



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE CURITIBA
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS - PPGEM

RICARDO MELO ARAUJO

ATIVAÇÃO QUÍMICA E TÉRMICA DE ESCÓRIA DE
ACIARIA ELÉTRICA

CURITIBA

MAIO - 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RICARDO MELO ARAUJO

ATIVACÃO QUÍMICA E TÉRMICA DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Materiais, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

Orientador: Prof. José Alberto Cerri, Dr.

CURITIBA

MAIO - 2008

TERMO DE APROVAÇÃO

RICARDO MELO ARAUJO

ATIVÇÃO QUÍMICA E TÉRMICA DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Neri Volpato, PhD
Coordenador de Curso

Banca Examinadora

Prof. Nome do Examinador, Título
(Instituição)

Curitiba, xx de Maio de 2008

A Maria Carolina e minhas filhas.

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer as seguintes pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao meu professor orientador Prof^o. D.Sc José Alberto Cerri, agradeço a dedicação, competência e seriedade com que colaborou com este trabalho, e principalmente na minha formação acadêmica. Agradeço à Prof^a. PhD. Márcia Silva de Araújo, pela suas inúmeras sugestões e colaborações, ao longo do trabalho experimental e na análise dos resultados.

Ao Prof^o. PhD. Vsevolod A. Myrine (Seva) pelas sugestões e principalmente pela paciência a mim dispensada nas diversas conversas, meus sinceros agradecimentos.

A UTFPR como instituição pela seriedade com que trabalha na formação de todos os seus alunos, em especial da minha ao longo dos últimos 13 anos.

Meu sincero agradecimento ao Geólogo Rodrigo Secchi e ao Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto do LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas, a Silvia Mara Haluch, Gerente da Qualidade do TECLAB – Tecnologia em Análises Ambientais e a Luciano Alves Pereira e Isac José da Silva – Centro de Pesquisas da Cia de Cimentos Rio Branco, ao Prof^o Dr. Júlio César Rodrigues de Azevedo, aos estagiários Luiz e Marcela do DAQBI.

A minha esposa Carol e minhas filhas, Gabriela e Isabela, pelas ausências ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Débora Ronsani, Kevin Christlieb Deessuy, Diego Coelho Vigário, Rodrigo Lucca e Leandro Weng pela colaboração nos ensaios de laboratório ao longo do desenvolvimento do trabalho. Agradeço também a todos que direta ou indiretamente colaboram com o desenvolvimento deste trabalho e que não acabaram sendo nomeados aqui.

ARAUJO, Ricardo Melo, **Ativação Química e Térmica de Escória de Aciaria Elétrica**, 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 93p.

RESUMO

A ativação de escória de aciaria elétrica é uma proposta para o consumo de milhares de toneladas desse subproduto que se acumulam em siderúrgicas. A escória ativada tem função aglomerante podendo ser uma alternativa ao consumo de cimento Portland e conseqüentemente um caminho para a redução no consumo de matérias-primas naturais e na emissão de CO₂. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar as características da ativação química e térmica de escória de aciaria elétrica. Para tanto foram realizadas misturas prensadas contendo diferentes teores (0; 0,375; 0,75; 1,5 e 3 %) de ativadores químicos (hidróxido de cálcio e de sódio) e tempo de ativação térmica (3, 6 e 9 h), para avaliação da resistência mecânica a compressão e composição mineralógica. A escória estudada apresentou grande quantidade de compostos cristalinos na análise mineralógica e alto teor de óxido de ferro (41,91 %). Os resultados mostraram que a ativação química de escória com baixos teores de ativadores alcalinos permitem a obtenção de misturas prensadas com resistência à compressão acima de 5 MPa, com teor de 1,5 % de ativador químico. A ativação térmica permite potencializar a ação do hidróxido de sódio, permitindo um aumento da resistência à compressão de mais de 200 %. Para as misturas ativadas com hidróxido de cálcio, a ativação térmica não trouxe melhoria de desempenho mecânico. Não ocorreram mudanças nos constituintes mineralógicos da escória ativada quimicamente, sendo os mesmos encontrados na escória como recebida. A ativação química e térmica de escória de aciaria elétrica é uma alternativa ao uso de materiais tradicionais aglomerantes.

Palavras-chave: Escória de Aciaria Elétrica, Ativação Química, Ativação Térmica.

ARAUJO, Ricardo Melo, **Chemical and Thermal Activation of Slag of Electric Arc Furnace**, 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 93p.

ABSTRACT

The activation of steel slag is an alternative for the consumption of thousand of tons of this by-product that has been stored as waste in steel plants throughout the world. The activated slag has cementing properties which may be an alternative to consumption of Portland cement and consequently a way for the reduction in the natural raw materials consumption and the CO₂ emission. The purpose of this research was to evaluate the characteristics of the chemical and thermal activation of steel slag. For the experimental study, pressed mixtures had been carried through with different percentages (0; 0.375; 0.75; 1.5 and 3 %) of chemical activators (calcium and sodium hydroxide) and time of thermal activation (3, 6 and 9 h), for evaluation of the compressive strength and mineralogical composition. The studied steel slag presented great amount of crystalline composites in the mineralogical analysis and high level of iron oxide (41.91 %). The results showed that the chemical activation of slag with low content of alkaline activators produced pressed mixtures with compressive strength above 5 MPa, with chemical activator at 1.5 %. The thermal activation allows improving the action of sodium hydroxide, increasing more than 200 % the compressive strength. For mixtures activated with calcium hydroxide, the thermal activation did not improve mechanical performance. Changes in the mineralogical constituents of the chemically activated slag had not occurred, being the same ones found in the slag as received. The chemical and thermal activation of steel slag is an alternative to the use of traditional cementitious materials.

Keywords: Steel slag, Chemical activation, Thermal activation.

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Relevância do tema.....	1
1.2 Justificativa	4
1.3 Objetivo	4
1.4 Estrutura da Dissertação.....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	6
2.1 Produção do Aço.....	6
2.1.1 Escória de aciaria elétrica	8
2.1.2 Quantidade de escória de aciaria elétrica produzida	8
2.2 Reciclagem de Resíduos Industriais	10
2.3 Caracterização da Escória	13
2.3.1 Composição química	13
2.3.2 Composição mineralógica	14
2.3.3 Relação entre a composição química e a reatividade potencial da escória	16
2.3.4 Cristalinidade.....	19
2.3.5 Lixiviação e solubilização	19
2.3.6 Pozolanicidade	24
2.4 Ativação de Escórias.....	24
2.4.1 Ativação química	25
2.4.2 Ativação térmica.....	30
2.4.3 Ativação mecânica	31
2.5 Cinética e Produtos da Reação.....	32
2.6 Cimento de Escória Ativada	33
2.6.1 Utilização de cimento de escória para produção de elementos estruturais.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Projeto Experimental	37

3.2	Materiais	38
3.2.1	Escória de aciaria elétrica	38
3.2.2	Ativadores.....	38
3.2.3	Caracterização da escória como recebida	39
3.2.4	Caracterização da escória ativada	40
3.3	Métodos.....	41
3.3.1	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e com ativação térmica	41
3.3.2	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e sem ativação térmica	46
3.3.3	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e sem ativação térmica - Verificação	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1	Caracterização da Escória Ativada	50
4.1.1	Características físicas	50
4.1.2	Composição química	51
4.1.3	Composição mineralógica	53
4.2	Reatividade Potencial da Escória.....	54
4.3	Resistência Mecânica à Compressão das Misturas	56
4.3.1	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e com ativação térmica	57
4.3.2	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e sem ativação térmica	66
4.3.3	Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ e sem ativação térmica - Verificação	68
4.4	Análise dos Compostos Mineralógicos	71
4.4.1	Análise por difração de raios X (3,0/0,0)	71
4.4.2	Análise por difração de raios X (0,0/3,0)	72
4.4.3	Análise por difração de raios X (3,0/3,0)	73
4.4.4	Análise por difração de raios X (1,5/1,5)	74
4.4.5	Análise dos resultados da difração de raios X	76
4.5	Análise de Periculosidade	76
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
5.1	Sugestões para Futuros Trabalhos	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática da produção do ferro-gusa e processos de refino do aço, com suas respectivas etapas de geração de escórias (MASUERO, 2001).....	7
Figura 2.2 - Produção mundial de aço. Adaptado de IISI (2007b).....	9
Figura 2.3 - Difratoograma da amostra de escória de aciaria elétrica, com um mês de exposição ao meio ambiente (GRAFFITTI, 2002).....	15
Figura 2.4 - Resistência à compressão de diversos tipos de cimentos de escórias ativados em função do tipo de ativador, condição de cura e composição, GLUKHOVSKY (1967) <i>apud</i> KRIVENKO (2007)	26
Figura 3.1 - Arranjo dos corpos-de-prova sobre o sistema de bandejas utilizado na ativação térmica	44
Figura 3.2 - Corpos-de-prova sendo preparados para ativação térmica	45
Figura 3.3 - Recipiente de cura dos corpos-de-prova	47
Figura 4.1 - Difratoograma da amostra de escória como recebida.....	53
Figura 4.2 - Ativação química e térmica com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ com ativação térmica - Gráfico Pareto	58
Figura 4.3 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio com diferentes tempos de ativação térmica	59
Figura 4.4 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio (1,5 %), com diferentes tempos de ativação térmica	60
Figura 4.5 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio (3,0 %), com diferentes tempos de ativação térmica	60
Figura 4.6 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio com diferentes tempos de ativação térmica	61
Figura 4.7 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e sódio (1,5 %) com diferentes tempos de ativação térmica	62

Figura 4.8 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e sódio (3,0 %) com diferentes tempos de ativação térmica	63
Figura 4.9 - Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 3 horas	64
Figura 4.10 - Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 6 horas	64
Figura 4.11 - Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 9 horas	65
Figura 4.12 - Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ com ativação térmica - Gráfico Pareto	66
Figura 4.13 - Efeito dos ativadores químicos na resistência	67
Figura 4.14 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e/ou sódio.....	68
Figura 4.15 - Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH) ₂ dissolvidos - Verificação - Gráfico Pareto	69
Figura 4.16 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio dissolvido	70
Figura 4.17 - Difratoograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de cálcio	71
Figura 4.18 - Difratoograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de sódio	72
Figura 4.19 - Difratoograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de cálcio e 3,0% de sódio.....	73
Figura 4.20 - Difratoograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 1,5% de cálcio e 1,5% de sódio.....	74
Figura 4.21 - Difratoogramas sobrepostos das amostras de escória de aciaria elétrica como recebida (vermelho) e da ativada quimicamente 1,5 / 1,5 (azul).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química média das escórias de aciaria elétrica (EAE), de forno-panela (FP) e Linz-Donawitz (LD).....	14
Tabela 2.2 - Índices de hidraulicidade (CINCOTTO <i>et al.</i> , 1992 e MASUERO, 2001).....	17
Tabela 2.3 - Índices de hidraulicidade (SAMET e CHAABOUNI, 2004).....	18
Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de lixiviação de escória de aciaria elétrica (EAE), de forno-panela (FP) e Linz-Donawitz (LD)	21
Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de solubilização de escória de aciaria elétrica (EAE), de forno-panela (FP) e Linz-Donawitz (LD)	22
Tabela 2.6 - Classificação dos cimentos (KRIVENKO, 2007)	34
Tabela 3.1 - Impurezas do NaOH (fonte: Vetec Química).....	39
Tabela 3.2 - Impurezas do Ca(OH) ₂ (fonte: Vetec Química)	39
Tabela 3.3 - Composições pesquisadas	42
Tabela 3.4 - As amostras utilizada com ativação térmica	46
Tabela 3.5 - As amostras utilizadas nos experimentos sem ativação térmica, que fazem parte da regressão	48
Tabela 3.6 - As amostras utilizadas nos experimentos sem ativação térmica e com dissolução, que fizeram parte da análise de regressão	49
Tabela 4.1 - Composição química de escória aciaria elétrica (EAE).....	52
Tabela 4.2 - Composição mineralógica da escória aciaria elétrica (EAE)	54
Tabela 4.3 - Análise do índice de hidraulicidade de acordo com CINCOTTO <i>et al.</i> (1992) e MASUERO (2001)	55
Tabela 4.4 - Análise do índice de hidraulicidade de acordo com SAMET e CHAABOUNI (2004).....	56
Tabela 4.5 - Resistência mecânica à compressão média das misturas em função da ativação química e térmica.....	57

Tabela 4.6 - Resistência mecânica à compressão média e o desvio padrão das misturas utilizando hidróxido de cálcio dissolvido e anidro	69
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de lixiviação da escória como recebida e ativada quimicamente (1,5/1,5).	76
Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de solubilização da escória como recebida e ativada quimicamente (1,5/1,5)	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
BOF	- <i>Blast Oxygen Furnace</i>
CP	- Corpos-de-prova
CP-III	- Cimento Portland de alto-forno
DRX	- Difração de Raios X
DTA	- Análise térmica diferencial
EAE	- Escória de aciaria elétrica
EAF	- <i>Electric Arc Furnace</i>
FP	- Forno-panela
FRX	- Fluorescência de Raios X
IAP	- Índice de atividade pozolânico
IBS	- Instituto Brasileiro de Siderurgia
IISI	- <i>International Iron and Steel Institute</i>
LAMIR	- Laboratório de Análises de Minerais e Rochas
LD	- <i>Linz-Donawitz / Blast Oxygen Furnace</i>
Mb	- Modulus of basicity
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
MME	- Ministério de Minas e Energia
MPa	- Mega Pascal
NBR	- Norma Brasileira
NM	- Norma Mercosul
OECD	- <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
P&D	- Pesquisa e Desenvolvimento
pH	- Potencial hidrogeniônico
RILEM	- <i>Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et Matériaux</i>
RMC	- Resistência mecânica à compressão
SCA	- <i>Slag Cement Association</i>
STAR	- <i>Systems and Technologies for Advanced Recycling</i>
US\$	- <i>Dollar</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	- Percentagem
<	- Menor
>	- Maior
≤	- Menor igual
≥	- Maior igual
°	- Grau
θ	- Ângulo de difração
#	- Diâmetro
+/-	- Mais ou menos

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do Tema

A utilização de resíduos como matéria-prima na construção civil tem se tornado uma opção cada vez mais freqüente, uma vez que os materiais alternativos geralmente são mais baratos e, muitas vezes, possuem características de resistência e durabilidade melhores ou tão adequadas quanto os convencionais.

Segundo definição proposta por CINCOTTO (1988), subproduto é quando um resíduo industrial ou agrícola adquire valor comercial, sendo este amplamente aceito pelo meio técnico.

Segundo LIMA (1999), a utilização de resíduos pode ajudar a conservar os recursos naturais e reduzir a demanda por matérias-primas convencionais. Ao mesmo tempo podem ajudar a preservar o meio ambiente, permitindo a redução da quantidade de resíduos, que em geral causam degradação ambiental.

A construção civil é um dos setores com maior potencial para absorver os resíduos sólidos, devido basicamente à necessidade de redução do custo, além da grande quantidade de matérias-primas e da diversidade dos materiais empregados nas obras (CINCOTTO, 1988).

De acordo com GEYER *et al.* (1999), dentre os vários setores industriais com capacidade para absorver várias toneladas de subprodutos gerados por outras indústrias, o da construção civil é o que apresenta maior potencial. Isto se deve a uma série de fatores, tais como: o elevado número de insumos consumidos, os altos custos dos insumos naturais para o desenvolvimento dos projetos, além do permanente déficit habitacional e a necessidade de implantação / melhoria da infraestrutura como base para o desenvolvimento e crescimento dos países. Isto torna indispensável o desenvolvimento de materiais e/ou tecnologias alternativas.

Segundo ÂNGULO *et al.* (2001), a reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma importante prática sustentável para que seja atenuado o impacto ambiental gerado pelo setor e também reduzido os custos. O processo de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de novos materiais à base

de resíduos precisa ser feito de forma criteriosa para garantir o sucesso destes produtos no mercado.

Um dos grandes desafios enfrentados pelas empresas é a destinação dos resíduos de produção, embora a reciclagem destes materiais seja uma etapa dos projetos de desenvolvimento sustentável e, por conseguinte, da preservação do meio ambiente. Segundo CECCATTO (2003), além dessas vantagens deve ocorrer também uma redução dos custos.

Outro fator que justifica a necessidade de pesquisas e desenvolvimento de novos materiais com a utilização de resíduos, seja industrial, agrícola ou urbano, é o fato de muitos deles necessitarem de disposição controlada para não poluir o meio ambiente.

Segundo JOHN (2000), a primeira e mais visível das contribuições ambientais da reciclagem é a preservação de recursos naturais, substituídos por resíduos, prolongando assim a vida útil das reservas e reduzindo a destruição da paisagem, flora e fauna.

Com relação à produção do cimento Portland, um fator negativo refere-se à quantidade de gás carbônico (CO_2) que é emitido no processo de calcinação do calcário e na queima dos combustíveis no forno, sendo que algumas cimenteiras também liberam CO_2 durante a produção de energia elétrica em termoeletricas movidas a carvão. De acordo com estimativas de KAVALEROVA (2007), as indústrias cimenteiras contribuem com aproximadamente 2,5 a 5 % das emissões mundiais de CO_2 .

Dentre os subprodutos que são utilizados como insumos na fabricação de materiais de construção estão as escórias de alto-forno, de aciaria elétrica e de aciaria Linz-Donawitz das usinas siderúrgicas, cinza volantes das usinas termoeletricas e sílica ativa gerada na produção de ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício nos fornos metalúrgicos (GEYER *et al.*, 1997).

Segundo dados da SCA - Slag Cement Association (2007), a produção de cimento com escória por parte das associadas cresceu em quase 329 % entre 1996 e 2006. Conforme estimativas da SCA foram evitadas as emissões de 3,1 milhões de toneladas de CO_2 com a utilização de escória na fabricação de cimento, o equivalente as emissões de cerca de 500.000 carros por ano. Adicionalmente, segundo o International Iron and Steel Institute (IISI, 2007b), a produção americana

de aço em 2006 foi de 98,6 milhões de toneladas, estimando-se que tenham sido gerados aproximadamente 32,3 milhões de toneladas de escórias de diversos tipos.

Em alguns tipos de indústria, como as siderúrgicas, os resíduos são gerados em grandes quantidades, sendo inerentes ao processo produtivo. De acordo com POLISSENI (2005) e com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2006), em 2005 o setor siderúrgico no mundo gerou cerca de 359 milhões de toneladas de escórias (alto-forno, aciaria LD e elétrica) e cerca de 915 milhões de toneladas de outros materiais não incorporados ao aço, totalizando cerca de 1.274 milhões de toneladas de resíduos.

Segundo MASUERO (2001), dentre os resíduos industriais destacam-se as escórias de aciaria geradas na produção do aço, devido ao volume gerado e a seu caráter expansivo, ao contrário da escória de alto-forno, a de aciaria elétrica não é utilizada como adição mineral ao cimento Portland, pois apresenta baixa reatividade.

De acordo com dados do MME (2007), em 2006 foram produzidos no Brasil cerca de 7,5 milhões de toneladas de aço em fornos de arco elétrico. Baseado nos dados de POLISSENI (2005), estima-se que em 2006 foram geradas cerca de 2,2 milhões toneladas de resíduos, e desse montante aproximadamente 1 milhão toneladas de escória de aciaria elétrica.

Segundo GOBBO *et al.* (2003), o custo destes subprodutos é bem mais baixo que os demais insumos normalmente utilizados na construção civil. De acordo com VOLOVIKOV e KOSENKO (2007), os custos de produção de concretos com escória ativada são entre 37 e 50 % menores que os custos do concreto de cimento Portland comum. No entanto, não é possível fazer uma comparação direta do custo de produção do cimento de escória ativada de alto-forno, uma vez que possui desempenho diferente do cimento Portland.

O custo de produção de cimento composto é inferior ao cimento Portland comum (CP-I), pois a demanda de energia para o processo e o preço da escória são inferiores ao do clínquer. Pode-se adicionar na produção até 70 % de escórias (NBR 5735/91) para a produção de cimento Portland de alto-forno (CP-III), além de 5 % de material carbonático.

A produção de cimentos de alto-forno ou compostos é também uma forma de se aumentar a produção das fábricas, sem aumentar a geração de CO₂, que pode ser adaptada sem grandes investimentos.

Segundo GEYER (2001), devido às características da produção de aço em aciaria elétrica, a escória gerada possui baixa reatividade, pois normalmente é resfriada muito lentamente, o que torna a estrutura cristalina.

De acordo com JOHN (1995), a ativação de escórias de alto-forno por silicato de sódio é capaz de produzir cimentos com características de desempenho bastante variáveis em função da composição, possuindo baixo calor de hidratação, menor pH e resistência mecânica apropriada para diversos fins. Fatores como tipo e quantidade de ativadores, teor de material amorfo e finura, alteram em muito os resultados obtidos para um mesmo tipo de escória.

1.2 Justificativa

Existem inúmeras pesquisas sobre a ativação química de escórias de alto-forno, entretanto os trabalhos que envolvem a ativação de escórias de aciaria elétrica são em pequeno número, sendo esse resíduo relegado a usos secundários, geralmente como material granular para pavimentação de estradas vicinais e base de estacionamentos, entre outros.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a utilização de escória de aciaria elétrica ativada como aglomerante hidráulico, mediante o uso de ativação química (hidróxidos alcalinos) e térmica.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está estruturada na forma de capítulos.

O Capítulo 2 aborda conceitos relacionados à revisão da literatura referente à geração, à reciclagem e às características da escória de aciaria elétrica, aos procedimentos para ativação química, térmica e mecânica, além dos estudos sobre cimento de escória ativada.

O Capítulo 3 relata o procedimento experimental, ou seja, os materiais e métodos utilizados.

O Capítulo 4 apresenta as análises dos resultados dos ensaios propostos no programa experimental.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Produção do aço

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) (2007b) as usinas de aço são classificadas de acordo com o processo produtivo em:

- Integradas: operam as três fases básicas: redução, refino e laminação;
- Semi-integradas: operam duas fases: refino e laminação. Estas usinas usam o ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridas de terceiros para transformá-los em aço nas aciarias elétricas e posterior laminação;
- Não integradas: operam apenas uma fase do processo: redução ou laminação.

O aço é produzido a partir de minério de ferro (óxido de ferro), carbono (carvão) e fundente (calcário) em altos fornos onde ocorre o processo de redução. Neste processo a atmosfera redutora transforma o minério em ferro metálico e devido à temperatura elevada ocorre a fusão do mesmo, sendo denominado nessa etapa de ferro gusa. Segundo ARAUJO (1967) além do ferro gusa no alto-forno são gerados escória, gás e poeira.

Dentre os vários processos para refino do aço, a partir do gusa, os dois mais importantes ocorrem: em conversor a oxigênio (aciaria LD/BOF - Linz-Donawitz / Blast Oxygen Furnace) utilizando o gusa líquido e; em forno elétrico a arco (aciaria elétrica ou EAF - Electric Arc Furnace) utilizando gusa solidificado e uma carga à base de sucata metálica, finalizando o processo em forno panela. Esses dois processos são ilustrados esquematicamente na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Representação esquemática da produção do ferro-gusa e processos de refino do aço, com suas respectivas etapas de geração de escórias (MASUERO, 2001)

No processo de produção de aço por Aciaria Elétrica, a escória oxidante é denominada de ácida e a escória redutora gerada, no Forno Panela, de básica. Geralmente a escória é denominada básica quando a relação cálcio/silício (C/S) é superior a 1, e ácida se inferior a 1 (JOHN, 1995).

A aciaria LD/BOF é utilizada em usinas integradas, processo característico de grandes empreendimentos siderúrgicos. A aciaria elétrica é um processo de fusão empregado em unidades chamadas semi-integradas, que na maioria dos casos são instalações menores e localizadas próximas aos grandes centros geradores de sucata metálica.

Segundo ARAUJO (1967), a operação do forno de arco elétrico (aciaria elétrica), compreende as seguintes fases: carregamento (sucata, gusa e fundente); fusão; retirada da escória; refino (forno panela); vazamento.

Após a retirada da escória a mesma é resfriada lentamente, com o objetivo de recuperar a maior quantidade da fração metálica. Segundo GEYER *et al.* (1997), a

fração metálica recuperada da escória de aciaria é empregada no alto-forno ou mesmo na aciaria e, em média, essa recuperação corresponde a 30 % da sua geração.

Segundo MASUERO *et al.* (2000), o aço produzido no forno de arco elétrico é conduzido para uma estação de refino secundário e processado em um equipamento denominado forno-panela. Nessa etapa, a partir da adição de elementos redutores e cal ocorre a formação da escória de refino.

2.1.1 Escória de Aciaria Elétrica

De acordo com a definição do International Iron and Steel Institute (IISI, 2007a), escórias são rochas sintéticas que se formam no alto-forno, da aciaria a oxigênio e nos fornos de arco elétrico. Elas resultam das inclusões e adições não-metálicas em tais processos. Escórias solidificadas podem ser usadas como rochas ou cascalho, ou podem ser usadas na fabricação de cimento.

2.1.2 Quantidade de escória de aciaria elétrica produzida

O volume mundial de escória gerada em aciaria é da ordem de 84 milhões de toneladas por ano. Segundo informações do IBS (IBS, 2003), 20,2 % do aço produzido no Brasil é obtido por este processo e no mundo este percentual chega a 33,9 % (GEYER *et al.*, 1997). Entretanto, no Brasil a produção de aço pelo processo de aciaria elétrica aumentou para 24,4 % em 2006 (MME, 2007).

Segundo POLISSENI (2002), para a produção de uma tonelada de aço pelo processo de aciaria elétrica são gerados 0,39 ton. de resíduos, sendo 0,13 ton. de escória e 0,16 ton. de materiais não incorporados ao aço. Entretanto, segundo dados do IBS (2007a), em 2006 foram produzidos cerca de 13 milhões de toneladas de resíduos, sendo 10,1 milhões de escórias (aproximadamente 78 % do total gerado) e o restante de pós e lamas (representando 2,8 milhões de toneladas). Esta geração total de resíduos representa cerca de 0,42 ton. por tonelada de aço produzido, sendo que 22 % são reutilizados internamente (principalmente os pós, ricos em ferro) e os 78 % restantes representam as escórias de alto-forno vendida às indústrias cimenteiras.

MASUERO (2001) estima que a geração de escórias situa-se entre 70 a 170kg/ton. de aço bruto e segundo GRAFFITTI (2002), a geração média seria de 100 a 150 kg/ton. LIMA (1999) pesquisando escória de aciaria elétrica espanhola, cita uma geração de 180 kg/ton. de aço produzido.

Segundo IISI (2007b) entre 2001 e 2005 a produção mundial de aço aumentou em 46,3 %, sendo que no Brasil esse aumento foi de 15,7 % no mesmo período. Em 2006 a produção mundial de aço (IISI, 2007b) foi de 1.244,2 milhões de toneladas e desse total estima-se, baseado em IBS (2003), que 421,8 milhões foram produzidos pelo processo de aciaria elétrica (33,9 % da produção mundial). Baseado em dados, sobre geração de escória, apresentados por POLISSENI (2002) foram gerando cerca de 54,8 milhões de toneladas de escórias de aciaria e 67,5 milhões de toneladas de outros tipos de resíduos não incorporados ao aço.

Entre 2005 e 2006 o Brasil situou-se entre os 10 maiores produtores de aço do mundo, como mostra a Figura 2.2.

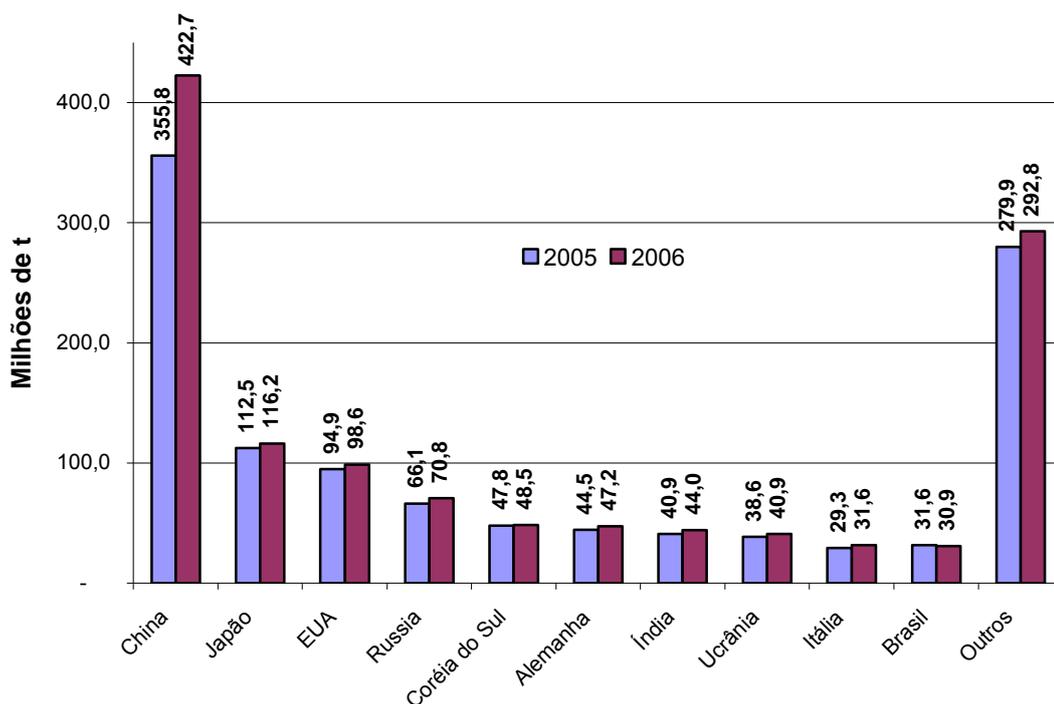


FIGURA 2.2 - Produção mundial de aço. Adaptado de IISI (2007b)

Em 2006 foram produzidos no Brasil 30,9 milhões de toneladas de aço, e destas 7,55 milhões por aciaria elétrica (24,4 %). Estima-se que foram gerados 1 milhão de toneladas de escórias de aciaria elétrica, distribuídas em nove estados da

federação (MME, 2007). No Brasil há 46 fornos de arco elétrico em operação, distribuídos nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo, Pernambuco, Ceará, Paraná, Rio Grande do Sul e Bahia (MME, 2007).

A escória a ser utilizada nessa dissertação é de aciaria elétrica, produzida por uma empresa, localizada na cidade de Araucária - PR. Segundo dados do IBS (2003), em 2002 esta empresa produziu 402 mil toneladas de aço pelo processo de aciaria de arco elétrico. Baseado nos dados de POLISSENI (2002) e na produção de 2002, estima-se que foram geradas cerca de 52 mil toneladas de escória e 64 mil toneladas de outros materiais não incorporados ao aço, 13 % e 16 %, respectivamente, por tonelada de aço produzida. O volume gerado seria aproximadamente de 142 toneladas de escória por dia.

A transformação desses resíduos em subprodutos de maior valor agregado é um grande atrativo para a utilização da escória como matéria-prima. Entretanto, há alguns inconvenientes no uso deste produto, como por exemplo, o óxido de cálcio (CaO) que participa no processo de purificação do aço, pode permanecer parcialmente não reagido na escória. Esse material em presença de umidade hidrata-se e forma compostos expansivos, limitando o seu uso.

2.2 Reciclagem de Resíduos Industriais

A reciclagem de subprodutos industriais é uma alternativa ambientalmente correta e economicamente viável. Contudo, antes dos estudos para utilização de resíduos industriais deve-se realizar uma análise de todo o processo que resulta na geração do mesmo e identificar a classe de toxidez a qual pertence.

De acordo com ROY (1999), nos últimos anos as indústrias têm dedicado particular ênfase na utilização de subprodutos.

Segundo CHERMONT e MOTTA (1996), na gestão de resíduos vigora uma hierarquia de objetivos, no qual se deve priorizar a redução da geração na fonte; buscar reutilização do resíduo produzido na mesma empresa; reciclagem; recuperação de energia (incineração); e por fim a sua deposição em aterros sanitários ou industriais.

CINCOTTO (1988) propõe critérios de avaliação dos resíduos para uso na construção civil, baseados nos estudos da OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) e da RILEM (Réunion International des Laboratoires d'Essais et Matériaux). Os critérios são:

- a) a quantidade disponível em um local deve ser suficiente para justificar o desenvolvimento de sistema de armazenamento, processamento e transporte;
- b) a distância entre o gerador e os consumidores implica em custo com transporte, o qual deve ser avaliado de modo a não prejudicar a competitividade do resíduo com os materiais convencionais;
- c) o material enquanto insumo não pode ser potencialmente nocivo durante a produção de materiais ou posteriormente à sua incorporação em uma obra.

A reciclagem de resíduos sólidos industriais como materiais alternativos na construção civil tem-se tornado uma prática indispensável na preservação de recursos naturais, minimização de custos e redução de impacto ambiental (CECCATTO, 2003).

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

Segundo POLISSENI (2002), para a produção de aço são consumidas grandes quantidades de matérias-primas (minério e/ou sucata, bem como finos de carvão, coque metalúrgico, produtos carboquímicos, pós, lamas e carepas, refratários, metais separados das escórias, etc.). Porém, apenas menos da metade desses produtos se incorporam ao produto final, originando a formação de resíduos em larga escala.

Em uma usina siderúrgica é gerada uma grande quantidade de resíduos que para serem descartados apresentam inúmeros inconvenientes, tais como [GALDEANO *et al.*¹, 1994 apud GEYER (2001)]:

- a) Necessidade de grandes áreas para disposição;
- b) elevado custo de transporte e preparação da área de disposição (US\$ 20 a US\$ 30 por tonelada de resíduo depositado);
- c) desperdício de materiais;
- d) agressão ao meio-ambiente.

Dentre as diversas soluções para destinação das escórias sem comprometimento do meio ambiente podem ser citadas:

- a) fonte de cálcio para fabricação de clínquer Portland;
- b) adição mineral para a fabricação do cimento Portland de alto-forno;
- c) agregados miúdo e graúdo utilizados como lastro de ferrovia, sub-base e base de ruas e estradas;
- d) concretos Portland e asfáltico;
- e) fertilizantes;
- f) vitrocerâmicas.

Segundo GEISELER (1996), na Alemanha cerca de 70 % da escória de aciaria elétrica é utilizada, sendo que 66 % na construção civil e 4 % em metalurgia. A escória de aciaria a oxigênio possui índice de utilização de 85 %, sendo 42 % na construção civil, 17 % em metalurgia, 16 % em fertilizantes e 10 % para outros usos. Atribui-se o menor uso da escória de aciaria elétrica ao fato de sua produção ser distribuída em diversas unidades menores, dificultando a logística para reciclagem.

Devido a suas propriedades cimentícias e do alto teor de cálcio, a utilização de escórias possibilitam a redução da extração de matéria-prima para a produção do cimento, aumentando assim a vida útil das jazidas de calcário e diminuindo a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) liberado para a atmosfera.

O processo denominado CEMSTAR foi desenvolvido pelas empresas TXI's Cement Group e Chaparral Steel² (EUA) dentro de um programa de redução de resíduos chamado de STAR (Systems and Technologies for Advanced Recycling).

¹ GALDEANO, O. V. R. *et al.* A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: **SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS E RESÍDUOS NA SIDERURGIA**, 25, Volta Redonda, RJ. Anais. Volta Redonda, 1994. p.271-285.

Observou-se uma redução de 2,3 % no consumo de combustíveis, 7 % na emissão de CO₂ e 40 % na emissão de NO_x, além de aumentar a produção do clínquer Portland em 10 % sem qualquer ampliação na capacidade do forno (YATES *et al.*, 2004). O processo STAR consiste na substituição do calcário por escória de aciaria elétrica na fabricação de clínquer.

GEISELER (1996) também cita a utilização de escória de aciaria de LD com matéria-prima para fabricação de clínquer, reduzindo a temperatura máxima de clínquerização e o consumo de energia. Mas, para sua utilização como adição mineral deve-se levar em consideração que a escória de aciaria elétrica possui propriedades hidráulicas inferiores ao da escória granulada de alto-forno. Na Europa a escória é utilizada como fertilizante e como agregado (areia e brita) para construções de prédios e estradas.

A escória de aciaria já vem sendo utilizada na construção, principalmente como base, sub-base e revestimento asfáltico em rodovias. Entretanto, seja qual for o reaproveitamento da escória, é necessário um período de cura que varia em função da temperatura e umidade. É exatamente este processo lento de cura que pode torná-la não competitiva em certas regiões em comparação com os materiais convencionais.

2.3 Caracterização da Escória

2.3.1 Composição química

Segundo POLISSENI (2002) a escória de aciaria é um resíduo, constituído por uma mistura de óxido de cálcio e magnésio, silicato de cálcio, ferro metálico, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala, resultando em uma elevada variação de composição química e mineralógica.

A composição da escória apresenta diferenças dependendo da composição química da matéria-prima ou do processo (ALTUN e YILMAZ, 2002; SHI, 2002; PAL *et al.*, 2003). As variações de composição química, além da velocidade de resfriamento, influenciam na reatividade da escória como adição mineral. A

²

Chaparral Steel é de propriedade da Gerdau Ameristeel, desde julho de 2007.

composição química pode trazer elementos tóxicos (As, Zi, Cu, Pb, etc.) que mesmo em quantidades reduzidas podem impossibilitar a utilização, devendo o material ser depositado em aterro industrial.

A Tabela 2.1 apresenta a composição química de diversas escórias.

Tabela 2.1 - Composição química média das escórias de aciaria elétrica (EAE), de forno-panela (FP) e Linz-Donawitz (LD)

Composição química	LENZI (1995) EAE + FP	LIMA (1999) EAE	MASUERO (2001) EAE	GUMIERI (2002) LD	POLISSENI (2005) EAE *	POLESE <i>et al.</i> (2006) EAE
CaO	28,60	28,6	29,81	40,90	30,97	37,78
SiO ₂	15,90	11,4	16,08	9,20	21,64	16,47
Al ₂ O ₃	2,30	6,55	7,22	4,30	3,93	5,76
MgO	10,15	3,65	7,18	6,70	5,42	4,81
FeO	36,15	-	30,36	27,70	29,31	-
Fe ₂ O ₃	-	42,45	-	-	-	31,02
MnO	4,25	4,4	3,14	6,50	4,19	n. d.
P ₂ O ₅	0,81	0,55	0,46	1,50	0,66	0,76
Cr ₂ O ₃	1,50	-	2,14	0,35	0,74	-
TiO ₂	0,32	0,4	0,43	0,85	0,51	-
V ₂ O ₅	0,11	-	0,08	-	0,00	-
S / SO ₃	0,12	-	0,24	-	0,68	-
CaO livre	-	-	0,97	5,80	0,39	0,24
Outros	-	0,5	0,04	0,08	1,71	3,4
Perda ao fogo	-	-	-	1,80	0,00	*
i = CaO / SiO ₂	1,80	2,51	1,85	4,45	1,44	2,29

Caso as escórias sejam dispostas sem controle sofrem oxidação e podem liberar metais pesados que contaminam o solo e a água.

2.3.2 Composição mineralógica

MASUERO (2001) analisou a escória de aciaria elétrica após o processo de separação magnética (EAE - Escória de Aciaria Elétrica beneficiada e sem envelhecimento) obtendo como principais constituintes mineralógicos: wustita (FeO), silicato de magnésio (Mg₂SiO₄), quartzo (SiO₂), magnetita (Fe₃O₄) e ferrita de magnésio (MgFe₂O₄).

POLISSENI (2005) analisando três amostras de escória que permaneceram diferentes tempos de estocagem (72 horas, 6 e 24 meses), encontrou como

principais constituintes mineralógicos: ferrita de magnésio; quartzo; melilita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$); hematita (Fe_2O_3); calcita (CaCO_3); belita (Ca_2SiO_4) e wustita.

A análise da escória realizada por LUXÁN *et al.* (2000) encontrou com principais compostos minerais a gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) sob duas diferentes formas, a larnita (Ca_2SiO_4) e a bredigita [$\text{Ca}_{14}\text{Mg}_2(\text{SiO}_4)_8$], além de outros compostos detectados em menor quantidade.

MONSHI e ASGARANI (1999) na análise da escória encontraram gehlenita e akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) como compostos principais.

No estudo realizado por GRAFFITTI (2002) analisando escória de aciaria elétrica com diferentes idades (1, 4, 6 e 8 meses) foram encontrados como principais compostos: kirschsteinita (CaFeSiO_4), gehlenita, akermanita, monticelita ($\text{Ca}_2\text{MgSiO}_4$), merwinita ($\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), quartzo, wustita, periclásio (MgO) e calcita. Sendo que os três últimos são compostos expansivos em contato com água.

A Figura 2.3 mostra o difratograma de raios X da escória de aciaria elétrica com um mês de exposição ao meio ambiente, estudada por GRAFFITTI (2002). Os picos mais intensos são atribuídos a wustita, merwinita, monticelita, quartzo e kirschsteinita.

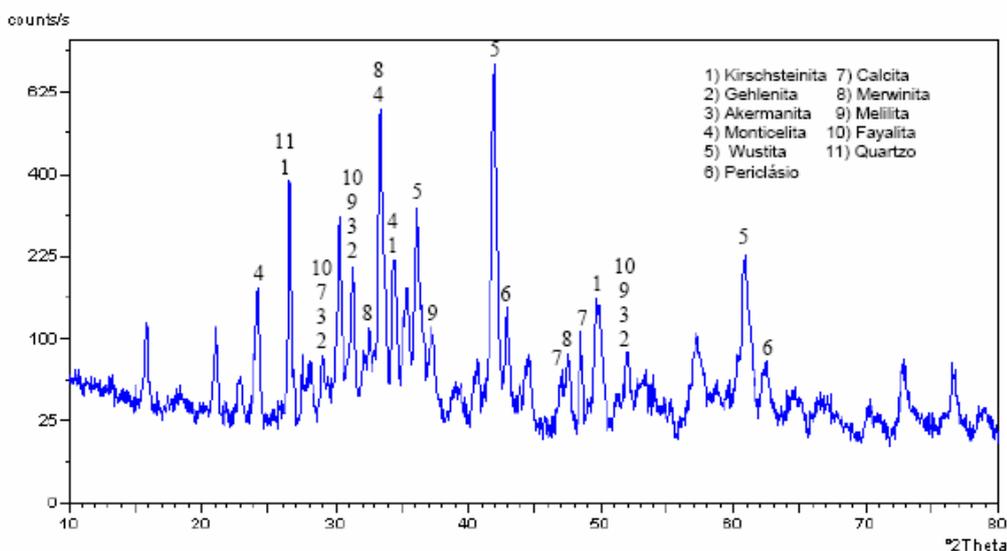


Figura 2.3 - Difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica, com um mês de exposição ao meio ambiente (GRAFFITTI, 2002)

POLESE *et al.* (2006) encontraram 55 compostos diferentes em pesquisa com escória de aciaria elétrica utilizando a técnica de difração de raios X. Ao utilizar uma microsonda de raios X acoplada a um microscópio eletrônico de varredura (MEV)

foram identificados a calcita, a aragonita (CaCO_3), a vaterita (CaCO_3), o sulfato de cálcio (CaSO_4) e silicatos de cálcio hidratados [$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(\text{H}_2\text{O})_4$].

LIMA (1999) pesquisando escória de aciaria elétrica espanhola obteve como compostos principais na análise da escória graúda (100/150 mm): wustita, larnita, merwinita, portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), brownmilitita ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$) e gehlenita. Observaram-se picos intensos em cerca de 36° , 42° e 61° , caracterizando a presença de wustita, como demonstra a composição química da escória rica em ferro.

2.3.3 Relação entre a composição química e a reatividade potencial da escória

A grande reatividade encontrada em escórias com estruturas amorfas é decorrente da instabilidade estrutural que a falta de organização atômica provoca no material. Como os materiais tendem a atingir uma configuração que resulte em menor energia livre, quando a escória é finamente moída e em presença de ativadores alcalinos esta tende a solubilizar e rearranjar-se cristalograficamente.

Segundo CINCOTTO *et al.* (1992), além da composição química, o resfriamento brusco (fase vítrea) é essencial para se aumentar a reatividade necessária.

Para NEVILLE (1997) além da temperatura e finura, a composição química e o teor de fase vítrea são os outros fatores que influenciam na reatividade de uma escória.

A reatividade das escórias está intimamente relacionada com a velocidade de resfriamento, pois se esse resfriamento for lento produzirá escórias altamente cristalinas. Nesta categoria encontram-se majoritariamente todos os tipos de escória de aciaria, que são empregadas como agregados. Nos resfriamentos rápidos a escória se solidifica como um produto vítreo, apresentando características hidráulicas latentes, sendo que uma representante comum dessa categoria são as escórias de alto-forno (MASUERO, 2001).

Segundo JOHN (1995) e MELO NETO (2002), dado à baixa solubilidade da fração cristalina, o teor de fase vítrea (amorfa) é um primeiro condicionante da reatividade. Uma escória totalmente cristalina não será capaz de, em condições

normais de temperatura e pressão, hidratar-se. Outro fator importante é a composição química da fase vítrea que vai influenciar a solubilidade da escória.

Esta fase pode ser estimada pela contagem da fração cristalina por microscopia óptica ou por difração de raios X (JOHN, 1995). No qual este material apresenta um halo vítreo na proximidade de 30° (2θ), diferente das escórias de aciaria elétrica e Linz-Donawitz resfriadas lentamente que possuem muitos compostos cristalinos (LIMA, 1999; MASUERO, 2001; POLISSENI, 2005).

O potencial de reatividade de uma escória pode ser avaliado utilizando a concentração dos compostos simples, obtidos por análises químicas conforme apresentado nas Tabelas 2.2 e 2.3.

A Tabela 2.2 apresenta índices obtidos por diversos pesquisadores ou normalizados para determinação do índice de hidraulicidade a partir da composição química das escórias.

Tabela 2.2 - Índices de hidraulicidade (CINCOTTO *et al.*, 1992 e MASUERO, 2001)

Pesquisador / Norma	Índice
Blondiau	$1,45 < \text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1,54$ $1,8 < \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 < 1,9$
Venuat	$1,40 < \text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1,45$
DIN, Espanha NBR 5735/87	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1$ > 1,4 (Japão)
Cheron e Lardinois	$I_H = (\text{CaO} + 1,4 \text{ MgO} + 0,56 \text{ Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1,54$
ASTM	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3 \text{ Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{ Al}_2\text{O}_3) > 1$
Schewiete	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + (\text{Al}_2\text{O}_3 - 10) / (\text{SiO}_2 + 10) > 1$
Dron	$R' = (\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 \times \text{Al}_2\text{O}_3)^2 > 0,18$

A hidraulicidade potencial das escórias está relacionada à presença de Si, Ca e Al como elementos químicos predominantes, ao fato de encontrarem-se no estado anidro e amorfo, além de apresentarem área específica (finura) superior a 3000 cm^2/g (JOHN, 1995; MASUERO, 2001).

Segundo JACOMINO *et al.*³ (2000) *apud* MASUERO (2001) a hidraulicidade de uma escória está relacionada a sua capacidade de endurecer em presença de um ativador e água.

Os índices apresentados anteriormente buscam correlacionar a composição química com a resistência mecânica dos cimentos com escória, sendo indicados para controle de produção e para determinação do potencial de utilização de escórias na produção de aglomerantes.

Para analisar se a escória possui potencial de utilização como adição mineral ao cimento, SAMET e CHAABOUNI (2004) propõe a utilização das equações descritas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Índices de hidraulicidade (SAMET e CHAABOUNI, 2004)

	Índice	Módulos / Parâmetros
F1	$\text{CaO} / \text{SiO}_2$	F1 \leq 1 escória ácida (baixa hidraulicidade) F1 \geq 1 escória básica (boa reatividade)
F2	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$	F2 > 1
F3	$(\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2} \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO})$	F3 > 1,5
F4	$(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$	F4 \geq 1
F5	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$	F5 \geq 2/3 do peso total da escória
	Fase vítrea	2/3 massa total

Os parâmetros apresentados na Tabela 2.3 buscam através da proporção dos diversos componentes químicos e do teor de fase vítrea estimar a reatividade de escórias, através dos diversos módulos (F).

Um parâmetro de determinação do potencial uso da escória é o seu módulo de alcalinidade (Ma) ou Módulo de basicidade (Mb - Modulus of basicity). Segundo USHEROV-MARSHAK *et al.* (1998) e SONG *et al.* (2001), pode ser definido como sendo a relação entre a soma das massas de óxidos de cálcio e magnésio pelo

³ JACOMINO, V. M. F.; BATISTA, A. A. M.; RIBEIRO, E. D. L.; CASTRO, L. F. A.; LOPES, L. E. F. **Usos da escória de alto-forno – Alternativas para a melhoria da qualidade ambiental.** In: XXI SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO . ABM. Santos – SP. Anais. p 97-107. Nov - Dez. 2000

quociente da soma da massa de dióxido de silício mais óxido de alumínio $[(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)]$.

Mesmo para valores baixos (0,80 a 1,50) de módulo de basicidade, é possível a obtenção de misturas de escória ativada com alta resistência inicial (USHEROV-MARSHAK *et al.*, 1998).

Os diversos índices apresentados anteriormente não representam consenso entre os diversos pesquisadores, sendo utilizados de maneira indicativa, buscando correlacionar a composição química das escórias, com o seu potencial de hidraulicidade.

2.3.4 Cristalinidade

Segundo LIMA (1999), quando a escória é resfriada lentamente os elementos se agrupam ordenadamente formando estruturas cristalinas estáveis, mas quando se resfria o material bruscamente os elementos não se agrupam de forma ordenada formando estruturas amorfas.

A difratometria de raios X é uma técnica adequada para verificar a eficiência do resfriamento da escória em produzir estruturas amorfas, pois, na ausência de quaisquer estruturas cristalinas o diagrama apresenta uma crista centrada no pico principal da melilita (em torno de 2θ igual a 30°) (AÏTCIN, 2000).

JOHN (1995) utilizou uma escória com teor de vidro (material amorfo) de 97 % e o ensaio de difração de raios X ($Cu \alpha$) não revelou a presença de produtos cristalinos, apenas do halo vítreo centrado em 2θ igual a 31° .

Essa técnica auxilia na identificação dos compostos presentes nas amostras de escórias, assim como nas misturas ativadas. Desta forma, é possível identificar os compostos originais da escória e os resultantes da ativação.

2.3.5 Lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação e solubilização são necessários para a caracterização de toxidez da escória proveniente de aciaria. Esses ensaios fornecem informações se as amostras possuem ou não elementos tóxicos e qual a sua concentração.

Segundo CECCATTO (2003) a caracterização de toxidez dos resíduos é considerada, principalmente pelos órgãos ambientais, requisito indispensável para aprovação ou não do uso proposto para determinado resíduo.

Para ZORDAN e JOHN (2001), a avaliação da toxidez constitui um passo decisivo na produção de um novo produto que utiliza algum resíduo como matéria-prima. Inicialmente a avaliação comercial é um importante passo, freqüentemente negligenciado quando se escolhe a melhor aplicação para um determinado resíduo. Outros passos importantes são os desenvolvimentos dos produtos e avaliação do desempenho. Essa avaliação global deve ser baseada na definição do ciclo de vida, devendo-se considerar o benefício ambiental, evitar a disposição do resíduo e incluir testes ambientais como lixiviação e outros específicos. Também a transferência de tecnologia deve ser cuidadosamente planejada e desenvolvida na apresentação de um novo produto.

Quando resíduos industriais são utilizados como materiais de construção, a migração de componentes prejudiciais destes resíduos é a preocupação mais significativa em termos ambientais. Algumas características dos resíduos devem ser consideradas quando o potencial de risco e utilização dos mesmos é avaliado (MROUEH e WAHLSTRÖM, 2002):

- a) Riscos diretos para seres humanos, plantas, animais e organismos na água;
- b) Ambiente de disposição, haja vista que pode intensificar a lixiviação de elementos potencialmente nocivos;
- c) Formação de gases tóxicos, através da degradação ou reatividade;
- d) Problemas causados pela formação de pó.

A NBR 10004/04 classifica os resíduos industriais sólidos e semi-sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, indicando quais devem ter manuseio e destinação mais rigidamente controlados. A classificação proposta baseia-se fundamentalmente nas características dos resíduos, em listagem dos reconhecidamente perigosos e em listagens de padrões de concentração de poluentes.

A NBR 10005/04 fixa os requisitos exigíveis para a obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. O ensaio de lixiviação é utilizado quando se pretende determinar a capacidade de liberação de substâncias de orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo, por meio de dissolução no meio extrator.

A NBR 10006/04 fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. O ensaio de solubilização é utilizado para diferenciar resíduos sólidos das classes II A – não inertes e II B - inertes. Os resultados dessas análises são comparados com índices máximos de concentrações permitidos pelas respectivas especificações e, baseado nessa comparação é possível determinar a classe do resíduo.

Ensaio de caracterização de toxidez é realizado para analisar se a escória estudada possui elementos ou compostos químicos em quantidade superior ao limite estabelecido pela norma NBR 10004/04, sendo que em caso positivo o descarte deve ser realizado em aterro industrial.

A Tabela 2.4 apresenta os valores obtidos por diversos pesquisadores nos ensaios de lixiviação, comparados com os limites previstos pela NBR 10004/04.

Tabela 2.4 - Resultados dos ensaios de lixiviação de escória de aciaria elétrica (EAE), de forno-painel (FP) e Linz-Donawitz (LD)

Poluente	Unid.	Limite máximo NBR 10004/87	GUMIERI (2002) LD	GEYER (2001) FP	MASUERO (2001) EAE	POLISSENI (2005) EAE*	POLISSENI (2005) Arg.**	Limite máximo NBR 10004/04
Arsênio	mg/l	5,0	≤0,5	<0,005	<5,0	<0,010	<0,010	1,0
Bário	mg/l	100,0	≤20	<1,0	3,3	1,05	0,94	70,0
Cádmio	mg/l	0,5	≤0,02	<0,01	<0,01	0,007	<0,005	0,5
Chumbo	mg/l	5,0	≤0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,005	1,0
Cromo total	mg/l	5,0	0,56	<0,02	0,06	<0,016	<0,016	5,0
Fluoreto	mg/l	150,0	17,7	17	2,5	3,07	1,87	150,0
Mercúrio	mg/l	0,1	≤0,001	<0,0005	<0,5	<0,001	<0,001	0,1
Prata	mg/l	5,0	≤0,01	2,2	0,2	<0,009	<0,008	5,0
Selênio	mg/l	1,0	≤0,5	<0,05	0,296	<0,003	<0,003	1,0

Obs.:

* Teor médio. Conforme NBR10004/04

** Argamassa de cimento Portland composto (34 % de escória) com traço 1:1,5. Conforme NBR10004/04

As pesquisas de GUMIERI (2002), GEYER (2001) e MASUERO (2001) foram realizadas de acordo com a norma NBR 10004/87, vigente na ocasião das pesquisas.

Essas normas exigem que o material seja moído para realização dos ensaios. Entretanto, segundo GEYER (2001) se os materiais fossem ensaiados em tamanhos mais próximos daqueles em que serão utilizados, poderiam existir casos em que o

material moído resultasse em resíduo perigoso (Classe I), mas em tamanho natural poderia ser inerte, caracterizando o encapsulamento daqueles resíduos perigosos. No entanto, essa interpretação desconsidera os casos em que os produtos poderão sofrer quebras ou serão triturados em novo processo de reciclagem.

A Tabela 2.5 apresenta os resultados dos ensaios de solubilização de diversos pesquisadores.

Tabela 2.5 - Resultados dos ensaios de solubilização de escória de aciaria elétrica (EAE), de forno-painel (FP) e Linz-Donawitz (LD)

Poluente	Unid.	Limite max. NBR 10004/87	GUMIERI (2002) LD	GEYER (2001) FP	MASUERO (2001) EAE	POLISSENI (2005) EAE *	POLISSENI (2005) Arg **	Limite max. NBR 10004/04
Alumínio	mg/l	0,2	0,4	23	3,8	2,03	<0,20	0,2
Arsênio	mg/l	0,05	≤0,05	<0,005	0,005	<0,010	<0,010	0,01
Bário	mg/l	1,0	≤0,1	<1,0	<1,0	<0,33	<0,36	0,7
Cádmio	mg/l	0,005	≤0,005	<0,01	<0,001	<0,004	<0,004	0,005
Chumbo	mg/l	0,05	≤0,05	<0,05	<0,05	0,043	<0,032	0,01
Cobre	mg/l	1,0	≤0,02	0,02	0,04	<0,010	<0,010	2,0
Cromo total	mg/l	5,0	≤0,02	<0,02	0,03	<0,016	<0,016	0,05
Ferro	mg/l	0,3	≤0,01	<0,03	<0,03	<0,13	0,23	0,3
Manganês	mg/l	0,1	≤0,02	0,01	0,01	<0,012	<0,012	0,1
Mercúrio	mg/l	0,001	≤0,001	0,0005	<0,0005	<0,001	<0,001	0,001
Prata	mg/l	0,05	≤0,01	1,2	<0,01	<0,009	<0,009	0,05
Selênio	mg/l	0,01	≤0,01	0,038	0,036	<0,003	<0,003	0,01
Sódio	mg/l	200,0	52,0	11	10	1,46	1,86	200,0
Zinco	mg/l	5,0	≤0,02	<0,01	<0,01	0,007	<0,001	5,0
Cianeto	mg/l	0,1	≤0,001	0,01	0,01	<0,017	<0,017	0,07
Cloreto	mg/l	250,0	≤1,0	173	18,0	38,0	34,0	250,0
Dureza	mg/l	500,0	1000,0	650,0	380,0	79,0	474	-
Fenóis	mg/l	0,001	0,098	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	0,01
Fluoreto	mg/l	1,5	2,60	0,66	6,2	2,61	0,94	1,5
Nitrato	mg/l	10,0	1,20	<0,1	<0,1	<0,017	<0,017	10,0
Sulfato	mg/l	400,0	≤5,0	123,2	1,2	5,33	121	250,0
Sulfactante	mg/l	0,2	-	-	NA	<0,20	<0,20	0,05

Obs.: * Teor médio. Conforme NBR10004/04 ** Argamassa de cimento Portland composto (34 % de escória) com traço 1:1,5. Conforme NBR10004/04

As pesquisas de GUMIERI (2002), GEYER (2001) e MASUERO (2001) foram realizadas de acordo com a norma NBR 10004/87, vigente na ocasião das pesquisas.

Conforme apresentado na Tabela 2.4 em nenhuma das pesquisas a escória estudada apresenta teor de elementos ou compostos perigosos acima do limite máximo especificado no ANEXO G (Listagem nº7) da NBR 10004/87 para o ensaio de lixiviação (NBR 10005/87), entretanto se formos analisar os teores adotados pela norma NBR 10004/04, a escória analisada por MASUERO (2001), não atende a norma na quantidade de mercúrio e arsênio. Também constam os novos valores de concentração do extrato lixiviado adotados pela NBR 10004/04.

Quando a escória é utilizada em mistura com cimento, como no trabalho de POLISSENI (2005), ocorre uma redução nas quantidades lixiviadas, indicando que ocorreu o encapsulamento na matriz de cimento dos elementos potencialmente tóxicos.

Conforme a Tabela 2.5, em todas as amostras de escória estudadas ocorreu a extração de alguns elementos poluentes. Todos os trabalhos, com exceção ao de POLISSENI (2005), foram realizados conforme a norma NBR 10006/87. Constam os limites adotados pela norma nas duas edições, sendo que os limites máximos adotados pela norma NBR 10004/04 são inferiores para alguns elementos.

No trabalho realizado por POLISSENI (2005), de acordo com os teores de alumínio e fluoretos identificados, a escória foi classificada como resíduo Classe II-A, não perigoso e não inerte. O mesmo ocorreu com os resultados de outros trabalhos em que os teores de alguns compostos estavam acima do limite máximo permitido pela NBR 10004/87. Dentre os compostos que excederam os limites estão: GUMIERI (2002) teor de alumínio, dureza ($\text{mg CaCO}_3 / \text{l}$), fenóis e fluoreto; MASUERO (2001) alumínio, selênio, fenóis e fluoreto; GEYER (2001) alumínio, cádmio, prata, selênio e dureza, sendo que as escórias em todos os casos são classificadas, conforme NBR 10004/04 como não inerte (Classe II-A).

No ensaio de solubilização realizado por POLISSENI (2005) com argamassa de cimento Portland com adição de escória de aciaria elétrica, ocorreu um aumento na quantidade de sulfatos e dureza, embora esses contaminantes tenham como origem o cimento Portland utilizado.

Em todos os casos, com exceção de POLISSENI (2005), que ensaiou uma amostra de escória como componente de uma argamassa, os outros pesquisadores realizaram os ensaios de caracterização de toxidez somente da escória pura,

envelhecida ou não. Nenhum deles avaliou a capacidade de incorporação e/ou retenção destes elementos em matriz cimentícia, utilizando misturas binárias com cimento Portland ou com o uso de ativadores.

2.3.6 Pozolanicidade

Para determinar se um material possui atividade pozolânica ou não, existem diversos métodos. GAVA (1999) apresenta um estudo comparativo das diversas metodologias para avaliação da atividade pozolânica. Segundo a pesquisadora os atuais métodos (NBR 5752/92, ASTM C311/96a, ASTM C1240-93, BS EN450, NBR 5751/92 e método de Chapelle modificado) não apresentam concordância com o real desempenho das pozolanas em argamassas. Ainda segundo GAVA (1999), a relação água/aglomerante, tipo e teor de adição e a presença de aditivos redutores de água são fatores que influenciam no desenvolvimento da resistência das argamassas, mas não são controlados nas atuais metodologias para determinação do índice de atividade pozolânico (IAP).

GEYER (2001) determinou o IAP da escória do Forno Panela com cimento Portland de acordo com a NBR 12653/92 e a NBR 5752/92, obtendo o valor de 92,5 % em relação à referência. CECCATTO (2003) analisando o IAP da escória de fundição granulada e utilizando as mesmas normas obteve um valor de 88,8 % do valor de referência.

2.4 Ativação de Escórias

FÉRET (1939)⁴ *apud* JOHN (1995) emprega o termo ativador para designar as substâncias que propiciavam uma “excitação” da escória.

De acordo com JOHN (1995) a ativação da escória consiste na aceleração do processo de dissolução seguido pela precipitação dos produtos hidratados.

Tradicionalmente as pesquisas sobre ativação, foram realizadas com escória de alto-forno utilizando-se o material sob a forma de uma argamassa plástica [JOHN (1995), SHI (1996), COLLINS e SANJAYAN (1998), BAKHAREV *et al.* (1999a),

⁴ FERRET, R. (1939) – *Slags for the Manufacture of Cement*, Revista Mater Constr. Trav Publish, p. 250.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.* (1999), entre outros] ou como concreto [COLLINS e SANJAYAN (1999), BÌLEK (2007), VOLOVIKOV e KOSENKO (2007)].

Pesquisas que versam sobre a ativação de escórias de aciaria elétrica ou forno a oxigênio ou Linz-Donawitz (LD), ou outros tipos de escória de resfriamento lento e propriedade hidráulicas inferiores são menos freqüentes, tendo sido utilizados outros métodos para preparação dos corpos-de-prova. MYMRINE *et al.* (2005) e MYMRINE *et al.* (2006), utilizaram à prensagem dos corpos-de-prova em uma mistura com cerca de 10 % de umidade.

De acordo com REGOURD⁵ (1986) *apud* JOHN (1995) e KRIVENKO e KOVALCHUK (2007), a ativação de escórias se classifica em química, mecânica ou térmica.

Segundo CAMARINI e CINCOTTO (1995), a escória granulada de alto-forno possui material vítreo com propriedades hidráulicas latentes que, finamente moído e misturado com água, é capaz de reagir e endurecer. As reações sendo lentas, para fins práticos devem ser aceleradas, o que é feito por ativação química ou térmica.

Isoladamente, a ativação mecânica e térmica tem limitadas possibilidades de aplicação, embora freqüentemente sejam empregadas em combinação com a ativação química (JOHN, 1995), sendo essa a que produz geralmente os melhores resultados.

2.4.1 Ativação química

A preferência pelo uso de álcalis na ativação da escória ocorre em função da capacidade de elevar o pH do meio que é o fator preponderante para uma evolução satisfatória das reações de hidratação (MELO NETO, 2002).

Segundo BAKHAREV *et al.* (2000), as pesquisas revelaram que os efeitos da ativação dependem da composição química e das fases mineralógicas presentes na escória, do tipo e da concentração dos ativadores. A Figura 2.4 apresenta a resistência à compressão de diversos tipos de cimentos de escórias ativadas em função do tipo de ativador, condição de cura e composição da escória realizada por GLUKHOVSKY (1967)⁶ *apud* KRIVENKO (2007).

⁵ REGOURD, M. *Caracteristiques et activation des produits d'addiction*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 8. Rio de Janeiro, 1986. *Anais*. Rio de Janeiro, 1986. v. I, p.199-229.

⁶ GLUKHOVSKY, V.D. *Soil- silicate Articles and Structures*, Kiev, Budivelnik Publish.,1967, pp. 8-66.

Glukhovsky dividiu a ativação química de sua pesquisa em 5 grupos, conforme a suas características químicas:

- I - sem a utilização de ativador, somente mistura com água (H_2O);
- II - hidróxidos alcalinos;
- III - hidróxidos alcalinos terrosos;
- IV - carbonatos alcalinos;
- V - carbonatos alcalinos terrosos.

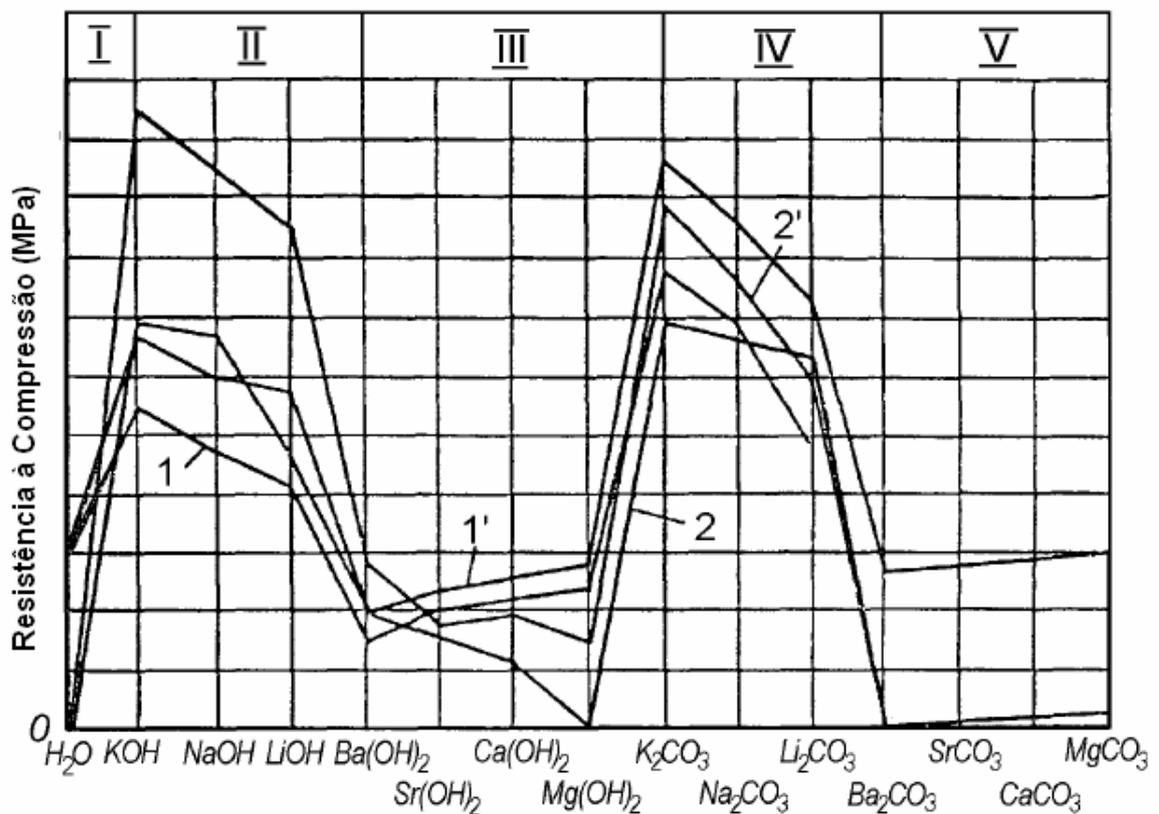


Figura 2.4 - Resistência à compressão de diversos tipos de cimentos de escórias ativados em função do tipo de ativador, condição de cura e composição, GLUKHOVSKY (1967) *apud* KRIVENKO (2007)

1 e 1' - Escória com $Mb^ = 1,13$ ($Al_2O_3 = 6,75\%$)

2 e 2' - Escória com $Mb^ = 0,85$ ($Al_2O_3 = 15,85\%$);

1 e 2 - Cura à vapor $T = 90 \pm 5$ °C sobre um regime de 3+7+2 horas.

1' e 2' - Cura em autoclave $T = 173$ °C sobre um regime de 3+7+2 horas.

$Mb^$: Modulus of basicity / Módulo de basicidade / Módulo de Alcalinidade

A pesquisa de Glukhovsky utilizou-se de ativação química e térmica para verificar o desempenho mecânico de cimentos de escórias.

Os resultados da pesquisa de Glukhovsky indicam que metais alcalinos na forma de hidróxidos e carbonatos foram os que apresentaram a maior eficiência na ativação química de escórias.

O cimento Portland pode ser considerado como ativador de escórias para a produção de cimentos compostos ou de alto-forno. Entretanto, ativadores alcalinos são uma alternativa mais eficiente de utilização.

Segundo JOHN (1995), no caso da ativação química de maior interesse prático, a aceleração do processo de hidratação das escórias se dá pela combinação de dois fatores:

- a) elevação da velocidade de dissolução através da elevação do pH;
- b) antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados devido ao aumento da concentração de íons na solução já no início do processo de dissolução ou pela alteração da solubilidade dos compostos da escória.

Ativação com sódio

O tipo e o teor de ativadores são fatores importantes para a ativação das escórias. O melhor resultado para ativação de escória de alto-forno é com silicato de sódio, pois produziram cimento alta resistência inicial, porém de reduzida trabalhabilidade (JOHN, 1995).

BAKHAREV *et al.* (1999a) utilizaram silicato, hidróxido, carbonato e fosfato de sódio em diversos teores, para a ativação de escória granulada de alto-forno. Essa escória apresentava caráter neutro com a relação cálcio/silício (C/S) de 1,13, mais de 90 % de fase vítrea e possuía adição de 2 % de gesso. Os melhores desempenhos mecânico foram obtidos com a utilização de silicato de sódio (4, 6 e 8 %), com módulo de sílica entre 1 e 1,25. Com módulo de sílica igual a 0,75 o desempenho inicial foi superior às misturas que apresentam módulo maior, entretanto aos 28 dias a resistência mecânica à compressão foi menor. Em outro estudo BAKHAREV *et al.* (1999b) citam que carbonatos e sulfatos não são recomendados para ativação de escórias ácidas ou neutras, pois o cimento resultante apresenta baixa resistência mecânica.

BAKHAREV *et al.* (2000) utilizaram o silicato de sódio previamente dissolvido em água, junto com a água de amassamento para ativação de escória de alto-forno. O módulo de sílica é a razão entre a quantidade de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, geralmente variando entre 1,6 e 3,75, em massa (JOHN, 1995).

Em pesquisa realizada por WANG e SCRIVENER (1995), foi utilizado hidróxido e silicatos de sódio para a identificação dos produtos resultantes da hidratação das escórias a alto-forno ativadas com álcalis.

JOHN (1995) empregou como ativadores o silicato de sódio e o hidróxido de cálcio em diversos teores na escória de alto-forno. O silicato de sódio foi composto, com teores de óxido de sódio (Na_2O) de 0 %, 2,5 % e 5 %, o óxido de silício (Si_2O) com teores de 0 %, 3,7 %, 4,8 %, 7,4 %, 9,6 % e 14,8 %, e o hidróxido de cálcio com teores de 0 %, 2,5 % e 5 %. Os módulos de sílica variaram de 1,48 a 2,96.

COLLINS e SANJAYAN (1998) pesquisaram a ativação de escória de alto-forno com o uso de hidróxido e carbonato de sódio. Esses autores obtiveram melhor trabalhabilidade em concretos produzidos a partir de silicato de sódio em pó, previamente misturados na escória.

SHI (1996) pesquisou argamassa de escória de alto-forno ativada com 6 % de equivalente em massa de Na_2O , a partir de ativadores como NaOH , NaCO_3 e Na_2SiO_3 . Entretanto, SHI e DAY (1996) citam que o teor ótimo de ativador, para escória de alto-forno, seria de 3,0 % do equivalente em massa de Na_2O quando utilizada a temperatura de 95 °C para a cura e em temperatura ambiente a resistência mecânica aumenta até o teor de 8 %, especialmente para idades recentes.

Segundo SHI e DAY (1996) a evolução do calor de hidratação de escórias ativadas (NaOH , Na_2CO e Si_2NaO_3) depende da natureza da escória, do tipo e teor de ativadores utilizados.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.* (1999) utilizaram soluções contendo de 3 a 4 % de Na_2O sobre o peso da escória de alto-forno, obtendo cerca de 20 MPa aos 7 dias.

Ativação com cálcio

Segundo JOHN (1995), a presença de íons cálcio na solução de ativação não altera a cinética do processo e provavelmente deve reduzir o tempo necessário para ser atingida a concentração de equilíbrio para dissolução.

CAMARINI e CINCOTTO (1995) afirmam que o clínquer atua como um ativador químico, razão pela qual a produção de cimento Portland de alto-forno consiste em uma mistura de clínquer, escória de alto-forno e sulfato de cálcio.

FOERSTER (1928) cita que os cimentos de escória eram obtidos por simples mistura mecânica de cal hidráulica (hidratada) e escória de alto-forno moída, sendo a proporção de uma parte de cal para duas partes de escória.

Segundo NUERSE (1964), os primeiros cimentos de escórias, consistiam em misturas de escória de alto-forno e cal (15 %), sendo que este tipo de cimento era raramente fabricado na década de 60. Os principais ativadores utilizados nos modernos cimentos de escória são o cimento Portland (cimento Portland de alto-forno) e mistura de cimento Portland e sulfato de cálcio (supersulfatado). Outros ativadores seriam hidróxidos de sódio ou potássio e misturas de sais que produzissem uma solução aquosa com alto pH.

Na década de noventa, TAYLOR (1990) cita somente a existência de cimento supersulfatado e de Portland de alto-forno, não fazendo referências aos cimentos de escórias com uso de ativadores alcalinos. O cimento supersulfatado geralmente possui de 80 a 85 % de escória de alto-forno, 10 a 15 % de sulfato de cálcio e 5 % de clínquer Portland, podendo ser classificado como um cimento de escória, ativado com gesso (sulfato) e clínquer (ativação alcalina).

MYMRINE *et al.* (2005) utilizaram teores de 2 % de cimento Portland comum como ativador de escórias de aciaria elétrica, obtendo resultados de aproximadamente 2,5 MPa aos 7 dias, sendo que a resistência mecânica à compressão chega a cerca de 15 MPa com 4 anos.

Em pesquisa sobre a utilização de escórias de alto-forno, Forno Martin, arco-elétrico e conversor LD, ativadas com 2 % de cimento Portland comum, para melhoria das propriedades de solos, MYMRINE *et al.* (2006) obtiveram resultados maiores que 45 MPa para amostras com um ano de cura.

Em ambas as pesquisas de MYMRINE *et al.* (2005 e 2006) os corpos-de-prova foram prensados com reduzidos teores de água e com escórias de alta cristalinidade, diferente de outros pesquisadores que utilizaram escórias de baixa cristalinidade.

2.4.2 Ativação térmica

A ativação térmica é obtida pela elevação da temperatura da escória e água, geralmente utilizando-se cura à vapor, a fim de aumentar a velocidade de dissolução da escória e precipitação dos produtos hidratados (JOHN, 1995).

Vários autores verificaram que o aumento da temperatura resulta em aumento da solubilidade da escória e da velocidade de reação de hidratação. O endurecimento dos cimentos de escória de alto-forno, também é acelerado permitindo a redução do teor de ativador necessário para o atendimento da resistência à compressão inicial (SILVA E AGOPYAN, 1998).

Segundo KRIVENKO e KOVALCHUK (2007), o mecanismo de ativação térmica se baseia no aumento da solubilidade da sílica e da alumina com o aumento da temperatura. Semelhante a ativação mecânica, a ativação térmica é eficaz apenas em combinação com a ativação química.

Segundo CAMARINI e CINCOTTO (1995), a temperatura de cura (ativação térmica) também pode ser um ativador das reações da escória, desde que se utilize a temperatura adequada.

Segundo KJELLENSEN e DETWILER⁷ (1992) apud SILVA e AGOPYAN (1998), o melhor momento de se aplicar a cura térmica é nos primeiros estágios da hidratação, particularmente logo após o início de pega, onde o mecanismo é quimicamente controlado pela dissolução-precipitação.

CAMARINI e CINCOTTO (1996) pesquisaram o efeito da ativação térmica (cura à vapor) em cimentos produzidos com diferentes teores de escória de alto-forno (0, 35, 50 e 70 %), utilizando diferentes temperaturas máximas (60, 80 e 95°C)

⁷ KJELLENSEN, K. O.; DETWILER, R. J. Reaction kinetics of Portland cement mortars hydrated at different temperatures. **Cem. Concr. Research**. 1992, v.22, n. 1, p. 112-120.

e tempos de cura (3; 4,5; 6; 7,5 e 9 horas), com aquecimento de 20°C por hora, a partir de uma temperatura ambiente de 25°C.

SHI e DAY (1996) estudaram o calor de hidratação de escória de alto-forno ativada com NaOH, NaCO₃ e NaSiO₃ em diferentes temperaturas de ensaio (25 e 50°C). Os resultados indicaram um aumento expressivo no calor de hidratação, com acréscimo de temperatura de 25 para 50°C, quando foi utilizado o NaOH como ativador, ocorrendo um aumento de 7 vezes na quantidade de energia liberada em uma hora.

Segundo ZELIC *et al.* (2007), as propriedades mecânicas dos cimentos alcalinos de cinza dependem do método utilizado para sua preparação, da concentração do agente ativador alcalino, bem como as condições de cura. A cura térmica acelera a reação e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência mecânica à compressão.

O principal efeito da cura a vapor é aumentar a cinética de hidratação nos primeiros estágios, sendo desnecessária à cura por longos períodos, geralmente ocorrendo redução na resistência mecânica máxima na idade de 90 dias. Os cimentos (equivalentes ao CP - III) com maior teor de escória (50 e 70 %) foram os que apresentam melhores resultados com ativação térmica. Para estes cimentos a melhor temperatura máxima foi 80 °C (CAMARINI e CINCOTTO, 1996).

2.4.3 Ativação mecânica

A essência da ativação mecânica está no aumento da finura inicial por meio de moagem, isto permite alcançar não só uma quantitativa melhoria da capacidade de reação, proporcional ao aumento da área específica, mas também uma mudança qualitativa, com a formação de pontos reativos na nova superfície formada (KRIVENKO e KOVALCHUK, 2007).

A ativação mecânica é obtida pela moagem da escória de maneira a atingir áreas específicas elevadas. Isto ocorre porque a velocidade de dissolução depende da área de contato com a solução alcalina, REGOURD⁸ (1986) *apud* JOHN (1995).

⁸ REGOURD, M. *Caracteristiques et activation des produits d'addiction*. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO, 8. Rio de Janeiro, 1986. *Anais*. Rio de Janeiro, 1986. v. I, p.199-229.

Com a ativação mecânica de escórias de alto-forno seria possível aumentar o teor de escória de um cimento de alto-forno de 35 % para 80 % com similar resistência à compressão (KUMAR *et al.*, 2006).

SEKULIC *et al.* (2004) concluem que as propriedades físico-mecânicas de cimentos Portland comum e compostos apresentam melhorias após o processo de ativação mecânica por moagem. Os melhores resultados de resistência mecânica à compressão foram obtidos quando os materiais (cimento, escória e cinza) passaram por moagem separadamente, ocorrendo também redução no tempo de pega do cimento estudado.

KUMAR *et al.* (2007) afirmam que novos produtos podem ser desenvolvidos a partir da melhoria das propriedades de cimentos geopoliméricos, obtidos pela ativação mecânica dos materiais.

Segundo ALTUN e YILMAZ (2002), a finura da escória reduz o tempo de pega, mas ainda é superior à referência contendo somente cimento.

TÜFEKÇI *et al.* (1997) observaram que o uso de escória de alto-forno com área específica de 2900 cm²/g, similar à do cimento, demandou menor quantidade de água para obter a mesma consistência devido às características superficiais.

2.5 Cinética e Produtos da Reação

A baixa solubilidade da fração cristalina e o teor de material amorfo são fatores condicionantes da reatividade. Uma escória totalmente cristalina não será capaz de hidratar-se em condições normais de temperatura e pressão (JOHN, 1995).

Segundo FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ e PUERTAS (1997) a ativação alcalina da escória é um processo em que ocorre primeiramente a destruição da estrutura e seqüencialmente a formação de produtos cristalinos.

Segundo SHI e DAY (1996) a evolução do calor de hidratação da escória ativada com álcalis não depende somente das características da escória usada, mas também da natureza e teor de ativadores usados.

SCHRÖDER⁹ (1969) *apud* JOHN (1995) demonstrou essa dependência em um estudo que relacionou a resistência mecânica à compressão de cimentos de escória, com fração amorfa variando de 0 a 100 %, e observou que a resistência aumenta linearmente com a quantidade de material amorfo.

Segundo ROY (1999), muitos produtos de hidratação em ambiente normal são amorfos não podendo ser identificados por difratometria de raios X. Alguns dos produtos de hidratação das escórias ativadas com álcalis são cristalinos: silicato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2\text{Si}_2\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), muitas variedades, hidrotalcita ($\text{Mg}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_{16}\text{CO}_3] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e em menor quantidades strätlingita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).

WANG e SCRIVENER (1995) identificaram o C-S-H e a hidrotalcita por meio de análise térmica diferencial (ATD) e difratometria de raios X. Além dos citados JOHN (1995) encontrou hidrogranada $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (aluminato de cálcio hidratado) na ativação de escória de alto-forno.

2.6 Cimento de Escória Ativada

Segundo JOHN (1995) o primeiro registro da utilização comercial de escória ativada como aglomerante hidráulico é de 1865 na Alemanha, para a produção de blocos de alvenaria, sendo que a primeira norma sobre cimento de escória de alto-forno foi editada na Suíça em 1901, seguido as normas alemã (1906) e russa (1911).

ROY (1999) fez uma revisão histórica sobre a utilização de escória ativada e ressaltou alguns pontos importantes sobre o cimento de escória ativada:

- Há um substancial conhecimento acumulado sobre as propriedades e mecanismos de reação;
- Apresentam bom desempenho em diversas aplicações;
- É material ambientalmente correto, pois reduz o consumo de matéria-prima, de energia e a geração de poluentes.

A substituição do tradicional cimento Portland por aglomerantes baseados em sistemas compostos por óxidos de metais alcalinos e alcalinos terrosos ($\text{RO} - \text{R}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ e $\text{R}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$) são alternativas já aprovadas por mais

⁹ SCHRÖDER, F. **Blast furnace slags and slag cements**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5. Tokyo, 1968. *Proceedings*. Tokyo, 1969. v.IV, p.149.

de 40 anos de experiência. As comprovações práticas foram baseadas em investigações e utilizações de cimentos alcalinos e concretos em diferentes áreas de construção, incluindo os destinados a usos especiais (KRIVENKO, 2007).

De acordo com KAVALEROVA (2007), existem mais de 500 patentes, relacionadas a escória ativada para produção de cimento, de concreto e de tecnologias de fabricação, bem como o uso de matérias-primas, incluindo resíduos e subprodutos, depositadas nos países que compunham a União Soviética, na Ucrânia e em alguns outros países.

Segundo KRIVENKO (2007), há menos de um século, a presença de álcalis livre no cimento não era admissível, e esses metais alcalinos foram excluídos da composição dos cimentos hidráulicos tradicionais devido à sua alta solubilidade. A presença de álcalis é o princípio básico da ativação química de escórias. Esse autor propõe que os cimentos sejam classificados de acordo com a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Classificação dos cimentos (KRIVENKO, 2007)

Tipo de cimento	Portland comum	Portland comum alcalino	Portland comum alcalino (mistura)	Cimento de escória alcalino	Cimento de cinza alcalino	Geo-cimento
Fase sólida inicial	Clinker Portland	Clinker Portland + R ₂ O	Clinker Portland + adição (escória, cinza, etc.) + Me ₂ O	Escória metalúrgica + R ₂ O	Cinza volante + R ₂ O	Argila + R ₂ O
% álcalis (R ₂ O)	<0,6	1-5	2-5	4-8	5-10	10-20
Produto de Hidratação	0 % R ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O → 100 % ← 100 % RO-SiO ₂ -H ₂ O					

Obs.: Me₂O e R₂O referem-se de metais alcalinos terrosos utilizados na ativação química, tradicionalmente denominados de geocimentos.

KRIVENKO (2007) cita como as principais vantagens dos cimentos alcalinos: melhores resultados quanto a resistências físico-mecânicas e durabilidade, baixo custo, bem como alta eficiência.

Segundo JOHN (1995), a reatividade da escória pode ser definida como sendo uma medida potencial do seu desempenho como aglomerante. O desempenho deve ser avaliado em função das necessidades de cada aplicação e dependerá em maior ou menor grau da forma de ativação, sendo a avaliação da reatividade considerada apenas como um indicador inicial.

Dentro do proposto por JOHN (1995), as características dos materiais devem ser otimizadas de modo que a produção de um aglomerante hidráulico alternativo de baixa resistência possa ser uma alternativa para o consumo das escórias de aciaria elétrica. A escória de aciaria elétrica por possuir baixa reatividade são sub-utilizadas como lastro ferroviário ou material para base e sub-base de ruas e estradas ou simplesmente descartadas em aterros industriais.

A produção de blocos para alvenaria similares aos de concreto utilizando este tipo de aglomerante pode ser uma alternativa mais econômica para a construção de habitações. Além da redução no custo, outra importante vantagem dessa proposta é a de produzir elementos construtivos sem a necessidade de consumir cimento Portland, um insumo de elevado valor, que consome grande quantidade de energia e recursos naturais, libera CO₂ e que resulta em valores de resistência mecânica à compressão muito superior à necessária para a produção de blocos.

2.6.1 Utilização de cimento de escória para produção de elementos estruturais

BÌLEK (2007) cita que o custo do concreto utilizando cimento de escória ativada com o uso de hidróxido de potássio (KOH) é mais elevado do que com NaOH, mas não é superior ao custo do concreto convencional baseado em cimento Portland, que normalmente é utilizado na produção de elementos pré-fabricados.

MYMRINE (2006) cita a utilização de escória de diversos tipos, em misturas com solos para a produção de bases de estradas, pistas de aeroportos, barragens e alguns tipos de fundações, sendo que as mesmas estão em uso há mais de 25 anos em diversas regiões da Rússia, inclusive na Sibéria.

SAVASTANO JR *et al.* (2000) utilizaram cimentos de escória de alto-forno reforçado com fibras celulósicas (eucalipto e banana), com o objetivo de avaliar suas propriedades mecânicas, uma vez que este tipo de cimento é mais adequado à produção de compósitos de cimento de baixo custo com fibras celulósicas, devido principalmente ao seu pH ser inferior ao do cimento Portland.

VOLOVIKOV e KOSENKO (2007) citam que a partir dos anos 60 foi utilizado cimento de escória ativada (hidróxido e silicato de sódio), para a produção de concreto (pavimento e base de máquinas) e produção de blocos nas instalações da Ilyich Iron and Steel Integrated Works (Ucrânia). No período de 2002 a 2006 foram produzidos mais de 18.600 m³ de concreto com classe de resistência variando de 10 a 35 MPa, de acordo com normas ucranianas. O custo deste concreto foi cerca de 50 % do produzido com cimento Portland, para a classe M200 (20 MPa) e 63 % para o M300 (35 MPa)

ROSTOVSKAYA *et al.* (2007) citam diversas obras utilizando escória ativada com aglomerante nas cidades de:

- Odessa, Ucrânia (1966) - sistema de drenagem;
- Mariupol, Ucrânia (1999-2000) - produção de pavimento, blocos de fundação e blocos de alvenaria;
- Vasilevka, Ucrânia (1982) - diversas construções rurais, inclusive depósitos de silagem;
- Ternopol, Ucrânia (1984) - pavimentos industriais;
- Magnitogorsk, Rússia (1984) - pavimentos para veículos pesados;
- Lipetsk, Rússia (1986-1994) - edifícios de múltiplos pavimentos utilizando pré-fabricados;
- São Petersburgo, Rússia (1988) - dormentes de concreto pré-tensionados.

Em inspeção realizada nas obras (hidráulicas, rodoviárias, industriais, civis e construções agrícolas) citadas foi constatado que as construções se encontram em bom estado, e que a alta durabilidade foi comprovada em ensaios físicos-mecânicos após longo período de serviço sob condições ambientais severas (ROSTOVSKAYA *et al.*, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As pesquisas sobre ativação de escória versam principalmente sobre a ativação química (alcalina) de escória de alto-forno, sendo reduzido o número de pesquisas sobre a ativação de escória de aciaria elétrica. Baseado neste fato foi desenvolvido o projeto experimental descrito a seguir.

A metodologia adotada na pesquisa baseou-se principalmente nos trabalhos de MYMRINE *et al.* (2005), CORRÊA (2005), MYMRINE *et al.* (2006) e de MYMRINE e CORRÊA (2007).

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Materiais do DACOC/UTFPR e em outros laboratórios da UTFPR e de instituições parcerias como LAMIR/UFPR e Laboratório Central – Votorantim Cimentos.

3.1 Projeto Experimental

Baseados nas informações sobre ativação química de escória, foram selecionados como ativadores dois compostos alcalinos de reconhecida eficiência na ativação química de escórias: hidróxidos de sódio e de cálcio.

Devido às características da escória de aciaria elétrica, foi incluída na pesquisa a ativação térmica com o intuito de avaliar o efeito da mesma no desenvolvimento da resistência mecânica à compressão das misturas.

Foram estudadas as seguintes variáveis independentes:

- a) Ativadores químicos
 - hidróxido de sódio, NaOH;
 - hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂.
- b) Teores dos ativadores
 - 0; 0,375¹⁰; 0,75; 1,5 e 3,0 %.
- c) Tempo de ativação térmica
 - 3, 6 e 9 horas.

¹⁰ Teor de ativador utilizado somente com hidróxido de sódio.

- d) Tempo de cura (sem ativação térmica)

Como indicador de desempenho, ou variável dependente, foi utilizado a resistência mecânica à compressão aos 7 dias de idade da mistura. Para a composição de melhor desempenho mecânico e para a escória como recebida, também foram realizados os ensaios de difratometria de raios X (para determinação das fases mineralógicas).

Além da mistura com melhor desempenho e da escória como recebida, foram selecionadas mais três composições, baseado no planejamento experimental para determinação das fases mineralógicas através do ensaio de difratometria de raios X. Para escória como recebida foi realizado ensaio de Fluorescência de raios X (para determinação qualitativa da composição química).

3.2 Materiais

3.2.1 Escória de aciaria elétrica

A escória de aciaria elétrica utilizada foi recolhida do depósito de uma siderúrgica, localizada na cidade de Araucária - PR. Foram retiradas diversas amostras parciais das pilhas de estocagem e envelhecimento, seguindo as recomendações das NBR NM 26/01 e NBR 10007/04. Esta escória já havia passado pelo processo de britagem e recuperação metálica, e a mesma estava estocada no processo de envelhecimento há aproximadamente 6 meses.

Foi utilizado um moinho de bolas com elementos de moagem de aço para reduzir a seco, o tamanho das partículas de escória até uma granulometria passante na peneira 0,075 mm (# 200). Depois de moídos os diversos lotes foram novamente homogeneizados mecanicamente.

3.2.2 Ativadores

Foram utilizados ativadores da classe de Pureza Analítica (P.A.) com o objetivo de minimizar a possível interferência no resultado do experimento causada pelas impurezas. Foram utilizadas micropérolas de hidróxido de sódio P.A. (Vetec Química), com teor mínimo de 99,0 % hidróxido de sódio, na forma de uma solução

(diluído na água de mistura). As impurezas presentes no NaOH são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Impurezas do NaOH (fonte: Vetec Química)

Na ₂ CO ₃	máx. 1,0 %
Cloreto (Cl)	máx. 0,01 %
Sulfato (SO ₄)	máx. 0,003 %
Ferro (Fe)	máx. 0,001 %
Fósforo (PO ₄)	máx. 0,001 %
Níquel (Ni)	máx. 0,001 %
Potássio (K)	máx. 0,02 %
Mercúrio (Hg)	máx. 0,00001 %
Compostos nitrogenados (como N)	máx. 0,001 %
Precipitados por NH ₄ OH	máx. 0,02 %
Metais pesados (como Ag)	máx. 0,002 %

O outro ativador utilizado foi o hidróxido de cálcio P.A. (Vetec Química) na forma de um pó fino, com teor de hidróxido mínimo de 95,0%. A adição desse ativador ocorreu de duas formas: sendo previamente homogeneizado com a escória antes de se adicionar água e, dissolvido na água de mistura para então ser homogeneizado com a escória. As impurezas presentes no Ca(OH)₂ são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Impurezas do Ca(OH)₂ (fonte: Vetec Química)

Teor (CaCO ₃)	Máx. 3,0 %
Insolúvel em HCl	Máx. 0,1 %
Cloreto (Cl)	Máx. 0,03 %
Compostos Sulfurados (como SO ₄)	Máx. 0,1 %
Metais Pesados (Como Pb)	Máx. 0,003 %
Ferro (Fe)	Máx. 0,05 %
Magnésio e sais básicos (como Sulfatos)	Máx. 1,0 %

3.2.3 Caracterização da escória como recebida

Para caracterização da escória de aciaria elétrica foram realizados os ensaios de massa específica (NM 23/02), determinação da finura pelo Método de Blaine

(NBR NM 76/98), finura em peneira # 200 (NBR 11579/91) e em peneira # 325 (NBR 9202/85), realizados no Laboratório Central da Votorantim Cimentos.

A determinação da composição química qualitativa da escória foi obtida por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX) de acordo com a NBR 14656/01 realizado no Laboratório Central da Votorantim Cimentos. A constituição mineralógica foi identificada por meio do ensaio de difração de raios X (DRX) sendo realizada pelo método do pó, no LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas, da UFPR, com a utilização do difratômetro modelo PW-1830 (PHILIPS ANALITICAL). Os parâmetros utilizados nos ensaios foram: $\text{CuK}\alpha$, 2θ entre 3 e 70 °, passo de 0,02° e tempo de 0,5 s em cada passo.

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados de acordo com as NBR 10005/04 e NBR 10006/04 nos Laboratórios do DAQBI / UTFPR.

3.2.4 Caracterização da escória ativada

Com o objetivo de caracterizar as misturas de escória de aciaria elétrica ativadas foram realizados os seguintes ensaios:

a) Resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência mecânica à compressão foi baseado na NBR 5739/07.

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios (DL-10000, EMIC, Brasil), utilizando-se de uma célula de carga de 1000 kgf, sendo adotado como velocidade de carregamento 1,0 mm/min. Devido às características do processo de produção dos CPs não foi realizado nenhum tipo de regularização da superfície dos mesmos.

b) Identificação das fases mineralógica

O surgimento de novas fases mineralógicas ou redução na intensidade de fases presentes na escória como recebida, após os processos de ativação da escória, inclusive de fases cristalinas resultantes da hidratação do cimento de escória ativada, foram avaliados pela técnica de DRX.

c) Pozolanicidade com hidróxido de cálcio

A determinação do índice de atividade pozolânica com hidróxido de cálcio de acordo com a NBR 5751/92 realizado no Laboratório Central da Votorantim Cimentos. Este ensaio é uma medida direta do grau de pozolanicidade através da determinação da resistência à compressão simples, conforme NBR 7215/96, de corpos-de-prova de argamassas preparadas com a escória de aciaria elétrica moída, hidróxido de cálcio, areia e água, curadas nos moldes durante 24 ± 2 h a temperatura de 23 ± 2 °C e durante seis dias a temperatura de 55 ± 2 °C.

d) Lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados de acordo com as NBR 10005/04 e NBR 10006/04 nos Laboratórios do DAQBI / UTFPR para a mistura 1,5/1,5 sem ativação térmica.

As amostras foram preparadas de acordo com as normas e utilizando-se de equipamento de Jar-Test e espectrofotômetro de absorção atômica por chama.

3.3 Métodos

A elaboração das composições foi dividida em três etapas para avaliar os efeitos da ativação térmica e química. A descrição sobre os procedimentos para mistura dos materiais, método de cura e forma de análise dos resultados das composições será apresentado separadamente.

3.3.1 Ativação química com Na e/ou Ca e com ativação térmica

Todas as concentrações dos ativadores estão expressas como porcentagem de substituição da escória em base seca, conforme Tabela 3.3. Assim, aumentando-se o total de ativadores, diminuiu-se na mesma proporção o teor de escória. A quantidade de água adicionada foi sempre de 10 % sobre massa seca (escória + ativadores).

Tabela 3.3 - Composições pesquisadas

Código	Escória (%)	Ca(OH) ₂ (%)	NaOH (%)
0,0/0,0	100,0	-	-
0,0/0,375	99,625	-	0,375
0,75/0,0	99,25	0,75	-
0,75/0,75	98,5	0,75	0,75
0,0/0,75	99,25	-	0,75
0,0/1,5	98,5	-	1,5
1,5/0,0	98,5	1,5	-
1,5/1,5	97,0	1,5	1,5
1,5/3,0	95,5	1,5	3,0
3,0/1,5	95,5	3,0	1,5
3,0/0,0	97,0	3,0	-
0,0/3,0	97,0	-	3,0
3,0/3,0	94,0	3,0	3,0

O fator água / materiais secos e a finura (ativação mecânica) foram mantidos constantes.

Preparação dos corpos-de-prova (CPs)

Para cada uma das 14 misturas (incluindo duas repetições da composição 1,5/1,5), sendo preparados 9 CPs para cada tempo de ativação térmica. Os tempos de ativação térmica a 80 °C, em horas, foram de 3, 6 e 9.

Os CPs foram preparados sob a forma de cilindros, com dimensões de (20 x 20) mm, sendo que essas dimensões foram definidas em função do tipo de equipamento de moldagem disponível e da dificuldade de obtenção CPs prensados de maior altura.

A preparação da mistura seguiu os seguintes procedimentos:

- Pesagem dos materiais (escória, hidróxido de cálcio e/ou hidróxido de sódio e água);
- Dissolução do hidróxido de sódio (quando utilizado) com água sendo mantida em banho-maria até atingir temperatura ambiente, haja vista que essa mistura produz uma intensa reação exotérmica;

- Mistura manual do hidróxido de cálcio e escória até a completa homogeneização;
- A aspersão da água (contendo ou não hidróxido de sódio) sobre a escória;
- Mistura mecânica em argamassadeira (AG-5, EMIC, Brasil) por 2 minutos, sendo que 1 minuto em velocidade baixa e o tempo restante em velocidade alta;
- A após a mistura foi definido um tempo inicial de 40 minutos para o início da prensagem, permanecendo a mistura em recipiente coberto;
- A compactação foi realizada em uma máquina universal de ensaios (DL 10000, EMIC, Brasil), com velocidade de carregamento de 2,5 mm/min, sendo a compactação em dois patamares: inicial com 400 kgf, e carga máxima final com 800 kgf. Nos dois patamares foi mantida a pressão por 30 segundos;
- A após a compactação, foi dado início ao processo de cura.

Cura

Depois de compactados os CPs, permaneceram em umidade (média de 58 %) e temperatura ambiente (média de 21,1 °C), dentro de um recipiente de cura lacrado por aproximadamente 24 horas.

A Figura 3.1 mostra o arranjo dos CPs sobre o sistema de bandejas que foi utilizado para efetuar a ativação térmica.

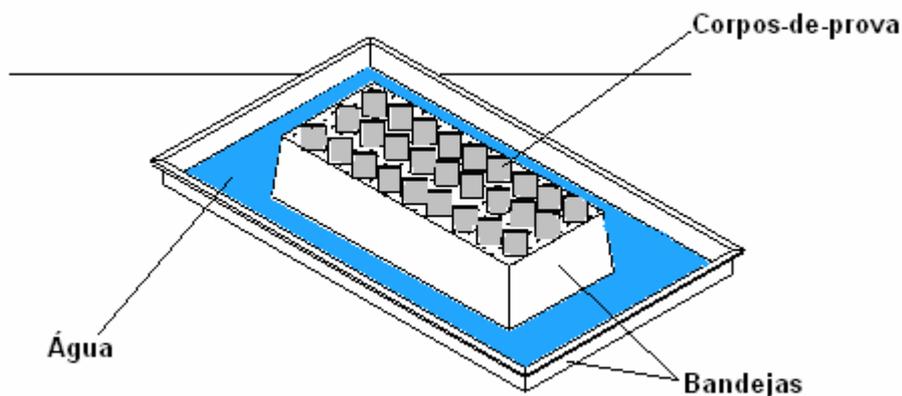


Figura 3.1 - Arranjo dos corpos-de-prova sobre o sistema de bandejas utilizado na ativação térmica

Para realizar a ativação térmica a 80 °C e com umidade acima de 80 %, foi utilizada uma estufa com circulação interna de ar (modelo 400/4NDE, Nova Ética, Brasil), com faixa de trabalho entre 15 e 300 °C e controle de temperatura (+/- 1°C). Para manter o interior da estufa com a umidade citada, a bandeja de suporte dos CPs foi mantida com água quente.

Após o período de ativação térmica, na estufa, o lote de CPs eram retirados e acondicionados em um recipiente fechado com filme plástico de PVC, contendo 500 g de cloreto de bário (Ba_2Cl) e 140 ml de água. Segundo ESALQ (2007) é possível obter 90,0 % de umidade relativa à temperatura de 23 °C, com uma solução saturada de cloreto de bário.

A Figura 3.2 mostra o acondicionamento dos CPs na bandeja.



Figura 3.2 - Corpos-de-prova sendo preparados para ativação térmica

Planejamento Estatístico

Para análise estatística foi utilizada Regressão Multivariável Não Linear, cuja equação geral é apresentada a seguir:

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_1^2 + fX_2^2 + gX_3^2 \quad \text{Eq. 3.1}$$

Sendo $X_1 = \text{Ca(OH)}_2$, $X_2 = \text{NaOH}$ e $X_3 = \text{tempo de ativação térmica}$.

A Tabela 3.4 apresenta o planejamento estatístico utilizado.

Tabela 3.4 – As amostras utilizada com ativação térmica.

Experimento	Níveis			Composição		
	Ca(OH) ₂	NaOH	Tempo	Ca(OH) ₂ (%)	NaOH(%)	Tempo (h)
1	-1	-1	-1	0	0	3
2	1	-1	-1	3	0	3
3	-1	1	-1	0	3	3
4	-1	1	-1	3	3	3
5	-1	-1	1	0	0	9
6	1	-1	1	3	0	9
7	-1	1	1	0	3	9
8	1	1	1	3	3	9
9	0	0	0	1,5	1,5	6
10	0	0	0	1,5	1,5	6
11	0	0	0	1,5	1,5	6
12	-1	-1	0	0	0	6
13	1	-1	0	3	0	6
14	-1	1	0	0	3	6
15	-1	1	0	3	3	6
16	0	0	-1	1,5	1,5	3
17	0	0	-1	1,5	1,5	3
18	0	0	-1	1,5	1,5	3
19	0	0	1	1,5	1,5	9
20	0	0	1	1,5	1,5	9
21	0	0	1	1,5	1,5	9
22	-1	-0,5	-1	0	0,75	3
23	-0,5	-0,5	-1	0,75	0,75	3
24	-0,5	-1	-1	0,75	0	3
25	-1	-0,5	0	0	0,75	6
26	-0,5	-0,5	0	0,75	0,75	6
27	-0,5	-1	0	0,75	0	6
28	-1	-0,5	1	0	0,75	9
29	-0,5	-0,5	1	0,75	0,75	9
30	-0,5	-1	1	0,75	0	9
31	-1	-0,75	-1	0	0,375	3
32	-1	-0,75	0	0	0,375	6
33	-1	-0,75	1	0	0,375	9

3.3.2 Ativação química com Na e/ou Ca e sem ativação térmica

A preparação dos CPs seguiu a mesma metodologia apresentada anteriormente, permanecendo por aproximadamente 24 horas em recipiente lacrado.

A cura dos CP que foram somente ativados quimicamente, sem ativação térmica, foi realizada em um recipiente fechado com filme plástico de PVC (Figura 3.3), contendo 500 g de cloreto de bário (Ba_2Cl) e 140 ml de água, sendo iniciada após cerca de 24 horas e permanecendo por 7 dias.



Figura 3.3 - Recipiente de cura dos corpos-de-prova

Planejamento Estatístico

Para análise estatística foi utilizada Regressão Multivariável Não Linear, cuja equação geral é a Equação 3.2.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_1^2 + eX_2^2 \quad \text{Eq. 3.2}$$

Sendo $X_1 = Ca(OH)_2$ e $X_2 = NaOH$. A Tabela 3.5 apresenta o planejamento estatístico utilizado.

A Tabela 3.5 apresenta as amostras analisadas nos experimentos sem ativação térmica.

Tabela 3.5 - As amostras utilizadas nos experimentos sem ativação térmica, que fazem parte da regressão.

Experimento	Níveis		Composição	
	Ca(OH) ₂	NaOH	Ca(OH) ₂ (%)	NaOH (%)
1	-1	-1	0	0
2	1	-1	3	0
3	-1	1	0	3
4	-1	1	3	3
5	-1	0	0	1,5
6	0	0	1,5	1,5
7	0	0	1,5	1,5
8	0	0	1,5	1,5
9	0	-1	1,5	0
10	-1	-0,5	0	0,75
11	-0,5	-0,5	0,75	0,75
12	-0,5	-1	0,75	0
13	-1	-0,75	0	0,375

3.3.3 Ativação química com Na e/ou Ca e sem ativação térmica - Verificação

A preparação dos CPs seguiu a mesma metodologia apresentada no item 3.3.1, com exceção da utilização de hidróxido de cálcio dissolvido em água, assim como o utilizado com hidróxido de sódio, cujo objetivo foi o de comparar os resultados de RMC com os obtidos quando da utilização do mesmo misturado à seco com a escória.

Os mesmos não foram ativados termicamente, sendo que o procedimento de cura foi o mesmo adotado no item 3.3.2.

Planejamento Estatístico

Para análise estatística foi utilizada Regressão Multivariável Não Linear, cuja equação geral é a Equação 3.3.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_1^2 + eX_2^2 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Sendo $X_1 = \text{Ca(OH)}_2$ e $X_2 = \text{NaOH}$. A Tabela 3.5 apresenta o planejamento estatístico utilizado.

A Tabela 3.6 apresenta as amostras utilizadas nos experimentos sem ativação térmica.

Tabela 3.6 - As amostras utilizadas nos experimentos sem ativação térmica e com dissolução, que fizeram parte da análise de regressão.

Experimento	Níveis		Composição	
	Ca(OH) ₂	NaOH	Ca(OH) ₂ (%)	NaOH (%)
1	-1	-1	0	0
2	1	-1	3	0
3	-1	1	0	3
4	-1	1	3	3
5	-1	0	0	1,5
6	0	0	1,5	1,5
7	-1	-0,5	0	0,75
8	0	-0,75	1,5	0,375

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados da caracterização da escória de aciaria elétrica e das misturas ativadas, além da avaliação dos resultados de resistência mecânica à compressão, seguindo a seqüência estabelecida no capítulo 3.

Devido à quantidade de informações referentes à resistência mecânica das misturas ativadas química e termicamente, será feita uma análise dos resultados por etapa, com o objetivo de analisar isoladamente o efeito de cada uma das variáveis isoladamente.

4.1 Caracterização da Escória Ativada

A seguir são apresentados os resultados da caracterização da escória de aciaria elétrica utilizada no desenvolvimento da pesquisa.

4.1.1 Características físicas

A umidade média da escória, quando do seu recolhimento no pátio da siderúrgica era menor que 1 %, apresentava módulo de finura igual a 4,73 e sua distribuição granulométrica não atendia a nenhum limite de distribuição granulométrica, tanto para agregados graúdos quanto para miúdos, segundo a NBR 7211/2005.

Após a moagem, a massa específica da escória, conforme a NM23/00 foi de 3,80 g/cm³, valor este ligeiramente superior a média de 3,65 g/cm³ obtida para escórias de aciaria elétrica, apresentados na literatura. Para a determinação do material retido por peneiramento foram encontrados os seguintes resultados: na peneira # 200 (0,075 mm) de 10,8 % e na peneira # 325 (0,044 mm) de 26,7 %. A norma NBR 5735/91 determina um teor máximo retido de 8% na peneira # 200 (0,075 mm) para o cimento Portland de alto-forno, já a norma NBR 12653/92 para determinação da atividade pozolânica determina um teor máximo de 34,0 % de material retido na peneira # 325 (0,044 mm). A escória estudada atende as

exigências necessárias para avaliação da atividade pozolânica, entretanto, apresenta teor de material retido superior ao estipulado pela norma referente ao cimento de alto-forno.

A área específica, determinada pelo método Blaine (NBR NM 76/98) foi de 2910 cm²/g. Este valor de área específica é superior ao utilizado por GUMIERI (2002) em pesquisa com escória granulada de fundição (EGF) beneficiada (2280 cm²/g), mas inferior ao geralmente utilizado em pesquisa com escórias diversas. JOHN (1995) utilizou escória de alto-forno com 5810 cm²/g de área específica, MASUERO (2001) pesquisando escória de aciaria elétrica resfriada bruscamente, 5290 cm²/g e GEYER (2001) pesquisando escória de aciaria elétrica, 3760 cm²/g.

A grande variedade de finuras utilizadas nas pesquisas pode ser decorrente da restrição de moinhos de laboratórios.

No ensaio de índice de atividade pozolânica (IAP) com hidróxido de cálcio realizado de acordo com a NBR 5751/92, a argamassa produzida não apresentou resistência mecânica à compressão, não apresentando atividade pozolânica com cal, caracterizando a escória como de baixa reatividade ou inerte.

4.1.2 Composição química

A Tabela 4.1 apresenta a composição química da escória como recebida.

Entre os principais compostos presentes na escória de aciaria elétrica pesquisada estão o óxido de ferro e de silício, apresentando teores acima da média dos encontrados nos trabalhos de LIMA (1999), MASUERO (2001), POLISSENI (2005) e POLESE *et al.* (2006). Com relação aos teores de óxidos de cálcio, de alumínio e de manganês, os valores foram inferiores aos da média dos trabalhos citados.

Por ser um resíduo industrial, a escória de aciaria elétrica apresenta grande variação de composição química, podendo ser em decorrência da composição da sucata ou das matérias-primas incorporadas ao processo.

O composto que apresenta o maior teor é o óxido de ferro, com 41,91 % da massa total, valor esse similar ao apresentado por LIMA (1999), quando da pesquisa com escória espanhola, mas muito superior ao das escórias de aciaria elétricas brasileiras, que possuem média em torno de 30 %.

Tabela 4.1 - Composição química de escória aciaria elétrica (EAE)

Composição química	Teor (%)	Teor médio* (%)	Teor mínimo* (%)	Teor máximo* (%)	Diferença entre escória estudada e teor médio (%)
CaO	19,50	31,79	28,60	37,78	- 38,7
SiO ₂	19,95	16,40	11,40	21,64	+ 17,8
Al ₂ O ₃	4,78	5,87	3,93	7,22	- 18,6
MgO	7,43	5,27	3,65	7,18	+ 29,1
FeO	-	29,84	29,31	30,36	-
Fe ₂ O ₃	41,91	36,74	31,02	42,45	+ 13,53
MnO	3,23	3,91	3,14	4,40	- 17,4
P ₂ O ₅	0,61	0,61	0,46	0,76	0,0
Cr ₂ O ₃	0,89	1,44	0,74	2,14	- 38,2
TiO ₂	0,82	0,45	0,40	0,51	+ 45,1
SO ₃	0,20	0,46	0,24	0,68	- 56,5
BaO	0,25	n.d.	n.d.	n.d.	-
Na ₂ O	0,20	n.d.	n.d.	n.d.	-
K ₂ O	0,05	n.d.	n.d.	n.d.	-
ZnO	0,05	n.d.	n.d.	n.d.	-
SrO	0,04	n.d.	n.d.	n.d.	-
ZrO ₂	0,03	n.d.	n.d.	n.d.	-
CuO	0,03	n.d.	n.d.	n.d.	-
Cl	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	-
Nb ₂ O ₅	0,01	n.d.	n.d.	n.d.	-
i = CaO / SiO ₂	0,98	2,02	1,44	2,51	- 98,0

Obs.: * Teor médio dos trabalhos de LIMA (1999) – um mês de envelhecimento; MASUERO (2001) – sem envelhecimento; POLISSENI (2005) – média de 72 horas, 6 meses e 24 meses de envelhecimento e POLESE *et. al* (2006) – não indicada. Não informado.

O teor de óxido de cálcio (19,50 %) é menor se comparado com as outras pesquisas (mínimo de 28,6 %) embora o teor de óxido de magnésio (7,43 %) é maior, indicando possivelmente o uso de calcário dolomítico no processo de fabricação do aço.

Em pesquisa realizada por MYMRINE *et al.* (2006), o teor de óxido de ferro na escória de aciaria elétrica é muito inferior (16,2 %), mas, em contrapartida o teor de óxido de cálcio (29,6%) e de magnésio (16,5 %) são superiores.

4.1.3 Composição mineralógica

Foi realizada a determinação da composição mineralógica com o objetivo de identificar os principais compostos presentes e avaliar a cristalinidade, através da técnica de difratometria de raios X. O ensaio para determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX) da escória como recebida está apresentado na Figura 4.1.

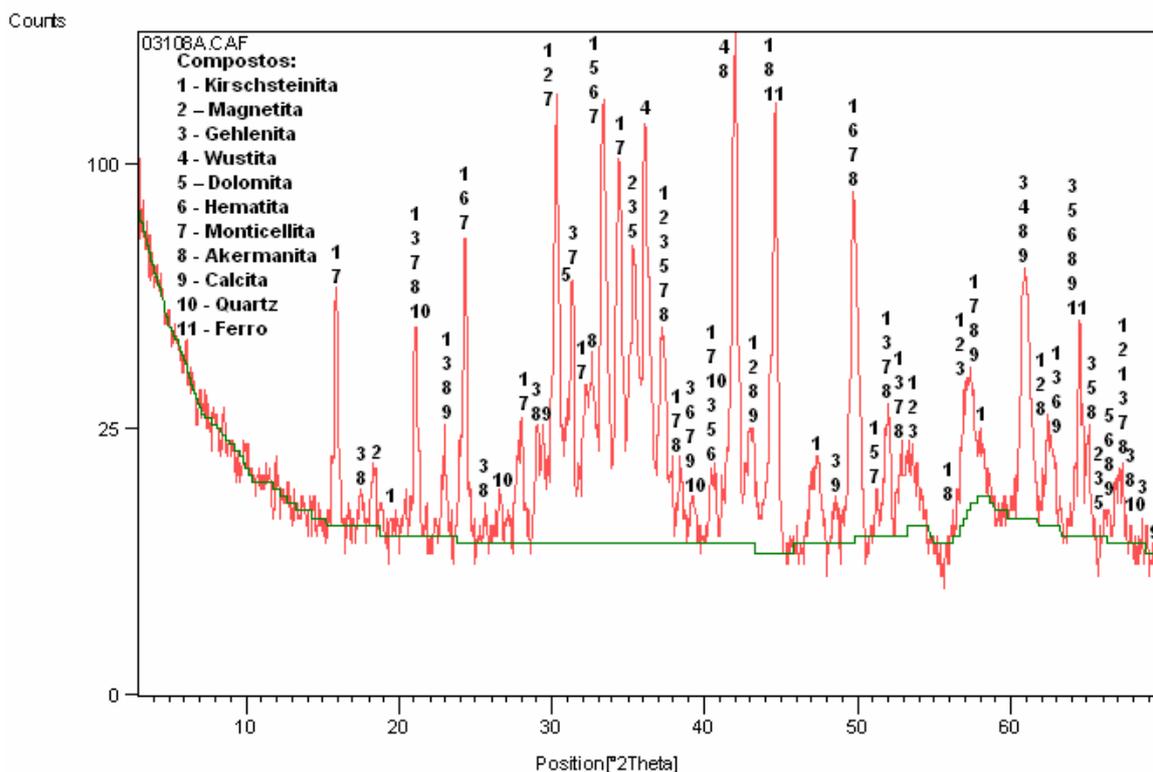


Figura 4.1 - Difratograma da amostra de escória como recebida

O difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica como recebida, apresenta muitos picos cristalinos, principalmente de Kirschsteinita, Akermanita,

Monticelita e Gehlenita, indicando um baixo grau de vitrificação. Os compostos principais encontrados são similares aos obtidos por GRAFFITTI (2002).

A Tabela 4.2 apresenta os compostos mineralógicos presentes nas amostras de escória de aciaria elétrica como recebida.

Tabela 4.2 - Composição mineralógica da escória aciaria elétrica (EAE)

Fase	Grupo	Fórmula
Kirschsteinita	Olivinas	CaFeSiO_4
Monticelita		$\text{Ca}_2\text{MgSiO}_4$
Akermanita	Sorrosilicatos	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$
Gehlenita		$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
Calcita	Calcita	CaCO_3
Dolomita	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Magnetita	Espinelio	Fe_3O_4
Hematita	Hematita	Fe_2O_3
Quartzo	Quartzo	SiO_2
Ferro	-	Fe
Wustita	Periclasio	FeO

Os compostos mineralógicos encontrados não diferem dos apresentados nos trabalhos de LIMA (1999), LUXÁN *et al.* (2000), MASUERO (2001), GRAFFITTI (2002), POLISSENI (2005) e POLESE *et al.* (2006), embora os compostos com presença de ferro como kirschsteinita, wustita, magnetita e hematita aparecem com mais intensidade na escória analisada. O alto teor de ferro é confirmado pela determinação da composição química por FRX e massa específica, conforme apresentado anteriormente.

4.2 Reatividade Potencial da Escória

Os parâmetros para determinação da hidraulicidade potencial apresentados por CINCOTTO *et al.* (1992) e MASUERO (2001) são apresentados na Tabela 4.3,

no qual dos 9 limites analisados, 5 apresentam parâmetros inferiores aos limites recomendados.

Tabela 4.3 - Análise do índice de hidraulicidade de acordo com CINCOTTO *et al.* (1992) e MASUERO (2001)

Pesquisador/ Norma	Limites	Análise
Blondiau	$1,45 < \text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1,54$	0,98
	$1,8 < \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 < 1,9$	4,17
Venuat	$1,40 < \text{CaO} / \text{SiO}_2 < 1,45$	0,98
DIN, Espanha e NBR 5735/80	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1$	1,59
	$> 1,4$ (Japão)	1,59
Cheron e Lardinois	$I_H = (\text{CaO} + 1,4 \text{MgO} + 0,56 \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2 > 1,54$	1,63
ASTM	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + 1/3\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + 2/3 \text{Al}_2\text{O}_3) > 1$	1,23
Schewiete	$I_H = (\text{CaO} + \text{MgO} + (\text{Al}_2\text{O}_3 - 10) / (\text{SiO}_2 + 10) > 1$	0,73
Dron	$R' = (\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 \times \text{Al}_2\text{O}_3)^2 > 0,18$	0,01

A Tabela 4.4 a seguir apresenta a análise da hidraulicidade potencial da escória de acordo com o trabalho de SAMET e CHAABOUNI (2004). A escória estudada possui caráter ácido ($F1 = 0,98$) e apresentaria baixa hidraulicidade, pois dos 6 índices verificados ela apresenta em 4 valores inferiores ao recomendado.

Tabela 4.4 - Análise do índice de hidraulicidade de acordo com SAMET e CHAABOUNI (2004)

	Índice	Parâmetros	Análise
F1	$\text{CaO} / \text{SiO}_2$	$F1 \leq 1$ ácida (baixa hidraulicidade) $F1 \geq 1$ básica (boa reatividade)	$F1 = 0,98$
F2	$(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2$	$F2 > 1$	$F2 = 1,59$
F3	$(\text{CaO} + \text{CaS} + \frac{1}{2} \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2 + \text{MnO})$	$F3 > 1,5$	$F3 = 1,21$
F4	$(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$	$F4 \geq 1$	$F4 = 1,35$
F5	$\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2$	$F5 \geq 2/3$ do peso total da escória	$F5 = 0,47$

A escória estudada apresenta Módulo de basicidade de 1,09, valor este entre o intervalo aceito por USHEROV-MARSHAK *et al.* (1998), como adequado, e superior ao apresentado por SONG *et al.* (2001) em sua pesquisa (0,82).

Fazendo uma análise geral dos diversos índices de hidraulicidade, não foi possível determinar, baseado na composição química, a hidraulicidade potencial da escória de aciaria elétrica, haja vista que os índices e limites propostos apresentaram resultados conflitantes. Vale ressaltar que geralmente esses índices se aplicam a escória de alto-forno.

4.3 Resistência Mecânica à Compressão das Misturas

A seguir serão apresentados e analisados os resultados da resistência mecânica à compressão de todas as misturas realizadas

Em apêndice Tabela completa com a apresentação dos resultados da RMC média, máxima e mínima, assim como o desvio padrão de todas as misturas realizadas, com diferentes teores e tipos de ativadores, e tempo de ativação térmica.

4.3.1 Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH)₂ e com ativação térmica

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da resistência à compressão média das misturas em função da ativação química, com diferentes teores e tipos de ativadores, e tempo de ativação térmica.

Tabela 4.5 - Resistência mecânica à compressão média das misturas em função da ativação química e térmica

Código Ca(OH) ₂ / NaOH	Tempo de Ativação Térmica		
	3 h	6 h	9 h
0,0 / 0,0	0,98 +/- 0,14	1,07 +/- 0,10	1,07 +/- 0,13
0,75 / 0,0	1,41 +/- 0,17	1,48 +/- 0,15	1,47 +/- 0,15
1,5 / 0,0	1,62 +/- 0,19	1,59 +/- 0,04	1,88 +/- 0,12
3,0 / 0,0	1,68 +/- 0,03	1,84 +/- 0,04	1,78 +/- 0,06
0,75 / 0,75	5,33 +/- 0,43	5,94 +/- 0,88	6,52 +/- 1,07
1,5 / 1,5	6,46 +/- 0,30	6,89 +/- 0,59	8,09 +/- 0,67
1,5 / 3,0	5,98 +/- 0,34	6,86 +/- 0,22	8,17 +/- 0,31
3,0 / 1,5	6,72 +/- 0,22	7,30 +/- 1,45	8,56 +/- 0,54
3,0 / 3,0	5,84 +/- 0,25	6,95 +/- 0,22	8,41 +/- 1,08
0,0 / 0,75	5,40 +/- 0,16	5,56 +/- 0,48	5,64 +/- 0,38
0,0 / 1,5	6,72 +/- 0,47	7,68 +/- 0,39	8,49 +/- 0,44
0,0 / 3,0	5,32 +/- 0,42	6,84 +/- 0,29	7,85 +/- 0,46

A seguir será apresentada o Gráfico Pareto (Figura 4.2), no qual são apresentados os fatores relevantes na ativação química e térmica da escória, como sendo aqueles cujos valores ultrapassam o limite da linha vertical preta.

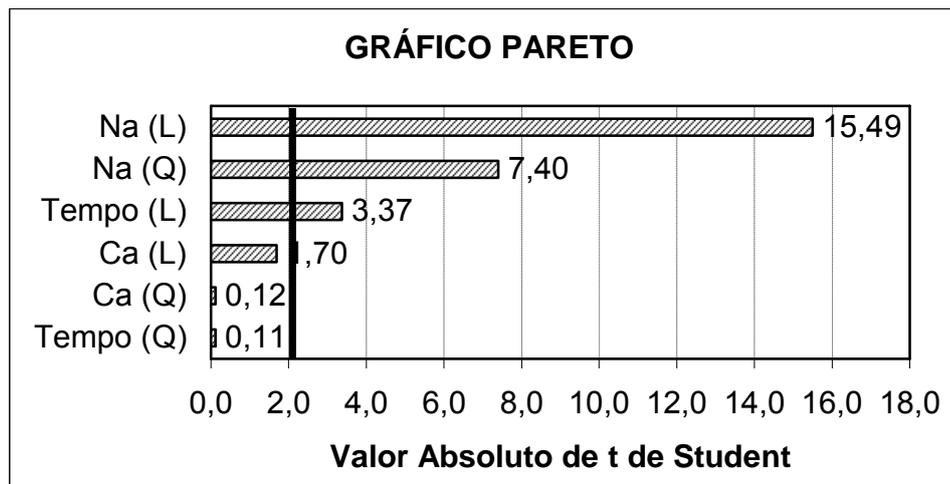


Figura 4.2 - Ativação química e térmica com NaOH e/ou Ca(OH)₂ com ativação térmica - Gráfico Pareto

Segundo o gráfico Pareto as componentes quadrática e linear do sódio, assim como a componente linear do tempo apresentam relevância em relação à RMC. A equação geral (Equação 4.1) do sistema é apresentada a seguir:

$$Y = 7,306 + 0,347X_1 + 2,797X_2 + 0,522X_3 - 0,048X_1^2 - 3,033X_2^2 + 0,030X_3^2 \quad \text{Eq. 4.1}$$

Sendo $X_1 = \text{Ca}$, $X_2 = \text{Na}$ e $X_3 = \text{Tempo}$

O sistema apresenta $R^2 = 0,937$ e R^2 ajustado = 0,923.

a) Ativação com hidróxido de sódio

A influência da ativação química com hidróxido de sódio será apresentada a seguir, analisando-se a influência do teor de ativador, sua combinação com hidróxido de cálcio e o tempo de ativação térmica. A Figura 4.3 apresenta o gráfico com a resistência mecânica à compressão (RMC) quando do uso de hidróxido de sódio como ativador químico. Observa-se que a resistência à compressão, aumenta em função do aumento do teor de ativador, até o teor de 1,5 % e essa tendência repete-se para todas as misturas ativadas termicamente.

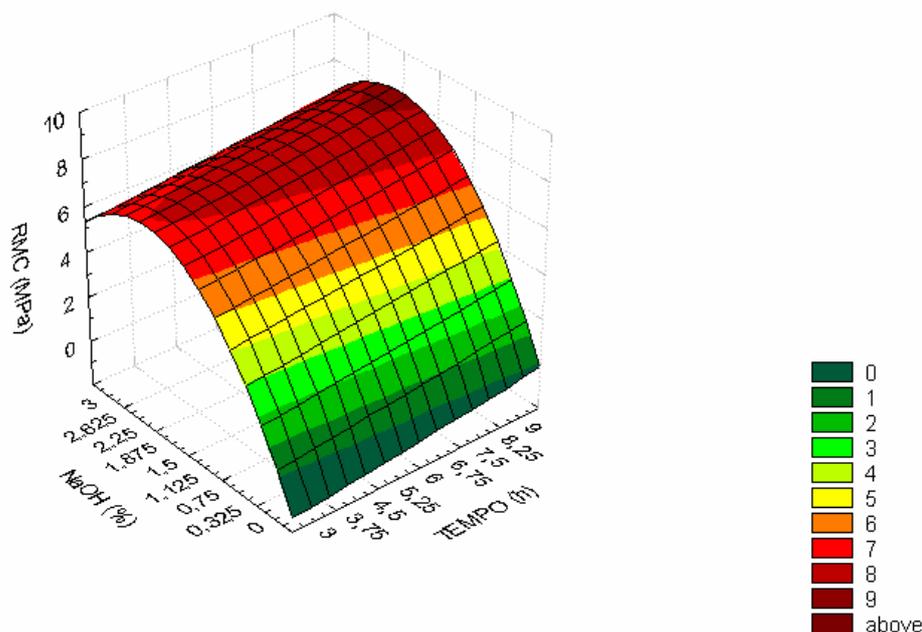


Figura 4.3 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio com diferentes tempos de ativação térmica

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.3, a resistência à compressão das misturas ativadas com hidróxido de sódio aumentam significativamente em função do teor de ativador e pouco do tempo de ativação.

A ativação com sódio proporciona aumento da resistência à compressão com o aumento do tempo de ativação térmica de 3 para 9 horas em todas as misturas. O aumento da RMC com o tempo foi de 4 %, 26 % e 48 %, para as composições de 0,0/0,75; 0,0/1,5 e 0,0/3,0, respectivamente.

Nas misturas contendo exclusivamente hidróxido de sódio, o aumento da RMC foi de 427 %, 693 % e 634 %, para os teores de 0,0/0,75, 0,0/1,5 e 0,0/3,0, respectivamente, em comparação com a referência (0,0/0,0), para um tempo de 9 horas de ativação térmica.

Entretanto a influência do teor de ativador químico no aumento da RMC é muito maior se comparado com o efeito da ativação térmica.

A Figura 4.4 apresenta o resultado da ativação das escórias com hidróxido de sódio e cálcio (1,5 %) e ativação térmica.

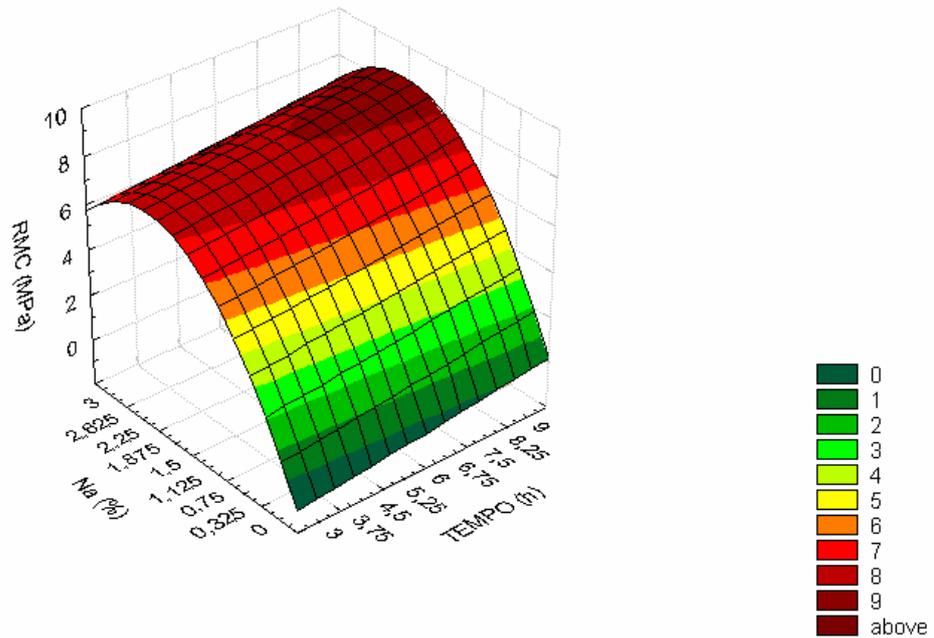


Figura 4.4 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio (1,5 %), com diferentes tempos de ativação térmica

A Figura 4.5 apresenta o resultado da ativação das escórias com hidróxido de sódio e cálcio (3,0 %) e ativação térmica.

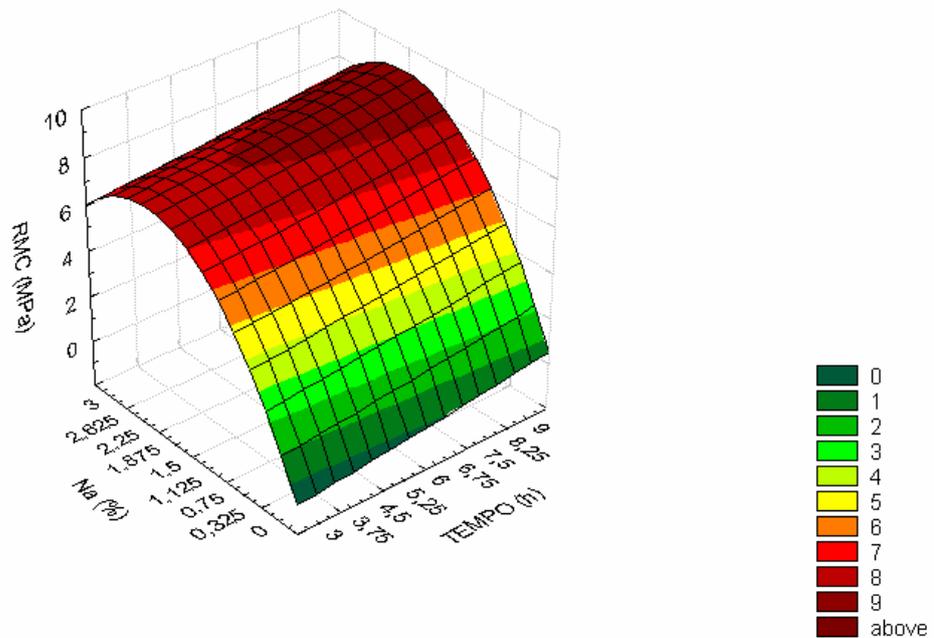


Figura 4.5 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio (3,0 %), com diferentes tempos de ativação térmica

A RMC da escória ativada com hidróxido de sódio e hidróxido de cálcio com 1,5 % (Figura 4.4) e 3,0% (Figura 4.5), apresentam resultados similares aos apresentados na Figura 4.3 e 4.4, todavia ocorre um pequeno incremento da RMC com a adição de hidróxido de cálcio, principalmente se associado com ativação térmica.

b) Ativação com hidróxido de cálcio

A influência da ativação química com hidróxido de cálcio será apresentada a seguir, analisando-se a influência do teor de ativador, sua combinação com hidróxido de sódio e o tempo de ativação térmica. A Figura 4.6 apresenta o gráfico com a resistência mecânica à compressão (RMC) utilizando o hidróxido de cálcio como único ativador químico.

Nos resultados de resistência à compressão da escória ativada quimicamente com cálcio e sem NaOH como ativador, observa-se que a resistência à compressão para as misturas que não foram ativadas termicamente, aumenta em função do teor de ativador (0,0 a 3,0 %), e essa tendência repete-se para as misturas ativadas termicamente (exceção para 9 h).

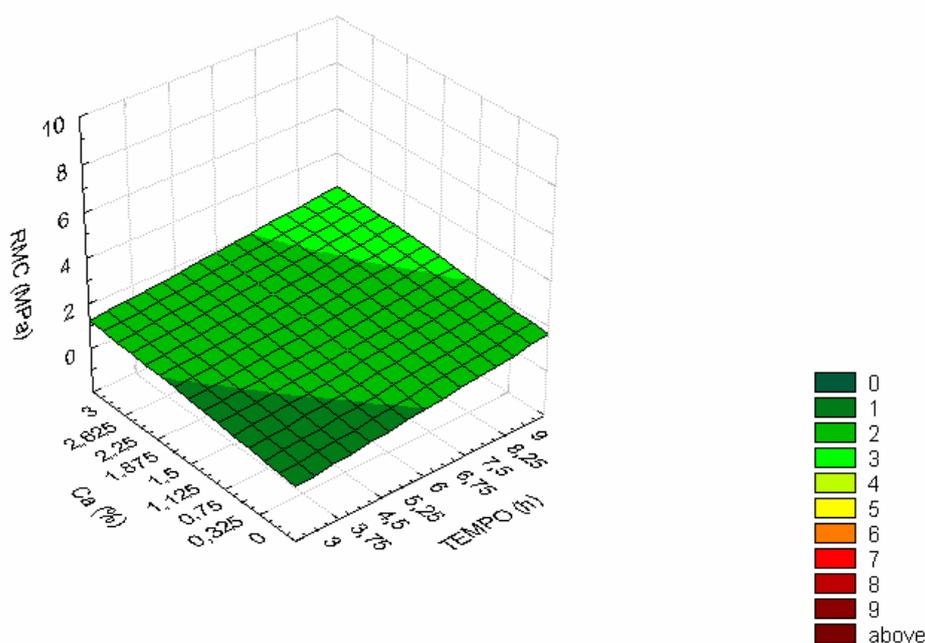


Figura 4.6 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio com diferentes tempos de ativação térmica

O aumento do teor de cálcio nas misturas não promove um aumento na RMC, mas o tempo possui influência na resistência à compressão.

O aumento da resistência foi de 37 %, 76 % e 66 %, para os teores de 0,75/0,0, 1,5/0,0 e 3,0/0,0, respectivamente, em comparação com a referência (0,0/0,0) para um tempo de 9 horas de ativação térmica.

Entretanto o aumento da resistência foi de 4 %, 16 % e 6 %, para os teores de 0,75/0,0, 1,5/0,0 e 3,0/0,0, respectivamente, quando do aumento do tempo de ativação térmica de 3 para 9 horas.

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.6 a RMC das misturas ativadas exclusivamente com hidróxido de cálcio, tanto a ativação térmica quanto o teor de ativador apresentam baixa eficiência quando comparadas com ativação realizada com hidróxido de sódio.

A Figura 4.7 apresenta o resultado da ativação das escórias com hidróxido de cálcio e sódio (1,5 %) e ativação térmica.

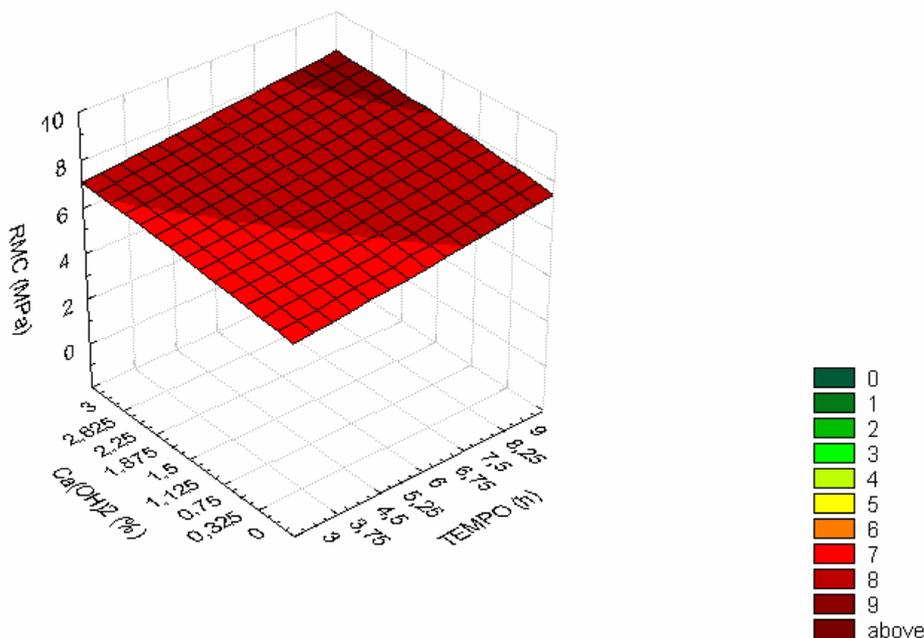


Figura 4.7 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e sódio (1,5 %) com diferentes tempos de ativação térmica

A Figura 4.8 apresenta o resultado da ativação das escórias com hidróxido de cálcio e sódio (3,0 %) e ativação térmica.

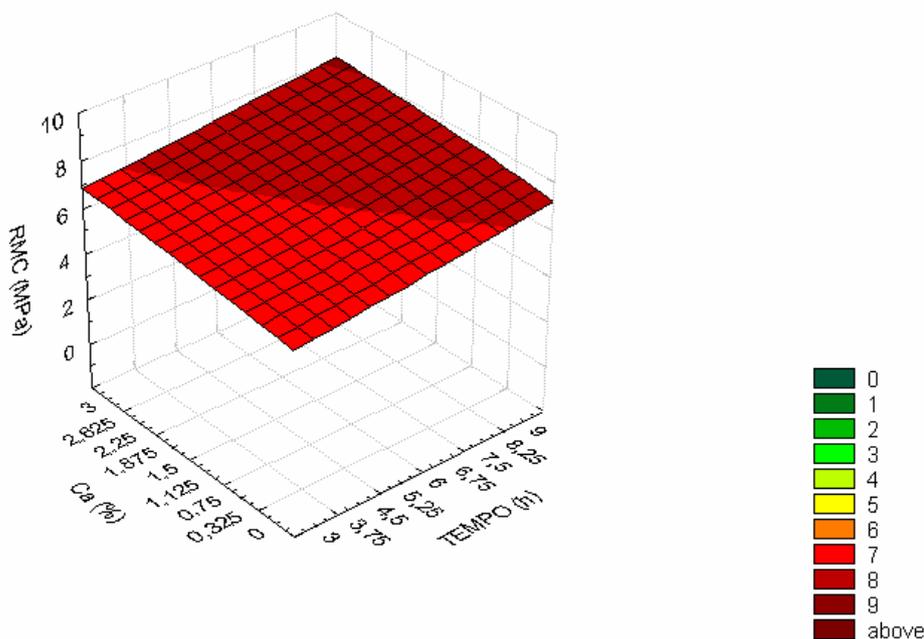


Figura 4.8 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e sódio (3,0 %) com diferentes tempos de ativação térmica

A RMC da escória ativada com hidróxido de cálcio e sódio com 1,5 % (Figura 4.7) e 3,0 % (Figura 4.8), apresenta resultados muito superiores aos apresentados na Figura 4.6, ocorrendo um aumento da RMC em cerca de 4 vezes com a adição de hidróxido de sódio a mistura.

A superfície gerada (Figura 4.6) pelas informações é muito diferente da formada na Figura 4.3, indicando um aumento crescente em função do aumento do teor de hidróxido de cálcio e do tempo de ativação térmica. Com o uso combinado de hidróxido de cálcio e sódio, o sódio se mostrou mais eficiente até o teor de 1,5 %.

c) Ativação térmica

A ativação térmica produz um aumento da RMC para todas as misturas, independente do teor ou do tipo de ativador químico. Este aumento tem correlação direta com o tempo de ativação, sendo mais eficiente para o tempo de 9 horas.

Os resultados apresentados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram a influência da ativação térmica das misturas.

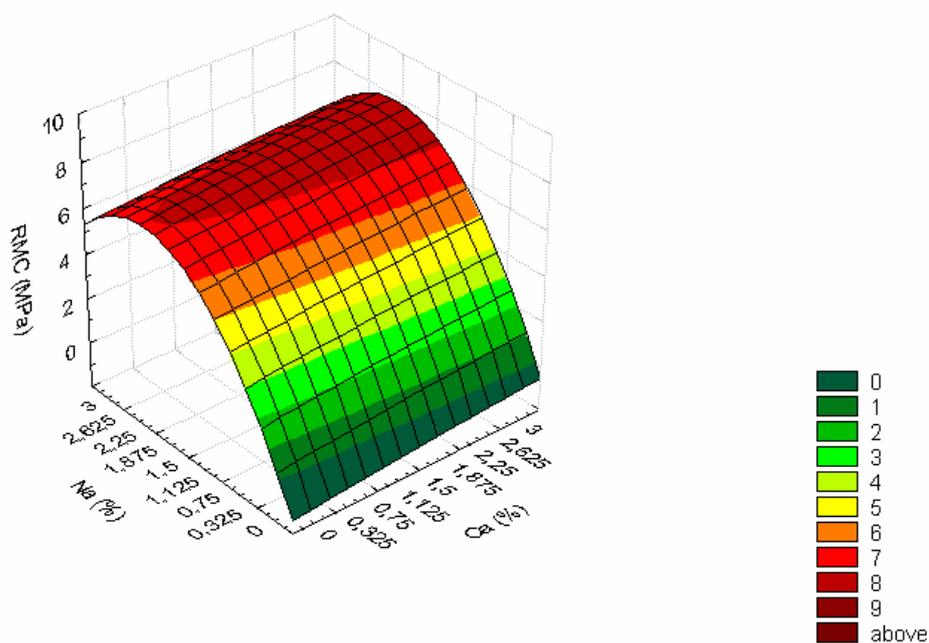


Figura 4.9 - Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 3 horas

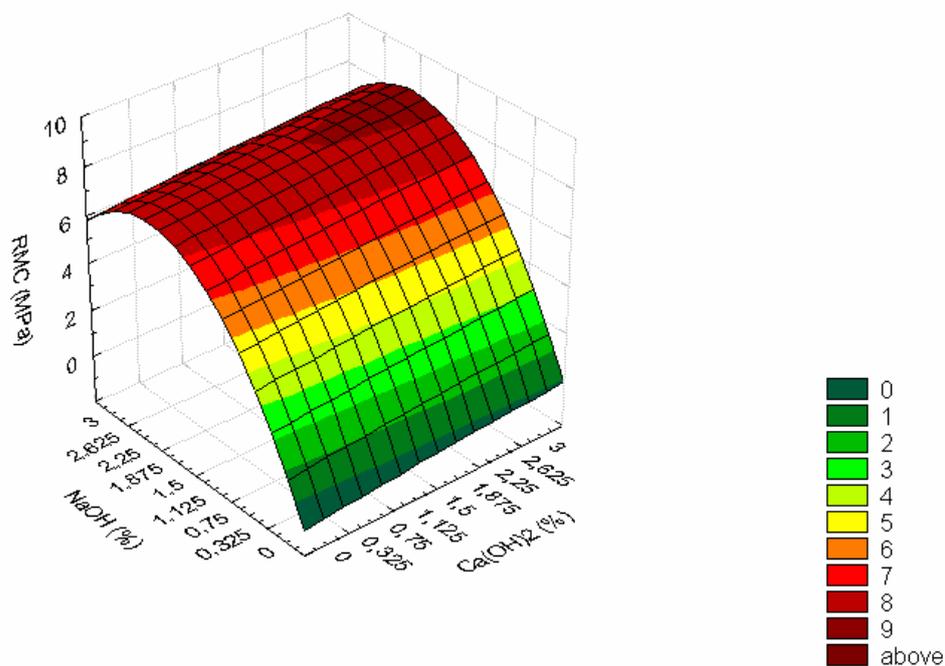


Figura 4.10 - Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 6 horas

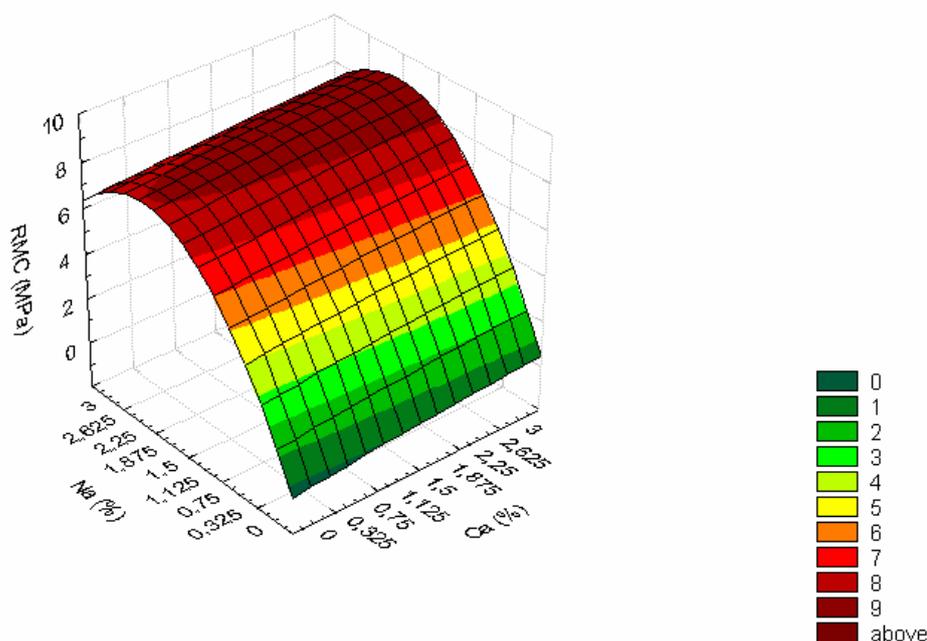


Figura 4.11 – Resistência à compressão da escória ativada com ativação térmica de 9 horas

Nas misturas ativadas quimicamente com sódio a ativação térmica provoca um aumento da RMC diretamente proporcional ao tempo de ativação, sendo mais efetiva para os teores mais elevados de ativador químico. Para as misturas sem ativação química, a ativação térmica não produz variação no desempenho mecânico.

A resistência de cerca de 6 MPa poderia ser obtida com 1,1 % de sódio sem ativação térmica, ou com 0,75 % de sódio, com ativação térmica pelo tempo de 9 horas (Figura 4.11), representando uma redução do consumo de ativador de 50 %.

Observa-se que misturas ativadas exclusivamente com hidróxido de cálcio como ativador apresentem desempenho inferior para o tempo de 3 (Figura 4.9) e 6 horas (Figura 4.10) de ativação térmica, quando comparado com os resultados obtidos sem ativação térmica.

Não foi observado benefício nas misturas ativadas termicamente e quimicamente com cálcio (Figura 4.9, 4.10 e 4.11), uma vez que os resultados apresentados após o período de ativação térmica são similares às misturas que somente tiveram ativação química. Entretanto quando de somente ativação química com hidróxido de cálcio ocorre pequeno benefício na RMC.

As misturas em que o teor de cálcio é igual ou superior ao do sódio com ativação térmica por períodos inferiores a 9 horas, tendem a resultados de resistência mecânica à compressão menores que o não ativado termicamente. Esse comportamento assemelha-se as misturas ativadas exclusivamente com cálcio.

Nas misturas em que o teor de sódio era superior ao de cálcio (1,5/3,0) a resistência à compressão foi crescente em todos os tempos de ativação térmica.

Entretanto, após período de ativação térmica por 9 horas todas as misturas apresentaram resistência mecânica à compressão superior com relação à ausência de ativação térmica.

4.3.2 Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH)₂ e sem ativação térmica

A seguir será analisada a influência do tipo e do teor do ativador químico sem a utilização da ativação térmica.

A Figura 4.12 apresenta o gráfico Pareto, no qual são apresentados os fatores relevantes na ativação química da escória.

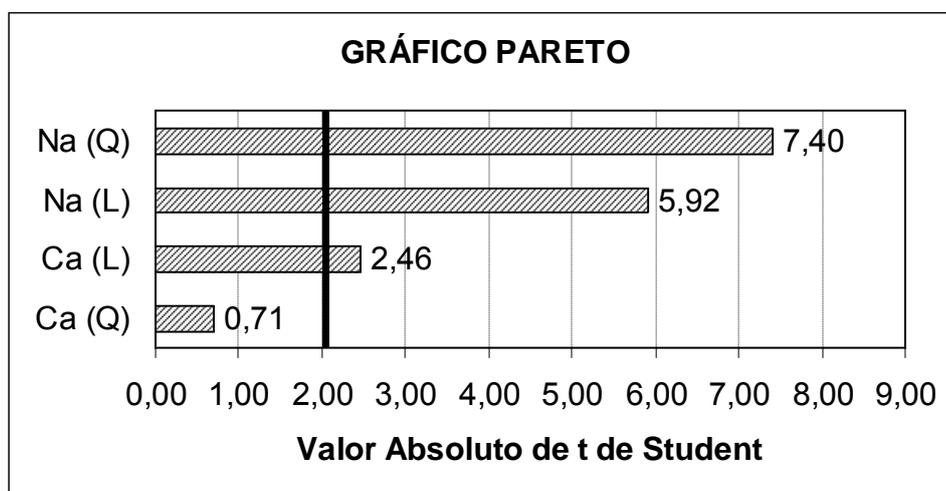


Figura 4.12 - Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH)₂ - Gráfico Pareto

Segundo o gráfico Pareto as componentes quadráticas e a linear do sódio, assim como a componente linear do cálcio linear apresentam relevância em relação à RMC. A equação geral (Equação 4.2) do sistema é apresentada a seguir:

$$Y = 6,761 + 0,739.X_1 + 1,652.X_2 - 0,312.X_1^2 - 3,277.X_2^2 \quad \text{Eq. 4.2}$$

Sendo $X_1 = \text{Ca}$ e $X_2 = \text{Na}$

O sistema apresenta $R^2 = 0,907$ e R^2 ajustado = 0,869.

A Figura 4.13 apresenta o gráfico com os resultados de resistência à compressão da escória ativada quimicamente com hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio e misturas binárias.

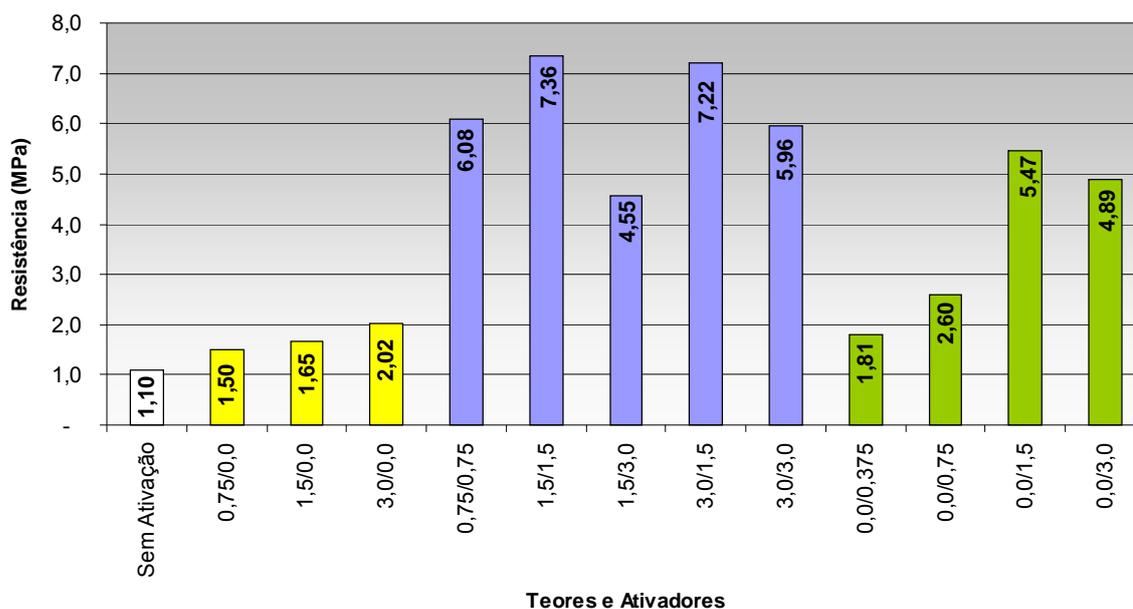


Figura 4.13 – Efeito dos ativadores químicos na resistência

Observa-se na Figura 4.13 que o efeito da ativação química com cálcio (amarelo) é reduzido, se comparado com a ativação química com sódio (verde). Para 3,0 % de hidróxido de cálcio ocorre um acréscimo na resistência de 84 %, já com o mesmo teor de hidróxido de sódio, a melhoria é de 345 %, sendo este valor superior a 4 vezes.

Geralmente as misturas binárias de cálcio e sódio (azul) apresentam resistência superior se comparadas à referência e as misturas com somente um ativador. Com exceção das misturas 1,5/3,0, todas as outras apresentam desempenho superior às misturas unitárias. O desempenho da mistura contendo 0,75/0,75 apresentou resultado de 453 % superiores a referência (branco), e de aproximadamente 11% e 268 % superior ao da mistura contendo 0,0/1,5 e 1,5/0,0, respectivamente, considerando que possuem o mesmo teor total de ativadores.

A Figura 4.14 apresenta o gráfico com a resistência mecânica à compressão (RMC) para sistemas com Na e/ou Ca.

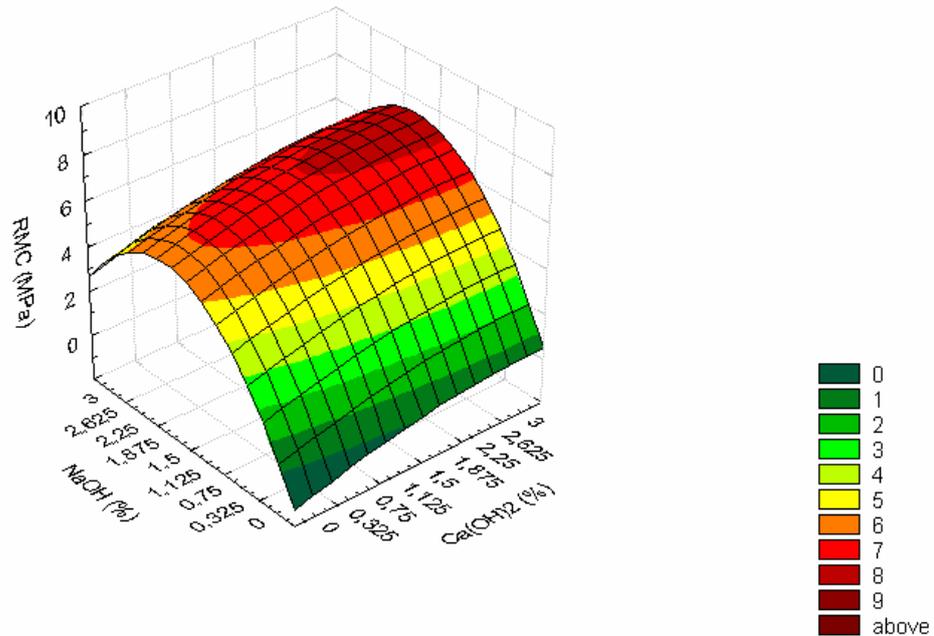


Figura 4.14 – Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de cálcio e/ou sódio

Conforme o resultado apresentado na Figura 4.14 ocorre um aumento na RMC, com o aumento do teor de cálcio nas composições, indicando que o ativador possui influência na RMC. Já o aumento da RMC quando do uso de hidróxido de sódio ocorre até o teor 1,5 %, independente do teor de hidróxido de cálcio.

4.3.3 Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH)₂ dissolvidos

Esta verificação tem como objetivo comparar os resultados da RMC da escória ativada quimicamente com hidróxido de cálcio dissolvido em água ou misturado a seco e hidróxido de sódio, sem o uso de ativação térmica os resultados são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resistência mecânica à compressão média e o desvio padrão das misturas utilizando hidróxido de cálcio dissolvido e anidro

Código Ca(OH) ₂ / NaOH	Dissolvido	Anidro
3,0 / 0,0	2,42 + / - 0,07	2,02+ / - 0,04
1,5 / 1,5	6,97+ / - 0,33	7,36+ / - 0,21
3,0 / 3,0	5,28+ / - 0,25	4,13+ / - 0,12

A Figura 4.15 apresenta o Gráfico Pareto, no qual são apresentados os fatores relevantes na ativação química da escória com hidróxido de cálcio dissolvido, como sendo aqueles que ultrapassam a linha vertical.

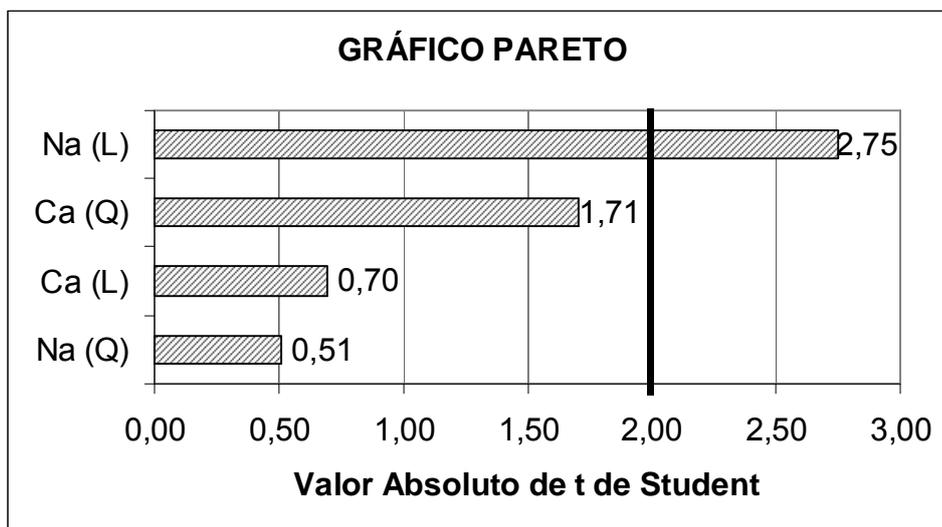


Figura 4.15 - Ativação química com NaOH e/ou Ca(OH)₂ dissolvidos - Verificação - Gráfico Pareto

Segundo o gráfico Pareto a componente linear do sódio foi a única que apresentou relevância em relação à RMC. A equação geral (Equação 4.3) do sistema é apresentada a seguir:

$$Y = 6,977 + 0,446X_1 + 1,6961X_2 - 2,920X_1^2 - 0,653X_2^2 \tag{Eq. 4.3}$$

Sendo $X_1 = Ca$ e $X_2 = Na$

O sistema apresenta $R^2 = 0,798$ e R^2 ajustado = 0,597.

A Figura 4.16 apresenta o resultado de RMC da ativação das escórias com hidróxido de cálcio dissolvido.

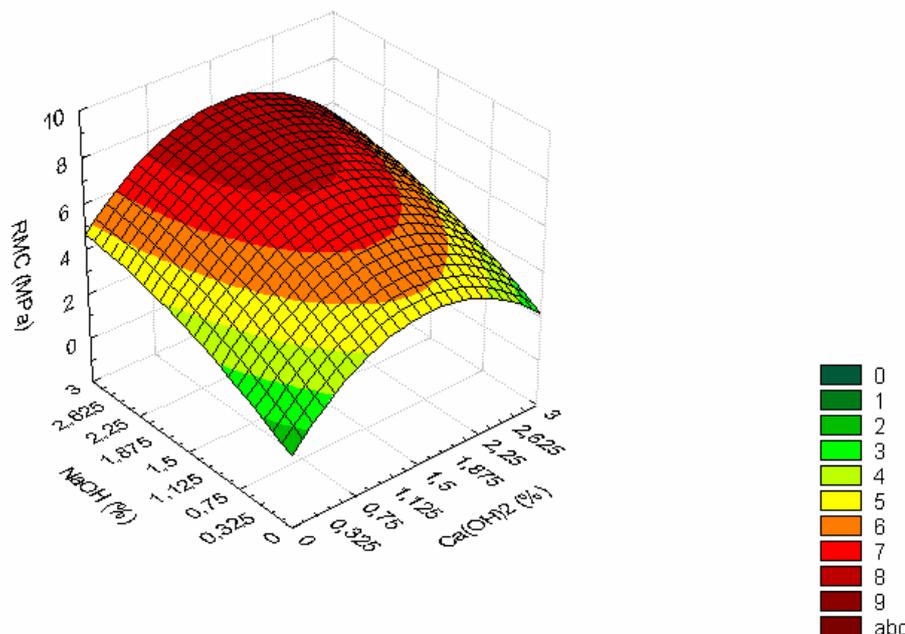


Figura 4.16 - Resistência à compressão da escória ativada com hidróxido de sódio e cálcio dissolvidos

As superfícies de resposta dos sistemas com hidróxido de cálcio dissolvido (Figura 4.16) e a seco (Figura 4.13) apresentam características diferentes, indicando uma possível competição entre o sódio e o cálcio nos processos que ocorrem posteriormente à mistura.

Para sistemas com hidróxido de cálcio a seco a maior RMC ocorre com o maior teor (3,0%). Quando o mesmo é dissolvido previamente em água o melhor desempenho encontra-se com teor de 1,5%. Essa redução do teor de hidróxido de cálcio indica que a dissolução em água potencializa a RMC, independente do teor de hidróxido de sódio.

4.4 Análise dos Compostos Mineralógicos

A composição mineralógica foi realizada com o objetivo de identificar os principais produtos de reação da escória ativada (fases cristalinas) e comparar com os compostos da escória como recebida. As composições ativadas quimicamente e analisadas por difração de raios X foram: 1,5/1,5; 0,0/3,0; 3,0/0,0 e 3,0/3,0.

4.4.1 Análise por difração de raios X (3,0/0,0)

O ensaio para determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX) da escória ativada quimicamente (3,0/0,0) está apresentado na Figura 4.17.

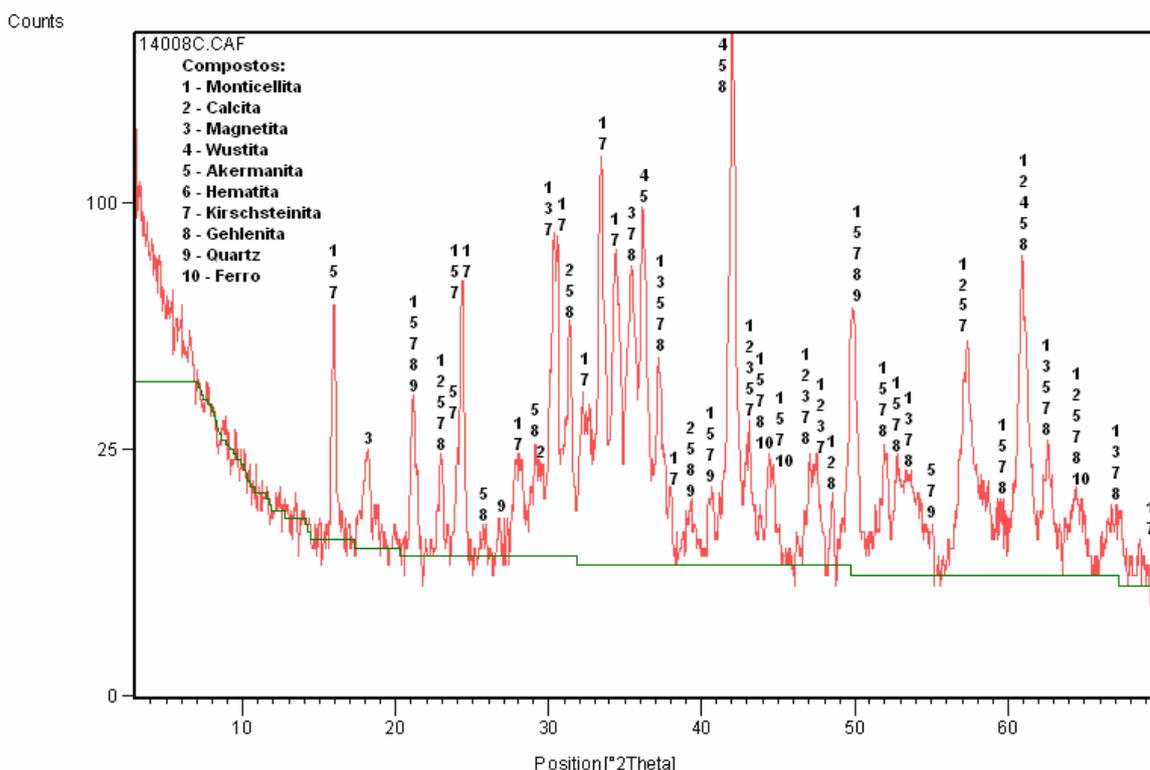


Figura 4.17 - Difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de cálcio

Não existe diferença entre os principais compostos mineralógicos encontrados na escória como recebida e ativada quimicamente (3,0/0,0) com cálcio.

No difratograma apresentando na Figura 4.17 da escória ativada 3,0/0,0 foi identificada uma elevada redução na intensidade dos picos das posições 30,5°, 45°, 50° e 64,5°. Os minerais originais que não aparecem após ativação são apresentados sublinhados ou que surgem após a ativação química aparecem em negrito.

4.4.2 Análise por difração de raios X (0,0/3,0)

O ensaio para determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX) da escória ativada quimicamente (0,0/0,3) está apresentado na Figura 4.18.

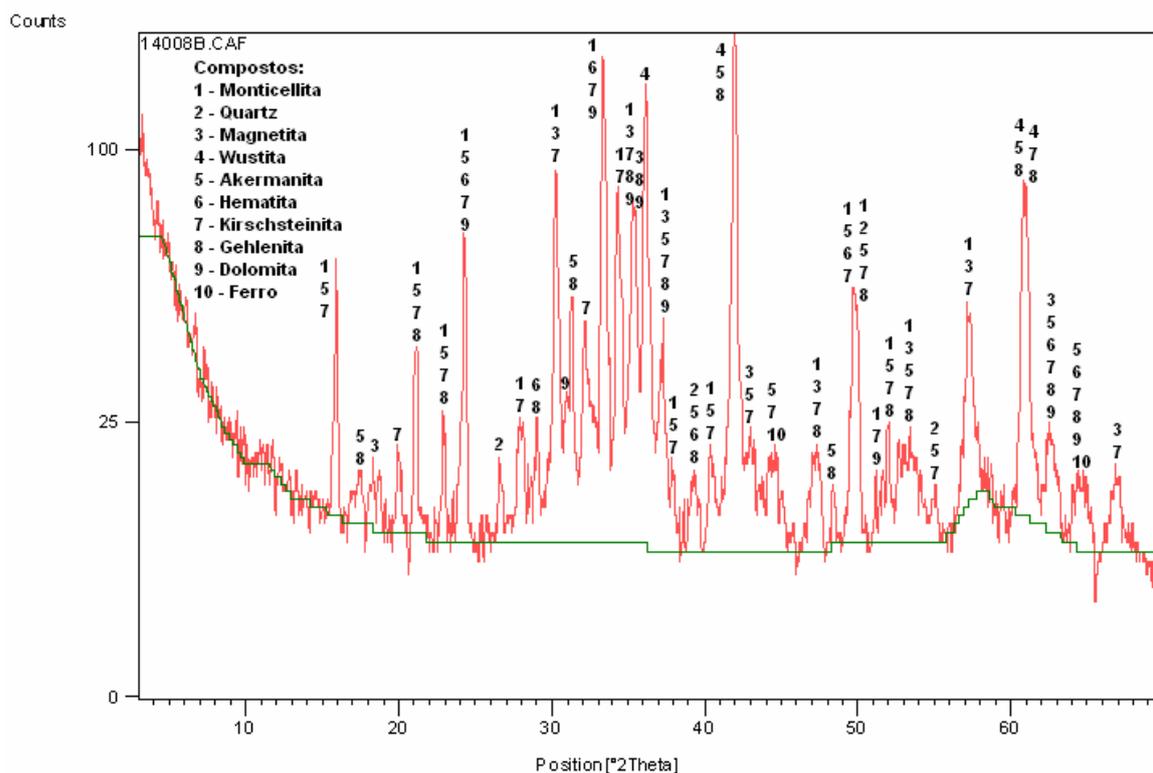


Figura 4.18 - Difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de sódio

Não existem diferenças significativas entre os principais compostos mineralógicos encontrados na escória como recebida e ativada quimicamente (0,0/3,0) com sódio (Figura 4.18).

No difratograma Figura 4.18 da escória ativada 0,0/3,0 são identificados uma grande redução na intensidade dos picos da posição 45°, 50°, 64,5°. Os minerais originais que não aparecem após ativação são apresentados sublinhados ou que surgem após a ativação aparecem em negrito.

4.4.3 Análise por difração de raios X (3,0/3,0)

O ensaio para determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX) da escória ativada quimicamente (3,0/3,0) está apresentado na Figura 4.19.

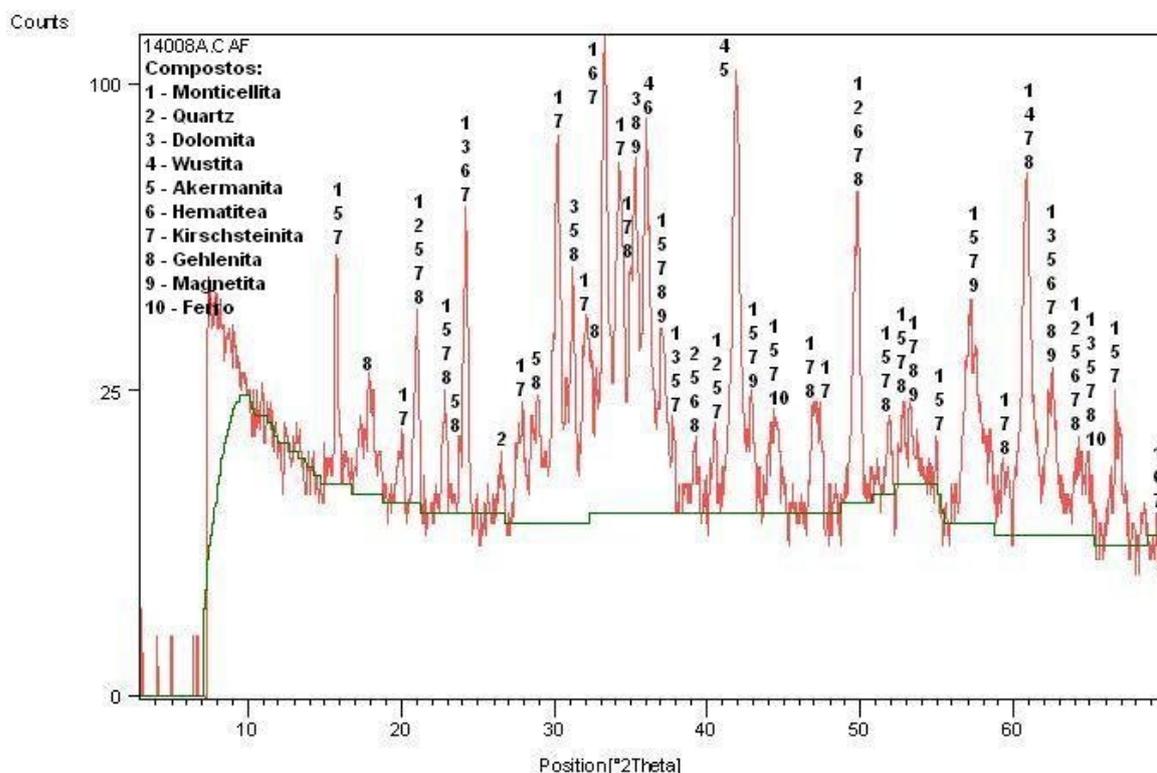


Figura 4.19 - Difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 3,0% de cálcio e 3,0% de sódio

A ativação química da escória com hidróxido de cálcio e de sódio não produziu diferenças significativas entre os compostos mineralógicos principais encontrados na escória como recebida.

No difratograma da escória ativada com máxima concentração de Na e Ca (3,0/3,0) é identificado uma elevada redução na intensidade dos picos nas posições 44° e 65°, conforme apresentado na Figura 4.19. Os minerais originais que não aparecem após ativação são apresentados sublinhados ou que surgem após a ativação química aparecem em negrito.

4.4.4 Análise por difração de raios X (1,5/1,5)

O ensaio para determinação da composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX) da escória ativada quimicamente (1,5/1,5) está apresentado na Figura 4.20.

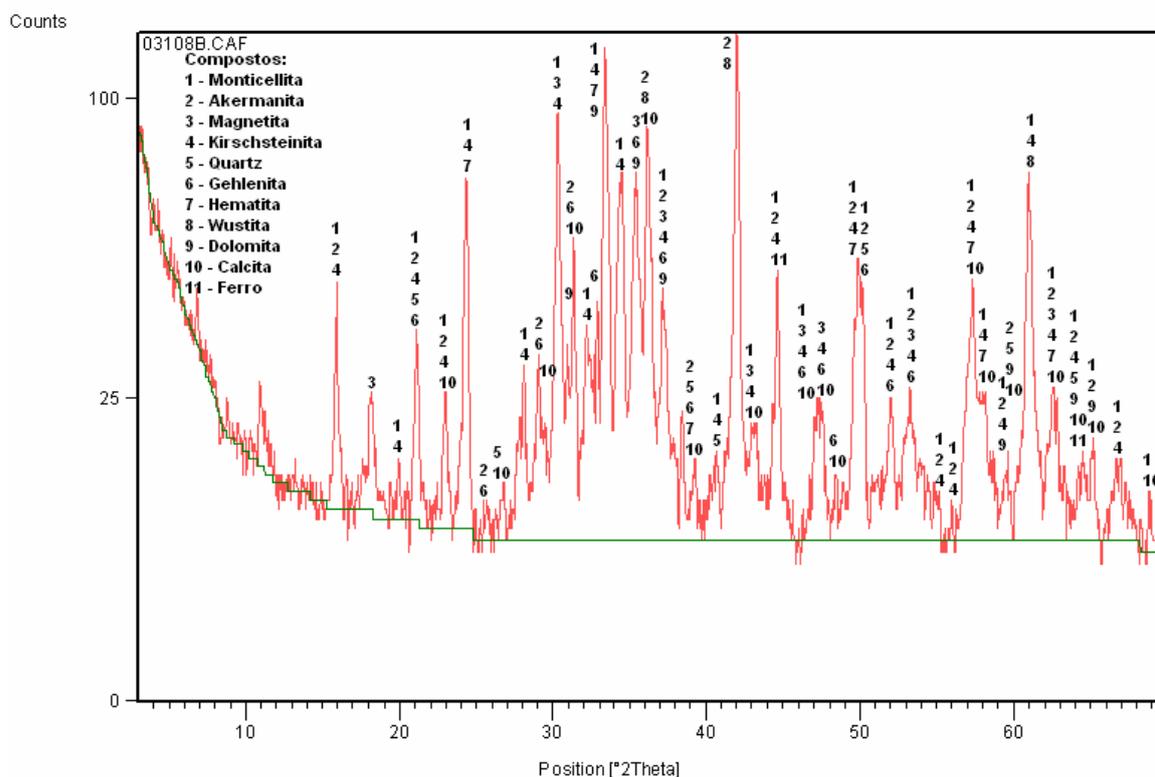


Figura 4.20 - Difratograma da amostra de escória de aciaria elétrica ativada quimicamente por 1,5% de cálcio e 1,5% de sódio

Os principais compostos mineralógicos encontrados na escória como recebida (Figura 4.20) e ativada quimicamente (1,5/1,5) são os mesmos, não indicando o surgimento de nenhum novo, pelo menos não cristalino.

A Figura 4.21 apresenta os dois difratogramas sobrepostos, em vermelho da escória como recebida e em azul ativada quimicamente por 1,5% de cálcio e 1,5% de sódio.

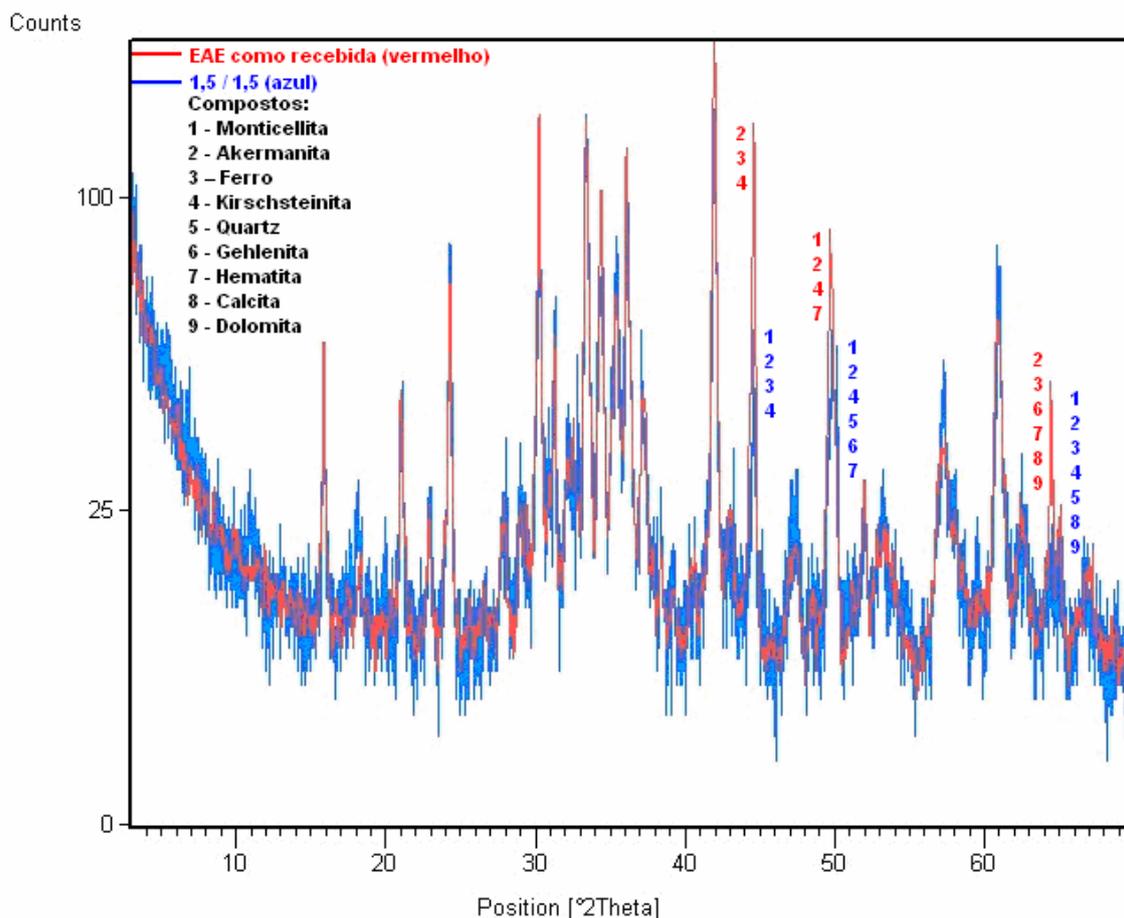


Figura 4.21 - Difratogramas sobrepostos das amostras de escória de aciaria elétrica como recebida (vermelho) e da ativada quimicamente 1,5 / 1,5 (azul)

No difratograma da Figura 4.21 é identificado uma elevada redução na intensidade dos picos nas posições 45°, 50° e 64,5°.

4.4.5 Análise dos resultados da difração de raios X

A ativação química da escória de aciaria elétrica não produz mudanças mineralógicas significativas quando comparadas com a escória como recebido, indicando a possibilidade da criação de estruturas amorfas, como relatado por MYMRINE *et al.* (2006) e CORREA (2005), haja vista que as composições apresentavam resistência mecânica à compressão superior a referência.

Em três picos (45°, 50°, 64,5°) ocorreu redução na intensidade, para todos os teores de ativação química estudados, desapareceram algumas fases e surgiram outras. A diminuição da intensidade do pico existente em 30,5° ocorreu somente com a mistura 3,0/0,0.

4.5 Análise de Periculosidade

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização de toxidez (lixiviação e solubilização) da escória como recebida e da composição 1,5/1,5 (sem ativação térmica).

A Tabela 4.7 apresenta os resultados do ensaio de lixiviação.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de lixiviação da escória como recebida e ativada quimicamente (1,5/1,5).

Poluente	Unid.	Limite máximo NBR 10004/04	Escória como recebida	Escória Ativada (1,5/1,5)
Arsênio	mg/l	1,0	NA	NA
Bário	mg/l	70,0	NA	NA
Cádmio	mg/l	0,5	NA	NA
Chumbo	mg/l	1,0	ND	ND
Cromo total	mg/l	5,0	ND	ND
Fluoreto	mg/l	150,0	NA	NA
Mercúrio	mg/l	0,1	NA	NA
Prata	mg/l	5,0	NA	NA
Selênio	mg/l	1,0	NA	NA

ND – não detectado / NA – Não analisado

Dos elementos considerados poluentes que fazem parte da análise do lixiviado, não foi detectada a presença de chumbo e cromo total. Também não foi detectada a presença de cobre, zinco, manganês, níquel, cobalto e ferro.

Apesar de não fazer parte da lista de elementos a serem analisados para determinação da concentração no lixiviado, foi encontrado um teor de 0,262 e 0,082 mg/l de alumínio na escória como recebida e na ativada (1,5/1,5), respectivamente.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados do ensaio de solubilização.

Tabela 4.8 - Resultados dos ensaios de solubilização da escória como recebida e ativada quimicamente (1,5/1,5).

Poluente	Unid.	Limite máximo NBR 10004/04	Escória como recebida	Escória Ativada (1,5/1,5)
Alumínio	mg/l	0,2	1,053	0,508
Arsênio	mg/l	0,01	NA	NA
Bário	mg/l	0,7	NA	NA
Cádmio	mg/l	0,005	NA	NA
Chumbo	mg/l	0,01	ND	ND
Cobre	mg/l	2,0	ND	ND
Cromo total	mg/l	0,05	ND	ND
Ferro	mg/l	0,3	ND	ND
Manganês	mg/l	0,1	ND	ND
Mercúrio	mg/l	0,001	NA	NA
Prata	mg/l	0,05	NA	NA
Selênio	mg/l	0,01	NA	NA
Sódio	mg/l	200,0	NA	NA
Zinco	mg/l	5,0	ND	0,025
Cianeto	mg/l	0,07	NA	NA
Cloreto	mg/l	250,0	NA	NA
Dureza	mg/l	-	NA	NA
Fenóis	mg/l	0,01	NA	NA
Fluoreto	mg/l	1,5	NA	NA
Nitrato	mg/l	10,0	NA	NA
Sulfato	mg/l	250,0	NA	NA
Sulfactantes	mg/l	0,05	NA	NA

ND – não detectado / NA – Não analisado

Chumbo, cobre, cromo total, ferro, manganês e zinco na foram detectados na análise do solubilizado da escória como recebida. Quando da análise do solubilizado da escória ativada não foram identificados chumbo, cobre, cromo total, ferro e manganês, sendo detectado uma concentração de zinco de 0,025 mg/l, inferior ao limite da norma que é de 5,0 mg/l. Entretanto foi encontrada uma concentração de alumínio acima dos parâmetros da norma NBR 10.004/04, para o solubilizado da escória como recebida (1,053 mg/l) e da escória ativada (0,508 mg/l), sendo na duas situações classificadas como Resíduo Classe II A – Não inerte.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido às características do processo siderúrgico a geração de escória se faz presente em grande quantidade, sendo necessária a sua reciclagem, buscando a valorização e principalmente o seu uso, evitando o armazenamento deste subproduto. Esta pesquisa buscou estudar o efeito da ativação (química e térmica) de escória de aciaria elétrica, historicamente este subproduto foi destinado para fins menos nobres.

A utilização de hidróxidos alcalinos para ativação de escórias de aciaria elétrica permite a produção de compostos aglomerantes resistentes e com características diversas, que podem ter seu uso adaptado a diversos fins. Com a utilização de pequenos teores de ativadores químicos é possível produzir um considerável incremento na resistência mecânica à compressão de escórias de aciaria elétrica.

Os resultados obtidos a partir do presente pesquisa levaram às seguintes conclusões:

- a) Escória como recebida - Apresentou composição química e mineralógica similar a de outros estudos, entretanto o teor de óxido de ferro encontrado está acima da média de escórias similares geradas no Brasil. A composição química consiste predominante é de óxido de ferro (41,91 %), silício (19,95 %), cálcio (19,50 %), magnésio (7,43 %) e alumínio (4,78 %), totalizando aproximadamente 94 % da massa total da escória. Como constituintes mineralógicos foram encontrados kirschsteinita monticelita, akermanita, gehlenita, calcita, dolomita, quartzo, wuestita, magnetita, hematita e ferro, sendo que os quatro últimos ricos em ferro. A escória não apresentou reatividade com hidróxido de cálcio no ensaio para determinar o índice de atividade pozolânica. A massa específica da escória foi de 3,80 g/cm³. É classificada segundo a norma 10004/04, como resíduo Classe II A - Não Inerte;
- b) Eficiência do ativador (ativação química) - A utilização de hidróxido de sódio como ativador mostrou-se muito eficiente, apresentando adequado desempenho mecânico, mesmo para teores muito baixos (0,375 %) de

- ativadores. A ativação com hidróxido de cálcio apresenta desempenho limitado, se comparado com hidróxido de sódio, produzindo um aumento de resistência de 84 % quando do uso de 3,0 % de ativador químico e sem ativação térmica. Outra característica apresentada refere-se ao aspecto dos CP's, que se apresentavam similares aos sem ativadores, tendendo a esfarelar. A combinação entre hidróxido de cálcio e sódio produziu resistência mecânica superior às misturas unitárias com mesmo teor de ativador total;
- c) Teores (ativação química) - O aumento do teor de ativador para misturas com hidróxido de cálcio e sem ativação térmica, produziram um aumento da resistência mecânica, indicando que teores maiores que 3,0 % poderiam produzir resultados de RMC maiores. Entretanto a ativação química com a utilização de hidróxido de sódio produziu desempenho muito superior se comparado à ativação com hidróxido de cálcio. O melhor desempenho é obtido com o teor de 1,5 %, reduzindo um pouco a resistência quando da utilização de 3,0 %, podendo indicar um excesso de ativador. As misturas binárias, geralmente apresentaram alta resistência mecânica, contudo misturas ricas (3,0 %) em hidróxido de sódio apresentaram resistência menor, mesmo comportamento apresentado quando da ativação com alto teor de sódio;
- d) Dissolução do hidróxido de cálcio (ativação química) - A dissolução do hidróxido de cálcio em água, antes da mistura com escória produziu resultados diferentes de quando o mesmo era misturado a seco, como tradicionalmente ocorre. O teor que apresenta melhor desempenho foi reduzido de 3,0 % para 1,5 %, ocorrendo um aumento da RMC, podendo indicar uma competição entre hidróxido de cálcio e sódio na dissolução dos constituintes mineralógicos da escória.
- e) Ativação térmica - A escória sem a utilização de ativador químico (0,0/0,0) obteve RMC de aproximadamente 1 MPa, não teve seu desempenho mecânico alterado com ativação química. A ativação térmica não é recomendada para escórias ativadas quimicamente com hidróxido de cálcio, pois não ocorreu alteração do desempenho mecânico das misturas, entretanto para teores iguais ou superiores da 0,75 % de hidróxido de sódio a cura térmica produziu um acentuado aumento de desempenho mecânico a

compressão. As misturas binárias também apresentam elevação no seu desempenho mecânico;

- f) Avaliação dos produtos de hidratação - A ativação química não produziu o surgimento de novos compostos cristalinos, sendo os compostos principais similares aos encontrados na escória como recebida, entretanto ocorreu o desaparecimento de 3 picos (45° , 50° e $64,5^\circ$ aproximadamente), podendo indicar a destruição de parte da estrutura cristalina inicial. A alta resistência mecânica a compressão é um indicativo do surgimento de novas estruturas, que não puderam ser identificadas por difração de raios X;
- g) Avaliação de periculosidade - A escória ativada (1,5/1,5) foi classificada, segundo a norma 10004/04, como resíduo Classe II A - Não Inerte.

5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

Esta pesquisa teve como objetivo principal analisar as características obtidas quando da ativação da escória em determinadas condições, entretanto, fazem-se necessários estudos mais detalhados ou complementares no que tange aos itens listados a seguir seriam interessantes:

- Estudo da durabilidade dos compostos em sistemas agressivos;
- Variação da energia de prensagem, buscando aperfeiçoar o processo;
- Ativação mecânica da escória em moinhos de alta energia, aumentando consideravelmente a finura;
- Produção de artefatos de escória ativada;
- Estudo da resistência mecânica, após o processo de ativação térmica e com idades superiores (28 dias, 3 meses, etc.).

REFERÊNCIAS

- ÄITCIN, P.-C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini, 2000.
- ALTUN, Í. A.; YILMAZ, Í. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 32, p. 1247-1249, 2002.
- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In. **IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES**. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001. São Paulo, IBRACON, 2001.
- ARAUJO, L. A., **Siderurgia**. São Paulo: Ed. FTD - 1967, 483p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004** – Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10004** – Resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 10005** – Lixiviação de resíduos. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 10005** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006** – Solubilização de resíduos. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 10007** – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 11579** – Determinação da finura por meio da peneira 7,5 mm (nº 200). Rio de Janeiro, 1991.
- _____. **NBR 12653** – Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 14656** – Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 5735** – Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5739** – Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5751** – Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica – Índice de atividade pozolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5752** – Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 7211** – Agregado para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 7215** – Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 9202** – Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (número 325). Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR NM 23** – Cimento Portland - e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 26** – Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 76** – Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Alkali activation of Australian Slag cements. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 29, p. 113-120, 1999a.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 29, p. 1619-1625, 1999b.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, Y. B. Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 30, p. 1367-1374, 2000.

BÌLEK, V. Alkali-activated slag concrete for the production of building elements. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 71-81, 2007.

CAMARINI, G.; CINCOTTO, M. A. **Efeito da cura térmica na resistência de argamassas de cimento Portland comum e de alto-forno.** São Paulo: EPUSP – BT/PCC/156,1995. 20p

CAMARINI, G.; CINCOTTO, M. A. Different steam curing conditions effects on compressive strength of slag cement. In. **PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONGRESS ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES.** Florianópolis, 1996. Anais. Florianópolis, p. 542-553, 1996.

CECCATTO, D. M. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – Propriedades mecânicas.** Porto Alegre, 2003. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CHERMONT, L. S., MOTTA, R. S. **Aspectos Econômicos da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: IPEA, 1996.

CINCOTTO, M. A., Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Tecnologia de Edificações.** São Paulo: Pini, 1988 p. 71-74.

CINCOTTO, M.A.; BATTAGIN, A. F.; AGOPYAN, V. **Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado.** São Paulo. IPT, 1992. 33p. (Boletim 65).

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na₂CO₃. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH.** v. 28, p. 655-664, 1998.

COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Workability and mechanical properties of alkali-activated slag concrete. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH.** v. 29, p. 455-458, 1999.

CORRÊA, S. M. **Compósito à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal.** 2005. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa

de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ESALQ. **Conservação de alimentos pelo controle da umidade**. 2007. 32p. Disponível em: < http://www.esalq.usp.br/departamentos/lan/pdf/Conservacao_umidade.pdf > Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, J. G.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 29, p. 1313-1321, 1999.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PUERTAS, F. Alkali-activated slag cements: Kinetic studies. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 27, p. 359-368, 1997.

FOERSTER, M. **Materiales de construcción**. Tradução por: CAMPALANS, R. Barcelona: Ed. Labor, 1928. Original alemão.

GAVA, G. P. **Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica**. Florianópolis, 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

GEISELER, J. Use of steelworks slag in Europe. In. **WASTE MANAGEMENT**. v. 16, p. 59-63, 1996.

GEYER, R. T.; GEYER, A. L.; DALMOLIN, D.; VILELA, A. C. F. Perspectivas de reciclagem de resíduos da indústria siderúrgica como material de construção civil. In: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 1**. Canela-RS, 1997. Anais. Canela-RS, ANTAC, 1997, p. 1-6

GEYER, R. T.; DALMOLIN, D.; VILELA, A. C. F. Caracterização de escória de aciaria para utilização como adição ao cimento Portland. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 41**. Salvador, 1999. Anais. São Paulo, IBRACON, 1999, p. 1-10. 1 CD-ROM

GEYER, R. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre, 2001. 170 f. Tese (Doutorado em

Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOBBO, C. C. A. S.; GEYER, R. T.; ALBUQUERQUE, A. C., ANDRADE, M. A. S., ANDRADE, W. P. Utilização de escória de aciaria como adição ao concreto compactado com rolo (CCR). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 45**. Vitória, 2003. Anais. São Paulo, IBRACON, 2003, p. 1-17. 1 CD-ROM

GRAFFITTI, D. F. **Avaliação do teor de cal livre em escória de aciaria elétrica**. Porto Alegre, 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS) **Anuário estatístico 2003**. Rio de Janeiro, 2003, 100p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS) **Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade 2007**. Disponível em: < <http://www.ibs.org.br/publicacoes.asp> > Acesso em: 05 nov. 2007a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (IBS) **Processo Siderúrgico**. Disponível em: < http://www.ibs.org.br/siderurgia_processo_siderurgico.asp > Acesso em: 05 nov. 2007b.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI) **Glossary**. Disponível em: < <http://www.worldsteel.org/index.php?action=faqlist&id=40#82> > Acesso em: 15 nov. 2007a.

INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE (IISI) **World Steel in Figures**. Disponível em: < <http://www.worldsteel.org/pictures/storyfiles/WSIF07web%20v6.pdf> > Acesso em: 17 nov. 2007b.

JOHN, V. M. **Cimento de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo, 1995. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

KAVALEROVA, E. Alkaline cements, and concretes: economical, ecological and legislative aspects. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 293-302, 2007.

KRIVENKO, P. Alkaline cements, concretes and structures: 50 years of theory and practice. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 313-331, 2007.

KRIVENKO, P.; KOVALCHUK, G. Fly ash based alkaline cements. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 349-367, 2007.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A. Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries. **RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING**. V. 48, p.301-314, 2006.

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A.; MEHROTRA, S. P. Novel geopolymeric building materials through synergistic utilisation of industrial waste. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 429-446, 2007.

LENZI, J.C.R. **Técnicas de análise estrutural e microestrutural aplicadas ao estudo de escórias siderúrgicas - uma abordagem sobre a aplicabilidade em escórias de aciaria elétrica**. Porto Alegre: 1995. 118p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIMA, L. A. **Hormigones com escórias de forno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.** 1999. 265 f. Tesis (Doctoral en Ingeniería) – Departament D'Enginyeria de la Construcción, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

LUXÁN, M. P.; SOTOLONGO, R.; DORREGO, F.; HERRERO, E. Characteristics of slag produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH.** v. 30, p. 517-519, 2000.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA A. C. F. Emprego da escória de aciaria elétrica como adição a concretos. In. **SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDÚSTRIAS.** São Paulo, 2000. Anais. São Paulo , 2000, p. 1-19. 1 CD-ROM.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização com substituição ao cimento.** 2001. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais - PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada.** São Paulo, 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil) **Anuário estatístico: setor metalúrgico 2006.** 108p. Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Produção física de produtos selecionados.** Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/download.do;jsessionid=A4A2497918C1306BC2F8467D408FFCB6?attachmentId=10164> >
Acesso em: 17 nov. 2007.

MONSHI, A.; ASGARANI M. K. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH.** v. 29, p. 1373-77, 1999.

MROUEH, U.-M; WAHLSTRÖM, M. By-products and recycled materials in earth construction in Finland – an assessment of applicability. **RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING**. V. 35, p.117-129, 2002.

MYMRINE, V. A.; CORRÊA, S. M. New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**. V. 21, p.578-582, 2007.

MYMRINE, V. A.; PONTE, H. A.; IMPINNISI, P. R. Potential application of acid jarosite wastes as the main component of construction materials. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**. V. 19, p.141-146, 2005.

MYMRINE, V.; RIBEIRO, R. A. C. ; KREUSCH, M. A; TALLINI JR., V. M.; PONTE, H. A. Utilização de escória de siderurgia, como ligante de solos locais, na construção de bases de estradas. In. **Seminário Sulbrasileiro de Saneamento Ambiental**, 2º. Anais. Curitiba, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006, pp 01-11.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução S. E. Giannusso. 2º ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

NUERSE, R. W. Cimentos de escórias. In: TAYLOR, H. F. W. (Ed.). **La química de los cementos**. Tradução por: FERNANDEZ, J. A. 1º Ed. Bilbao: Ed. Urmo, 1964. v. 2, p. 48-79. Original inglês.

PAL, S.C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S.R. Investigation of hidraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 33, p. 1481-1486, 2003.

POLESE, M. O.; CARREIRO, G. L.; SILVA, M. G.; SILVA; M. R.; Caracterização microestrutural de escória de aciaria. In. **REVISTA MATÉRIA**. Rio de Janeiro, V.11, p.444-454, 2006.

POLISSENI, E. A. Caracterização da escória de aciaria oriunda de Juiz de Fora destinada à fabricação de cimento. In. **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 44. Belo Horizonte, 2002. Anais. São Paulo, IBRACON, 2002, p. 1-23. 1 CD-ROM.

POLISSENI, E. A. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. 2005. 220p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROSTOVSKAYA, G. , ILYIN, V., BLAZHIS, A. The service properties of the slag alkaline concretes. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 593-610, 2007.

ROY, D. M. Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 29, p. 249-254, 1999.

SAMET, B.; CHAABOUNI M. Characterization of the Tunisian blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 34, p. 1153-1159, 2004.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P.; Cimento de escória de alto-forno reforçado com fibras celulósicas. In: **8º ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. Salvador, 2000. Anais. São Paulo, ENTAC, 2000, V.2, p.948-955.

SCA – Slag Cement Association. **U. S. Slag Cement Shipments**. Disponível em: <http://www.slagcement.org/shared/custompage/custompage.jsp?_event=view&_id=445505_c_sU128801_s_i148636> Acesso em: 08 nov. 2007

SEKULIC, Z.; PETROV, M.;ZIVANOVIC, D. Mechanical activation of various cements. **INTERNATIONAL JOURNAL OF MINERAL PROCESSING**. V. 74S, p.S355-S363, 2004.

SHI, C. Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 26, p. 1789-1799, 1996.

SHI, C. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 32, p. 459-462, 2002.

SHI, C., DAY, R. L. Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 26, p. 439-447, 1996.

SONG, M. L. K., EMERY, S.J.; BENN, M. Alkali Activation of Milled Slag and its Implications for the use of Un-Milled Slag as a Road Stabiliser. **Annual Transportation Convention** Session 2A, Pretoria. p. 1-10, 2001.

SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. **A Influência da Temperatura na Hidratação dos Cimentos de Escória de Alto-Forno**. São Paulo: EPUSP – BT/PCC/224,1998. 20P

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 1º Ed. Londres: Ed. Academic Press, 1990.

TÜFEKÇI, M.; DEMIRBAS, A.; GENÇ, H. Evaluation of steel slags as cement additives. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 27, p. 1713-1717, 1997.

USHEROV-MARSHAK, A.V.; KRIVENKO, P.V.; PERSHINA, L.A. The role of solid-phase basicity on heat evolution during hardening of cements. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 28, p. 1289-1296, 1998.

VOLOVIKOV, A.; KOSENKO, S. Experience from production and application of the slag alkaline cements and concretes. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 737-744, 2007.

WANG, S.-D; SCRIVENER, K. L. Hydration products of alkali activated slag cement. In. **CEMENT AND CONCRETE RESEARCH**. v. 25, p. 561-671, 1995.

YATES, J. R.; PERKINS, D.; SANKARANAYANAN, R. **CemStarsm process and technology for towering greenhouse gases and other emissions while increasing cement production**. Disponível em: <
http://www.hatch.ca/Sustainable_Development/Projects/cemstar_process.htm >
Acesso em: 14 de abr. de 2004.

ZELIC, j.; JOZIC, D.; TIBLJAS, D. Strength and microstructure development of alkali-activated fly ash mortars. In. **2007 - INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION**. Praga, 2007. Anais. Praga, p. 757-769, 2007.

ZORDAN, S.E. JOHN, V. Research & development methodology for recycling residues as building materials. **WASTE MANAGEMENT**. V. 21, p.213-219, 2001.

APÊNDICE

Tabela - Resistência mecânica à compressão (média, máxima e mínima) e desvio padrão de todas as misturas

Código		Sem ativação térmica		Ativação Térmica (h)					
		MPa	DP	3		6		9	
Ca(OH) ₂ / NaOH				MPa	DP	MPa	DP	9 MPa	DP
1,5 / 0,0	média	1,65	0,26	1,62	0,19	1,59	0,04	1,88	0,12
	máximo	2,11		1,79		1,64		2,05	
	mínimo	1,47		1,32		1,53		1,74	
1,5 / 1,5	média	7,36	0,21	6,46	0,30	6,89	0,59	8,09	0,67
	máximo	7,66		6,70		7,54		8,79	
	mínimo	7,08		5,97		5,97		7,12	
1,5 / 3,0	média	4,55	0,14	5,98	0,34	6,86	0,22	8,17	0,31
	máximo	4,80		6,39		7,16		8,48	
	mínimo	4,42		5,54		6,56		7,83	
3,0 / 0,0	média	2,02	0,04	1,68	0,03	1,84	0,04	1,78	0,06
	máximo	2,08		1,72		1,88		1,84	
	mínimo	1,98		1,64		1,80		1,71	
0,0 / 0,0	média	1,10	0,08	0,98	0,14	1,07	0,10	1,07	0,13
	máximo	1,20		1,19		1,16		1,18	
	mínimo	0,97		0,85		0,91		0,84	
0,0 / 1,5	média	5,47	0,71	6,72	0,47	7,68	0,39	8,49	0,44
	máximo	6,23		7,49		8,43		9,03	
	mínimo	4,33		6,27		7,27		7,82	
0,0 / 3,0	média	4,89	0,14	5,32	0,42	6,84	0,29	7,85	0,46
	máximo	5,09		6,03		7,27		8,31	
	mínimo	4,68		4,98		6,59		7,21	
3,0 / 1,5	média	7,22	0,42	6,72	0,22	7,3	1,45	8,56	0,54
	máximo	8,01		7,06		10,47		9,51	
	mínimo	6,76		6,4		6,39		8,13	
3,0 / 3,0	média	5,96	0,33	5,84	0,25	6,95	0,22	8,41	1,08
	máximo	6,39		6,17		7,33		9,83	
	mínimo	5,57		5,55		6,72		7,24	
0,75 / 0,0	média	1,5	0,23	1,41	0,17	1,48	0,15	1,47	0,15
	máximo	1,84		1,79		1,74		1,64	
	mínimo	1,31		1,17		1,24		1,33	
0,75 / 0,75	média	6,08	0,23	5,33	0,43	5,94	0,88	6,52	1,07
	máximo	6,41		5,97		7,57		8,21	
	mínimo	5,75		4,97		5,24		5,44	
0,0 / 0,75	média	2,6	0,23	5,4	0,29	5,56	0,45	5,64	0,58
	máximo	3,19		5,62		6,2		6,17	
	mínimo	2,22		5,15		4,99		5,22	

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)