda ao fogo, anidrido sulfúrico, enxofre, óxido de cálcio livre e resíduo insolúvel da EACN.

4.7.3 Composição química

A composição química da EACN, EACM1 e EACM2a estão apresentadas na Tabela 4.27 e foi determinada pelo método de fluorescência de raios X (FRX). A composição química da escória de alto-forno foi fornecida pela empresa siderúrgica.

Observa-se, na Tabela 4.27, que a EACN é constituída basicamente de CaO, FeO, SiO₂ e Al₂O₃ e a EACM1, EACM2a e a EAF constituída basicamente de CaO, SiO₂ e Al₂O₃. A diminuição dos teores de ferro na composição química da EACM1 e EACM2a é um fator importante alcançado no processo pirometalúrgico. No caso da EACM2a, o teor de ferro caiu de 25,1% para 1,29%, eliminando um grande obstáculo da utilização da escória de aciaria.

Os valores encontrados para a composição química são comparados com os limites estabelecidos para o cimento CP II-E 40 NBR 11578 (ABNT, 1997), pois, para esse cimento, a adição da escória granulada de alto-forno está no intervalo de 6% a 34%. Os valores encontrados para o MgO da EACM1 e EACM2a de 9,642% e 12,8%,

respectivamente, não atendem à NBR 11578 (ABNT, 1997), que tem como exigência química $\text{MgO} < 6,5\%$.

O valor de resíduo insolúvel caracteriza o percentual de substância inócua para o desenvolvimento das propriedades da EACM1 e EACM2a, visto que o valor encontrado da EACM1 de 23,19% (RI) é superior ao valor máximo de 2,5% exigido pela NBR 11578 (ABNT, 1997), e o valor do resíduo insolúvel da EACM2a de 0,7% atende à referida norma.

As basicidades da EACM1 e EACM2a, definidas como relação CaO/SiO_2 são, respectivamente, 2,73 e 1,24 (Tabela 4.27), sendo considerados básicos; e a basicidade 1,24 da EACM2a é próxima da basicidade da escória de alto-forno de 1,2 utilizada na produção de cimento. Os dois fatores, basicidade e resfriamento rápido, são fundamentais para a obtenção de escória com características cimentícias.

O somatório dos compostos químicos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) apresentados na Tabela 4.27, corresponde para a EACM1 47,23% e a EACM2a 42,79%, e é inferior ao valor mínimo de 50,00%, que é uma das exigências químicas para material pozolânico, conforme Tabela 4.28, e exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Os valores dos requisitos químicos para materiais pozolânicos da EACM1 de 45,85 e da EACM2a de 42,79, De acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991), a escória de alto-forno deve atender à expressão $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 > 1$. Os valores encontrados por essa expressão para a EACM1 e EACM2a são, respectivamente, 6,22 e 1,98, atendendo, portanto, à exigência da expressão de composição química da referida norma.

Segundo Lea (apud MONTGOMERY; WANG, 1991), quando há relação $\text{MgO}/(\text{FeO} + \text{MnO}) < 1$, pode-se considerar que MgO é estável. É possível verificar que a substituição dos valores de EACM1, EACM2a e EACM2b obtidos na Tabela 4.26 resulta em valores iguais a 1,05, 2,43 e 2,43, sendo considerados não estáveis. Porém, a estrutura vítrea da EACM1, EACM2a e EACM2b torna o MgO não reativo.

Tabela 4.26 – Determinação da reatividade do MgO

Reatividade do MgO	EACM1	EACM2a	EACM2b
MgO	1,05	2,43	2,43
(FeO + MnO)			

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.27, apresenta-se a composição química das escórias EACN, EACM1, EACM2a e EAF.

Tabela 4.27 – Composição química das escórias da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF

	Óxido	Abreviatura	Escória aciaria LD (EACN) (%)	Escória de aciaria modificada n.º I (EACM1) (%)	Escória de aciaria modificada n.º II (EACM2a) (%)	Escória de alto- forno (EAF) (%)	Limites NBR 5735 (ABNT, 1991) (%)	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991) (%)
Cal	CaO	C	38,00	32,02	38,60	41,60		
Sílica	SiO ₂	S	8,54	11,73	31,20	33,65		
Alumina	Al ₂ O ₃	Al	7,41	29,679	10,30	12,42		
Ferro	FeO	F	25,1	5,82		0,45		
	Fe ₂ O ₃				1,29			
Magnésio	MgO	M	9,6	9,63	12,80	7,95		≤ 6,5
Sódio	Na ₂ O	N	0,104	0,245	0,083			
Potássio	K ₂ O	K	0,0536	0,383	0,09			
Enxofre	SO ₃	S	0,324	0,18	0,292		<4	
Anidrido fosfórico	P ₂ O ₅	P	1,44	0,383	0,146			
Manganês	MnO	Mn	3,4	4,141	3,97			
Titânio	TiO ₂	Ti	0,381	0,46	0,419	0,73		
Vanádio	V ₂ O ₅	V	0,102	0,09	0,049			
Cromo	Cr ₂ O ₃	Cr	0,224	0,286	0,101			
	NiO			0,017	0,09			
	SrO			0,105	0,115			
	ZrO ₂			0,026	0,079			
	NB ₂ O ₅			0,015	0,013			
	K ₂ O			0,129				
	Cl				0,013			
Basicidade								
–			4,45	2,73	1,2	1,24		
CaO/SiO ₂								

Fonte: Elaborada pelo autor, (2015).

Na Tabela 4.28, apresentam-se as propriedades químicas da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF necessárias para ser considerado material pozzolânico. Observa-se que o somatório dos compostos químicos SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ para EACN, EACM1, EACM2a e da EAF é inferior ao valor mínimo de 50, que é uma das

exigências químicas para material pozolânico. Porém o SO_3 e a perda ao fogo (PF) atendem à NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 4.28 – Exigências químicas para materiais pozolânicos da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF

Propriedades	Valores determinados				Limites NBR 12653 (ABNT, 2015)
	Escória de aciaria LD (EACN)	Escória de aciaria modificada n.º I (EACM1)	Escória de aciaria modificada n.º II (EACM2a)	Escória de alto-forno (EAF)	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%) ⁽¹⁾	41,05	47,23	42,79	46,52	$\geq 50,0^{(2)}$
SO_3 % máx.	0,324	0,18	0,292	-	$< 5,0$
Perda ao fogo - PF	5,20	0,00	0,34	-	$\leq 6,0$
Na_2O %máx.	0,104	0,245	0,083	-	$\leq 1,5$

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

NOTAS:

- (1) NBR 12653 (ABNT, 2015) – Materiais pozolânicos: especificações. Essa norma é utilizada para as demais adições minerais.
- (2) No caso de escória Classe E, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015), a exigência do parâmetro $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ passa para valores $\geq 50,0$.

Na Tabela 4.29, apresentam-se os resultados da soma da expressão $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$, da EACN, EACM1, EACM2a e da EAF.

Tabela 4.29 – Relação que a composição química da EAF deve obedecer

Propriedades	Valores determinados				Limites NBR 5735 (ABNT, 1991) Cimento CP III
	Escória de aciaria LD (EACN)	Escória de aciaria modificada n.º I (EACM1)	Escória de aciaria modificada n.º II (EACM2a)	Escória de alto- forno (EAF)	
$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$	6,44	6,08	1,98	1,84	> 1

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.30 apresenta-se a caracterização química da perda ao fogo (PF), do anidrido sulfúrico (SO_3), enxofre (S), óxido de cálcio livre (CaOlivre) e resíduo insolúvel (RI) da EACM1.

Tabela 4.30 – Caracterização química da perda ao fogo (PF), do anidrido sulfúrico (SO_3), enxofre (S), óxido de cálcio livre (CaOlivre) e resíduo insolúvel (RI) da EACM1 por métodos de normas brasileiras

Ensaio	Métodos de ensaio	Teores (%)	Limites NBR 11578(97) CP II E	Limites NBR 5735(91) CP III
Perda ao fogo – PF	NBR NM 18 (2012)	0,00	$\leq 6,5\%$	$\leq 4,5\%$
Anidrido sulfúrico – SO_3	NBR NM 16 (2012)	0,05	$\leq 4,0\%$	$\leq 4,0\%$
Enxofre – S	NBR NM 19 (2012)	0,00	-	-
Óxido de cálcio livre – CaO (livre)	NBR NM 13 (2012)	0,03	-	
Resíduo insolúvel	NBR NM 15 (2012)	23,19	2,5%	$\leq 1,5\%$

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.31 apresentam-se os ensaios químicos da EACM2a e verifica-se que a perda ao fogo (PF), anidrido sulfúrico SO_3 e resíduo insolúvel (RI) são inferiores aos limites exigidos pela NBR 11578 (ABNT, 1997) e NBR 5735 (ABNT, 1991).

Tabela 4.31 – Resultados de ensaios químicos do material EACM2a

Determinações	Resultados, em %	Limites NBR 11578(97) CP II E	Limites NBR 5735(91) CP III
Perda ao fogo (PF) ^{Nota 3}	0,46	$\leq 6,5\%$	$\leq 4,5\%$
Óxido férrico (Fe_2O_3) ^{Nota 4}	0,06		
Óxido de ferro II (FeO)	1,14		
Ferro metálico (FeM)	0,02		
Equivalente alcalino (em Na_2O) ^{Nota 5}	0,12		
Sulfeto (S_2^-)	0,09		
Óxido de cálcio livre (CaO)	0,07		
Resíduo insolúvel (RI)	0,7	2,5%	$\leq 1,5\%$
Anidrido sulfúrico (SO_3)	0,03	$\leq 4,0\%$	$\leq 4,0\%$
Anidrido carbônico (CO_2)	0,83		

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Nota 3: O valor de perda ao fogo obtido é inferior ao valor de anidrido carbônico, possivelmente devido a fenômenos de óxido-redução que ocorrem no ensaio de perda ao fogo, inerentes à amostra ensaiada.

Nota 4: A determinação do óxido de ferro (Fe_2O_3) foi obtida por estequiometria com a seguinte equação: $\text{Fe}_2\text{O}_3 = ((\text{Ferro total (Fe)} - (\text{Óxido de ferro II (FeO)} \times 0,78) - \text{Ferro metálico (FeM)})) \times 1,43$.

Nota 5: Equivalente alcalino (em Na_2O) = $\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O}$.

Verifica-se, no diagrama de fases ($\text{CaO} + \text{MgO}$, SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) (Figura 4.22), que a EACM2a tem a composição química similar à da EAF, atingindo, com isso, o objetivo inicial deste trabalho: obter a escória de alto-forno mediante o processamento pirometalúrgico de uma escória de aciaria de convertedor. A EACM1, que foi a primeira tentativa do processo pirometalúrgico, distanciou-se da escória de alto-forno, não alcançando o objetivo deste trabalho.

Verifica-se que os resultados encontrados para a composição química da EACM2a (Tabela 4.31) estão próximos da área delimitada para a escória de alto-forno no diagrama de fases (Figura 4.22) de Monshia e Asgaranib (1999). A EACM1a está próxima da escória de aciaria e do cimento aluminoso.

Figura 4.22 – Composição química da escória da EACN, EACM1 e EACM2a comparadas com outros materiais no diagrama de fases

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.7.4 Atividade pozolânica

O resultado dos ensaios de atividade pozolânica da EACM1 e EACM2a obtidos pelo método Chapelle modificado é apresentado na Tabela 4.32. Verifica-se que o valor encontrado da EACM1, menor que um da atividade pozolânica (Tabela 4.32), demonstra que é um material pouco reativo na presença da água. O valor encontrado de 132(mg) de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ (Tabela 4.32) da EACM2a significa que apresenta uma pequena atividade pozolânica, porém inferior ao limite exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Tabela 4.32 – Atividade pozolânica da EACM1 e EACM2a

Propriedades determinadas	Método de ensaio	EACM1	EACM2a	Limite NBR 12653 (ABNT, 2015)
Índices de atividade pozolânica (Método modificado) de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$	NBR 15895 (ABNT, 2010)	<1	132	-
				≥ 330

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.7.5 Análise térmica

Na Tabela 4.33, apresentam-se as perdas de massas em função da temperatura da EACM1 das curvas TG/DTG da Tabela 4.33. Esse ensaio foi realizado de acordo com ASTM E794/06(2012) – Standard Test Method for Metting and Crystalization Temperatures by Thermal Analysis (CT – OBRAS – LMCC – Q – PE – 093).

O valor encontrado do teor de cal livre pela análise química (Tabela 4.33) foi 0,03%. Nesse valor está incluído o valor do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Para determinar somente o teor de CaO (avaliar o potencial expansivo da escória), faz-se necessário usar a técnica de análise térmica (TG e DTG), no intuito de determinar a quantidade de Ca(OH)_2 com grande precisão.

Nessa análise termogravimétrica (TG), o Ca(OH)_2 começa a se decompor na temperatura, no intervalo de 370°C a 580°C. Com base na Tabela 4.33 determinada pela TD/DTG, a perda de massa entre 412°C e 540°C é de 0,78%, correspondente ao Ca(OH)_2 . Calcula-se estequiometricamente o percentual de CaO em Ca(OH)_2 , pela Equação 4.4.

$$\text{CaO}/56 = \Delta\text{H}_2\text{O} / 18 \quad \text{Equação 4.4}$$

Os valores de 56 e 18 são as massas moleculares dos componentes CaO e H_2O , respectivamente.

O valor de $\Delta \text{H}_2\text{O} = 0,78$ refere-se à perda de massa determinada pela curva TG.

$$\text{CaO}/56 = 0,78/18 \quad \text{CaO} = 2,42\% \quad \text{Equação 4.5}$$

O valor de CaO livre na EACM1 será a diferença de 0,03%, resultado obtido, no ensaio de etilenoglicol, do valor obtido na Equação 4.5, que foi o de 2,42%, sendo esse o valor do CaO livre devido à desidroxilação do Ca(OH)_2 . Logo, CaO livre não hidratado é de -2,39% (considerado zero devido ao valor negativo encontrado), que será considerado para avaliar o potencial expansivo da EACM1. Assim, o efeito expansivo do CaO livre não hidratado na EACM é nulo.

Verifica-se, na Tabela 4.33, que a perda de massa total da EACM1 foi 8,13%, sendo superior à da EACN, que foi 5,91%, até a temperatura de 1000°C.

Tabela 4.33 – Perda de massa em função da temperatura da EACM1 (LMCC n.º 864-15)

Faixa de temperatura da EACM1(°C)	23-220	220-320	320-412	412-540	540-760	760-918	Perda total
Perda de massa (%)	1,67	0,60	0,82	0,78	4,67	-0,41*	8,13

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Nota 2: O material apresenta ganho de massa.

Figura 4.23 – Curvas TG/DTG da "Escória de aciaria modificada n.º1" (LMCC N.º 869-15).

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Quanto à análise térmica da EACM2a, a perda de massa no intervalo de temperatura de 23°C a 998°C foi 0,19%, bem menor que a de EACN e EACM1, respectivamente, 5,91% e 8,13%. A perda de massa de 0,19% demonstra que a EACM2a apresenta boa estabilidade térmica devido a sua pequena perda de massa até 1000 °C.

A perda de massa no intervalo de temperatura de 412°C a 540°C é aproximadamente de 0,02%, calculando o valor do percentual de CaO em Ca(OH)_2 pela Equação 4.6.

$$\text{CaO}/56 = \Delta\text{H}_2\text{O} / 18$$

Equação 4.6

Considerando $\Delta\text{H}_2\text{O} = 0,02$ temos $\text{CaO} = 0,06$

Na Tabela 4.31, tem-se o CaO livre pelo método etilenoglicol de 0,07%. Logo, CaO livre final será 0,01%. Assim, o efeito expansivo do CaO livre não hidratado na EACM é muito pequeno.

Tabela 4.34 – Perda de massa em função da temperatura da EACM2a (LMCC n.º 869-15)

Faixa de temperatura da EACM2a (° C)	23-412	412-998	Perda total
Perda de massa (%)	-0,19*	0,38	0,19

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Nota 2: O material apresenta ganho de massa.

Figura 4.24 – Curvas obtidas nos ensaios térmicos TG e DTG para a escória de aciaria modificada 2a (EACM2a)

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.7.6 Caracterização mineralógica

As fases mineralógicas da EACM1 foram determinadas por meio da difração de raios X, cuja amostra apresentou baixas intensidades com a identificação apenas de duas fases 50,4% de óxido di-alumínio-magnésio e 49,6% da fase gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ou $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), havendo poucos picos no difratograma de raios X e sendo encontrados 14,17% de valor cristalino para a amostra modificada (Figura 4.25). Segundo Gumieri (2002), a forma cristalina da escória geralmente faz com que a escória não apresente propriedades aglomerantes. Isso mostra uma vantagem para a EACM1, quando comparada com a EACN, pois o resultado de cristalinidade da EACM1 é bem inferior ao do natural.

Figura 4.25 – Difratoograma de raios X da amostra de escória de aciaria modificada

Fonte: Empresa Panalytical (2015).

Com base na última versão do programa HighScore Plus 4.1, foram feitos a identificação, a refinação, a quantificação de fases e o cálculo de cristalinidade. O valor cristalino encontrado foi 14,17%, sendo a maior parte da amostra não cristalina e, portanto, invisível à difração de raios X.

Quando se compara a amostra da EACM1 com a da EACN, verifica-se que a EACN tinha bem mais picos cristalinos, sendo bem mais cristalina quando comparada com a EACM1.

Na Tabela 4.35, encontram-se os ICDD, os compostos minerais e a fórmula química de cada um deles, que foram encontrados na EACM2a.

Tabela 4.35 – Identificação dos compostos na difração de raios X da escória de aciaria modificada (EACM2a), o ICDD, o nome do composto e fórmula na química mineral

ICDD	Nome do composto	Fórmula química	Mineral
Fase amorfa			
01-074-0382	Merwenita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	Merwinita
00-084-1320	Monticellita	CaMgSiO_4	Monticellita

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Figura 4.26, apresenta-se o difratograma da EACM2a, que foi resfriada bruscamente e possui um grande halo amorfo entre 28° e 36° . A maior parte da amostra se encontra vítrea e, portanto, invisível à difração de raios X, o que se deve

ao processo de resfriamento rápido da EACM2a. O difratograma da EACM2a apresenta apenas dois picos cristalinos significativos, que são os minerais merwinita e a monticelita. Porém, na EACN (Figura 4.8), constata-se vários picos cristalinos dos compostos mineralógicos (portlandita, periclásio, calcita, larnita, quartzo, wustita, óxido de cálcio e ferro, magnésio ferrita e srebrodskita). A intensidade dos maiores picos da merwinita e monticelita da EACM2a é superior à dos picos da EACN.

Figura 4.26 – Difratograma de raios X da amostra de escória de aciaria modificada EACM2a

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.7.7 Caracterização microestrutural

Realizaram-se as análises de MEV/EDS da EACM1e da EACM2a com o objetivo de identificar as fases que fazem parte das escórias e se estas eram coerentes com os elementos e compostos identificados via análise química e de fases cristalinas. Observou-se a morfologia das partículas com a microsonda EDS (Espectroscopia por Dispersão de Energia), que fornece a microanálise da composição química em um determinado ponto da amostra.

Da Figura 4.27 à Figura 4.31 apresentam-se as micrografias, respectivamente, realizadas com EACM1 e, na Figura 4.32, as micrografias da EACM2a. Da Tabela 4.36 à Tabela 4.40, apresentam-se as análises da EACM1 por EDS (espectrometria por dispersão de energia) e da EACM2a na Tabela 4.45.

Figura 4.27 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4 e 5)

Fonte: LCT – PMI (2015).

Tabela 4.36 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4 e 5

EDS	Teores (% massa)										
	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1					6,52	0,23					93,3
2	39,4	4,14	13,4	13,4		26,2	0,21			2,60	0,70
3	41,5	15,3	37,9			0,31			0,54	1,57	2,86
4	40,4	4,72	14,8	12,6		24,0				2,50	0,98
5				0,21	0,29	0,38		0,23		1,38	97,5
											100,0

Fonte: LCT – PMI (2015).

Figura 4.28 – Micrografia da EACM1 com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos de 1 a 6)

Fonte: LCT – PMI (2015).

Tabela 4.37 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6

EDS	Teores (% massa)											
	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Total
1											100,0	100,0
2	39,3	4,36	13,5	13,3		25,6	0,25			2,53	1,30	100,0
3	40,9	27,2	23,6	0,74		3,09			0,45	2,77	1,34	100,0
4	39,0	3,43	13,5	13,6	0,26	27,2				1,91	1,04	100,0
5	41,4	16,4	39,1			0,27		0,21	0,28	1,50	0,79	100,0
6	39,3	4,07	13,5	13,8		25,8				2,49	1,16	100,0

Fonte: LCT – PMI (2015).

Figura 4.29 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos de 1 a 7)

Fonte: LCT – PMI (2015).

Tabela 4.38 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7

EDS	Teores (% massa)												
	O	F	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Total
1	39,4		4,37	12,8	13,6	0,21		26,0			2,48	1,18	100,0
2	41,6		16,4	38,6						0,29	1,62	1,55	100,0
3	39,5		13,1	32,2						7,27	4,25	3,63	100,0
4	41,8		15,9	38,4				0,17		0,65	2,09	1,14	100,0
5	40,2		3,33	12,2	14,6			28,1			0,82	0,69	100,0
6	41,7		12,7	32,2	4,15			5,39		0,31	1,91	1,71	100,0
7	35,9	2,39	4,56	10,9	14,7	1,44	0,31	15,4	1,18		9,03	4,25	100,0

Fonte: LCT – PMI (2015).

Figura 4.30 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6)

Fonte: LCT – PMI (2015).

Tabela 4.39 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6

EDS	Teores (% massa)									
	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Total
1					0,65				99,4	100,0
2					0,88				99,1	100,0
3					0,97				99,0	100,0
4	40,0	3,65	10,6	15,3	29,6			0,42	0,45	100,0
5	38,7	3,77	13,0	13,7	26,2	0,26		2,28	2,15	100,0
6	41,6	15,7	38,1	0,58	1,07		0,28	1,74	0,92	100,0

Fonte: LCT – PMI (2015).

Figura 4.31 – Micrografia da EACM1 resfriada rapidamente com marcação dos pontos submetidos à análise por EDS (pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8)

Fonte: LCT – PMI (2015).

Tabela 4.40 – Análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia) para os pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8

EDS	Teores (% massa)											Total
	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	
1					0,64						99,4	100,0
2	39,1	4,03	13,7	13,5		26,1				2,53	0,99	100,0
3	41,3	16,2	38,6			0,27		0,23	0,44	1,66	1,28	100,0
4	39,4	3,86	12,6	13,8		26,6				2,77	1,06	100,0
5	39,2	3,03	12,4	14,5		29,4				0,86	0,64	100,0
6	39,9	13,0	31,0	4,69	0,26	6,52	0,26		0,36	2,38	1,58	100,0
7	39,6	5,21	15,7	12,3		23,5	0,21			2,41	1,10	100,0
8	42,5	16,1	38,4			0,48			0,30	1,73	0,49	100,0

Fonte: LCT – PMI (2015).

Na Figura 4.32, apresenta-se a micrografia da amostra EACM2a, cuja superfície dos grãos é lisa, diferenciando-se da EACN, que é rugosa.

Figura 4.32 – Micrografia da amostra de escória EACM2a

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Tabela 4.41, apresenta-se a análise por EDS (espectrometria por dispersão de energia), realizada nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 na amostra da EACM2a, conforme indicado na Figura 4.32. Nesses pontos, verifica-se a presença de cálcio (Ca), manganês (Mn), magnésio (Mg), alumínio (Al) e silício (Si), cujos teores dos elementos químicos dos pontos 1, 2, 3, 4 e 5 são bem próximos, conforme se observa na Tabela 4.41. Isso evidencia o que mostrou a caracterização química da EACM2a (Tabela 4.27), que apresenta os dois maiores valores para cálcio e silício, respectivamente, de 38,6% e 31,2%. A espectrometria por dispersão de energia (EDS) na Tabela 4.41 confirma que os maiores valores para a média são o cálcio com 29,6% e o silício com 18,08%.

Tabela 4.41 – Análise por EDS (Espectrometria por dispersão de energias) para os pontos 1, 2, 3, 4 e 5

EDS	Teores (% massa)					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn
1	21,85	8,78	7,78	19,83	38,52	3,23
2	31,61	9,89	7,76	18,21	30,32	2,22
3	31,46	10,02	7,90	18,91	29,80	1,92
4	37,28	10,53	7,94	17,12	25,58	1,55
5	39,83	10,51	7,73	16,37	23,80	1,76
Média	32,41	9,94	7,82	18,09	29,60	2,13
Desvio-Padrão	6,92	0,71	0,09	1,38	5,70	0,66
Variância	3,10	0,32	0,04	0,62	2,55	0,29

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Verifica-se, pela Figura 4.33, que foram identificados picos de cálcio, manganês, magnésio, alumínio e silício. A energia característica do silício é de 1,80 keV e corresponde à existência do maior pico na energia. Percebe-se também que o segundo maior pico na energia corresponde ao cálcio e atinge o valor de 3,60 keV. Esses resultados confirmam o resultado apresentado para a análise química, que indica que o cálcio, silício, magnésio, alumínio são os constituintes principais desse produto.

Figura 4.33 – Elementos químicos presentes na EACM2a

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

A diferença entre o MEV da EACN e o da EACM2a deve-se à presença do ferro, não presente no MEV da EACM2a, que foi eliminado durante o processo pirometalúrgico, para obter a EACM2a.

4.8 CALOR DE HIDRATAÇÃO DE CIMENTO CP V-ARI PURO E COM SUBSTITUIÇÃO DE 40% POR EACM2b

Foram registrados, na Tabela 4.42, os valores obtidos para calor de hidratação do cimento CP V-ARI puro e com CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b.

Verifica-se a perda de calor de hidratação do cimento CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b em relação ao CP V-ARI puro. Conclui-se que a EACM2b, quando misturada com CP V-ARI, libera menos calor em razão de a mistura possuir menos C_3S quando comparada ao CP V-ARI puro.

Observa-se que o efeito do calor de hidratação da EACM2b começou com maior intensidade entre 41 horas e 168 horas, pois o CP V-ARI puro teve uma variação do calor de hidratação de 6 (J/g), enquanto o CP V-ARI com 40% de EACM2b teve uma variação de calor de 26 (J/g), demonstrando o efeito lento da EACM2b.

O CP V-ARI tem calor de hidratação inicial maior nas horas iniciais devido ao seu elevado teor de C_3S ; já a EACM2b possui um teor elevado de C_2S , que tem ação lenta nas idades iniciais.

O cimento CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b pode ser considerado um cimento de baixo calor de hidratação, pois os valores obtidos aos 3 e 7 dias, respectivamente, de 248 (J/g) e 276 (J/g), são inferiores aos valores máximos especificados pela NBR 13116 (ABNT, 1994) para cimento Portland de baixo calor de hidratação, que são 260 J/g e 300 J/g para as respectivas idades.

Tabela 4.42 – Calor de hidratação do cimento CP V-ARI Puro e CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b (J/g)

Tempo (horas)	CP V-ARI PURO	CP V-ARI COM 40% DE SUBSTITUIÇÃO POR EACM2b
6	80	46
12	270	168
24	317	226
41	330	248
48	330	251
72	330	258
96	331	264
120	332	269
144	334	273
168	336	276

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Verifica-se a diminuição do calor de hidratação do cimento CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b em relação ao CP V-ARI puro. Conclui-se que a EACM2b, quando misturada com CP V-ARI, libera menos calor hidratação, em virtude de a

mistura possuir menos C_3S , quando comparada ao CP V-ARI puro, sendo esse o comportamento da escória de alto-forno quando presente no cimento.

O calor de hidratação elevado pode ser desfavorável em concretagem no verão e em estrutura do tipo concreto massa, porém favorável em concretagem no inverno.

Figura 4.34 – Calor de hidratação do cimento CP V-ARI e CP V-ARI com substituição do clínquer por 40% de EACM2b (J/g)

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Figura 4.35, verifica-se que o pico apresentado na evolução da temperatura do CP V-ARI puro representa a formação da etringita. Conclui-se que a temperatura alcançada pelo CP V-ARI até 72 horas do início do ensaio é superior à do CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b; após 72 horas, a temperatura do cimento CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b é superior à do cimento CP V-ARI. Segundo Melo (2010), pastas de cimento com altas temperaturas influem na porosidade da microestrutura da matriz cimentícia e sobre o tipo de produto formado, favorecendo a formação de aluminatos hidratados ao final do ciclo térmico e da etringita durante a estocagem sob a alta umidade.

Figura 4.35 – Elevação da temperatura em relação à garrafa de referência

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.9 AVALIAÇÃO DO GRAU DE VITRIFICAÇÃO DA EACM2b POR MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA POLARIZADA

A avaliação do grau de vitrificação foi feita com o microscópio óptico de luz transmitida polarizada, por meio da contagem dos grãos parcial e totalmente cristalizados. A fase vítrea da EACM2b tem boa reatividade, pois teores elevados de vidro favorecem a hidratação (SILVA, 2010).

Segundo Battagin e Esper (1998), na seção 2.2.3, a composição química e o grau de vitrificação são os fatores de que mais depende a atividade hidráulica das escórias.

Na Tabela 4.43, apresenta-se o resultado da análise quantitativa do grau de vitrificação da EACM2b. A determinação do grau de vitrificação tem a finalidade de caracterizar a reatividade da escória. Quanto maior o seu grau de vitrificação, favorecerá a hidratação, o que a tornará mais reativa. Segundo Silva (2010), a escória de alto-forno tem grau de vitrificação em torno 96(%), e a EACM2b ficou um pouco inferior com 76% (Tabela 4.43), porém bem mais reativa que EACM1, que teve grau de vitrificação de 14%.

Tabela 4.43 – Grau de vitrificação da amostra de escória Identificação da amostra

Identificação da amostra	Grau de vitrificação (%)
Escória de aciaria modificada (EACM2b)	76

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.10 AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE EACM2b POR MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA (TESTE DE MICHELSEN)

Na Tabela 4.44, apresenta-se a avaliação da reatividade da EACM2b, sendo mais reativa que o traço referência, que é feito com uma escória de alto-forno de boa reatividade. A reatividade da escória depende da sua solubilidade com álcalis e com a sua capacidade de precipitação de compostos hidratados insolúveis (SILVA, 2010). A EACM2b, conforme resultados apresentados na Tabela 4.50, contribuiu para o aumento da resistência à compressão axial de 3 a 7 dias de 73,4% de argamassa de clínquer mais gesso, com substituição do cimento CP V-ARI, por 40% de EACM2b, quando comparada com o traço referência de 0% de substituição que teve, no mesmo intervalo de tempo, um aumento de apenas 23,4%.

Tabela 4.44 – Avaliação da reatividade

Identificação da amostra	Resultados
Traço referência	5 min 20s
Escória de aciaria modificada (EACM2b)	3min 46s

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Na Figura 4.36 e Figura 4.37, apresentam-se as agulhas formadas ao redor dos grãos de gipsita.

Figura 4.36 – Cristalização da gipsita

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Figura 4.37 – Cristalização das acículas de gipsita

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

4.11 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO REALIZADO COM A ESCÓRIA DE ACIARIA LD COM ADIÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO (NaOH) e Cal (CHI)

A seguir, são apresentados os resultados encontrados da resistência à compressão das argamassas com EACN de granulometria inferior a 0,074mm como cimento e com adição de hidróxido de sódio e cal. Utilizaram-se 3% de hidróxido de sódio e 5% de cal como ativadores da escória de aciaria LD.

Apresenta-se, na Tabela 4.45, a proporção dos materiais utilizados nos traços A e B: o traço A é a referência e o traço B foi realizado com escória de aciaria ativada com

hidróxido de sódio e cal como cimento, e os agregados miúdos para ambos os traços (A e B) utilizaram areia normal de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2012) nas frações 0,15, 0,3, 0,6 e 1,2mm.

Tabela 4.45 – Proporção de escória de aciaria, como clínquer, ativada com silicato de sódio para a elaboração dos traços, de acordo com a NBR 7215:2012

Traço	CP III 40 RS (g)	Escória moída (g)	Hidróxido de sódio		Cal (CHI)		Areia normal Peneira de abertura de malha (mm)				Água (g)
			(g)	%	(g)	%	# 0,15	# 0,30	# 0,60	# 1,20	
A	624	-	-	-	-	-	468 ± 0,3	468 ± 0,3	468 ± 0,3	468 ± 0,3	300 ± 0,2
B	-	624	18,72	3	31,20	5	468 ± 0,3	468 ± 0,3	468 ± 0,3	468 ± 0,3	300 ± 0,2

Fonte: LEMAC - UFES (2014).

Os resultados da resistência à compressão, de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2012), estão apresentados na Tabela 4.46, nas idades de 28 dias e 91 dias, e são, respectivamente, 3,54MPa e 4,27MPa, sendo bem inferiores ao do traço referência de argamassa de cimento CP V-ARI puro, de acordo com a Tabela 4.5 que foi 47 MPa aos 28 dias e 52,6 MPa aos 91 dias. Dessa forma, a ativação alcalina com hidróxido de sódio e cal não é viável, devido à estrutura cristalina da EACN e sua composição química.

Tabela 4.46 – Resultado da resistência à compressão nas idades de 28 e 91 dias da escória de aciaria com adição de hidróxido de sódio (NaOH) e cal (CHI)

TRAÇO	IDADE DE RUPTURA					
	28 DIAS			91 DIAS		
	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência à compressão (MPa)	Carga (N)	Área (mm ²)	Resistência à compressão (MPa)
A1	7546,00	1963,44	3,84	8134,00	1963,44	4,14
A2	6370,00	1963,44	3,24	8624,00	1963,44	4,39
	Média (MPa)		3,54			4,27
(A) Traço com ativação da escória com 5% de hidróxido de sódio e 5% de cal						

Fonte: LEMAC – UFES (2014).

4.12 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO POR EACN

Apresentam-se a seguir os resultados de resistência à compressão axial de argamassas de cimento CP V-ARI com substituição parcial do cimento por EACN que foi moída e passou na peneira de 0,075mm de abertura, conforme foi descrito no capítulo 3, seção 3.2.2.

Na Tabela 4.47, apresentam-se os resultados de resistência média à compressão axial das argamassas nas idades de 3, 7, 28, 91 e 730 dias do cimento CP V-ARI com substituição de 0%, 6%, 10%, 20% e 34%.

Verifica-se, na Tabela 4.47, que a resistência média à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias das argamassas de cimento com 6% de substituição por EACN são, respectivamente, 34,4MPa, 37,4MPa e 43,3MPa, e, com 10%, respectivamente, 29,7MPa, 36,8MPa e 43,8MPa, que são superiores aos valores mínimos exigidos para o cimento CP II-E 40 pela NBR 11578 (ABNT, 1997) de 15MPa, 25MPa e 40MPa. Além disso, atende ao cimento CP V-ARI nas idades de 3 e 7 dias com valores superiores exigidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991) de 24MPa e 34MPa.

Conforme a Tabela 4.47, a resistência média à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias das argamassas de cimento com 20% de substituição por escória de aciaria EACN é, respectivamente, 26,8MPa, 29,8MPa e 37,8MPa, que são superiores aos valores mínimos exigidos para o cimento CP II-E 40 de 15MPa, 25MPa nas idades de 3 e 7 dias, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997). Porém, o valor de 37,8MPa aos 28 dias da argamassa de cimento com 20% de substituição por escória de aciaria EACN é inferior a 40MPa, que é valor mínimo para atender à NBR 11578 (ABNT, 1997). Entretanto, atende ao cimento CP II-E 32 da NBR 11578 (ABNT, 1997), pois os valores mínimos exigidos são 10MPa 20MPa e 32MPa, respectivamente, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Aos sete dias, a resistência média à compressão de 23,4MPa do cimento com 34% de escória de aciaria não atende ao valor mínimo de 25MPa, que é o exigido do

cimento CP II-E 40 pela NBR 11578 (ABNT, 1997). Para os cimentos CP II-E 32, a substituição de 34% de escória atende à exigência mínima da referida norma, que é de 20 MPa aos sete dias; porém, o de 28,7MPa não atende ao valor mínimo de 32MPa exigido do cimento CP II-E 32 aos 28 dias.

Conclui-se que aumentar o teor de escória de aciaria em substituição ao cimento leva sempre à diminuição da resistência à compressão e que é possível a substituição do cimento CP V-ARI por até 10% por EACN, respectivamente, para atender ao cimento CP II-E 40 e a substituição do cimento CP V-ARI por até 20% para atender ao cimento CP II-E 32.

Na Figura 4.38 observa-se que a substituição do cimento CP V-ARI por até 6% por EACN aos 730 dias teve a maior coluna em relação às demais misturas.

Tabela 4.47 – Resistência média à compressão das argamassas de cimento com substituição de cimento CP V-ARI por EACN nos teores de 0%, 6%, 10%, 20% e 34%

Idade (dias)	Percentual de substituição do cimento CP V-ARI					Resistência mínima à compressão		
	EACN					CP II-E 32	CP II-E 40	CP V-ARI
	0%	6%	10%	20%	34%	NBR 11578	NBR 11578	NBR 5733
1	24,1	-	-	-	-	-	-	≥ 14
3	36,2	34,4	29,7	26,8	20,5	≥ 10	≥ 15	≥ 24
7	39,5	37,4	36,8	29,8	23,4	≥ 20	≥ 25	≥ 34
28	47	43,3	43,8	37,8	28,7	≥ 32	≥ 40	-
91	52,6	46,6	45,2	40,9	33	-	-	-
730		56,8	45,2	43,81	33,1	-	-	-

Fonte: LEMAC - UFES (2017).

Figura 4.38 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACN nos teores de 0%, 6%, 10%, 20% e 34% e nas idades de 1, 3, 7, 28, 91 e 730 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.13 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR EACM1

Apresentam-se a seguir os resultados de resistência à compressão axial de argamassas de cimento CP V-ARI com substituição por EACM1, que foi moída e passou na peneira de 0,075mm de abertura, conforme foi descrito no capítulo 3, seção 3.2.1.9.

Apresentam-se, na Tabela 4.48, os resultados de resistência à compressão axial das argamassas com substituição de cimento CP V-ARI, no teor de 10% por EACM1 nas idades de 3, 7 e 28 dias e são, respectivamente, 31,52 MPa, 37,66MPa e 46,16MPa superiores aos valores mínimos exigidos do cimento CP II-E 40 pela NBR 11578 (ABNT, 1997), de 15MPa, 25MPa e 40MPa, respectivamente, nas idades de 3, 7 e 28 dias, também atende ao cimento CP V-ARI nas idades de 3 e 7 dias com valores superiores exigidos pela NBR 5733 (ABNT, 1991) de 24MPa e 34MPa.

Verifica-se, na Tabela 4.48, que o valor da resistência média à compressão axial aos 28 dias de 46,16MPa para a argamassa com substituição de 10% de EACM1 está próximo do valor da resistência à compressão de 47MPa da argamassa de referência, que não utiliza escória de aciaria LD como substituição parcial do cimento; porém, aos 91 dias, o valor encontrada da resistência à compressão axial de 56,12 MPa supera a resistência à compressão axial de 52,6 MPA do traço da argamassa com substituição de 0% de EACM1. A argamassa com substituição de 10% de EACM1 teve um crescimento de 21,58% aos 91 dias em relação aos 28 dias; já argamassa com 0% de substituição teve, no mesmo período, um crescimento de 11,92%. Isso é o resultado do efeito retardado da EACM1.

Tabela 4.48 – Resistência média à compressão das argamassas de cimento com substituição de cimento por escória de aciaria LD no teor de 10%

Idade (dias)	Percentual de substituição do cimento CP V-ARI		Resistência mínima à compressão		
		EACM1	CP II-E 32	CP II-E 40	CP V-ARI
	0%	10%	NBR 11578	NBR 11578	NBR 5733
1	24,1	-	-	-	≥ 14
3	36,2	31,52	≥ 10	≥ 15	≥ 24
7	39,5	37,66	≥ 20	≥ 25	≥ 34
28	47	46,16	≥ 32	≥ 40	-
91	52,6	56,12	-	-	-

Fonte: LEMAC – UFES (2017)

Na Figura 4.39, verifica-se que a EACM1 tem valores inferiores nas idades de 3,7 e 28 dias; porém, aos 91 dias, supera o traço referências.

Figura 4.39 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACM1 nos teores de 0%, e 10% nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.14 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS DE CIMENTO CP V-ARI COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR EACM2a e EACM2b

Apresentam-se, na Tabela 4.49, os resultados de resistência à compressão axial da argamassa de cimento CP V-ARI com substituição nos teores de 10% e 20% por EACM2a.

Verifica-se, na Tabela 4.49, que a resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias das argamassas de cimento com 10% de substituição por escória de aciaria EACM2a é, respectivamente, 43,73MPa, 47,46MPa e 58,71MPa, que são bem superiores aos valores mínimos exigidos para o cimento CP II-E40, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1997), que são 15MPa, 25MPa e 40MPa superiores aos valores mínimos de resistência à compressão axial do cimento CP V-ARI nas idades de 3 e 7 dias, que são 24MPa e 34MPa, respectivamente, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991).

Os valores encontrados de resistência à compressão axial nas idades de 3 e 7 dias 43,73MPa e 47,46MPa para o cimento CP V-ARI com 10% de adição são superiores a 36,2MPa e 39,5MPa, que são as resistências à compressão axial do traço sem adição escória de aciaria EACM2a.

Provavelmente a resistência à compressão superior das argamassas com substituição de 10% do CP V-ARI por EACM2a em 24,91% na idade de 28 dias, quando comparada com o traço de argamassas com 0% de substituição de escória, é devida à atividade pozolânica de 132 (mg) de $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$ da EACM2a, que, apesar de pequena, favoreceu a reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a reação de hidratação do cimento, contribuindo para o aumento da resistência. Na idade de 3 e 7 dias, a resistência à compressão de argamassas com substituição de 10% do CP V-ARI por EACM2a foi superior, respectivamente, com 20,8% e 20,15% ao traço com 0% de substituição.

O crescimento da resistência à compressão de 24,26%, entre as idades de 3 e 7 dias das argamassas com substituição de 20% do cimento CP V-ARI por EACM2a, é devido à ativação da EACM2a pelo de hidróxido de sódio liberado pelo cimento, pois, nesse caso, como o teor de escória era maior, favoreceu o crescimento da resistência. A expectativa de obter valores maiores de resistência à compressão quando se utilizam 20% de EACM2a, comparando com os 10% de EACM2a do traço inicial, pode ser explicada pela menor área específica Blaine de 1749 (cm^2/g) da EACM2a (Tabela 4.24), o que reduz o efeito filler, quando comparada à área específica Blaine do cimento CP V-ARI de 4812 (cm^2/g).

O aumento da fração não cristalina da pasta de cimento, quando se utilizou a EACM2a, pode ser um fator do aumento de resistência mecânica. Essa menor cristalinidade também resulta em menor porosidade, como foi comprovado em estudos (JOHN, 1995) e nos resultados, podendo ainda justificar o aumento de resistência mecânica nas composições com menor grau de organização cristalina. Verifica-se, na Tabela 4.49, que todas as resistências à compressão aos 28 dias foram superiores a 40 MPa, tanto para EACM2a como para EACM2b. A menor resistência à compressão aos 28 dias foi a da EACM2a com 20% de substituição do cimento CP V-ARI, o que pode ser explicado pela menor área específica Blaine de 1749 (cm^2/g) da

EACM2a. Isso reduz o efeito filler, quando comparada com a área específica Blaine do cimento CP V-ARI de 4812 (cm²/g).

Já a EACM2b teve área Blaine de 4371 (cm²/g) inferior ao do cimento CP V-ARI de 4812 (cm²/g), porém superior a EACM2a de 1749 (cm²/g), que favoreceu o efeito filler, quando comparado com o da EACM2a, mais o efeito da atividade pozolânica de 132mg de Ca(OH)₂/g da EACM2b, os quais contribuíram para o aumento da resistência à compressão de argamassas com substituição de 40% do CP V-ARI por EACM2b, quando comparada com a das argamassas de CP V-ARI puro, de acordo com a Tabela 4.5 as resistências das argamassas com substituição de 20% do CP V-ARI por EACM2b foram superiores às das argamassas 20% do CP V-ARI por EACM2a, também justificado pelo efeito filler da EACM2b.

As argamassas com substituição de 10% do CP V-ARI por EACM2a tiveram um crescimento da resistência muito pequeno quando se compara a idade de 270 dias à de 91 dias. O mesmo ocorreu com as argamassas de cimento CP V-ARI com 40% de substituição por EACM2b, quando se compara a idade de 182 dias à de 91 dias.

As argamassas do cimento CP V-ARI com substituição por 40% de EACM2b tiveram aumento da resistência à compressão axial de 114,09% entre as idades de 3 e 7 dias. Isso é devido a EACM2b ter grau de vitrificação de 76%, conforme Tabela 4.43, e apresentar boa reatividade Tabela 4.44.

Segundo Shi et al. (2006), a moagem prolongada aumenta tanto a superfície específica de um material quanto o número de imperfeições ou centros ativos que existem nas bordas, cantos, projeções e lugares cujas distâncias interatômicas são anormais ou embutidas com átomos externos. Esses centros estão num estado de energia mais alta do que na estrutura normal. Quanto maiores esses centros, maior a reatividade. Os autores concluem que, em geral, a reatividade hidráulica da escória de aciaria (BOF) aumenta no mesmo passo de sua finura.

Tabela 4.49 – Resistência à compressão axial de argamassa de traço referência do cimento CP V-ARI com 0% de substituição nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias; substituição de 10% e 20% da EACM2a nas idades de 3, 7, 28, 91 e 270 dias; e substituição do cimento CP V-ARI por EACM2b nos teores de 20% e 40%, nas idades de 3, 7, 28, 91 e 182 dias

Idade (dias)	Percentual de substituição do cimento CP V-ARI					Resistência mínima à compressão			
	PURO	EACM2a		EACM2b		CP II-E 32	CP II-E 40	CP III 40	CP V-ARI
	0%	10%	20%	20%	40%	NBR 11578	NBR 11578	NBR 5735	NBR 5733
1	24,10	-	-	-	-	-	-	-	≥ 14
3	36,20	43,73	29,10	33,11	21,65	≥ 10	≥ 15	≥ 12	≥ 24
7	39,50	47,46	36,16	42,63	46,35	≥ 20	≥ 25	≥ 23	≥ 34
28	47,00	58,71	42,79	50,42	52,97	≥ 32	≥ 40	≥ 40	-
91	52,60	59,36	43,80	65,45	59,08	-	-	-	-
182	-	-	-	-	59,50	-	-	-	-
270	-	59,60	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 4.40 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa com substituição do cimento CP V-ARI por EACM2a nos teores de 0%, 10% e 20% nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias, e EACM2b nos teores de 20% e 40%, nas idades de 1, 3, 7, 28 e 91 dias

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.15 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ARGAMASSAS DE CLÍNQUER E GESSO PURO E COM ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE 40% POR EACM2b

Verifica-se, na Tabela 4.50, que os valores de resistência à compressão de argamassas de clínquer e gesso aos 3, 7, 28 e 91 dias de 23,74MPa, 29,03MPa, 36,47MPa e 41,40MPa são superiores aos de resistência à compressão de argamassas de clínquer e gesso adição de 40% de EACM2b aos 3, 7, 28 e 91 dias, respectivamente, 15,38MPa, 26,75MPa, 39,17MPa e 49,15MPa.

A variação percentual da resistência à compressão na Tabela 4.50 de argamassas de clínquer e gesso entre 3 e 7 dias é de 22,28%, e a das argamassas de clínquer e gesso com substituição por 40% de EACM2b é de 73,93%. Isso demonstra que, até 3 dias, a EACM2b retarda o endurecimento. Porém, de 3 a 7 dias, a reatividade hidráulica da EACM2b é grande, provavelmente devido às suas características pozolânicas, apesar de pequenas, e ao efeito filler e estrutura vítrea, que favorecem a reatividade hidráulica.

Aos 91 dias, as argamassas de clínquer e gesso com substituição por 40% de EACM2b teve resistência à compressão de 49,15 MPa, atendendo somente, aos 91 dias, à resistência mínima axial à compressão aos 28 dias de 40 MPa do cimento Portland CP III-40, o mesmo ocorrendo com as argamassas de clínquer e gesso; porém, a resistência à compressão aos 91 dias foi 41,4 MPa.

A resistência das argamassas com clínquer foi reduzida em virtude de o tamanho dos grãos do clínquer ser superior ao do cimento, conforme resultados da granulometria a laser (Tabela 4.6), influeciando na redução da reatividade do clíquer.

Tabela 4.50 - Resistência à compressão axial (MPa) das argamassas com adição de 40% de EACM2b ao clínquer e gesso mineral

Idade (dias)	Percentual de adição do clínquer + gesso mineral		Resistência mínima à compressão (MPa)	
		EACM2b	CP III 40	CP V-ARI
	0%	40%	NBR 5735	NBR 5733
3	23,74	15,38	≥ 12	≥ 24
7	29,03	26,75	≥ 23	≥ 34
28	36,47	39,17	≥ 40	-
91	41,40	49,15	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Figura 4.41 – Representação gráfica da resistência média à compressão de argamassa de clínquer + gesso mineral nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias e com adição de 40% EACM2b ao clínquer + gesso mineral

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.16 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DE ARGAMASSAS ENDURECIDAS DE CIMENTO CP V-ARI PURO E COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL POR EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b

Foram registrados, na Tabela 4.51, os valores obtidos para absorção, índice de vazios e massa específica, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2009), com corpos de prova cilíndrico de 5cm x 10cm de argamassas endurecidas de cimento CP V- ARI puro e com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a.

Observa-se que a menor absorção e índice de vazios foram para a argamassa que utilizou 10% de substituição do cimento CP V-ARI por EACM1, o que pode estar relacionada ao efeito filler, pois a dimensão dos grãos da EACM1 favoreceu a menor absorção e índice de vazios.

A menor massa específica foi para a argamassa com 10% de substituição do cimento CP V-ARI por EACM2a, pois a EACM2a apresenta o menor teor de ferro na sua composição.

Conclui-se que a argamassa com 10% de substituição do cimento CP V-ARI por EACM2a apresenta absorção e índice de vazios inferior ao traço com 0% de substituição por escória. Já a argamassa com 20% de substituição de cimento CP V-ARI por EACM2a apresenta aumento respectivo de 4,3% e 4,63% para absorção e índice de vazios em relação ao traço com 0% de substituição por escória.

As argamassas com 40% de substituição do cimento CP V-ARI por EACM2b apresenta absorção e índice de vazios inferiores ao traço com 0% de substituição. Isso ocorre provavelmente devido à maior reatividade da EAMC2b, quando comprada do CP V-ARI (Tabela 4.44).

Tabela 4.51 – Absorção, índice de vazios e massa específica de argamassas endurecidas de cimento CP V-ARI puro e com substituição parcial por EACN, EACM1, EACM2a e EACM2b

Traço de argamassa em peso NBR 7215	Percentual de substituição de escória	Materiais em substituição em CP V-ARI	Adição ao clínquer + gesso	NBR 9778 (ABNT, 2009)		
				Absorção (%)	Massa específica real (g/cm ³)	Índice de vazios (%)
1:3:0,48	0%	CP V-ARI		7,65	2,53	16,21
1:3:0,48	10%	EACN		8,04	2,54	16,95
1:3:0,48	20%	EACN		7,92	2,52	16,64
1:3:0,48	34%	EACN		8,22	2,51	17,10
1:3:0,48	10%	EACM1		7,17	2,60	15,74
1:3:0,48	10%	EACM2a		7,44	2,50	15,94
1:3:0,48	20%	EACM2a		7,98	2,56	16,96
1:3:0,48	40%	EACM2b		6,57	2,15	14,10

Traço de argamassa em peso NBR 7215	Percentual de substituição de escória	Materiais em substituição em CP V-ARI	Adição ao clínquer + gesso	NBR 9778 (ABNT, 2009)		
				Absorção (%)	Massa específica real (g/cm³)	Índice de vazios (%)
1:3:0,48	40%	EACM2b		6,73	2,11	14,20
	40%		EACM2b	6,07	2,18	13,44
	40%		EACM2b	5,85	2,19	12,78

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Observa-se que a massa específica e o índice de vazios foram menores para argamassa que utilizou 40% de adição de EACM2b ao clínquer + gesso natural.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES REFERENTES À EACN

- A caracterização da EACN apresentou como principais resultados: basicidade de 4,45, MgO igual a 9,6, maior que o exigível pela NBR 11578 (1991), resíduo de 13,21% (RI), superior ao valor máximo de 2,5% exigido pela NBR 11578 (ABNT, 1997).
- A análise química confirmou a presença do CaO livre.
- A análise térmica (TG/DTG) das amostras EACN permitiu observar a decomposição do Ca(OH)_2 , possibilitando o cálculo do CaO livre.
- A combinação da análise térmica (TG/DTG) com a titulométrica mostrou-se fundamental para uma avaliação adequada do teor de cal livre em EACN de convertedor.
- A EACN apresentou estado cristalino, e os principais compostos são a portlandita na forma Ca(OH)_2 , periclásio MgO, carbonato de cálcio na forma de calcita CaCO_3 , larnita (Ca_2SiO_4), óxido de ferro (FeO) na forma de Wustita.
- A presença do periclásio, larnita na forma $\beta\text{-C}_2\text{S}$, CaO livre, bem como de ferro, pode produzir expansibilidade indesejada da escória.
- Do ponto de vista de resistência à compressão, são possíveis tanto a substituição do cimento CP V-ARI, por até 10% por EACN, respectivamente, pelo cimento CP II-E 40, como a substituição do cimento CP V-ARI, por até 20%, pelo cimento CP II-E 32.

5.2 CONCLUSÕES REFERENTES À EACN COM ADIÇÃO DE HIDRÓXIDO DE SÓDIO E CAL

- Sendo a resistência à compressão uma propriedade de fundamental importância para o estudo do cimento, conclui-se que a ativação da escória de aciaria LD com hidróxido de sódio e cal não é viável.

5.3 CONCLUSÕES REFERENTES À EACM1

- A caracterização da EACM1 apresentou como principais resultados a basicidade de 2,73, sendo menor que a basicidade da escória natural de 4,45, o que facilita a formação da estrutura vítrea, e a separação magnética após o resfriamento brusco.
- O MgO foi 9,63%, sendo maior que o exigível pela NBR 11578 (ABNT, 1991) e ficando praticamente estável em relação à EACN, que foi 9,6%.
- No caso do resíduo insolúvel na EACN, era de 13,21%, passando para 23,19% por ocasião da EACM1 e permanecendo maior que o valor máximo de 2,5% exigido pela NBR 11578 (ABNT, 1997).
- Na composição química, houve aumento da alumina (Al_2O_3), de 7,41% para 29,689%, e da sílica (SiO_2), de 8,54% para 11,733%. Porém, o teor de ferro (FeO) teve uma redução de 25,1% para 5,824%. Essa composição apresenta valores da composição química bem diferentes dos da escória de alto-forno, que era o objetivo do processo pirometalúrgico.
- A EACM1 apresentou 14,17% de valor cristalino e apenas duas fases: 50,4% de óxido di-alumínio-magnésio e 49,6% da fase gehlenita, havendo poucos picos no difratograma de raios X.
- Os elementos químicos presentes na EACM1 são o carbono (C), o oxigênio (O), o ferro (Fe), o magnésio (Mg), o alumínio (Al), o silício (Si) e o cálcio (Ca).
- A EACM1 apresentou valores de perda ao fogo (PF) de 0,00%, anidrido sulfúrico (SO_3) de 0,05%, enxofre (S) de 0,0% e óxido de cálcio livre de 0,03.
- Uma vantagem para a escória de aciaria LD modificada 1 (EACM1) é a sua cristalinidade, que é bem inferior ao da natural.
- Do ponto de vista de resistência à compressão, é possível a substituição do cimento CP V-ARI, por até 10%, por EACM1, respectivamente, para o cimento CP II-E 40 e o CP V-ARI. O único conveniente foi o teor de ferro que, apesar de ter diminuído ainda, ficou alto. A expansibilidade do CaOlivre foi eliminada e a expansibilidade devido ao MgO também foi eliminada em virtude de estar no estado vítreo.

5.4 CONCLUSÕES REFERENTES À EACM2a e EACM2b

- A caracterização da EACM2a apresentou como principais resultados a basicidade de 1,24, ficando igual à basicidade da escória de alto-forno de 1,24, utilizada na produção do cimento. Os dois fatores, basicidade e resfriamento rápido, são fundamentais para a obtenção de escória com características cimentícias.
- A composição química obtida da EACM2a — $\text{CaO}=38,60\%$, $\text{SiO}_2=31,20\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=10,30\%$, $\text{FeO}=1,29\%$, $\text{MgO}=12,80\%$ e $\text{TiO}=0,42\%$ — é similar à composição química da EAF: $\text{CaO}=41,60\%$, $\text{SiO}_2=33,65\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=12,42\%$, $\text{FeO}=0,45\%$, $\text{MgO}=7,95\%$ e $\text{TiO}=0,73\%$.
- Os elementos químicos presentes na EACM2a, pelo MEV, são o oxigênio (O), o magnésio (Mg), o alumínio (Al), o silício (Si) e o cálcio (Ca). Esses também estão presentes na escória de aciaria modificada, com exceção do ferro (Fe) e do carbono (C).
- O valor encontrado para a área específica da EACM2a pelo método de Blaine de 1749 (cm^2/g) está abaixo de alguns valores de área específica de adições minerais, tais como escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz, e também inferior ao mínimo exigido para área específica para o cimento CP II-E 40, que é de 2800,00 (cm^2/g).
- A EACM2b apresenta grãos menores que a EACM1 e EACM2a, tornando-a mais reativa do ponto de vista área superficial, pois a EACM1, EACM2a e EACM2b têm os diâmetros D50, respectivamente, de 22,3 μm , 31,8 μm e 11,637 μm , e os diâmetros D90, respectivamente, 57,2 μm , 69,4 μm e 41,01 μm .
- A resistência média à compressão da argamassa de cimento CP V com substituição de 10% por EACM2a, nas idades de 3, 7 e 28 dias, respectivamente, 31,52MPa, 37,66MPa e 46,16MPa, é superior à dos valores de 29,7MPa, 36,8MPa e 45,2MPa para argamassa de cimento com 10% de substituição por escória LD natural nas mesmas idades.
- A utilização da EACN, no estado modificado EACM2a, é uma alternativa para adição aos cimentos CP II-E 40, CP II-E 32, e CP V-ARI sem o inconveniente da expansibilidade do CaO livre e MgO na forma de periclásio e do alto teor de

ferro, porém com limitação do percentual máximo de 20% de substituição, devido à perda de resistência à compressão.

- As argamassas do cimento CP V-ARI com substituição de 40% de EACM2b tiveram aumento da resistência à compressão axial de 114,09% entre as idades de 3 e 7 dias. Isso ocorre em virtude de a EACM2b ter grau de vitrificação de 76% e apresentar boa reatividadeTabela 4.44.
- A utilização EACM2b é uma alternativa para adição ao clínquer mais gesso, para obter cimento CP III sem o inconveniente da expansibilidade do CaO livre e MgO na forma de periclásio e do alto teor de ferro, porém com limitação do percentual máximo de 40% de adição, devido à perda de resistência à compressão.
- Há necessidade do ajuste da análise química no processo pirometalúrgico para cada escória de aciaria, em virtude de sua composição química depender do aço que está sendo produzido; com isso, poderá ser reduzida a quantidade de CO₂ lançada na atmosfera devido às matérias-primas tradicionais empregadas na fabricação do clínquer.

5.5 PROPOSTA PARA FUTUROS ESTUDOS E PESQUISAS

Por esta pesquisa ser pioneira no estudo de obter a composição química da escória de aciaria similar à da escória de alto forno, inferimos algumas recomendações para trabalhos futuros.

- Estudar a escória de aciaria LD modificada por processo pirometalúrgico em concreto como substituição parcial do cimento.
- Avaliar as propriedades reológicas das argamassas de cimento com substituição parcial por escória de aciaria LD modificada por processo pirometalúrgico com aditivos.
- Avaliar a alteração química da escória de aciaria LD na saída do convertedor.
- Estudar a escória de aciaria LD modificada por processo pirometalúrgico e a escória de alto-forno, juntas, em substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer em argamassas e concreto.

- Avaliar a durabilidade de argamassas de cimento com substituição parcial por escória de aciaria Aciaria LD moída.
- Avaliar a durabilidade de argamassas de cimento com substituição parcial por escória de aciaria Aciaria LD moída e escória de alto forno juntas.

6 REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: Geraldo G. Serra. São Paulo: Ed. Pini, 2000. p. 667.

ALANYALI, H. et. al. Application of magnetic separation to steelmaking slags for reclamation. **Waste Management**, 26, 2006. p.1133-1139.

ALTUN, A., YILAMAZ, I. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. **Cement and Concrete Research**, 32, 2002. p. 1247-1249.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-151**. Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement Philadelphia, 1993.

_____. **ASTM C157**. Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement, Mortar, and Concrete. Philadelphia, 2004.

_____. **ASTM D 698**. Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort – Ensaio Proctor, 2000.

_____. **ASTM E794**. Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis, 2012.

_____. **ASTM C 1260**. Standard test method for potencial alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method),1994.

_____. **ASTM D 1883**. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils, 2005.

_____. **ASTM D 2940**. Standard specification for graded aggregate material for base or sub base for highways or airports, 2003.

_____. **ASTM D-4792**. Standard Test Method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. Philadelphia, 1995.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997.

ARAUJO, R. M. **Ativação química e térmica de Escória de Aciaria Elétrica. 2008**. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

ARRIVABENE, L. F. **Adição de resíduo da indústria de granito em escória de aciaria BOF visando sua utilização na produção de cimento**. 2012. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica de Materiais) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Metalúrgica de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ASI, M.; QASRAWI, H. Y.; SHALABI, F. I. Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes. **Can. J. Civil Eng.** 34, 2007. p. 902-911.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Uma breve história do cimento Portland.** 2009. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland>>. Acesso em: 30 jul. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13. Cimento Portland – **Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etilenoglicol.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 15.** Cimento Portland – Análise química – Determinação do resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 16.** Cimento Portland – Análise química – Determinação do anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 19.** Cimento Portland – Análise química – Determinação de enxofre na forma de sulfeto. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____. **NM 26.** Agregados – Amostragem. 2009.

_____. **NBR NM 27.** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. 2001.

_____. **NBR NM 43.** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro. 2003.

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

_____. **NBR NM 76.** Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 5732.** Cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5733.** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5735.** Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5736.** Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 5737.** Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7214.** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 7215.** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 9778.** Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2005.

_____. **NBR 10004.** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005.** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006.** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11172.** Aglomerantes de origem mineral – Terminologia. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 11578.** Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 11579.** Cimento Portland composto – Determinação da finura por meio da peneira 75µm (n.º 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11582.** Cimento Portland – Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12006.** Cimento Portland. Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1990.

_____. **NBR 12653.** Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro. 2014.

_____. **NBR 12989.** Cimento Portland branco – Especificação. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 13116.** Cimento Portland de baixo calor de hidratação – Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 15895.** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15900-1.** Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16372.** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

-----Chinese National Standart. Steel and Iron Slag Cement, GB 13590-92, Chinese National Standar, Beijing, 1992.

BALE, C. W. et. al. Fact Sage thermochemical software and databases. **Calphad**, v. 26, n. 2, jun. 2002. p. 189-228.

BATTAGIN, A. F. As adições como substitutos do clínquer, no contexto do Project Cement Technology Roadmap 2050. **7.º Congresso Brasileiro de Cimento**. Palestra, Rio de Janeiro, 2016.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, pesquisas e realizações**. v. 2. IBRACON, 2010. p. 1651-1687.

COSTA, E. B.. **Aproveitamento de cinza pesada e lodo de anodização do alumínio para a produção do cimento sulfoaluminato de cálcio belítico**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

CENTURIONE, S. L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. 1993. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1993.

GEISELER, J. Composition and structure of slags. In: Slag Atlas. **Düsseldorf: Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh)**. 2. ed., v. 4, 1995. p. 215-224.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD com adição em cimentos**. 2002. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais-PPGEMM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRGS, 2002.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Fluxo simplificado de produção de aço**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>>. Acesso em: 22 jan. 2017.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JUCKES, L. M. Test **Methods for the assement of the volumetric stability of steel slags**. British Steel Technical, 1991. 12 p.

KIHARA, Y. **Estudo Mineralógico de clínquer de cimento Portland**. 1973. 72 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Mestrado em Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1973.

KIHARA, Y.; CENTURIONE, S. L. O cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v. 1. São Paulo: IBRACON, 2005.p. 295-322.

KIHARA, Y.; VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. ABCP, 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

KIHARA, Y.; VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. ABCP, 2014. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

KOUROUNIS, S. et al. Properties and hydration of blended cements with steel making slag. **Cement and Concrete Research**. n. 37, 2007, p. 815-822.

LOBATO, N. C. C. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos da Indústria Siderúrgica**. 2014. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

LYRA, J. S. **Estudo da Influência de Policarboxilato Comercial na Hidratação, Reologia e Físico-Química de Superfície do Cimento**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MACHADO, F. B. et al. **Enciclopédia Multimídia de Minerais**. [on-line]. ISBN: 85-89082-11-3. Disponível em: WWW. URL: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/grm.html>>. Acesso em: 22 jul. 2015.

MACHADO, F. S. **Aproveitamento energético de finos de carvão em alto-forno, visando redução de emissões e obtenção de créditos de carbono**. 2009. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação da Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 2007. ...f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: 2007.

MAHOUTIAN, M. et al. Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders. **Materials and Structures**, n. 48, 2015. p. 3075-3085.

MALYNOWSKYJ, A. **Caracterização microestrutural de escórias LD modificadas por diferentes estabilizantes e taxas de resfriamento**. 2016. 75 f. Relatório final de pesquisa (pós doutoramento em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

MARTINI, M. **Avaliação do potencial de expansão de agregados siderúrgicos através da Difratometria de Raios X e Método de Rietveld**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2015.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais – PPGEMM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 242 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2010.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

_____. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

_____. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRANDA, C. R. **Pastas de Cimento de Alta Compacidade de Poços de Petróleo. Processo de Formulação, Propriedades Reológicas, Resistência Mecânica e Química**. 2008. 290 f. Tese (Doutorado em Ciência de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

MONTGOMERY, D. G.; WANG, G. Preliminary Laboratory Study of Steel Slag for Blended Cement Manufacture. **Materials Forum**, 1991. p. 374-382.

MONSHIA, A.; ASGARANIB, M. K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. **Cement and Concrete Research**, n. 29, 1999. p. 1373-1377.

MOREIRA, D. B.; LANA, M. F. **Geração da Escória de Aciaria LD pelo Método de convertedor com sopro de oxigênio**. Companhia Siderúrgica de Tubarão. Disponível em: <<http://www.cst.com.br/aplicacoes/documentos/02sql07/custom/inc/imagem.asp?arquivoid=%7BC337280C-F932-44E4-8A01-FE8A284795D4%7D&campo=arquivo>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags na opportunity to save natural resources. **Waste Management**, n. 21, v. 3, 2001.p. 285-293.

MUHMWOOD, L.; VITTA, S.; VENKATESWARAN, D. Cementitious sand pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. **Cement and Concrete Research**, n. 39, 2009. p. 102-109.

MURPHY, J. N.; MEADOWCROFT, T. R.; BARR, P. V. Enhancement of the cementitious properties of steel making slag. **Can. Metall. Quart.** n. 36, 1997. p. 315-331.

NASCIMENTO, K. A. L. **Utilização de escória proveniente de reciclagem do aço em concreto de cimento Portland**. 2007. ...f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1982.

_____. **Propriedades do concreto**. Trad. Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo. Pini, 1982.

NIV, Q. et al. Effects of superfine slag powder on cement properties. Cement and concrete research. **Pergamon Press**, v. 32, 2002. p. 615-629.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. In: Ed. JEAN-PIERRE, O. et al. (Org.). **Durabilidade de Concreto**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 17-40.

OLIVEIRA e SOUZA, Eduardo Bezerra. **Escórias de aciaria e resíduos de concretos refratários em componentes de pavimentação**. Programa de Pós-Graduação em Saneamento da Universidade Federal de Minas Gerais. 2007.

OLIVEIRA, F. F. **Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escórias de aciaria para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Vitória, 2006.

PASETTO, M; BALDO, N. Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation. **Materials and Structure**. v. 45, 2012. p. 441-424.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de agregado de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

PENNSYLVANIA TESTING METHOD. **PTM 130**. Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Departamento de Transportes da Pensilvânia. Pensilvânia, 1978.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 11. ed. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1987.

PINHO, F. O.; PANNONI, F. D. Produtos Metálicos Estruturais. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed.) **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. v. 2. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 1153-1188.

PINTO JÚNIOR, L. A, B. **Fabricação de cimento Portland contendo mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES. Vitória, 2012.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. 2005. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

PROCTOR, D. M. et al. Assessment of Human Health and Ecological Risks Posed by the Uses of Steel-Industry Slags in the Environment. **Human and Ecological Risk Assessment**. v. 8. n. 4. 2002. p. 681-711.

QASRAWI, H. **The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment**. Available online 19 January 2014.

QI, L.; LIU, J.; LIU, Q. Compound Effect of CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ on the Strength of Steel Slag – Cement Binding Materials. **Materials Research**. v. 19, n. 2, 2016. p. 269-275.

QUARCIONE, V. A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em Pasta**. 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica Da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2008.

RAI, A. et al. Metallurgical slag as a component in blended cement. **Construction and Building Materials**, n.16, 2002. p. 489-494.

RAMACHANDRAN, V.S. Applications of differential thermal analysis in cement chemistry. **New York**: Chemical Publishing Company, 1969. 308 p.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

SHEN, W. et al. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. **Journal of Hazardous Materials**, n. 164, 2009. p. 99-104.

SHI, C. Steel slag its production, processing, characteristics and cementitious properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, n. 16, v. 3, 2004. p. 230-236.

SHI, C.; QIAN J. High performance cementing materials from industrial slags – a review. **Resources, conservation and Recycling**, n. 29, v. 3, 2000. p. 195-207.

SHI, C; HU, S. Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing condition. **Cement and Concrete Research** **33**, n. 11, 2003. p. 1851-1856.

SHI, C., KRIVENKI, P. V., and ROY, D. SHI, C. **Alkali – Activated Cements and Concretes**. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

SILVA, M. G. Cimento Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo C. Concreto: Ensino, pesquisas e realizações. V1. IBRACON. 2010. P. 791-823

SILVA, A. M. **Estudo da combustão de carvões e misturas com o coque verde de petróleo injetadas em altos fornos**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/99308>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

SILVA, P. B. **Estabilização de Misturas de Resíduos Sólidos de Demolição e da Indústria Cerâmica para uso em Camadas de Pavimentos Viários**. 2014. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2014.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Rio de Janeiro, 2016.

SORLINI, S.; SANZENI, A.; RONDI, L. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. **Journal of Hazardous Materials**, 2012. p. 84-91.

SORLINI, S. et al. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. Department of Civil, Architecture, Territory and Environmental Engineering, University of Brescia, Via Branze 43, Brescia, 25123, Italy. **Journal of Hazardous Materials journal homepage**. Disponível em: www.elsevier.com/locate/jhazmat. Acesso em: 16 jul. 2015.

SOUZA, G. M. **Estudo Experimental de Escórias de Aciaria Para Fins de Caracterização Tecnológica como Material Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2007.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1998. 476p.

THOMAZ, E. C. S. **Fabricação do cimento Portland. Notas de aula**. IME. Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <http://aquarius.ime.uepb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/fab_cim_portl_and.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2015.

TSAKIRIDIS, P. E. et al. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. **Journal of Science Direct, Hazardous Materials**, n. 152, 2008. p. 805-811.

VILELA, A. C. F. **Geração e Processamento da escória de Aciaria e sua transformação em agregado siderúrgico**. São Paulo: ABM, 2006.

WANG, Q.; YAN, P. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag. **Construction and Building Materials**, n. 24, 2010. p. 1134-1140.

VLCEK, J ; TOMKOVA, V ; BABKOVA, P ; VAVRO, M Vlcek, J. **Alkali-activated composites based on slags from iron and steel metallurgy**. Oct.-Dec. 2009, Vol.48(4), pp.223-227.

WANG, Q.; YAN, P. Y.; HAN, S. The influence of steel slag on the hydration of cement during the hydration process of complex binder. *Technological Sciences*. v. 54, 2011. p. 388-394.

WANG, Qiang ; YAN, Peiyu ; YANG, Jianwei ; ZHANG, Bo. Influence os steel slag on mechanical properties and durability of concrete. *Construction na Building Materials*, October 2013, Vol.47, pp.1414-1420.

WANG, Q. The influence of mineral admixtures on bendindg strength of mortar on the premise of equal compressive strength. **Construction na Building Materials**, v. 27, n. 3, 2012.

XUEQUAN, W.; HONG; ZU. Study on steel slag and fly ash composite Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 29, 1999. p. 1103-1106.

YOSHIDA, N.; SUGISAKO, Y. Behavior of model asphalt pavement containing a hydraulic, graded iron and steel slag base-course under repeated plate-loading. **Journal of Japan Society of Civil Engineers, ser. EI (Pavemen Engineering)**, v. 67, n. 1, 2011. p. 47-52.

ZHANG, Tongsheng ; YU, Qijun ; WEI, Jiangxiong ; LI, Jianxin ; ZHANG, Pingping. Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag. *Resources, Conservation & Recycling*, Vol.56(1), pp.48-55. 2011.

APÊNDICE A – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Granulometria laser

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 μ m - 500.00 μ m / 100 Classes

Ref da amostra : 200482
 Tipo produto : Cimento
 Cliente : ABCP
 Comentários :
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Maurício
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 11/11/2016 Hora : 11:00:30
 Índice med. : 515

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 255
 Diâmetro a 10% : 1.00 μ m
 Diâmetro a 50% : 8.56 μ m
 Diâmetro a 90% : 23.77 μ m
 Diâmetro médio : 10.71 μ m
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00	12.50
Q3	14.01	21.64	26.25	31.14	36.33	40.94	42.18	48.23	54.44

x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0
Q3	72.56	97.70	97.96	98.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

x : diâmetro / μ m Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79 Ref : 1.r111.m0.45A1818/3.30/515m25.12.5.10.1Fh.20.5.10.BIVQ-0.0.0.0/300.0.15.g60.2.9.10.1.10.P6500.1.10.N.0V.3.10/830

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 200482
 Tipo produto : Cimento
 Cliente : ABCP
 Comentários :
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 11/11/2016 Hora : 11:00:30
 Índice med. : 515

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 255
 Diâmetro a 10% : 1.00 mu
 Diâmetro a 50% : 8.56 mu
 Diâmetro a 90% : 23.77 mu
 Diâmetro médio : 10.71 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.06	0.15	0.19	0.59	1.30	1.82	2.36	3.24	4.51	6.25
q3	0.02	0.01	0.01	0.04	0.13	0.13	0.18	0.36	0.61	0.97
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	8.10	9.92	11.65	13.26	14.73	16.07	18.35	20.18	21.64	22.75
q3	1.17	1.28	1.35	1.37	1.36	1.34	1.27	1.15	1.03	0.86
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	23.70	24.56	25.40	26.25	27.17	28.12	29.11	30.12	31.14	32.72
q3	0.81	0.80	0.84	0.91	1.06	1.16	1.29	1.39	1.48	1.62
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	34.29	36.33	37.79	39.19	40.94	42.96	44.83	46.57	48.23	49.81
q3	1.73	1.82	1.86	1.89	1.88	1.87	1.87	1.87	1.91	1.93
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	51.37	54.44	57.55	60.65	63.72	66.74	69.69	72.56	75.31	77.95
q3	2.03	2.16	2.42	2.65	2.85	3.03	3.17	3.30	3.37	3.43
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	80.46	82.81	84.99	86.98	88.79	91.84	95.22	96.81	97.96	98.77
q3	3.45	3.40	3.32	3.18	3.02	2.72	2.21	1.71	1.32	0.99
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	99.32	99.64	99.83	99.96	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.71	0.44	0.28	0.13	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra	: 197953	Ultrassom	: 60	s
Tipo produto	: Escória de Aciaria Modif.2	Concentração	: 180	
Cliente	: ABCP	Diâmetro a 10%	: 4.50	mu
Comentários	: Passante # 0,42	Diâmetro a 50%	: 31.76	mu
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 69.39	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 34.99	mu
Operador	: Mauricio-Macedo	Fraunhofer		
Empresa	: ABCP	Densidade/Fator	-----	
Localização	: São Paulo - SP	Superfície específica	-----	
Data : 03/03/2016	Hora : 14:54:09	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 422	Medida./Limp.	: 60/60/4	
		SOP : ABCP		

Valores cumulativos particulares										in volume / passante	
x	1.25	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	6.30	8.00	10.00	12.50	
Q3	2.46	4.58	6.65	8.88	11.06	13.00	13.53	16.25	19.16	22.65	
x	16.00	31.50	32.00	40.00	50.00	63.00	80.00	100.0	125.0	160.0	
Q3	27.43	49.64	50.32	60.26	72.05	85.28	95.50	99.56	100.00	100.00	

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Núm. de série : 79 Ref : 2.r111.m0.98A1818/3.30422/m25.12.5.10.1Ph.20.5.10.Br/VQ-0.0.0.0/300.0.15.p80.2.9.10.1.10.P8500.1.10.N.Q/V 3.10930

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : 197953
 Tipo produto : Escória de Aciaria Modif.2
 Cliente : ABCP
 Comentários : Passante # 0,42
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Mauricio-Macedo
 Empresa : ABCP
 Localização : São Paulo - SP
 Data : 03/03/2016 Hora : 14:54:09
 Índice med. : 422

Ultrassom : 60 s
 Concentração : 180
 Diâmetro a 10% : 4.50 mu
 Diâmetro a 50% : 31.76 mu
 Diâmetro a 90% : 69.39 mu
 Diâmetro médio : 34.99 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/4
 SOP : ABCP

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.08	0.20	0.21	0.21	0.29	0.46	0.79
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.07	0.16
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.16	1.54	1.92	2.28	2.63	2.96	3.56	4.10	4.58	5.02
q3	0.21	0.24	0.26	0.27	0.29	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	5.43	5.83	6.24	6.65	7.09	7.53	7.98	8.43	8.88	9.55
q3	0.31	0.33	0.36	0.39	0.45	0.48	0.52	0.55	0.58	0.61
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	10.21	11.06	11.67	12.25	13.00	13.87	14.70	15.49	16.25	17.00
q3	0.64	0.67	0.69	0.69	0.71	0.71	0.74	0.75	0.77	0.81
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	17.73	19.16	20.57	21.96	23.33	24.70	26.06	27.43	28.80	30.17
q3	0.84	0.89	0.97	1.05	1.13	1.22	1.30	1.40	1.49	1.58
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	31.54	32.92	34.32	35.75	37.20	40.20	44.69	47.57	50.32	52.94
q3	1.67	1.77	1.89	2.02	2.14	2.37	2.60	2.74	2.80	2.84
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	55.46	57.89	60.26	63.78	66.13	72.05	75.46	78.68	82.62	85.28
q3	2.90	2.95	3.04	3.20	3.40	3.69	3.85	3.84	3.75	3.58
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.0	112.0	125.0
Q3	87.67	91.07	93.29	95.50	97.15	98.33	99.08	99.56	100.00	100.00
q3	3.38	3.06	2.66	2.25	1.79	1.36	0.91	0.62	0.26	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Sample Name:
Ronaldo (EACM2) 4860 cm2/g - Average

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
LabCer

Result Source:
Averaged

Measured:
sexta-feira, 7 de outubro de 2016 16:57:53

Analysed:
sexta-feira, 7 de outubro de 2016 16:57:54

Particle Name:
Fraunhofer

Particle Rt:
0.000

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Absorption:
0

Dispersant Rt:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Weighted Residual:
0.418 %

Sensitivity:
Normal

Obscuration:
17.38 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0116 %Vol

Span :
3.362

Uniformity:
1.04

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
1.41 m^2/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
4.262 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
17.245 μm

d(0.1): 1.886 μm

d(0.5): 11.637 μm

d(0.9): 41.011 μm

Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.92	11.482	4.34	120.226	0.00	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.98	13.183	4.40	138.038	0.00	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.98	15.136	4.40	158.489	0.00	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	1.06	17.378	4.48	181.970	0.00	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	1.18	19.953	4.56	208.930	0.00	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	1.35	22.909	4.62	239.863	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.03	2.512	1.56	26.303	4.61	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.13	2.884	1.83	30.200	4.50	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.22	3.311	2.14	34.674	4.26	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.31	3.802	2.48	39.811	3.87	416.869	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.40	4.365	2.84	45.709	3.35	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.48	5.012	3.20	52.481	2.73	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.57	5.754	3.53	60.256	2.08	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.64	6.607	3.81	69.183	1.44	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.71	7.586	4.03	79.433	0.90	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.77	8.710	4.17	91.201	0.23	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.82	10.000	4.25	104.713	0.03	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.87	11.482	4.30	120.226	0.00	1258.925	0.00		

Operator notes: Ronaldo 07.10.2016 (EACM2) 4860 cm2/g

BET (Brunauer-Emmett-Teller) – ÁREA SUPERFICIAL

USP/Escola Politecnica

ASAP 2010 V3.00 G Unit 1 Serial # 1038
Page 1

Sample: Escoria modificada
Operator: Valquiria Mourao
File Name: C:\ASAP2010\DATA\001-386.SMP

Started: 23/01/12 14:07:33 Analysis Adsorptive:
N2
Completed: 23/01/12 17:20:03 Analysis Bath:
77.35 K
Report Time: 24/01/12 09:37:25 Thermal Correction:
No
Sample Weight: 2.4369 g Smoothed Pressures:
No
Warm Freespace: 16.6268 cm³ Cold Freespace:
49.9902 cm³
Equil. Interval: 10 secs Low Pressure Dose:
None

Analysis Log

Relative Saturation Pressure Press. (mmHg)	Pressure (mmHg)	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (HR:MN)
			02:51
706.52155			
0.068118945	48.12750	0.0620	03:04
0.080296761	56.73139	0.0663	03:06
0.120289065	84.98682	0.0786	03:08
0.160325600	113.27349	0.0883	03:10
0.200544393	141.68893	0.0889	03:12

USP/Escola Politecnica

ASAP 2010 V3.00 G Unit 1 Serial # 1038
Page 3

Sample: Escoria modificada
Operator: Valquiria Mourao
File Name: C:\ASAP2010\DATA\001-386.SMP

Started: 23/01/12 14:07:33 Analysis Adsorptive:
N2
Completed: 23/01/12 17:20:03 Analysis Bath:
77.35 K

Report Time: 24/01/12 09:37:25 Thermal Correction:
 No
 Sample Weight: 2.4369 g Smoothed Pressures:
 No
 Warm Freespace: 16.6268 cm³ Cold Freespace:
 49.9902 cm³
 Equil. Interval: 10 secs Low Pressure Dose:
 None

BET Surface Area Report

BET Surface Area: 0.3517 ± 0.0204
 m²/g
 Slope: 12.050040 ± 0.711616
 Y-Intercept: 0.326640 ± 0.096255
 C: 37.890835
 VM: 0.080797 cm³/g STP
 Correlation Coefficient: 9.948094e-01

Molecular Cross-section: 0.1620 nm²

1/ [VA* (Po/P - 1)]	Relative Pressure	Vol Adsorbed (cm ³ /g STP)
	0.068118945	0.0620
1.178225	0.080296761	0.0663
1.317622	0.120289065	0.0786
1.738625	0.160325600	0.0883
2.162195	0.200544393	0.0889
2.822936		

Summary Report

Area

Single Point Surface Area at P/Po 0.20054439 :0.3093 m²/g
 BET Surface Area: 0.3517 m²/g

Caracterização química por fluorescência de raio x

<p>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Laboratório de Caracterização Tecnológica Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br Tel: 11 3091-5151 e-mail: lct@lct.pol.usp.br</p>
---	---	---

RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO: AQ 0926-15

REQ: 01032-15

DATA: 22/12/2015

CLIENTE: Ronaldo Feu Rosa Pacheco

1. MÉTODO: Os teores apresentados foram determinados em amostra prensada, na calibração STD-1 (Standardless), relativa a análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, em espectrômetro de fluorescência de raios X. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.020°C por 2h. Os valores expressos foram normalizados a 100%.

2. RESULTADOS:

Nº LCT	5808
Amostra	Escoria modificada nº2
Na ₂ O (%)	0,083
MgO (%)	12,8
Al ₂ O ₃ (%)	10,3
SiO ₂ (%)	31,2
P ₂ O ₅ (%)	0,146
SO ₃ (%)	0,292
Cl (%)	0,013
K ₂ O (%)	0,090
CaO (%)	38,6
TiO ₂ (%)	0,419
V ₂ O ₅ (%)	0,049
Cr ₂ O ₃ (%)	0,101
MnO (%)	3,97
Fe ₂ O ₃ (%)	1,29
NiO (%)	0,009
SrO (%)	0,115
ZrO ₂ (%)	0,079
Nb ₂ O ₅ (%)	0,013
PF (%)	0,34

Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT Pol/USP

Dra. Giuliana Ratti
Pesquisadora do LCT Pol/USP
Química - CRQ 04105009-4ªR

Paulo A. Feldbaum
Pesquisador do LCT Pol/USP
Químico - CRQ 04162927-4ªR

NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) alíquota(s) enviada(s) ao LCT; a representatividade da(s) mesma(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

Caracterização mineralógica por difração de raio x

RESULTADO DE IDENTIFICAÇÃO DE FASES POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

RELATÓRIO: DRX 001-16

DATA: 05/01/16

CLIENTE: RONALDO FEU ROSA PACHECO

AMOSTRA: Escória modificada nº 2

IDENT. LCT: 460-1887.HPF

1. MÉTODO

O estudo foi efetuado através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X com detector sensível a posição.

A identificação das fases cristalinas, abaixo discriminadas, foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International Centre for Diffraction Data e ICSD - Inorganic Crystal Structure Database.

2. RESULTADOS

Os resultados obtidos estão listados na tabela abaixo:

ICDD	Nome do composto	Fórmula Química	Mineral	Obs
	Fase amorfa			
01-074-0382	Merwinita	$\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$	Merwinita	
01-084-1320	Monticellita	CaMgSiO_4	Monticellita	
01-089-8487	Grafite	C	Grafite	pp

Nota: pp = possível presença

O difratograma obtido (cor vermelha), onde são assinaladas as linhas de difração correspondente(s) à(s) fase(s) identificada(s) (cada fase em uma cor distinta) é apresentado anexo.

Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT Pol/USP

Dra. Maria Manuela Lé Tassinari
Pesquisadora do LCT Pol/USP

M.Sc. Juliana Lívi Antoniassi
Pesquisadora do LCT Pol/USP

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
Laboratório de Caracterização Tecnológica
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.polusp.br
Tel: 11 3091-6151 e-mail: lct@lct.polusp.br

DIFRATOGRAMA DE RAIOS X

FASES IDENTIFICADAS

Caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Bruker Nano GmbH, Germany

Quantax

Quantification results

Mass percent (%)

Date: 4/26/2016

Spectrum	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn
1	21,85311	8,78238	7,78342	19,83068	38,52176	3,228651
2	31,60959	9,887983	7,758052	18,20704	30,32217	2,21516
3	31,46175	10,01643	7,903318	18,90608	29,79645	1,915984
4	37,27854	10,53205	7,935534	17,1212	25,5778	1,554877
5	39,83202	10,50604	7,734961	16,36993	23,79906	1,757998

Mean value:	32,407	9,944975	7,823057	18,08699	29,60345	2,134534
Sigma:	6,924176	0,710533	0,090347	1,379025	5,700589	0,657483
Sigma mean:	3,096586	0,31776	0,040405	0,616719	2,549381	0,294036

Atividade Pozolânica

Segue abaixo os resultados preliminares do ensaio Chapelle.

- “Escória de aciaria natural” (LMCC N.º864-15): **< 1 mg Ca(OH)₂/g amostra**
- “Escória de aciaria modificada” (LMCC N.º865-15): **132 mg Ca(OH)₂/g amostra**
- “Escória de aciaria modificada n.º1” (LMCC N.º869-15): **< 1 mg Ca(OH)₂/g amostra**

Os ensaios foram realizados nos materiais conforme recebidos.

O ensaio foi executado de acordo com a NBR 15895/2010, utilizando 2g de CaO.

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração

Atenciosamente,

Eng.º Químico Sérgio Soares de Lima
Pesquisador Assistente
LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil
(11) 3767 4357

APÊNDICE B - ENSAIOS DE CALOR DE HIDRATAÇÃO, ANÁLISE TÉRMICA E GRAU DE VITRIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DA ESCÓRIA

Ensaio de calor de hidratação

Associação Brasileira de Cimento Portland	ÁREA DE TECNOLOGIA - LABORATÓRIO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 109779 ¹	1/1
	Interessado: Márcia Regina Pereira Lima Endereço: Av. Vitória, 1729 – CEP 29040-780 – Vitória/ES Referência: Orçamento 68974	
Amostras nºs: 200482 a 200483 Data de entrada: 17/06/2016 Material declarado: Cimento e escória Período de realização dos ensaios: 04/11/2016 a 11/11/2016 Objetivo: Determinação do calor de hidratação		

1. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta os resultados dos ensaios de determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant referentes a uma amostra de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) puro, e com a substituição de 40% de escória de aciaria modificada. As amostras coletadas e enviadas pelo interessado receberam as seguintes identificações:

ABCP	Interessado
200482	Holcim Puro - (CP V-ARI)
200483	Escória de aciaria modificada (EACM2b)

2. MÉTODO DE ENSAIO

NBR 12006/90 Cimento - Determinação do calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant

3. RESULTADOS

A *Tabela 1* apresenta os resultados dos ensaios de calor de hidratação realizados com a amostra de cimento CP V-ARI puro e com substituição de 40% de escória de aciaria modificada:

Ensaio 1 → CP V-ARI – Holcim Puro

Ensaio 2 → CP V-ARI + 40% de adição de escória de aciaria modificada.

¹ Este relatório cancela e substitui o relatório de ensaio 108315 emitido em 23/08/2016. Os ensaios de calor de hidratação foram repetidos por terem apresentado resultados atípicos para o cimento CP V-ARI.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente a(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 06347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

2/5

Relatório de ensaio nº 109779

TABELA 1 – Calor de hidratação (J/g)

Tempo (horas)	CP V-ARI (Holcim Puro)	CP V-ARI+40% de escória de aciaria modificada.
6	80	46
12	270	168
24	317	226
41	330	248
48	330	251
72	330	258
96	331	264
120	332	269
144	334	273
168	336	276

A Tabela 2 apresenta a elevação da temperatura em relação à garrafa de referência e as Figuras 1 e 2 ilustram os resultados obtidos.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

3/5

Relatório de ensaio nº 109779

TABELA 2 – Elevação da temperatura em relação à garrafa de referência (°C)

Tempo (horas)	Ensaio		Tempo (horas)	Ensaio		Tempo (horas)	Ensaio	
	1	2		1	2		1	2
1	2,3	1,8	58	8,7	8,2	116	1,2	1,7
2	2,9	2,2	60	8,1	7,7	118	1,2	1,7
4	5,3	3,6	62	7,5	7,3	120	1,2	1,7
6	12,6	7,0	64	7,0	6,8	122	1,1	1,6
8	28,8	13,9	66	6,5	6,4	124	1,1	1,5
10	35,1	20,0	68	6,0	6,1	126	1,0	1,5
12	35,5	22,7	70	5,6	5,7	128	1,0	1,4
14	34,7	24,0	72	5,2	5,4	130	0,9	1,4
16	33,6	24,2	74	4,9	5,1	132	0,9	1,4
18	32,4	23,8	76	4,6	4,8	134	0,8	1,3
20	31,0	23,0	78	4,2	4,6	136	0,8	1,3
22	29,6	22,2	80	3,9	4,3	138	0,7	1,2
24	28,1	21,2	82	3,6	4,0	140	0,8	1,3
26	26,6	20,3	84	3,5	3,9	142	0,7	1,2
28	25,1	19,3	86	3,2	3,6	144	0,7	1,1
30	23,6	18,4	88	3,0	3,5	146	0,6	1,1
32	22,2	17,5	90	2,9	3,4	148	0,6	1,1
34	20,7	16,4	92	2,6	3,1	150	0,6	1,1
36	19,3	15,6	94	2,5	3,0	152	0,6	1,0
38	18,0	14,7	96	2,3	2,8	154	0,6	1,0
40	16,8	13,9	98	2,1	2,7	156	0,5	1,0
42	15,6	13,1	100	2,1	2,6	158	0,6	1,0
44	14,6	12,4	102	2,0	2,5	160	0,6	0,9
46	13,6	11,7	104	1,8	2,3	162	0,5	1,0
48	12,6	11,0	106	1,7	2,2	164	0,6	1,0
50	11,7	10,4	108	1,6	2,1	166	0,5	0,9
52	10,9	9,8	110	1,5	2,0	168	0,5	0,9
54	10,1	9,2	112	1,4	1,9	-	-	-
56	9,4	8,7	114	1,3	1,8	-	-	-

Nota: Em vermelho está assinalado o pico de temperatura para cada condição de ensaio.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

4/5

Relatório de ensaio nº 109779

Figura 1 – Calor de hidratação (J/g)

Figura 2 – Elevação da temperatura em relação à garrafa de referência

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente a(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

5/5

Relatório de ensaio nº 109779

São Paulo, 28 de novembro de 2016.

Eng. Flávio André da Cunha Munhoz
Supervisor Laboratório de Cimento

Geól. Arnaldo Forti Battagin
Chefe do Laboratório
CREA nº 0600586647

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensalada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - Fax (11) 3760-5340 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

Análise térmica

BOLETIM DE RESULTADOS PRELIMINARS

CLIENTE: MÁRCIA REGINA PEREIRA LIMA.
CPF 808.611.057-53
Av. Vitória, n.º 1.729 – Jucutuquara.
CEP 29040-780 – Vitória – ES

NATUREZA DO TRABALHO: Análise Termogravimétrica.

REFERÊNCIA: Orçamento IPT Nº. 16.700/15 de 21.12.2015 e aprovação do orçamento de 05.02.2016.

1 MATERIAIS

Três (03) materiais recebidos no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT. Na Tabela 1 estão descritas informações complementares referentes à identificação dos materiais.

Tabela 1: Dados de identificação dos materiais.

Identificação do Cliente	Dados do IPT		
	Data de entrada	Massa (g)	LMCC Nº
"Escória de aciaria natural"	17.12.2015	68	864-15
"Escória de aciaria modificada n.º2"		82	865-15
"Escória de aciaria modificada n.º1"	23.12.2015	7	869-15

2 MÉTODO UTILIZADO

- Análise termogravimétrica (TG/DTG):** "Análise térmica diferencial e termogravimétrica simultânea", com base em diretrizes gerais da ASTM E 794/06 (2012) - *Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis*. (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-093).

Nota 1: Equipamento utilizado: NETZSCH Thermal Analysis STA 449 F3 Jupiter, empregando-se material passante em peneira ABNT n. 200 (0,075mm), cadinho de alumina sem tampa; com fluxo de gás de 50 mL/min de nitrogênio e taxa de aquecimento de 10°C/min até 1000°C.

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensalado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

3 RESULTADOS

Os resultados das análises termogravimétricas encontram-se nas Figuras 1 a 3 e na Tabela 2, a seguir.

Figura 1: Curvas TG/DTG da "Escória de aciaria natural" (LMCC N.º 864-15).

Figura 2: Curvas TG/DTG da "Escória de aciaria modificada n.º 2" (LMCC N.º 865-15).

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Figura 3: Curvas TG/DTG da "Escória de aciaria modificada n.º 1" (LMCC N.º 869-15).

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Tabela 2: Perdas de massa a partir das curvas TG/DTG

Material (LMCC)	Perdas de massa em função da faixa de temperatura							Perda total (%)
	°C	23-220	220-320	320-412	412-540	540-760	760-998	
"Escória de aciaria natural" (LMCC N.º 864-15)	%	1,50	0,68	0,86	1,06	2,47	- 0,66 Nota 2	5,91
"Escória de aciaria modificada n.º 2" (LMCC N.º 865-15)	%	- 0,19 Nota 2			0,38			0,19
"Escória de aciaria modificada n.º 1" (LMCC N.º 869-15)	%	1,67	0,60	0,82	0,78	4,67	- 0,41 Nota 2	8,13

Nota 2: O material apresenta ganho de massa.

EQUIPE TÉCNICA

Engenheiro Químico Sérgio Soares de Lima – IPT
Técnico Químico Jilson Cardoso – IPT

São Paulo, 29 de fevereiro de 2016.

ASSINATURAS

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste relatório de ensaio, impresso com a marca d'água IPT e devidamente assinado, é o único documento que possui validade legal.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensalado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

4. AVALIAÇÃO DA REATIVIDADE DE ESCÓRIA POR MICROSCOPIA DE LUZ TRANSMITIDA (TESTE DE MICHELSEN)

O teste de Michelsen é um ensaio que avalia a qualidade de uma escória, através da sua reatividade com solução aquosa de sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 4% em água. Consiste em medir o tempo de formação dos cristais de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sob microscópio polarizador de luz transmitida a partir da reação dos íons de Ca da escória com os íons de SO_4 , provenientes da solução de ensaio. Quanto mais rápido for a cristalização das acículas de gipsita sob condições padronizadas, mais reativa será a amostra de escória. Este teste somente é válido para grãos de escória vítreos.

O tempo de cristalização da gipsita depende também de uma série de outros fatores como a granulometria da amostra, a quantidade empregada, a concentração da solução de ensaio e a temperatura.

Com o intuito de minimizar a influência desses parâmetros, o teste de Michelsen é realizado em grãos de escória entre 62 μm (230 mesh) e 53 μm (270 mesh), obtidos após peneiramento da amostra. Paralelamente, são realizados ensaios em uma amostra de referência de comprovada qualidade.

4.1. Preparação das Lâminas

- Distribuir uma pequena quantidade da amostra já peneirada na região central da lâmina de vidro.
- Utilizar de 2 a 5 gotas de solução aquosa de sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 4% em água, pingando-as sobre a amostra.
- Com a ajuda de um cronômetro deve-se determinar o tempo de ensaio, o qual tem início no momento em que a primeira gota de solução entra em contato com a amostra.
- Homogeneizar a mistura com o auxílio de uma espátula metálica.
- Recobrir o material com lamínula de vidro, evitando-se ao máximo a formação de bolhas de ar.

4.2. Estudo microscópico

- Coloca-se a lâmina já preparada no microscópio de luz transmitida.
- Através da manipulação do charriot do microscópio deve-se observar toda a lâmina com um aumento de 150x.

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente à(s) amostra(s) ensaiada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 76 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

3/3

Relatório de ensaio nº 111071

- A observação microscópica deve persistir até que se perceba o surgimento de acículas, nas bordas dos grãos de escória. Neste momento deve-se parar o cronômetro e anotar o tempo na ficha de ensaio.
- O teste de Michelsen é composto de duas análises, sendo uma referente a uma amostra de reconhecida reatividade, e outra da amostra em estudo.

4.3. Resultados

Os resultados da reatividade da escória por microscopia de luz transmitida (Teste de Michelsen) são apresentados na *Tabela 2*.

TABELA 2 - Teste de Michelsen

Identificação das amostras	Resultados
Referência	5 min 20 s
Escória de aciaria modificada (EACM2b)	3 min 46 s

Foto 1 - Cristalização das acículas de gipsita

Foto 2 - Cristalização das acículas de gipsita

São Paulo, 26 de janeiro de 2017.

 Eng. Flávio André da Cunha Munhoz
 Supervisor Laboratório de Cimento

 Geól. Arnaldo Forti Batiagin
 Chefe do Laboratório
 CREA nº 0600586647

Este documento tem significação restrita e diz respeito tão somente a(s) amostra(s) ensalada(s). Sua reprodução só poderá ser total e depende da aprovação formal deste Laboratório.

Av. Torres de Oliveira, 75 - CEP 05347-902 - São Paulo/SP - Fone (11) 3760-5300 - e-mail: laboratorio@abcp.org.br

APÊNDICE C - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

1/5

LEMAC
LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT - CENTRO TECNOLÓGICO
DEE - DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 2519

Material: Corpos de Prova Cilíndricos de Cimento, diâmetro 50 mm e altura 100 mm.

Obra: Tese Aciaria.

Nat. do Trabalho: Determinação da Resistência à Compressão - ABNT NBR 7215/96.

Interessado: Ronaldo F. R. Pacheco.

Nota: Dados do Material fornecidos pelo Interessado através da Solicitação de Serviço Nº -.

NOTA IMPORTANTE:
Os resultados deste ensaio têm significação restrita e se aplicam somente à amostra trazida pelo Interessado.

RESULTADOS

Série 1 - Porcentagem de adição de escória de aciaria: 0%.

Data de Moldagem: 17/11/14.

1 dia		3 dias		7 dias	
CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)
01	23,3	05	35,8	09	39,7
02	25,1	06	36,0	10	40,1
03	24,1	07	(*)	11	40,4
04	24,0	08	36,7	12	37,7
Média	24,1		36,2		39,5
Desvio Relativo Máximo (%)	4,1		1,4		4,6

28 dias		94 dias	
CP Nº	Resistência	CP Nº	Resistência
13	47,7	17	50,0
14	48,2	18	54,2
15	46,5	19	53,7
16	45,5	20	52,5
Média	47,0		52,6
Desvio Relativo Máximo (%)	3,2		4,9

(*) Valor desconsiderado.

@ gu

2/5

LEMAC
LABORATÓRIO DE ENSAIOS EM
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT - CENTRO TECNOLÓGICO
DEE - DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES
LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

CONTINUAÇÃO DO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 2519

Série 2 - Porcentagem de adição de escória de aciaria: 6%.

Data de Moldagem: 17/11/14.

NOTA IMPORTANTE:

Os resultados deste ensaio têm significação restrita e se aplicam somente à amostra trazida pelo Interessado.

RESULTADOS

3 dias		7 dias		28 dias	
CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)
01	35,7	05	36,6	09	44,0
02	35,0	06	38,4	10	42,7
03	33,6	07	36,2	11	(*)
04	33,1	08	38,3	12	43,2
Média	34,4		37,4		43,3
Desvio Relativo Máximo (%)	3,8		3,2		1,6

94 dias	
CP Nº	Resistência
13	45,5
14	46,5
15	47,7
16	46,7
Média	46,6
Desvio Relativo Máximo (%)	2,4

(*) Valor desconsiderado.

gil

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT - CENTRO TECNOLÓGICO
 DEE - DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES
LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

CONTINUAÇÃO DO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 2519

Série 3 - Porcentagem de adição de escória de aciaria: 10%.

Data de Moldagem: 18/11/14.

NOTA IMPORTANTE:

Os resultados deste ensaio têm significação restrita e se aplicam somente à amostra trazida pelo Interessado.

RESULTADOS

3 dias		7 dias		28 dias	
CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)
01	30,2	05	36,9	09	45,5
02	29,5	06	35,6	10	43,2
03	29,5	07	37,7	11	43,5
04	*	08	36,9	12	43,0
Média	29,7		36,8		43,8
Desvio Relativo Máximo (%)	1,7		3,3		3,9

93 dias	
CP Nº	Resistência
13	45,0
14	45,0
15	46,2
16	44,7
Média	45,2
Desvio Relativo Máximo (%)	2,2

(*) Valor desconsiderado.

Ø Gil

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT - CENTRO TECNOLÓGICO
 DEE - DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES
LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

CONTINUAÇÃO DO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 2519

Série 4 - Porcentagem de adição de escória de aciaria: 20%.

Data de Moldagem: 18/11/14.

NOTA IMPORTANTE:

Os resultados deste ensaio têm significação restrita e se aplicam somente à amostra trazida pelo Interessado.

RESULTADOS

3 dias		7 dias		28 dias	
CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)
01	26,6	05	28,8	09	38,7
02	28,0	06	30,1	10	36,5
03	27,2	07	30,9	11	38,7
04	25,5	08	29,2	12	37,2
Média	26,8		29,8		37,8
Desvio Relativo Máximo (%)	4,9		3,7		3,4

93 dias	
CP Nº	Resistência
13	40,0
14	41,2
15	41,0
16	41,5
Média	40,9
Desvio Relativo Máximo (%)	2,2

(*) Valor desconsiderado.

gic

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CT - CENTRO TECNOLÓGICO
DEE - DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS E EDIFICAÇÕES

CONTINUAÇÃO DO RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 2519

Série 4 - Porcentagem de adição de escória de aciaria: 34%.

Data de Moldagem: 24/11/14.

NOTA IMPORTANTE:
Os resultados deste ensaio têm significação restrita e se aplicam somente à amostra trazida pelo Interessado.

RESULTADOS

3 dias		7 dias		28 dias	
CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)	CP Nº	Resistência (MPa)
01	20,2	05	23,2	09	29,0
02	20,6	06	23,2	10	28,2
03	20,6	07	23,3	11	29,0
04	20,5	08	23,7	12	28,7
Média	20,5		23,4		28,7
Desvio Relativo Máximo (%)	1,5		1,3		1,7

91 dias	
CP Nº	Resistência
13	34,2
14	33,7
15	32,7
16	31,2
Média	33,0
Desvio Relativo Máximo (%)	5,5

(*) Valor desconsiderado.

Visto:

Prof. Karla Moreira Conde
Chefe do DEC

Vitória, 04 de março de 2015.

Prof. Dr.ª Geilma Lima Vieira
Coordenadora do LEMAC