

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

ESCÓRIAS DE ACIARIA E RESÍDUOS DE
CONCRETOS REFRACTÁRIOS EM COMPONENTES
DE PAVIMENTAÇÃO

Eduardo Bezerra de Oliveira e Souza

Belo Horizonte
2007

**ESCÓRIAS DE ACIARIA E RESÍDUOS DE
CONCRETOS REFRACTÁRIOS EM COMPONENTES
DE PAVIMENTAÇÃO**

Eduardo Bezerra de Oliveira e Souza

Eduardo Bezerra de Oliveira e Souza

ESCÓRIAS DE ACIARIA E RESÍDUOS DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS EM COMPONENTES DE PAVIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Reciclagem, tratamento e disposição de resíduos sólidos industriais.

Orientador: Prof. Dr. Wilfrid Keller Schwabe

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em
Componentes de Pavimentação

EDUARDO BEZERRA DE OLIVEIRA E SOUZA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Wilfrid Keller Schwabe – Orientador

Prof. Dr. Abdias de Magalhães Gomes – DEMC - UFMG

Profª Dra. Liséte Celina Lange – DESA - UFMG

Pesq. Dr. Luis Rodolfo Mariani Bittencourt, Ph. D – MAGNESITA S.A. REFRAATÁRIOS

Belo Horizonte 10 de setembro de 2007.

Versão final aprovada por:

Prof. Dr. Wilfrid Keller Schwabe

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu vida e saúde para que eu pudesse chegar até aqui e vencer mais esta etapa.

A meus pais, “in memoriam”, os maiores incentivadores de todas as minhas conquistas.

A meus irmãos Alcy, Lucy, Bernardo, Ronaldo e Reinaldo, sempre presentes, no incentivo e no acompanhamento de minha vida.

À minha mulher Maria do Carmo, amiga, companheira, pelo seu incentivo, pela ajuda e que soube compreender a minha ausência em função do meu objetivo.

Ao meu orientador, Prof. Keller, pelos ensinamentos, sugestões e orientações, tão úteis para a conclusão desse meu trabalho.

Ao Prof. Abdias Magalhães Gomes, “meu co-orientador moral”, como ele mesmo se define, pela contribuição valiosa.

À IBEC Artefatos de Concreto pelo fornecimento do material inicial para testes em laboratório.

À MAGNESITA S.A. Refratários, através do Dr. Luis Rodolfo Mariani Bittencourt, à época Gerente do CPqD - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, que me ofereceu a possibilidade de desenvolver esse tema.

À Eng^a Daniele Fonseca de Lima, do CPqD da MAGNESITA, responsável pela coordenação no fornecimento das amostras e de informações importantes.

À SGSGEOSOL Laboratórios Ltda. e a FUNDAÇÃO VICTOR DEQUECH pelo incentivo à minha pesquisa, oferecendo-me subsídios para a execução dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Aos funcionários da UFMG, Ricardo Antônio Barbosa, Técnico do Laboratório de Concreto do DEMC, Cléber Eustáquio Flor do LTR – Laboratório de Tecnologia de Rochas e Norma Rodrigues de Abreu do Laboratório de Águas do DESA, pela ajuda na preparação de amostras e na realização de ensaios.

À Ludmila Costa e ao Marcos Gabrich pela grande ajuda na condução dos ensaios mecânicos no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFMG.

Ao Prof. Luis Cláudio Montenegro do Laboratório de Tratamento de Minério do Departamento de Engenharia de Minas – UFMG, pelo ajuda na moagem de amostras, nos ensaios de análise granulométrica e na determinação de massa específica.

A UNI-STEIN Pavimentação Articulada e Intertravada, na pessoa do Sr. Wilson Mozer, por permitir a utilização da empresa para confecção dos corpos de prova em escala industrial. Também agradeço ao Eng^o José Eli Goulart - Diretor Técnico, ao Sr. Aldeir Mozer - Encarregado de Produção e ao Sr. Juliano César Correia – Laboratorista pela prestimosa ajuda de cada um deles.

RESUMO

Este trabalho procurou avaliar a possibilidade de utilização de resíduos oriundos do processo de fabricação do aço, na substituição aos agregados naturais, usados na fabricação de elementos de pavimentação em pisos industriais e não industriais em conformidade com a norma brasileira ABNT NBR 9781:1987.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram escolhidos os seguintes resíduos: escória de aciaria LD estabilizada volumetricamente, concreto refratário de canal de vazamento de gusa, concreto refratário de carro torpedo e concreto refratário de desgaseificador RH. Essas amostras foram britadas e moídas procurando-se obter uma distribuição granulométrica adequada para a fabricação do concreto.

Para cada resíduo foram determinadas individualmente a composição química, a granulométrica, a massa específica e a composição mineralógica. Ensaios de lixiviação e de solubilização também foram conduzidos nas amostras individuais e em amostras de misturas para a caracterização ambiental.

Várias misturas com diferentes teores de cada um dos resíduos foram formuladas em escala de laboratório na tentativa de se obter os valores mínimos especificados na norma de ≥ 35 MPa (para veículos comerciais de linha) e de ≥ 50 MPa (tráfego de veículos especiais ou acentuados efeitos de abrasão) para a resistência à compressão.

Após o desenvolvimento satisfatório em laboratório, foi então decidida a produção em escala industrial, em uma empresa da Região Metropolitana de Belo Horizonte, fabricante de peças de pavimentação intertravada.

Foi feita a inspeção dimensional nas peças fabricadas tanto em laboratório quanto em escala industrial, com resultados que satisfizeram à norma brasileira. Embora não exigidos pela norma, foram feitos os testes de absorção de água e de abrasão, que apresentaram bons resultados.

No ensaio mecânico de compressão foram encontrados valores ≥ 50 MPa. A partir desses valores obtidos nas peças produzidas em escala industrial, concluiu-se que os resíduos do processo de fabricação do aço empregados nesta pesquisa, desde que adequadamente ajustados a uma composição granulométrica típica, têm potencial para serem usados como matéria prima na produção de peças para pavimentação intertravada para pisos industriais e não industriais.

Palavras-chave: resíduos da siderurgia, pavimentação intertravada, proteção ambiental.

ABSTRACT

This research intended to evaluate the utilization feasibility of waste materials or residues generated in the steelmaking process in substitution to regular resources to produce paving material for industrial and non industrial pavements in accordance with Brazilian Standard ABNT NBR 9781:1987.

For the purpose of developing this research work the following waste materials were chosen: volumetric stable BOF steelmaking slag, BF hot metal runner refractory concrete, Torpedo Car refractory concrete and RH Degassing refractory concrete.

The Chemical composition, the granulometry, the density, the mineralogical composition, as well as leaching and solubility tests were carried out for each individually waste.

Several different mixtures of those waste materials were made in laboratory scale to verify the achievement of the minimum compression tensile strength specified in the standard, i.e., ≥ 35 MPa for commercial vehicles and ≥ 50 MPa for special vehicles and heavy abrasion effects.

After reaching good results in the laboratory tests, the production of the interlocking paving pieces in an industrial scale was decided.

Dimensional inspection in both laboratorial and industrial paving pieces showed results in accordance with the above mentioned Brazilian Standard. Although not being a Standard requirement, water absorption and abrasion tests were made and also showed good results.

Values ≥ 50 MPa were obtained for the compression tensile strength on industrially produced paving pieces. According to these results it can be concluded that these waste materials had the potential to be used as raw material in the production of interlocking paving pieces for industrial and non industrial pavements.

Key-words: steelmaking wastes, interlocking pavers, environmental protection.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 REVISÃO DA LITERATURA	5
3.1 Processos de fabricação do aço	9
3.1.1 Coqueria - coqueificação do carvão mineral	10
3.1.2 Sinterização	11
3.1.3 Alto Forno - produção do ferro gusa	12
3.1.4 Aciaria LD – processo de refino	14
3.1.5 Desgaseificação e Forno Panela - metalurgia secundária.....	15
3.1.6 Lingotamento Contínuo – solidificação do aço líquido	15
3.1.7 Aciaria Elétrica	16
3.2 Origem das escórias de aciaria	17
3.3 Beneficiamento das escórias de aciaria	20
3.4 Propriedades das escórias	22
3.4.1 Propriedades físicas	23
3.4.2 Propriedades químicas	23
3.4.3 Propriedades mecânicas.....	25
3.5 Aplicações típicas das escórias de aciaria	25
3.6 Materiais Refratários	31
3.6.1 Concretos Refratários	34
3.6.1.1 Exemplos de aplicações de concretos refratários na siderurgia	39
3.7 Concreto comum de construção civil	40
3.7.1 Componentes do concreto comum	41
3.7.1.1 Cimento Portland.....	41
3.7.2 Agregados.....	48
3.7.2.1 Classificação dos agregados	50
3.7.2.2 Caracterização dos materiais	50
3.7.3 Aditivos Químicos.....	52
3.7.3.1 Classificação dos aditivos químicos.....	53
3.8 Pavimentos Intertravados	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1 Seleção e amostragem dos resíduos estudados.....	61
4.2 Caracterização dos resíduos	64
4.2.2 Características químicas e físicas	64
4.2.3 Características mineralógicas – Difração por Raios-X.....	68
4.2.4 Caracterização e classificação ambiental dos resíduos.....	70
4.3 Programa Experimental	72
4.3.1 Produção de peças em laboratório	73
4.3.2 Produção de peças em escala industrial.....	80
4.3.2.1 Processo industrial de fabricação	81
4.4 Avaliação do produto fabricado	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
5.1 Verificação Dimensional	85
5.2 Ensaio de Absorção de Água.....	87

5.3 Ensaio de Abrasão	89
5.4 Ensaios de Classificação das Misturas dos Resíduos Sólidos	90
5.4.1 Ensaio de lixiviação.....	90
5.4.2 Ensaio de solubilização	91
5.4.3 Classificação dos resíduos	93
5.5 Ensaio de Compressão Simples.....	93
6 CONCLUSÕES	105
7 REFERÊNCIAS.....	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Principais resíduos da indústria siderúrgica brasileira (10^3 t).....	9
Figura 3.2 - Fluxograma de produção de uma usina siderúrgica integrada.....	10
Figura 3.3 - Produção do coque metalúrgico.....	11
Figura 3.4 - Processo de obtenção do sinter.....	12
Figura 3.5 - Processo de produção do ferro gusa em Alto Forno.....	13
Figura 3.6 - Fluxo de produção de uma Aciaria LD.....	15
Figura 3.7 - Fluxograma simplificado de uma usina siderúrgica semintegrada.....	16
Figura 3.8 - Geração e tratamento da escória de aciaria.....	19
Figura 3.9 - Produção de escórias de aciaria na Europa em 2004 (%).....	20
Figura 3.10 - Escória bruta de aciaria.....	21
Figura 3.11 - Planta de beneficiamento de escória.....	21
Figura 3.12 - Sucata metálica recuperada.....	22
Figura 3.13 - Utilização de escória de aciaria.....	22
Figura 3.14 - Utilização de escórias de aciaria na Europa em 2004 (%).....	28
Figura 3.15 - Estrutura de multicamadas de filtro para proteção de margens.....	29
Figura 3.16 - Estrutura com pedras e filtro de escória no Rio Elba, Alemanha.....	30
Figura 3.17 - Pilha de blocos carbonatados de escória de aciaria.....	31
Figura 3.18 - Consumo de refratários por setor industrial.....	33
Figura 3.19 - Evolução do consumo de refratários na siderurgia brasileira.....	34
Figura 3.20 - Fluxograma da fabricação de produtos refratários monolíticos e pré-moldados.....	37
Figura 3.21 - Lanças de aciaria.....	39
Figura 3.22 - Peça antes do uso (Impeller do Sistema de dessulfuração de gusa).....	39
Figura 3.23 - Peça após o trabalho (Impeller do Sistema de dessulfuração de gusa).....	39
Figura 3.24 - Peça antes do uso (Snorkel de Desgaseificador RH).....	40
Figura 3.25 - Peça após o trabalho (Snorkel de Desgaseificador RH).....	40
Figura 3.26 - Peça antes do uso (Delta de Forno Elétrico a Arco – FEA).....	40
Figura 3.27 - Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer.....	44
Figura 3.28: Tipos de pavimentos intertravados.....	56
Figura 3.29 - Pavimentação de rua.....	59
Figura 3.30 - Tipo de pavimento usado.....	59
Figura 3.31 - Entrada de condomínio.....	59
Figura 3.32 - Rua interna do condomínio.....	59

Figura 3.33 - Shopping no bairro Luxemburgo.....	59
Figura 3.34 - Pavimento vazado (ecológico).....	59
Figura 3.35 - Pátio de posto de gasolina na BR 040.....	60
Figura 3.36 - Pavimentação com peças coloridas.....	60
Figura 4.37 - Escória britada (19 a 32 mm).....	61
Figura 4.38 - Resíduo CG.....	62
Figura 4.39 - Resíduo CT.....	62
Figura 4.40 - Resíduo RH.....	62
Figura 4.41 - Britador de mandíbula.....	63
Figura 4.42 - Moinho de rolos.....	63
Figura 4.43 - Resíduos LD e CG.....	63
Figura 4.44 - Resíduos CT e RH.....	64
Figura 4.45 - Quarteador – UFMG.....	65
Figura 4.46 - Conjunto de peneiras - DESA.....	65
Figura 4.47 - Utilização do frasco de Chapman.....	67
Figura 4.48 - Difractograma do resíduo LD.....	68
Figura 4.49 - Difractograma do resíduo CG.....	69
Figura 4.50 - Difractograma do resíduo CT.....	69
Figura 4.51 - Difractograma do resíduo RH.....	70
Figura 4.52 - Equipamento agitador rotatório de frascos.....	71
Figura 4.53 - Formas de plástico.....	74
Figura 4.54 - Formas com desmoldante.....	74
Figura 4.55 - Betoneira de eixo vertical.....	75
Figura 4.56 - Mesa vibratória.....	75
Figura 4.57 - Corpos de prova produzidos.....	79
Figura 4.58 - Sala úmida.....	79
Figura 4.59 - Corpos de prova desmoldados.....	80
Figura 4.60 - Face oposta dos corpos de prova.....	80
Figura 4.61 - Capeamento dos corpos de prova.....	80
Figura 4.62 - Vista parcial da empresa UNI-STEIN.....	81
Figura 4.63 - Vista frontal da vibro prensa.....	82
Figura 4.64 - Vista posterior da vibro prensa.....	82
Figura 5.65 - Peça de 16 faces.....	85
Figura 5.66 - Peça em formato de S.....	86
Figura 5.67 - Peças fabricadas na UNI-STEIN usando resíduos.....	88

Figura 5.68 - Comparação de acabamento de superfície.....	88
Figura 5.69 - Máquina de ensaio de abrasão.....	89
Figura 5.70 - Máquina de ensaio de compressão.....	94
Figura 5.71 - Valores de RC para diversas misturas de laboratório.....	95
Figura 5.72 - Valores de RC da M24 em diferentes idades.....	96
Figura 5.73 - Máquina de ensaio da UNI-STEIN.....	97
Figura 5.74 - Resistência à Compressão de T1, T2 e T3 (6CPs).....	99
Figura 5.75 - Resistência à Compressão de T1, T2 e T3 (4CPs).....	99
Figura 5.76 - Resistência à Compressão de T1, T2, T3 e M24.....	100
Figura 5.77 - Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (6CPs).....	102
Figura 5.78 - Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (4CPs).....	102
Figura 5.79 - Resistência à Compressão de T4, T5, T6 e M24.....	103
Figura 5.80 - Resultados de RC para produtos UNI-STEIN.....	103
Figura 5.81 - Valores de produto UNI-STEIN de 100 mm e $RC \geq 50$ MPa.....	104
Figura 5.82 - Comparação de RCs entre misturas de laboratório e industriais.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Produção de aço bruto (10^6 t).....	8
Tabela 3.2 - Valores de propriedades físicas das escórias de aciaria.....	23
Tabela 3.3 - Composição de escórias de aciarias LD e elétrica no Brasil.....	23
Tabela 3.4 - Produção brasileira de refratários.....	32
Tabela 3.5 - Geração de alguns resíduos de concretos refratários.....	37
Tabela 3.6 - Características de alguns concretos refratários.....	38
Tabela 3.7 - Compostos presentes no cimento Portland.....	46
Tabela 3.8 - Composição de alguns tipos de cimento Portland.....	47
Tabela 3.9 - Comparação entre tipos de pavimentação.....	57
Tabela 3.10 - Pisos intertravados – Mitos X Realidade.....	58
Tabela 4.11 - Composição química dos resíduos (%).....	64
Tabela 4.12 - Análise granulométrica do resíduo LD.....	65
Tabela 4.13 - Análise granulométrica do resíduo CG.....	66
Tabela 4.14 - Análise granulométrica do resíduo CT.....	66
Tabela 4.15 - Análise granulométrica do resíduo RH.....	66
Tabela 4.16 - Massa específica dos resíduos (g/cm^3).....	67
Tabela 4.17 - Resultado de ensaio de lixiviação.....	72
Tabela 4.18 - Misturas experimentais de laboratório.....	77
Tabela 4.19 - Misturas experimentais em escala industrial.....	83
Tabela 5.20 - Valores dimensionais das peças de laboratório.....	85
Tabela 5.21 - Valores dimensionais das peças do processo industrial.....	86
Tabela 5.22 - Valores médios de absorção.....	87
Tabela 5.23 - Valores de abrasão.....	90
Tabela 5.24 - Parâmetros do ensaio de lixiviação.....	91
Tabela 5.25 - Classificação da toxicidade por lixiviação.....	91
Tabela 5.26 - Resultado do ensaio de solubilização.....	92
Tabela 5.27 - Resistência à compressão (MPa).....	94
Tabela 5.28 - Valores de RC da M24 (MPa).....	96
Tabela 5.29 - Valores de RC das misturas T1, T2 e T3 (MPa).....	98
Tabela 5.30 - Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (MPa).....	101

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Areia Artificial
a/c	Relação água/cimento (kg/L)
AN	Areia Natural
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAFAR	Associação Brasileira de Refratários
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AF	Alto Forno
B0	Brita zero
CG	Concreto refratário de <u>C</u> anal de <u>V</u> azamento de <u>G</u> usa
CP	Corpo de prova
CPqD	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CT	Concreto refratário de rebote de <u>C</u> arro <u>T</u> orpedo
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG
DMC	Dimensão Máxima Característica
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EAF	Escória de Alto Forno
EUROSLAG	European Slag Conference
FEA	Forno Elétrico a Arco
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
LD	Escória de Aciaria LD
MF	Módulo de Finura
MAGNESITA	Magnesita S. A. Refratários
PP	Pó de Pedra
RC	Resistência à Compressão
RH	Concreto refratário de Desgaseificador <u>RH</u>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNI-STEIN	UNI-STEIN Pavimentação Articulada e Intertravada

“No princípio, criou Deus os céus e a terra”...

A terra, porém, estava sem forma e vazia...

Disse também Deus: Ajuntem-se as águas debaixo dos céus num só lugar, e apareça a porção seca. À porção seca chamou Deus Terra e ao ajuntamento das águas, Mares. E viu Deus que isso era bom.

Disse também Deus: Povoem-se as águas de enxames de seres viventes; e voem as aves sobre a terra, sob o firmamento dos céus.

Criou, pois, Deus os grandes animais marinhos [...], os quais povoam as águas [...]; e todas as aves [...]. E Deus os abençoou, dizendo: Sede fecundos multiplicai-vos e enchei as águas dos mares; e, na terra, se multipliquem as aves [...]

Disse também Deus: Produza a terra seres viventes, conforme a sua espécie: animais domésticos, répteis e animais selváticos, segundo a sua espécie [...]

“Viu Deus tudo quanto fizera, e eis que era muito bom.”

Gênesis, Capítulo 1, versículos 1 a 31, da Bíblia Sagrada.

“A Natureza fez tudo a nosso favor, nós, porém pouco ou nada temos feito a favor da Natureza. Nossas terras estão ermas, e as poucas que temos roteado são mal cultivadas, porque o são por braços indolentes e forçados. Nossas numerosas minas, por falta de trabalhadores ativos e instruídos, estão desconhecidas ou mal aproveitadas. Nossas preciosas matas vão desaparecendo, vítimas do fogo e do machado destruidor da ignorância e do egoísmo. Nossos montes e encostas vão-se escalfando diariamente, e com o andar do tempo faltarão as chuvas fecundantes que favoreçam a vegetação e alimentem nossas fontes e rios, sem o que o nosso belo Brasil, em menos de dois séculos, ficará reduzido aos páramos e desertos áridos da Líbia. Virá então este dia (dia terrível e fatal), em que a ultrajada natureza se ache vingada de tantos erros e crimes cometidos.”

José Bonifácio de Andrada e Silva

Representação à Assembléia Constituinte e Legislativa do Império do Brasil sobre a escravatura, 1823, apud PÁDUA (2002).

“É possível reduzir em muito o impacto negativo do crescimento econômico na deterioração ambiental. [...] Para que haja sustentabilidade, o essencial não é produzir menos, e sim produzir de outra maneira.”

BIRD/Banco Mundial

Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial, 1992. Desenvolvimento e Meio Ambiente. Washington, D. C., EUA, 1992, apud CALDERONI, 2002.

“Uma taxa de crescimento econômico como a da segunda metade do Breve Século XX, se mantida indefinidamente [...], deve ter conseqüências irreversíveis e catastróficas para o ambiente natural deste planeta, [...] Além disso, o ritmo em que a moderna tecnologia aumentou a capacidade de nossa espécie de transformar o ambiente é tal que, mesmo supondo que não vá acelerar-se, o tempo disponível para tratar do problema deve ser medido mais em décadas do que em séculos.”

Eric Hobsbawm

Era dos Extremos – O Breve Século XX: 1914 – 1991. São Paulo, Companhia das Letras, 1995, p. 547, apud CALDERONI, 2002.

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Art. 225 da Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 05 de outubro de 1988 (PINTO et al., 2001).

1 INTRODUÇÃO

Após 1972, ano da realização da Conferência da ONU sobre o Ambiente Humano, conhecida como Conferência de Estocolmo, as questões ambientais passaram a ser fortemente focadas na preservação e melhoria do ambiente humano e nos problemas da poluição (BELLO, 1998).

Em dezembro de 1983, foi criada uma Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente pela ONU – Organização das Nações Unidas, presidida por Gro Harlem Brundtland, Primeira Ministra da Noruega. Em 1987, essa Comissão apresentou o relatório “O Nosso Futuro Comum”, demonstrando a necessidade de nova abordagem de desenvolvimento, capaz de manter o progresso em todo o planeta e, em longo prazo, devendo ser alcançado tanto pelos países desenvolvidos quanto por aqueles em desenvolvimento. Esse novo tipo de desenvolvimento, definido como “Desenvolvimento Sustentável”, visa o crescimento econômico, com desenvolvimento humano e qualidade ambiental e é definido como aquele que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações futuras de satisfazerem também as suas.

Em 1992, foi realizada no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Eco-92. O documento editado, a Agenda 21, elegeu temas como a pobreza, o crescimento econômico, a industrialização e a degradação ambiental, como aqueles que deveriam desencadear ações objetivas e meios para implementação do Desenvolvimento Sustentável.

Segundo Almeida (2002) a emergência do novo paradigma, com sua crítica à abordagem fragmentada, e a constatação das fragilidades do modelo de comando-e-controle favoreceram a entrada e o fortalecimento de novos atores no cenário ambiental, como as ONGs – Organizações Não Governamentais. Mais tímida foi a participação das empresas. No universo empresarial, a dimensão ambiental era vista, na melhor das hipóteses, como um mal necessário. No máximo submetiam-se aos controles estabelecidos pelo poder público..

A maior parte dos impactos causados ao meio ambiente é atribuída ao desenvolvimento industrial dos últimos séculos, que pressionam os sistemas naturais.

Como consequência, desse crescimento industrial, aumenta a pressão sobre a indústria, considerada como a maior degradadora do meio ambiente, para melhorar o seu desempenho ambiental.

A indústria siderúrgica produz anualmente enormes quantidades de resíduos/co-produtos.

O aço produzido nas indústrias siderúrgicas é transformado em diferentes tipos de produtos como tiras laminadas a quente e a frio, folhas galvanizadas, barras, fios-máquina, arames, tubos, pregos, rebites e tantos outros, de acordo com sua aplicação final.

As necessidades político, social e tecnológica impuseram intensas mudanças no processo de fabricação do aço durante o Século XX.

A crise do petróleo nos anos 70, as preocupações ambientais nas décadas de 80 e 90 e as restrições impostas pela legislação ambiental, exigiram da indústria siderúrgica, novas mudanças.

Nos Estados Unidos, em 1995, do total dos valores em novos projetos siderúrgicos, 20-30% foram destinados a atender as exigências dos órgãos de controle ambiental.

No Brasil, o setor siderúrgico tem grande importância econômica, principalmente na região centro-sul. Pois, esse setor constitui-se um dos mais importantes, gerando riquezas e milhares de empregos. No entanto, essa atividade industrial produz enormes quantidades de resíduos.

É necessário empregar tecnologias limpas para a redução de sua geração, do seu reaproveitamento e/ou reciclagem de maneira econômica e ecológica.

Tanabe e Nakada (2003) relatam diversas tecnologias desenvolvidas pela siderúrgica japonesa NKK durante o Século XX. No entanto, a que mais chama a atenção é para a tecnologia de fabricação de aço com a redução expressiva da geração de escória devida a um eficiente processo de desfosforação no Convertedor LD.

Uma solução para o grande volume de resíduos gerados na indústria siderúrgica é o seu aproveitamento como agregados na Construção Civil: na pavimentação de estradas rodoviárias, como lastro de ferrovia e também nas construções hidráulicas.

Segundo Merkel (2000), na Alemanha e na Holanda, durante os últimos 25 anos, aproximadamente 10 milhões de toneladas de escórias de aciarias têm sido utilizadas em construções hidráulicas. Na Holanda, o projeto Delta é o maior projeto de engenharia hidráulica do mundo. O volume ocupado por essas 10 milhões de toneladas ($4,9 \times 10^6 \text{ m}^3$) é quase duas vezes o volume da Pirâmide de Quéops no Egito ($2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$). Se essa

quantidade de escória não tivesse sido utilizada, um valor equivalente de recursos naturais deveria ter sido extraído, o que teria provocado um enorme impacto ambiental.

Outros resíduos oriundos do processo siderúrgico são aqueles provenientes da utilização de concretos refratários. Esses produtos são usados no revestimento de equipamentos como altos fornos, carros-torpedo, convertedores de aciaria LD, fornos elétricos a arco, panela de vazamento de aço, fornos panela, distribuidores de aço no lingotamento contínuo, desgaseificadores.

Portanto, privilegiar o reuso e/ou a reciclagem é garantir a visão do “Ciclo de Vida de um Produto”, que implica na responsabilização do produtor desde a sua fabricação até a descaracterização após o seu consumo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é o de estudar e avaliar a possibilidade de fabricação de elementos de pavimentação, para aplicação em pisos industriais e não industriais em conformidade com a norma brasileira NBR 9781:1987, empregando escória de Aciaria LD estabilizada volumetricamente e resíduos de concretos refratários oriundos da indústria siderúrgica.

2.2 Objetivos específicos

- Classificar os resíduos sólidos escória de Aciaria LD e os concretos refratários, de acordo com as normas brasileiras NBR 10004:2004, NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004;
- Classificar e caracterizar ambientalmente as misturas de resíduos sólidos de escória de Aciaria LD estabilizada volumetricamente e de resíduos de concretos refratários, de acordo com as normas brasileiras NBR 10004:2004, NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004;
- Analisar as propriedades mecânicas do produto obtido – componentes de pavimentação – de acordo com a norma brasileira NBR 9780:1987.

3 REVISÃO DA LITERATURA

À proporção que cresce o número de indústrias devido ao desenvolvimento tecnológico, cresce também a quantidade de resíduos industriais.

Em decorrência desse fato, a maior parte desses resíduos tem destino incerto e inadequado, podendo ficar expostos ao ambiente.

Faz-se necessário desenvolver métodos eficazes para implementar novas diretrizes de gestão dos resíduos sólidos industriais, para esse problema que é comum ao Brasil e ao mundo.

Em vista disso, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de valorizar os resíduos sólidos industriais de diferentes naturezas, utilizando-os como matéria prima para produção de material utilizável.

A reciclagem dos resíduos industriais através de estudos capazes de detectar sua potencialidade e viabilizar sua seleção preliminar é encarada hoje como atividade que pode contribuir para diversificação dos produtos, diminuição dos custos, além de resultar em “novas” matérias primas para uma série de setores industriais.

A norma brasileira ABNT NBR 10004:2004 define resíduos sólidos como sendo os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações e controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização dos resíduos deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias primas, os insumos e o processo que lhes deu origem.

A mesma norma classifica os resíduos sólidos em:

- a) resíduos classe I – Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;

resíduos classe II A – Não inertes.

resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos classe I - Perigosos são aqueles que apresentam periculosidade (característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e/ou ao meio ambiente), ou uma das características seguintes: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.

Os resíduos classe II A – Não inertes são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes, nos termos da norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Os resíduos classe II B – Inertes são quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme o anexo G da ABNT NBR 10004.

O gerenciamento dos resíduos é hoje um dos principais desafios vivenciados pelas indústrias em todo mundo.

A gestão dos resíduos sólidos na indústria se caracteriza pela necessidade de implantação da gestão do conhecimento dos resíduos nela gerados, ou seja, a necessidade de se caracterizar e quantificar quais são os resíduos industriais perigosos e os não perigosos gerados no âmbito de cada indústria.

Uma gestão de resíduos sólidos eficiente deve contemplar as etapas de manuseio, armazenamento, transporte, reciclagem, tratamento e disposição final desses resíduos e ser realizada dentro de uma hierarquia na priorização das ações através dos seguintes passos:

- prevenir a geração de resíduos sólidos industriais;
- minimizar a geração de resíduos sólidos industriais: quando as melhores tecnologias empregadas nos processamentos industriais não eliminarem a sua geração, necessário se faz então minimizar as quantidades geradas e a toxicidade dos resíduos;
- reciclar os resíduos industriais: um resíduo gerado em uma produção industrial pode, após tratamento ou não, vir a ser matéria prima para o processamento industrial que o gerou ou para quaisquer outros;
- tratar os resíduos sólidos industriais visando dois objetivos principais: a descontaminação ou destoxificação para a viabilização de sua reciclagem e – quando a reciclagem não puder ser feita – o tratamento com a finalidade de uma disposição mais segura do ponto de vista ambiental;
- descontaminar as áreas degradadas: descontaminação de áreas antigas e nas quais houve disposição inadequada de resíduos.

As etapas de segregação, armazenamento, manuseio e transporte de resíduos apresentam custos que, em alguns casos, podem ser bastante elevados. Então se a indústria encontrar uma forma de reaproveitar ou vender esses resíduos, estará criando uma maneira atraente de resolver o problema e, ainda, de conseguir uma fonte de renda adicional.

A reciclagem dos rejeitos gerados pelas indústrias, para uso como matérias primas alternativas não é nova, e tem sido efetuada com sucesso em muitos países, incluindo o Brasil.

A reciclagem dos resíduos industriais que representam algum valor econômico é uma das formas mais atraentes na solução de problemas no gerenciamento de resíduos, tanto do ponto de vista empresarial, como dos órgãos de controle ambiental. O papel da reciclagem é o de diminuir o desperdício, reduzir a quantidade de resíduos encaminhados aos lixões e aos aterros sanitários, bem como aumentar os insumos, pois muitos materiais descartados podem ser utilizados como matéria prima de processos ou serem reutilizados na própria indústria que o descartou.

Do ponto de vista ambiental, as motivações para a intensificação da reciclagem, em geral, são:

- diminuição da quantidade de resíduos lançados no meio ambiente;
- a conservação de recursos naturais não renováveis;

- melhoria da saúde e segurança da população;
- a preocupação com o meio ambiente, e a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pela alta do petróleo, notadamente nos países onde há marcante escassez de matérias primas.

A indústria siderúrgica produz enormes quantidades de resíduos. De acordo com Silveira et al. (2004), a média brasileira de geração é de 700 kg/t de aço bruto produzido.

Benquerer (2000) informa que as aciarias contribuem com cerca de 26% do total de resíduos gerados numa usina siderúrgica integrada, ficando atrás apenas do alto forno que é capaz de gerar em torno de 49%.

A Tabela 3.1 mostra a evolução da produção mundial e brasileira de aço. Como a produção brasileira de aço bruto em 2006 alcançou 30,9 milhões de toneladas, cerca de aproximadamente 21,6 milhões de toneladas de resíduos foram geradas.

Tabela 3.1 - Produção de aço bruto (10⁶ t)

Produção	1970	1980	1990	2000	2003	2004	2005	2006
Mundial	595,4	715,6	770,5	847,7	968,1	1046,3	1108,3	1239,5
Brasil	5,4	15,3	20,6	27,9	31,1	32,9	31,6	30,9
Posição relativa do Brasil no mundo	18°	10°	9°	8°	9°	8°	9°	10°

Fonte: IBS, 2007.

A Figura 3.1 mostra a distribuição dos principais resíduos sólidos gerados na indústria siderúrgica no Brasil.

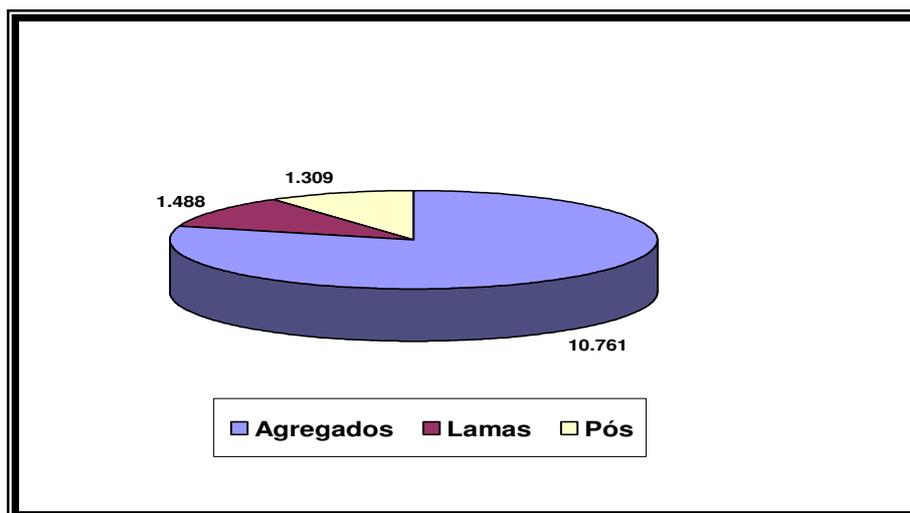


Figura 3.1 - Principais resíduos da indústria siderúrgica brasileira (10³t).
Fonte: IBS, 2003.

Em 2003, a USIMINAS produziu 3,29 milhões de toneladas de resíduos sólidos, dos quais 58% foram comercializados, 35% foram reciclados e 7% foram depositados em aterro controlado. Nesse mesmo ano, a siderúrgica vendeu 1,9 milhões de toneladas de resíduos industriais, que proporcionaram uma receita de R\$ 13,5 milhões. Do total comercializado, 333,7 mil toneladas foram de escória de aciaria, 39 mil toneladas de lama grossa LDG, 1,37 milhões de escória granulada e 43,9 mil toneladas de sucata de gusa. O total de resíduos reciclados somou 1,2 milhões de toneladas. Desse montante, 450 mil toneladas foram de sucata de aço, 160 mil toneladas de carepa, 120 mil toneladas de finos de minério e 116 mil toneladas de pós das sinterizações (IBS, 2004).

O emprego desses resíduos escolhidos – concretos refratários e escória de aciaria LD estabilizada volumetricamente – na produção de componentes de pavimentação, objetiva a substituição de recursos naturais como areia e brita.

Justifica-se o estudo pela procura de mais uma alternativa de utilização ambientalmente correta das escórias de aciarias das usinas siderúrgicas, que são produzidas em grandes quantidades.

3.1 Processos de fabricação do aço

O processo atual de fabricação do aço consiste de três estágios:

- produção do ferro gusa no alto forno;

- fabricação do aço nos convertedores a oxigênio (LD) ou o processo nos fornos elétricos a arco (FEA);
- metalurgia secundária em fornos panela;

Nas usinas denominadas integradas, a produção do aço envolve três passos básicos:

- primeiro, a fonte de energia (calor) para a fusão e redução do minério de ferro é produzida (coqueria).
- segundo, o minério de ferro introduzido sob a forma de sinter ou pelotas, é fundido em um alto forno.
- finalmente, o ferro gusa do alto forno é refinado para a produção do aço na aciaria.

A Figura 3.2 mostra o fluxograma de produção de uma usina integrada.

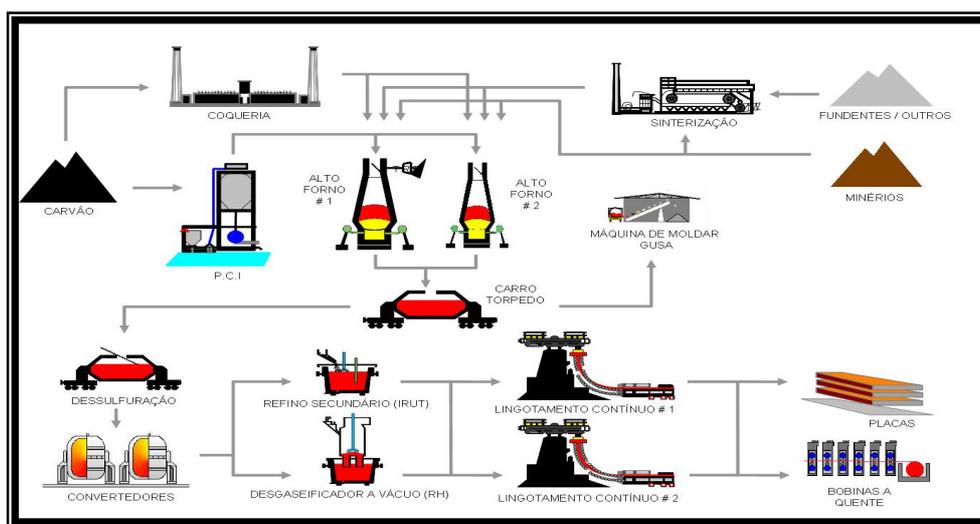


Figura 3.2 - Fluxograma de produção de uma usina siderúrgica integrada
Fonte: CST, 2006.

3.1.1 Coqueria - coqueificação do carvão mineral

O coque metalúrgico é um produto carbonoso, resultante do aquecimento do carvão mineral na ausência de ar, com elevada resistência mecânica, utilizado como combustível, redutor, sustentador e permeabilizador da carga do alto forno.

A coqueria é a unidade onde ocorre a transformação do carvão mineral em coque. O coque é um combustível sólido e uma fonte de carbono empregado para fundir e reduzir o minério de ferro. A produção do coque ocorre através da destilação de misturas de carvões em baterias de fornos que são selados e aquecidos a altas temperaturas por períodos de 14 a 36 horas. O calor é frequentemente transferido de um forno a outro com a finalidade de reduzir o consumo de energia. Após o período da coqueificação, o produto é desenformado e levado para uma torre de resfriamento com água onde ocorre o seu resfriamento brusco. Após o apagamento, ele é utilizado diretamente nos altos fornos ou estocado para posterior uso. Nos altos fornos, o coque exerce dupla função, como redutor dos óxidos de ferro e como fonte de energia térmica do processo. No processo de coqueificação, há a geração de gases que, após resfriamento e tratamento são distribuídos para utilização na usina.

A Figura 3.3 mostra o fluxograma de produção de uma coqueria.

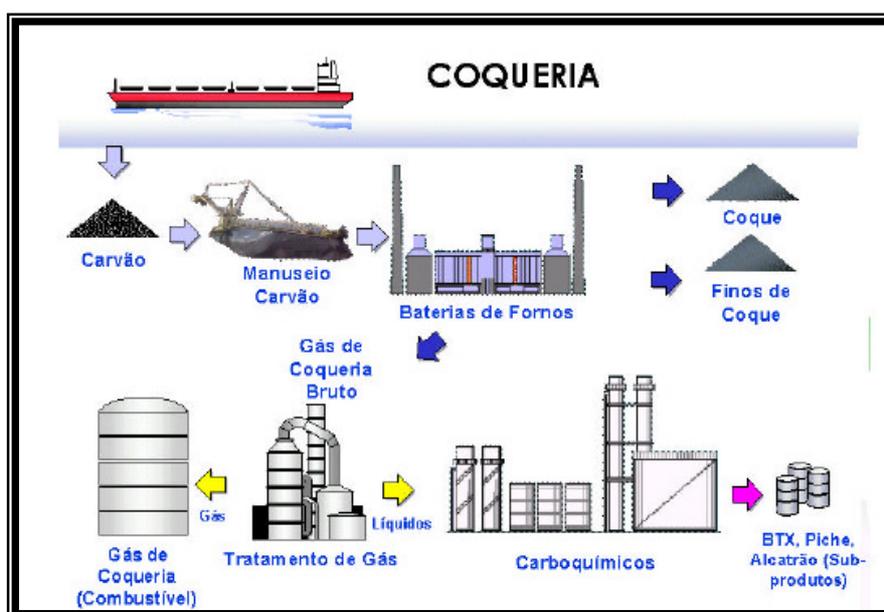


Figura 3.3 - Produção do coque metalúrgico
Fonte: LENZ e SILVA, 2004.

3.1.2 Sinterização

O síter é um aglomerado semi-fundido de minério de ferro fino e fundentes que constitui em média, de 70 a 80% da carga do alto forno.

A sinterização é a unidade onde ocorre a aglomeração a quente do minério de ferro fino, com outros materiais também finos, tais como calcário, coque, rejeitos internos e externos de processo, como pós de altos fornos e aciaria, escórias de aciaria, lama de aciaria e altos

foros, numa massa porosa, pela fusão incipiente, causada pelo calor resultante da queima de um combustível (coque) a elas adicionado.

Há a colagem das partículas sob condições em que a fusão ainda não ocorre, ou em que é impedida a fluidização de toda a camada, pois o aquecimento à temperatura de fusão é muito curto. O produto obtido é o sinter que é uma fonte metálica para carregamento nos altos foros e que possui características físico-químicas definidas e apropriadas à operação desses equipamentos.

A Figura 3.4 mostra o fluxograma esquemático de uma sinterização.

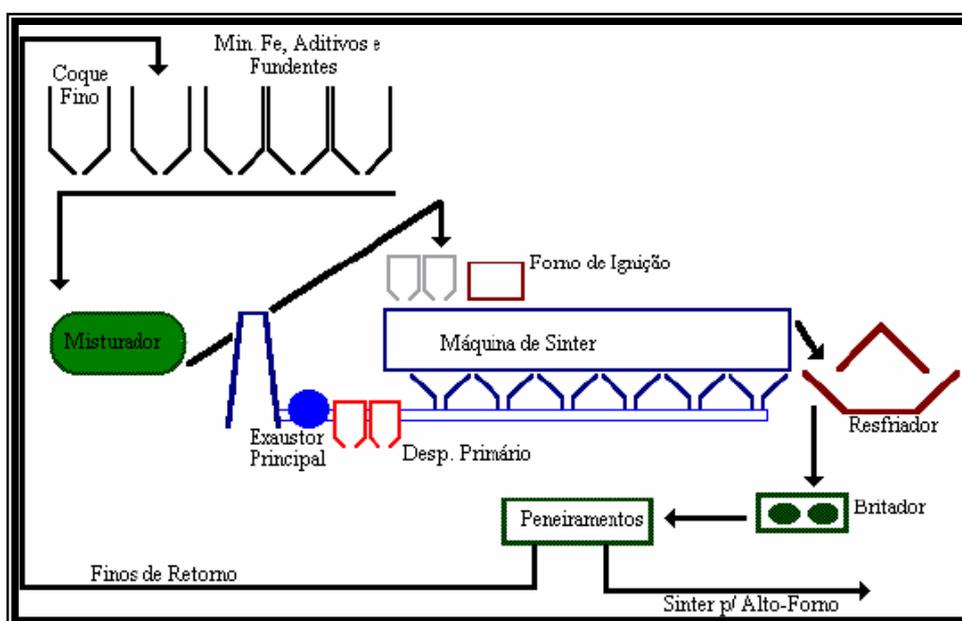


Figura 3.4 - Processo de obtenção do sinter
Fonte: LENZ e SILVA, 2004.

3.1.3 Alto Forno - produção do ferro gusa

O ferro gusa é uma liga ferro-carbono, com aproximadamente 95% de ferro, utilizado como principal matéria prima na produção do aço.

Na fabricação do ferro gusa, que é a matéria prima principal para a fabricação do aço na aciaria, são empregados os altos foros. O alto forno é um reator metalúrgico, e seu processo consiste na alimentação do forno com minério de ferro, sinter, coque metalúrgico, pelotas, fundentes e outros fluxantes. Ar quente é insuflado no interior do forno provocando a combustão do coque, proporcionando a energia (calor) e o carbono necessários para produção do ferro gusa. Os fundentes, principalmente o calcário, e outros fluxantes adicionados, formam a escória, responsável pela remoção das impurezas do ferro gusa.

A Figura 3.5 mostra o fluxograma esquemático de produção do ferro gusa.

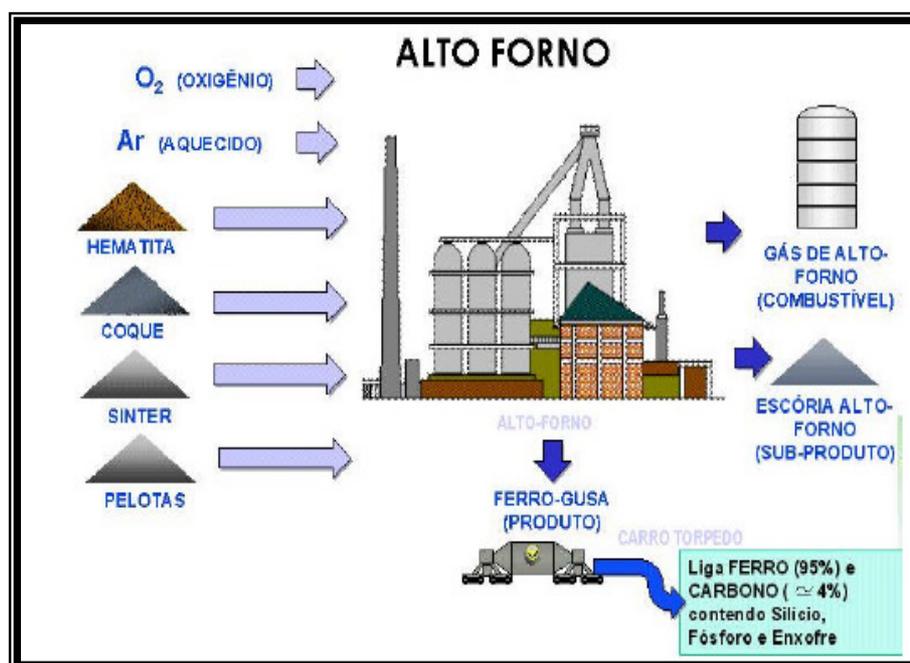
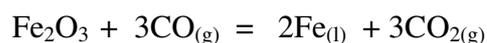
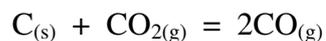
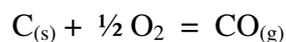


Figura 3.5 - Processo de produção do ferro gusa em Alto Forno
Fonte: LENZ e SILVA, 2004.

As principais reações químicas que ocorrem no interior do alto forno são:



Antes de chegar à aciaria, o gusa líquido transportado em carros torpedo, passa por uma estação de pré-tratamento, para remoção do enxofre por injeção através de uma lança, de agentes dessulfurantes, como carbureto de silício, cal e outros. Como resultado típico, temos um abaixamento do teor de enxofre de 0,040% para 0,002%.

3.1.4 Aciaria LD – processo de refino

O processo LD (iniciais das cidades austríacas Linz e Donawitz) é relativamente recente. Sua implantação em escala industrial ocorreu no final do ano de 1952, na Aciaria I da VOEST, com dois conversores de 30 t. A primeira instalação do hemisfério sul foi a da Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira, inaugurada em 1957 (ARAÚJO, 1997).

O ferro gusa líquido proveniente dos altos fornos, é enviado aos conversores LD que são utilizados para o refino do gusa na obtenção do aço.

O processo utiliza oxigênio gasoso para realizar o refino do gusa líquido, reduzindo os teores de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, através da oxidação desses elementos.

O oxigênio de alta pureza, insuflado através de lança refratária queima o carbono e o silício presentes no gusa líquido, ocasionando uma elevação da temperatura. Os fundentes e os fluxantes (CaO, CaO.MgO e CaF₂) são adicionados para a formação da escória, responsável pela remoção das impurezas presentes na massa líquida. Finalmente são adicionados os ferros-liga com o objetivo de atingir determinadas características no produto final.

Podem ser citadas como principais vantagens do processo LD a rapidez na transformação do gusa líquido em aço e o reaproveitamento da sucata de recirculação interna.

Conforme o Anuário Estatístico do IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia, a produção brasileira de aço bruto, usando o processo LD, atingiu em 2005 o valor de 24.650×10^3 t, ou seja, 78% do total.

Vancini (2005) informa que o índice médio de geração de escória de aciaria das usinas que utilizam o processo LD é da ordem de 113 kg/ t de aço líquido produzido.

Se considerarmos a produção acima mencionada de 24.650×10^3 t, uma quantidade de escória de aciaria LD da ordem de 2.785×10^3 t foi gerada no Brasil naquele ano.

A escória ao ser vazada do conversor é resfriada ao ar livre para sua solidificação. Essa escória, normalmente, carrega consigo uma quantidade de material metálico. Esse material é então submetido a uma separação magnética possibilitando seu posterior aproveitamento no próprio conversor.

A Figura 3.6 mostra o fluxo de produção de uma aciaria de usina integrada com um convertedor a oxigênio (LD), degaseificador RH, forno panela e lingotamento contínuo.

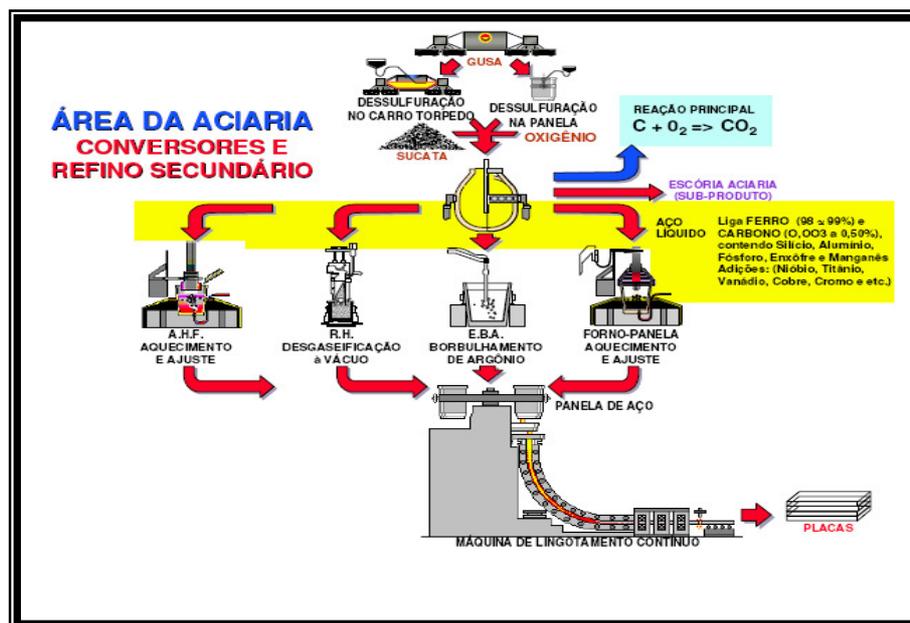


Figura 3.6: Fluxo de produção de uma Aciaria LD
Fonte: LENZ e SILVA, 2004.

3.1.5 Degaseificação e Forno Panela - metalurgia secundária

Estas duas unidades são consideradas de balanço entre os convertedores e o lingotamento contínuo. Aqui são feitos ajustes da composição química e da temperatura.

Dependendo dos tipos e especificações dos aços a serem fabricados, são imprescindíveis na configuração das usinas modernas. Como balanço entre convertedor e o lingotamento contínuo, têm a função muito importante de permitir um número maior de sequenciamento de corridas, aumentando o rendimento da aciaria.

3.1.6 Lingotamento Contínuo – solidificação do aço líquido

Consiste este processo no vazamento do aço líquido em um molde de dimensões definidas, seguido de um resfriamento rápido e controlado, possibilitando que a solidificação ocorra dentro dos parâmetros previstos e especificados. Esse processo de solidificação substitui o lingotamento convencional em lingotes, aumentando significativamente o rendimento metálico da aciaria.

3.1.7 Aciaria Elétrica

No mesmo Anuário Estatístico do IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia, de 2005, a produção brasileira de aço bruto, usando esta tecnologia, correspondeu a 6.959×10^3 t, ou seja, 22% do total.

A fabricação de aço via utilização de sucata metálica, fundida em FEA – Forno Elétrico a Arco, é denominada de processo semi-integrado. A carga metálica além do gusa sólido, emprega o ferro-esponja, os fundentes e os fluxantes para formação da escória, responsável pela remoção das impurezas presentes no aço líquido.

Os fornos elétricos a arco (FEAs) vêm sendo utilizados nas siderúrgicas modernas apenas como vaso fusor, isto é, todo o refino do aço (ajustes de composição química e de temperatura) é feito nos fornos panela, mais eficientes em termos energéticos, liberando os FEAs para aumentar a produção das aciarias.

A Figura 3.7 mostra um fluxograma simplificado da produção de aço em uma usina semi-integrada.

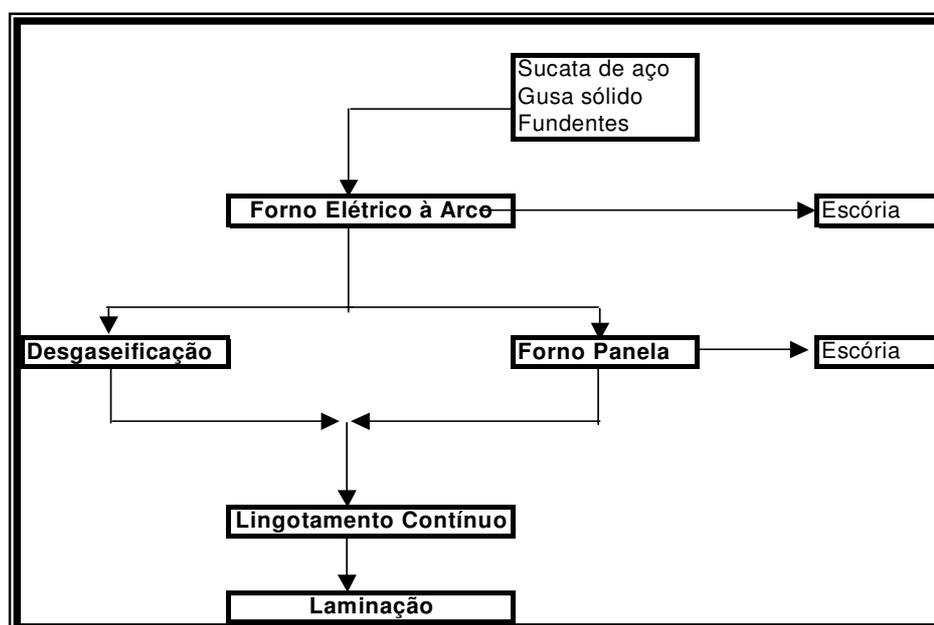


Figura 3.7 - Fluxograma simplificado de uma usina semintegrada

A operação de um FEA se inicia com o carregamento da cal, cuja finalidade é forrar a soleira do forno minimizando os danos aos refratários pelo impacto da sucata carregada em seguida. Essa carga de sucata deve ser bem preparada dentro do cesto, colocando-se sucata mais leve no fundo, para não danificar os refratários.

Completado o carregamento, abaixam-se os eletrodos abrindo-se o arco elétrico formado entre a carga metálica e os eletrodos de grafita ou carvão amorfo iniciando a fusão da carga metálica (POLISSENI, 2002).

A presença de oxigênio nos óxidos da sucata, no minério de ferro, na carepa (óxido de ferro) ou ainda no oxigênio soprado no forno, produz a fervura do banho líquido cujo objetivo é remover os elementos prejudiciais à qualidade do aço, tais como o fósforo, o nitrogênio e as inclusões não metálicas. A escória gerada nessa fase do processo é denominada oxidante

A escória oxidante é então retirada parcialmente, para a formação de uma nova escória denominada espumante. Essa escória é formada pela adição de carbono, e sua principal finalidade é a proteção dos refratários das paredes, redução das perdas de calor por irradiação e redução do consumo de eletrodos. Como consequência, maior potência no forno pode ser usada, reduzindo o tempo de fusão.

Faz-se então a retirada da escória, com o basculamento rápido do forno para trás, deixando-a escorrer livremente até o momento em que se percebe a presença de metal na corrente líquida. Fornos mais modernos possuem um furo excêntrico de vazamento, que melhora enormemente essa operação ficando a escória retida no forno.

A produção média de escória nas aciarias elétricas é de 140 kg/t de aço bruto (Vancini, 2005). Portanto, para uma produção de aço em 2005 de $7,0 \times 10^6$ de toneladas, foram geradas cerca de 980 mil toneladas de escória nessas aciarias.

3.2 Origem das escórias de aciaria

Escórias são geradas em alguns dos estágios do processo siderúrgico: no alto forno, na aciaria LD, na aciaria elétrica e na metalurgia secundária. Devido ao emprego de altas temperaturas nos diferentes processos, em torno de 1500 – 1600°C, as escórias não contêm nenhuma substância orgânica.

O processo de fabricação do aço na aciaria é considerado de alta tecnologia, com operações muito bem controladas, para que se obtenha um produto que satisfaça exigências muito rígidas do mercado consumidor.

A escória de aciaria é, portanto, um resíduo da fabricação do aço. É produzida durante o processo de refino do aço dentro dos fornos de elaboração do aço. A escória ocorre como

líquido fundido e é uma solução complexa de silicatos e óxidos que se solidificam após o resfriamento. Portanto, a escória de aciaria é obtida como resultado de um processo muito bem controlado, objetivando a sua obtenção adequada ao mercado de consumo.

Toda a produção mundial hoje em dia é praticamente feita em usinas integradas que usam o processo a sopro de oxigênio LD e usinas semintegradas, que usam os fornos elétricos a arco (FEAs).

No final do processo de refino, o aço líquido é vazado para uma panela, ao mesmo tempo em que a escória é retida no vaso do convertedor e vazada posteriormente para um pote de escória.

Como a quantidade de diferentes tipos de aço produzida é muito grande, as propriedades das escórias obtidas podem variar grandemente. Os graus de aço fabricados podem ser de alto, médio e baixo teor de carbono. No caso dos aços de alto teor de carbono, para que ocorra sua redução, são necessárias maiores quantidades de fundentes para a remoção das impurezas do aço líquido, produzindo um volume maior de escória.

Portanto, muitos tipos diferentes de escória são produzidos nas aciarias. A primeira escória produzida é denominada de escória do forno ou escória de vazamento, que representa a maior quantidade.

O aço vazado do forno é transferido em uma panela, para o estágio de refino (metalurgia secundária), com o objetivo de aprofundar a remoção das impurezas ainda presentes no aço líquido, a correção da temperatura e ainda a adição de ferros-liga para a obtenção da composição química especificada. Essa operação recebe o nome de refino de panela, pois a operação é completada dentro da panela (forno panela). Durante a operação de refino outra escória é produzida pela adição de outros fundentes. Essa nova escória, denominada de escória de panela, combina-se com a porção daquela proveniente do convertedor ou do forno elétrico a arco, auxiliando na absorção dos produtos da desoxidação (inclusões endógenas), isolamento térmico do aço líquido e proteção dos refratários.

Devido à grande quantidade de fluxantes utilizada no processo de metalurgia secundária, as propriedades dessas escórias, denominadas sintéticas, são bem diferentes daquelas das escórias produzidas no convertedor (refino primário), o que as torna, geralmente, não apropriadas para utilização como agregados, para algumas aplicações específicas. Essas

escórias devem ser segregadas para evitar a contaminação das escórias primárias, estas, apropriadas ao uso como agregados.

A escória de limpeza é outro tipo comumente encontrado nas aciarias, e é constituída normalmente, de restos de escória que caem no chão da planta e outros vários estágios da operação, ou então a escória retida após o esgotamento do aço após o lingotamento contínuo.

Como o aço, a escória de aciaria deve ser tratada como um produto, durante todas as etapas do processo de fabricação deste. Pedacos de tijolos refratários, eletrodos e sucata de aço, devem ser removidos.

A Figura 3.8 mostra o fluxo de geração e tratamento da escória de aciaria de uma das usinas siderúrgicas brasileiras.



Figura 3.8 - Geração e tratamento da escória de aciaria
Fonte: SILVA, 2006.

A Figura 3.9 mostra a distribuição percentual dos tipos de escórias de aciaria na Europa em 2004, para um total de 15,2 milhões de toneladas.

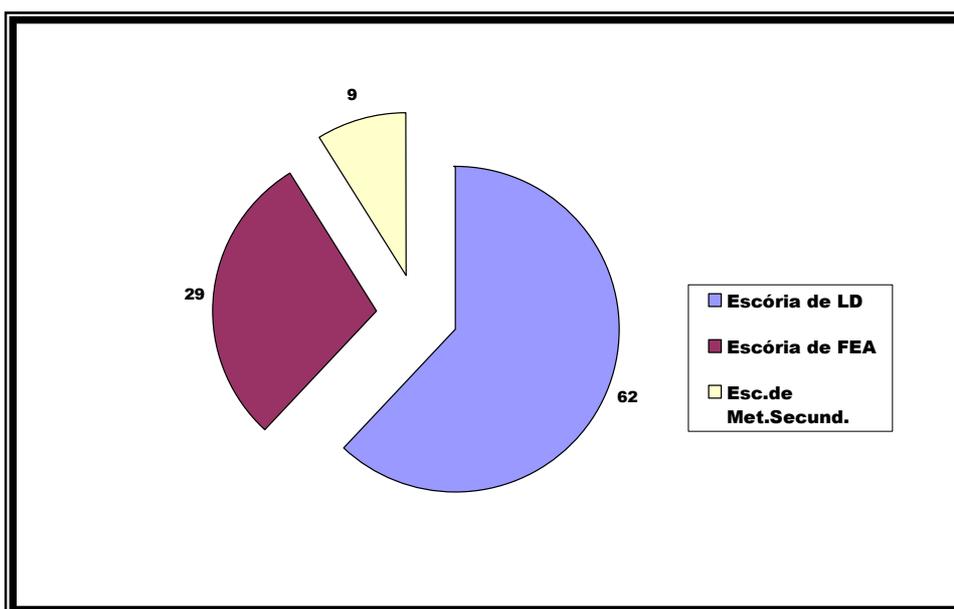


Figura 3.9 - Produção de escórias de aciaria na Europa em 2004 (%)
Fonte: EUROSILAG, 2006.

3.3 Beneficiamento das escórias de aciaria

Durante a produção da escória de aciaria, são necessários procedimentos de controle de qualidade da operação de forma a garantir que o entulho de tijolos refratários, madeira, pedras e outros fragmentos, não sejam incorporados à escória.

Após o seu resfriamento, a escória de aciaria é processada (beneficiada) para obter agregados finos e grossos que serão usados em diferentes tipos de aplicação.

O processamento tem início por uma separação magnética, quando a sucata ferrosa é recuperada e encaminhada posteriormente para utilização como carga metálica, ou no alto forno ou na aciaria.

A Figura 3.10 mostra a escória bruta, como recebida no pátio da planta de beneficiamento.



Figura 3.10 - Escória bruta de aciaria
Fonte: CST, 2006.

A britagem, o peneiramento e a separação magnética são procedimentos indispensáveis na obtenção de um agregado de escória de qualidade, seja ele fino ou grosso.

A Figura 3.11 mostra a planta de beneficiamento de escória de aciaria: a correia transportadora e a separação magnética da mesma planta.



Figura 3.11 - Planta de beneficiamento da escória
Fonte: CST, 2006.

A Figura 3.12 mostra parte da sucata metálica recuperada após beneficiamento e que será retornada ao processo produtivo do aço. Este valor representa aproximadamente 30% em peso (ARAÚJO, 1997).



Figura 3.12 - Sucata metálica recuperada
Fonte: CST, 2006.

Como forma de controlar a instabilidade volumétrica da escória, resultante da presença de óxido de cálcio e óxido de magnésio livres e potencialmente hidratáveis, faz-se a escolha daquelas que possuam teores mais baixos desses óxidos. Faz-se então o processo de “envelhecimento da escória”, que consiste em molhá-la por um determinado período de tempo permitindo assim a hidratação desses óxidos livres. Homogeneidade física é requisito importante nos agregados de escória e as siderúrgicas devem garantir que ela seja obtida.

A Figura 3.13 mostra o montante da escória recuperada e sua utilização após beneficiamento.



Figura 3.13 - Utilização da escória de aciaria
Fonte: CST, 2006.

3.4 Propriedades das escórias

De acordo com o tipo de aciaria (LD ou FEA), do controle do processo de fabricação do aço, dos procedimentos de processamento da escória após resfriamento e de sua estocagem, pode-se obter uma gama muito ampla de agregados de escória, com variações consideráveis de suas

propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Dessa forma, na utilização dos agregados obtidos, deve-se levar em consideração a origem da escória e as variáveis de processo na aciaria.

3.4.1 Propriedades físicas

Proctor et al. (2002) afirmam que as partículas de escória de aciaria possuem uma forma acentuadamente angular e uma textura superficial grosseira o que as permite se intertravarem. Possuem também uma massa específica que é mais elevada que a dos agregados naturais e um moderado índice de absorção de água. Por possuírem uma textura superficial mais porosa quando comparados aos agregados naturais, eles são mais suscetíveis à retenção de umidade. A combinação desse poder de retenção de água com a presença de óxidos hidratáveis provoca a instabilidade volumétrica. Outro fator desfavorável associado à maior quantidade de poros é o consumo maior de cimento asfáltico. A Tabela 3.2 mostra os valores especificados para propriedades físicas das escórias de aciaria a serem aplicadas em camadas de pavimento.

Tabela 3.2 - Valores de propriedades físicas das escórias de aciaria

Propriedade	Valor
Massa específica (g/cm ³)	3,0 – 3,5
Massa unitária (kg/dm ³)	1,6 – 1,7
Absorção de água (% em peso)	1% a 2%

Fonte: DNER, 1994.

3.4.2 Propriedades químicas

A composição química das escórias é expressa usualmente em termos de óxidos simples, calculados das análises dos elementos pelo método de fluorescência de raios-X. A Tabela 3.3 mostra as faixas de compostos presentes nas escórias de aciaria, para as diferentes usinas siderúrgicas brasileiras.

Tabela 3.3 - Composição química de escórias de aciarias LD e elétrica no Brasil

Tipo se Escória	CaO	MgO	SiO₂	Al₂O₃	Fe Total	S (total)	P₂O₅	Basicidade
Aciaria LD	36 - 46	5 - 12	11 - 16	1 - 4	14 - 22	0,1 - 0,3	1,0 - 2,5	> 3,00
Aciaria Elétrica	28 - 50	4 - 17	8 - 25	2 - 13	10 - 28	0,1 - 0,3	0,2 - 0,7	~ 3,00

(*) relação (CaO + MgO)/ SiO₂

Fonte: ARTHUR D. LITTLE e SETEPLA, 1999.

As escórias provenientes das diversas usinas que utilizam o mesmo processo LD, têm composições químicas semelhantes aos apresentados na Tabela 3.3, mas nem todas são adequadas para aplicação como agregados. De maior importância, é a forma mineralógica da escória que depende diretamente do processo de produção do aço e da sua taxa de

resfriamento. De acordo com esses dois fatores, serão formados compostos cristalinos tais como silicato dicálcio ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), ferrita dicálcica ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$), merwinita ($3\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$), aluminato de cálcio ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e algum CaO e MgO (periclásio) livres. A ocorrência desses compostos depende do tipo de processo empregado na aciaria, se LD ou FEA.

Segundo Motz (2000), CaO e MgO livres são os componentes mais importantes na utilização de escórias de aciaria na engenharia de construção civil. A estabilidade volumétrica da escória depende fundamentalmente dos teores de CaO e MgO livres. Portanto, quanto maior esses teores, maior a instabilidade volumétrica da escória. Explica-se esse fenômeno de instabilidade da escória pela hidratação dos referidos óxidos. O CaO hidrata-se rapidamente, causando mudanças de volume em curto prazo (semanas), enquanto o MgO hidrata-se mais lentamente, podendo levar anos para se desenvolver. A expansão volumétrica provoca desintegração dos agregados da escória e conseqüentemente perda de resistência.

As escórias de aciaria, com elevado teor CaO livre na composição química, quando expostas à umidade podem transformar o CaO, em $\text{Ca}(\text{OH})_2$, e posteriormente CaCO_3 . Este fenômeno é denominado de formação da tufa. Segundo Silva et al., 2000, essa expansão volumétrica pode alcançar 14%. Alguns fatores podem acelerar as reações de formação da tufa tais como: a reatividade da escória com a água, a área superficial das partículas da escória, a porosidade superficial das partículas, a quantidade de água à qual as partículas de escória estão expostas e o teor de CO_2 na atmosfera.

Kuehn et al. (2000) informam sobre o processo de tratamento da escória desenvolvido em conjunto pela Thyssen Krupp Stahl AG e Forschungsgemeinschaft Eisenhuettenschlacken e.V.. Consiste em levar a escória proveniente do forno para uma estação própria e injetar areia quartzosa e oxigênio o que provoca uma oxidação exotérmica do ferro metálico e do ferro divalente, liberando energia. Esta energia é suficiente para dissolver grandes quantidades de sílica sem que a temperatura caia. A viscosidade da escória diminui drasticamente, alterando as condições cinéticas, o que possibilita a dissolução do CaO livre.

A escória de aciaria é alcalina, com o pH quando medido em solução aquosa variando entre 8 e 12. O lixiviado proveniente da escória de aço pode apresentar pH maior que 11 valor este que pode ser corrosivo para os tubos galvanizados ou com revestimento de alumínio, quando colocados em contato direto com a escória.

3.4.3 Propriedades mecânicas

Nascimento (2003) informa que as escórias de aciaria são materiais muito duros e resistentes. O ensaio que permite avaliar a sua resistência para uso em pavimentação rodoviária é o Abrasão Los Angeles (Desgaste Los Angeles). Esse ensaio procura reproduzir as condições de trabalho de um agregado numa camada granular de pavimento cuja especificação no DNIT (DNER – ES – 303/97) é de 55% máximo. Os valores obtidos na sua pesquisa de 10 a 17% permitem concluir que as escórias de aciaria são muito mais resistentes que a maioria dos materiais normalmente utilizados na construção das camadas granulares de pavimentos rodoviários.

3.5 Aplicações típicas das escórias de aciaria

Na citação de Geiseler (2000), o uso de escória oriunda dos processos de produção de ferro gusa e do aço remonta mais de 100 anos. No entanto, as primeiras informações sobre o uso de escória datam de 350 a.C. quando Aristóteles a usou como medicamento. Nos séculos seguintes ela tem sido usada principalmente como material de construção.

Montgomery e Wang apud Gumieri (2002) citam, na Austrália, o uso combinado da escória LD com a escória de alto forno e clínquer como matéria prima da fabricação do cimento. Descrevem que o CaO livre nas escórias LD pode ser absorvido pela escória de alto forno, reduzindo dessa forma, a sua instabilidade. Mencionam ainda que a proporção de escória LD deva ser entre 10 e 55% em relação à massa total dos materiais (escória de alto forno, clínquer e gesso) constituintes do cimento. A resistência do cimento composto é similar à do cimento comum, quando a quantidade de escória LD utilizada for, no máximo, 35% e a quantidade de clínquer for superior a 55% da massa total.

Ramakrishna et al (1997) estudaram em escala de laboratório, a aplicação da escória de aciaria para remoção de coloração provocada por tintas em águas residuárias. Justifica-se a utilização da escória de aciaria como substituta do carvão ativado no processo de adsorção das impurezas iônicas pelo fato de suas partículas possuírem alta porosidade, grande área superficial e elevada variedade de tamanhos.

Dongxue et al. (1997) e Shi e Qian (2000) apud GUMIERI (2002) citam que na China, os cimentos já são fabricados comercialmente com escórias de Aciaria LD resfriadas lentamente. Na fabricação desses cimentos, a escória de LD é misturada com escória de alto forno

granulada, clínquer, gesso e outras adições. Informam que aproximadamente 40% do volume total de escórias LD geradas na China são usados na fabricação de cimentos.

Li (1999) desenvolveu um novo método de tratamento para degradação do 4-clorofenol e seus componentes intermediários de oxidação. Os resultados experimentais mostraram que o 4-clorofenol e seus intermediários podem ser decompostos completamente pela utilização da escória de aciaria LD, com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), numa solução ácida ($pH = 2,8 \pm 0,2$). Os óxidos de ferro presentes na escória (FeO e Fe_2O_3), em solução ácida, são dissociados produzindo íons ferroso e férrico. Os íons ferrosos reagem com o peróxido de hidrogênio e formam o “Reagente de Fenton” que pode produzir os radicais hidroxilas (OH^\cdot), de alto poder oxidante para os compostos químicos orgânicos.

Proctor et al. (2002) conduziram um estudo sobre o potencial de risco à saúde humana associado à aplicação no meio ambiente (aterros, pavimentação de estradas, paisagismo) de escória de alto forno, de aciaria LD e de aciaria elétrica, utilizando a caracterização de 73 amostras. A análise determinou que nenhuma das aplicações atuais dessas escórias da indústria siderúrgica apresenta risco significativo à saúde humana ou ameaça para as fontes de águas subterrâneas.

Yan et al. (2000) pesquisaram a capacidade de neutralização ácida em longo prazo de uma escória de FEA. Concluíram que a capacidade de neutralização ácida da escória de aciaria é diferente para diferentes níveis de pH. A maioria dessa capacidade é consumida na faixa de pH acima de 8,5. Os elementos que mais contribuem para a capacidade de neutralização da escória são o Ca e o Mg presentes na escória.

Gumieri (2002) estudou a viabilidade técnica de utilização de escórias de Aciarias LD como adição em cimentos. Utilizando amostras de escória resfriadas lentamente e também com resfriamento brusco, concluiu que este elimina a expansão da escória e o desenvolvimento das propriedades pozolânicas/cimentícias da escória granulada.

Ziemkiewicz e Simmons (2002) reportam que várias escórias de aciaria com diferentes capacidades de neutralização, foram lixiviadas com água ácida de mina de qualidade conhecida. O objetivo do trabalho foi determinar a habilidade da escória que possui alta alcalinidade, elevar a alcalinidade das águas ácidas para promover a remoção dos metais presentes nessas. Os resultados dos testes mostraram que uma quantidade muito pequena de metais foi encontrada nos lixiviados da escória, mesmo sob condições ácidas. Esses

resultados indicaram que muitos dos metais presentes na escória permaneceram ligados e na forma insolúvel, apesar da variação do pH.

Ahn et al. (2003) testaram vários resíduos da indústria siderúrgica, incluindo a escória de aciaria LD, como forma de tratamento de águas de drenagem de minas, com alta concentração de arsênio (As). Foram construídas barreiras permeáveis reativas para o controle dos lixiviados subsuperficiais provenientes do conteúdo das barragens. A justificativa é que os resíduos da siderurgia geram pH na faixa de 9 a 12, produzindo altas concentrações de cálcio. O mecanismo de remoção é feito através da formação de compostos de cálcio e arsênio ao invés de compostos de óxido de ferro.

Maslehuddin e Sharif (2003) relatam os resultados dos testes feitos com agregados de escórias de FEA, comparando-os com as características dos agregados naturais de calcário. Os resultados indicam que algumas das propriedades físicas e a durabilidade do concreto feito com agregados de escória de aciaria foram superiores às daquelas do concreto feito com agregados naturais. Salientam ainda, como importante, a possibilidade de uso desses agregados de escória de aciaria na fabricação de estruturas de maior responsabilidade em regiões carentes de agregados naturais.

Shih et al. (2004) em Taiwan, investigaram a possibilidade de combinação de argila com escória de produção de aço inoxidável para produção de tijolos. As propriedades avaliadas no produto foram a absorção de água, a resistência à compressão, as alterações dimensionais pela secagem e pela temperatura de queima. Foram feitas várias formulações utilizando de 0 a 30% de agregado de escória na mistura com argila. Os resultados obtidos nos tijolos no ensaio de compressão indicam que eles satisfazem os critérios das respectivas normas do país.

A Figura 3.14 mostra o volume total de geração de escória na Europa em 2004, foi de aproximadamente 15,0 milhões de toneladas, sendo que 72% do volume produzido são utilizados em aplicações qualificadas e desenvolvidas nos últimos 35 anos (EUROSLAG, 2006).

A utilização das escórias de aciaria é ainda muito menor do que a escória de alto forno. Cerca de 11% da escória de aciaria produzida na Europa, ainda são dispostas em aterros. Entretanto, estes valores variam de país para país, evidentemente, dependendo da qualidade das escórias produzidas e também dependendo das condições de disponibilidade e mercado dos agregados naturais.

Em alguns países europeus, o índice de utilização das escórias de aciaria pode ultrapassar a 90% (EUROSLAG, 2006).

A porção não metálica da escória passa por peneiramento e classificação e é então comercializada de acordo com as necessidades do mercado para algumas aplicações típicas.

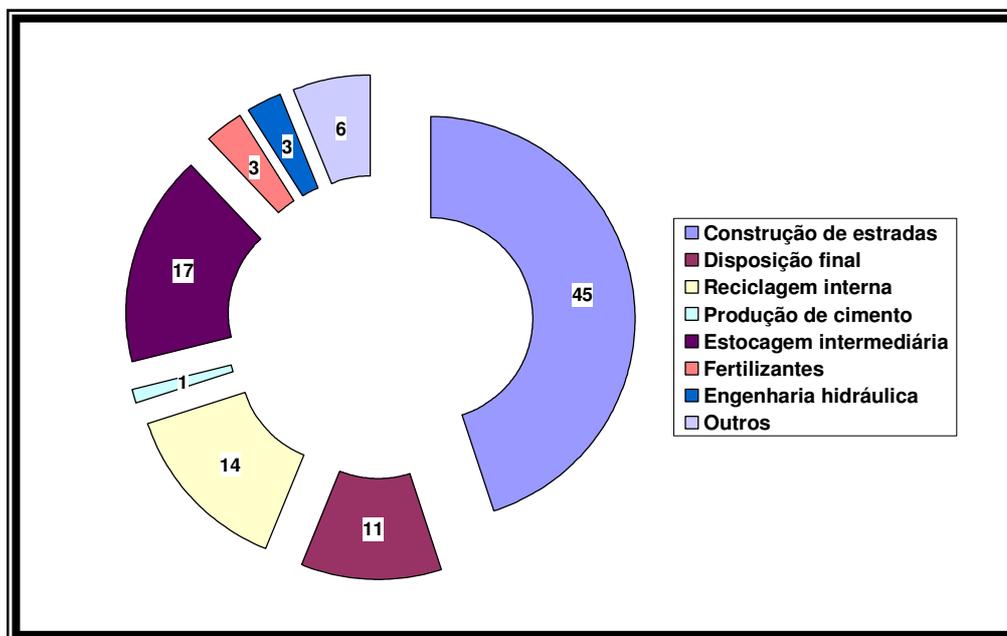


Figura 3.14 - Utilização de escórias de aciaria na Europa em 2004 (%)
Fonte: EUROSLAG, 2006.

Os principais campos de aplicação das escórias de aciaria são:

- a produção de agregados para a construção de estradas, empregados tanto na camada de asfalto, como aquelas camadas de estabilização dos solos. A utilização da escória LD proporciona um significativo aumento na resistência à abrasão, pois as partículas expostas resistem satisfatoriamente às solicitações mecânicas, ampliando de forma consistente a vida útil do pavimento (LANZELLOTTI et al., 2005).
- o lastro de ferrovia;
- o uso na agricultura, como fertilizante, quando o teor de P_2O_5 é maior que 16%;
- o uso na agricultura, como corretivo de solo, no controle da acidez. Neste caso, a escória deve ser resfriada bruscamente, o que permite obter CaO e MgO solúveis no solo;

- o uso na produção de cimento, somente com correção de alumina, e submetida a um resfriamento brusco, ou seja, uma granulação similar àquela da escória de alto forno;
- a produção de lã de escória, através da refusão da escória;
- o uso interno nas usinas siderúrgicas como fonte de CaO, FeO, MnO e Al₂O₃ nos altos fornos. De acordo com Isoda et al. (2001) é mais lucrativo do que utilizá-la após estabilização, como material para construção de estradas;
- o uso em aterros nas usinas ou em áreas de seu entorno.
- a aplicação em construções hidráulicas: as principais aplicações da escória de aciaria, nas construções hidráulicas, são para a regularização do fluxo do curso d'água e proteger suas margens, através de construção de nervuras, defletores e filtros de multicamadas (JOOST, 2002).

As Figuras 3.15 e 3.16 mostram essas aplicações da escória de aciaria nas construções hidráulicas na Alemanha.

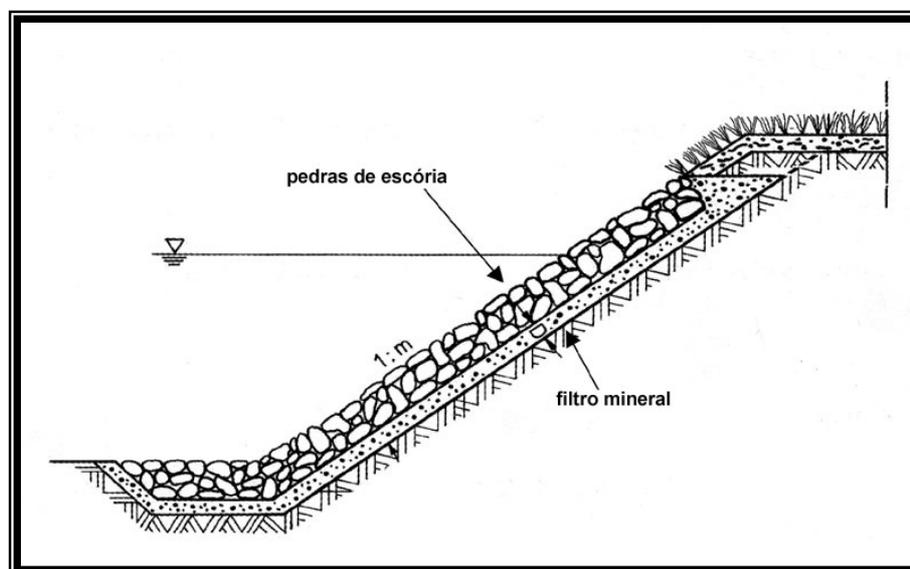


Figura 3.15 - Estrutura de multicamadas de filtro para proteção de margens
Fonte: JOOST, 2002.

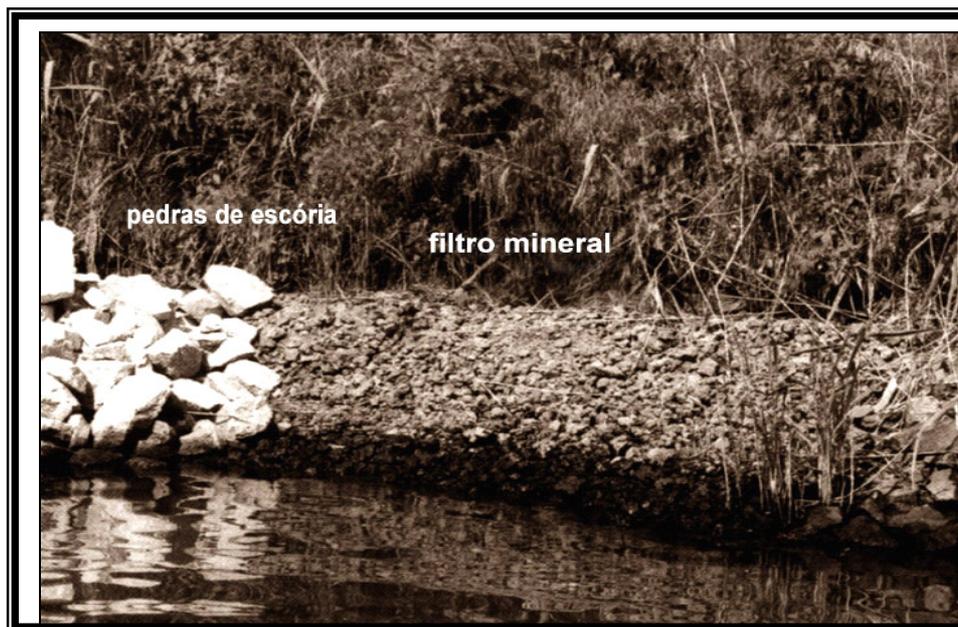


Figura 3.16 - Estrutura com pedras e filtro de escória no Rio Elba, Alemanha
Fonte: JOOST, 2002.

- a experiência da NKK no Japão na produção de “Marine Blocks”, que é um produto comercializado com marca registrada, é relatada por Tanabe e Nakada (2003). O gás CO_2 proveniente do gás da exaustão é injetado na escória líquida reagindo com o CaO que está presente nessa, formando carbonato de cálcio que envolve as partículas da escória e as retém ligadas. Paralelamente, são resolvidos dois problemas que sempre estiveram presentes no uso da escória de aciaria em ambiente de água salgada: a expansividade da escória e a elevação do pH da água.

Em abril de 1999, uma quantidade de blocos fabricados com escória de aciaria, cada um deles com uma seção de base quadrada com 1 m de lado e altura de 50 cm foram empilhados no fundo do mar para se investigar seu efeito sobre os organismos marinhos, conforme mostrado na Figura 3.17.

No processo de produção dos blocos marinhos o CO_2 é absorvido a uma taxa de 200 kg por tonelada de escória. Isto significa que 800.000 t de CO_2 seriam fixadas se fossem usadas 4 milhões de toneladas de escória de aciaria (30% do total produzido anualmente no Japão).

Esta aplicação proporcionaria uma contribuição significativa na prevenção do aquecimento global do nosso planeta.

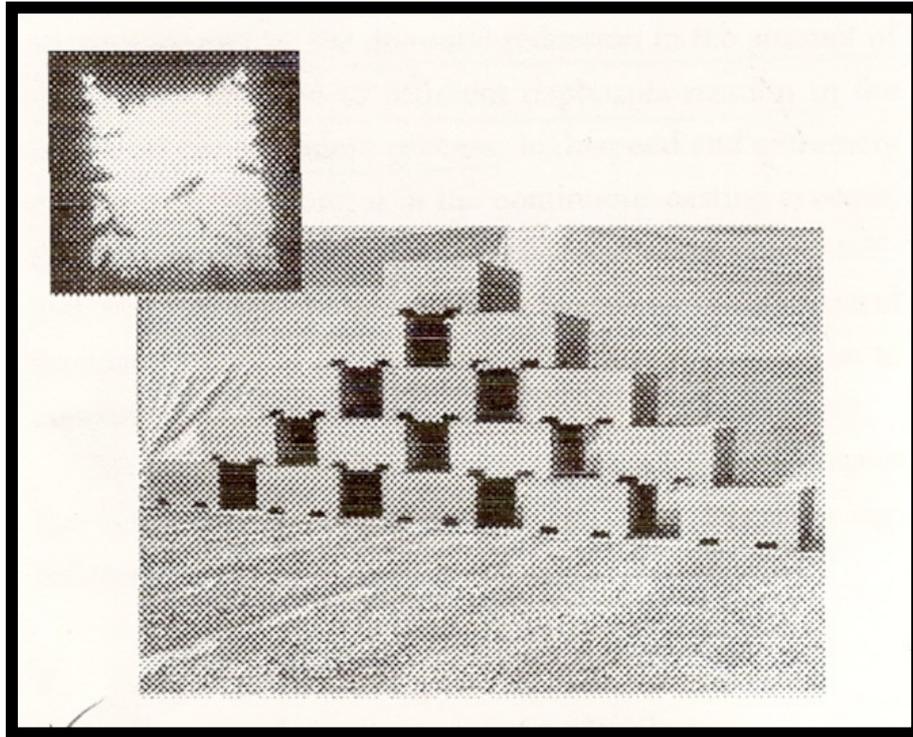


Figura 3.17: Pilha de blocos carbonatados de escória de aciaria
Fonte: TANABE E NAKATA (2003).

3.6 Materiais Refratários

Os materiais refratários são materiais naturais ou artificiais, geralmente não metálicos, mas não excluídos aqueles que contenham constituintes metálicos.

Os materiais refratários podem ser conceituados como materiais resistentes a elevadas temperaturas, apresentando ainda resistências adequadas a gradientes térmicos, ao desgaste mecânico e à corrosão química, por certo intervalo de tempo (VASCONCELOS).

Os refratários são produtos fundamentais para uma vasta gama de indústrias. De modo geral, qualquer processo que envolva altas temperaturas depende do desempenho de refratários.

Os refratários são utilizados nas indústrias siderúrgicas, nas de cimento, nas de vidro, na petroquímica. Além disso, devido à sua resistência à abrasão, à corrosão e ao choque térmico os refratários podem ser usados em outras indústrias mais específicas.

Para suportar essas solicitações citadas e em função de sua natureza foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes tipos de matérias primas isoladas ou misturadas.

Quanto à natureza química os refratários são classificados em (VASCONCELOS):

- refratários ácidos: contêm alto teor de sílica livre (SiO_2); os refratários de sílica (94 a 97% de SiO_2); refratários argilosos, que possuem de 40 a 80% de SiO_2 e os refratários de zirconita e carbeto de silício considerados refratários ácidos especiais;
- refratários básicos: são aqueles que possuem alta porcentagem de MgO ou CaO, na forma de doloma; refratários de magnésia, cromita ou forsterita são considerados de fraca basicidade;
- refratários neutros: refratários de carbono são considerados neutros por excelência; refratários de alta-alumina (> 50%) são considerados neutros com tendência para ácidos; refratários de cromita que também são considerados neutros com tendência para básicos.

A Tabela 3.4 mostra números da indústria de refratários no Brasil.

Tabela 3.4 - Produção brasileira de refratários

Número de empresas	43
Produção total (t x 1000)	458
<hr/>	
Refratários básicos (t x 1000)	
- Formados	104
- Não formados	80
Refratários não básicos (t x 1000)	
- Formados	180
- Não formados	94

Fonte: ABRAFAR, 2002/2003

A Figura 3.18 mostra o consumo de refratários pelos diferentes setores industriais. Como pode ser visto, a indústria siderúrgica é o maior consumidor destes produtos. Pela necessidade de fabricação de aços de alta qualidade e de baixo custo de produção, as indústrias de refratários têm sido impelidas a fazer grandes investimentos em instalações e em tecnologia para atender essa crescente demanda.

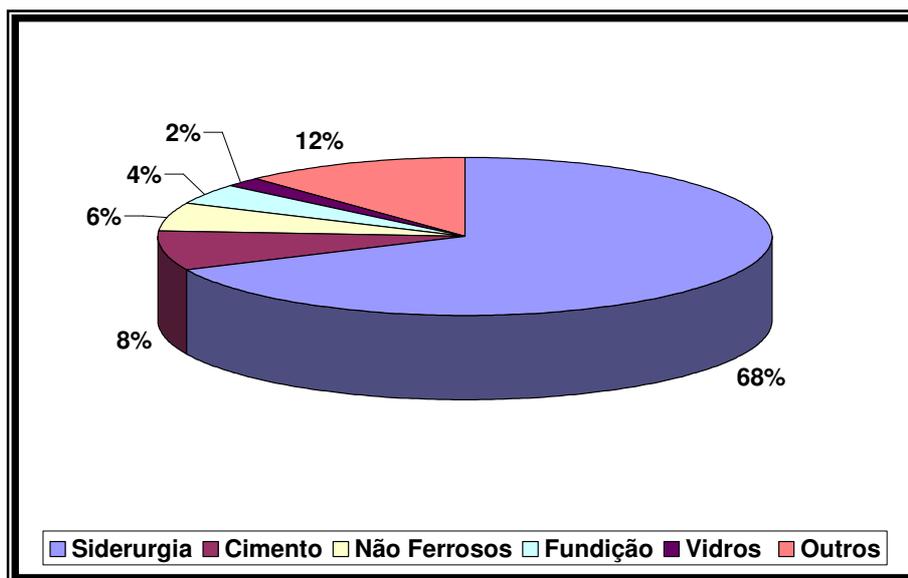


Figura 3.18 - Consumo de refratários por setor industrial
Fonte: MENEGAZZO, 1996.

Dependendo do seu estado físico, são classificados em moldados e monolíticos e conforme sua massa específica em densos ou isolantes.

A seleção do refratário ideal para cada aplicação depende, entre outros fatores, da temperatura do processo, da agressividade química, das ações físicas, enfim, de qual mecanismo físico-químico é mais predominante.

A constante evolução tecnológica na indústria de refratários, com produtos cada vez mais com desempenho superior, tem gerado, no entanto, uma redução no consumo específico (kg de refratário / t de aço) destes materiais. No entanto, esta tendência de redução do consumo específico vem sendo compensada pelo aumento do valor agregado destes mantendo assim, ou mesmo elevando o crescimento/faturamento das indústrias de refratário (MENEGAZZO, 1996).

A Figura 3.19 mostra a evolução do consumo específico de refratário no setor siderúrgico brasileiro.

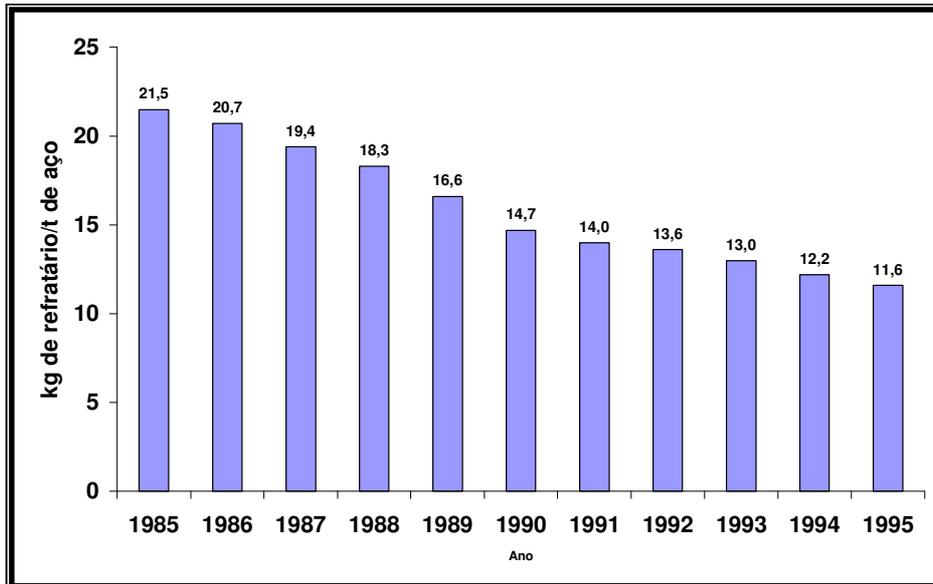


Figura 3.19 - Evolução do consumo específico de refratários na siderurgia brasileira.

Fonte: MENEGAZZO, 1996.

3.6.1 Concretos Refratários

Materiais refratários não-moldados, designados também por não-conformados ou monolíticos, adquirem a forma final quando aplicados. Esses refratários são usados como recebidos, secos ou após adição de algum agente reológico (água, plastificantes, aditivos especiais).

Um concreto refratário é um material cerâmico obtido pela mistura de agregados refratários, segundo uma distribuição granulométrica balanceada e de cimento refratário à base de aluminato de cálcio. Pode conter aditivos que cumpram funções diversas como, por exemplo, característica de pega hidráulica inicial. O teor de cimento empregado determina a quantidade de água necessária à moldagem.

Nas últimas décadas vem-se notando o crescimento vertiginoso da produção de refratários monolíticos (não moldados) em detrimento a de refratários moldados convencionais (tijolos). Cerca de 70% dos refratários monolíticos produzidos hoje são usados na siderurgia, o que é um volume superior aos 65% da produção de refratários na forma de tijolos que a siderurgia também consome (VASCONCELOS). Essa tendência está fundamentada nos seguintes aspectos (MENEGAZZO, 1996):

- processo de fabricação mais rápido, não necessitando de conformação e queima;
- redução do consumo de energia, pela ausência da queima;
- instalação rápida, permitindo revestir geometrias complexas com maior facilidade, já que podem ser vertidos, projetados, socados, rebocados, etc.;

- redução no tempo de parada dos equipamentos;
- reparos nos locais, com facilidade;
- custo de mão de obra reduzido;
- facilidade de abastecimento;
- características similares ou até superiores aos produtos conformados.

Os refratários monolíticos incluem as argamassas, as massas de socagem, massas de projeção, os concretos e outros.

Os concretos possuem inúmeras aplicações em engenharia, sendo em algumas delas utilizados com objetivos unicamente estruturais. Em outras, como revestimento refratário, sob condições severas de serviço a altas temperaturas.

A crescente demanda das indústrias siderúrgicas, petroquímicas e de cimento, por refratários monolíticos tem estimulado o desenvolvimento de diversas técnicas de instalação, com intuito de minimizar a introdução de defeitos no revestimento e atender às exigências específicas de cada tipo de equipamento. Tais exigências são determinadas, de um modo geral, pela região do equipamento que se deseja revestir, facilidade de acesso à região, disponibilidade de vibradores e mão de obra especializada. O custo, o formato do molde, entre outras exigências deve ser também levado em consideração.

Outro aspecto importante é o cálculo térmico. O concreto refratário sinterizado, em relação aos refratários convencionais moldados e ceramizados, apresentam como principal vantagem uma condutividade térmica da ordem de 30 a 50% menor, permitindo revestimentos mais delgados. Os refratários monolíticos são produtos não formados que podem ser fornecidos prontos para uso ou podem ser misturados com água e/ou aditivos químicos no local da aplicação.

De acordo com o modo de aplicação, os concretos apresentam características físico-químicas, a saber:

- vertido: após umidificação, o concreto é colocado no local de aplicação e acomodado com auxílio de instrumentos manuais;

- vertido-vibrado: depois de vertido, o concreto na forma ou local de aplicação, a acomodação é feita por um vibrador, preferivelmente de imersão;
- projetado: o concreto seco, ou pré-umidificado adequadamente, é carregado em uma máquina de projeção. Sua projeção desenvolve-se segundo técnica específica. Geralmente os concretos requerem um sistema de âncoras metálicas para sua sustentação;
- socado: após a umidificação, o concreto é compactado, com o emprego de compactadores pneumáticos.

Os concretos refratários podem ainda ser classificados de acordo com o teor de cimento de aluminato de cálcio (CA) (GRILLO, 1990):

- concretos convencionais: são aqueles com teor de cimento de aluminato de cálcio da ordem de 20 a 30% e necessitam de 8 a 15% de água para aplicação. Apresentam excelente resistência mecânica após secagem a 110° C, em razão de ligações hidráulicas, as quais são modificadas durante a fase de aquecimento;
- concretos de baixo teor de cimento: têm sua tecnologia baseada principalmente na utilização de matérias primas de rigoroso controle granulométrico e químico. O teor de cimento varia de 5 a 8%, o que reduz significativamente as impurezas e a quantidade de água necessária à sua aplicação. A associação desses fatores propicia melhora nas características do material tais como: aumento da refratariedade, aumento na resistência mecânica com a redução de defeitos microestruturais, conseqüentemente melhorando no seu desempenho;
- concretos de ultra baixo teor de cimento: a tecnologia utilizada na sua fabricação é a mesma empregada na fabricação dos concretos de baixo teor de cimento, porém, utilizam 1 a 3% de cimento de aluminado de cálcio. Esses concretos apresentam um aumento significativo dos níveis de resistência mecânica após tratamento térmico. Esse aumento de resistência deve-se à minimização dos defeitos internos do sistema, do empacotamento das partículas de forma eficiente e principalmente à redução da quantidade de água e à formação de um conjunto de fases mineralógicas ideais.

A Figura 3.20 apresenta o fluxograma dos processos de fabricação dos produtos monolíticos e dos produtos pré-moldados:

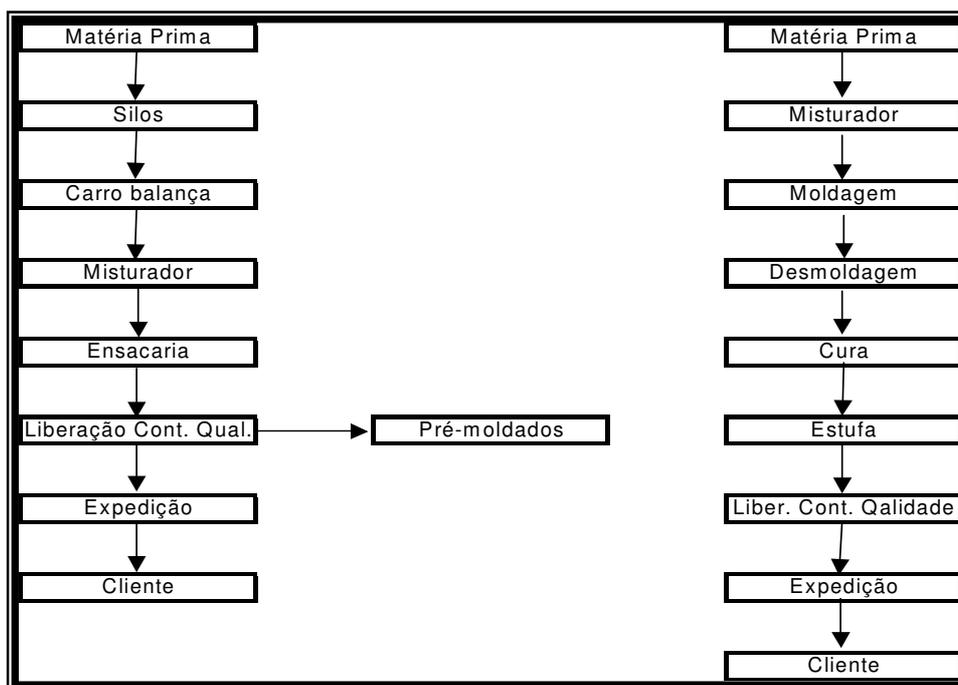


Figura 3.20 - Fluxograma da fabricação de produtos refratários monolíticos e pré-moldados.

Fonte: MAGNESITA, 2006.

Os principais produtos monolíticos são massa de tamponamento de furo de corrida de AF, massa de revestimento de canal de corrida de AF, massa de socagem e estampagem para reparo e revestimento de canal de corrida de AF, concretos para revestimento de fornos de fabricação de cimento Portland, concretos para pré-moldados de aciaria e carro torpedo.

A Tabela 3.5 mostra os índices de geração de resíduos de concretos refratários para uma determinada usina siderúrgica brasileira.

Tabela 3.5 - Geração de alguns resíduos de concretos refratários

Grupo	Equipamento	Geração
Concretos refratários monolíticos e pré-moldados	Canal principal de vazamento de gusa (CG)	0,35 kg de concreto / t de gusa
	Carro torpedo (CT)	0,032 kg de concreto / t de gusa
	Desgaseificador RH (RH)	0,050 kg de concreto / t de aço

Fonte: MAGNESITA, 2006.

A Tabela 3.6 apresenta as características de alguns exemplos de concretos refratários utilizados na siderurgia.

Tabela 3.6 - Características de alguns concretos refratários

Descrição	Aplicações principais	Composição química (%)					
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O
Carro Torpedo Concreto refratário sílico-aluminoso, de pega hidráulica, aplicado por colher ou vertedura e vibração. Temp. máx. de uso 1450°C	Em substituição aos tijolos sílico-aluminosos	42,00 mín.	47,00 máx.	3,00 máx.	3,00 máx.	7,00 máx.	-
Distribuidor Concreto refratário aluminoso de fluência livre	Revestimento permanente do distribuidor	66,00 mín.	31,00 máx.	2,70 máx.	2,50 máx.	-	-
Aciaria LD Concreto tradicional aluminoso com fibra metálica	Lança do convertedor	94,00/97,00	0,12 máx.	-	-	0,60 máx.	0,40 máx.

Fonte: MAGNESITA, 2006.

Apenas como informação, uma usina integrada que produza cinco milhões de toneladas de gusa/ano e quatro milhões de toneladas de aço/ano, geraria as seguintes quantidades de resíduos dos concretos refratários estudados:

- 0,35 kg de concreto CG/t de gusa x 5.000.000 t de gusa/ano = 1750 t
- 0,032 kg de concreto CT/t de aço x 4.000.000 t de aço/ano = 128 t
- 0,050 kg de concreto RH/t de aço x 4.000.000 t de aço/ano = 200 t

Alguns dos principais produtos pré-moldados são: snorkel para desgaseificador e para sistema de aquecimento de corrida por aluminotermia em refino secundário de aço; deltas/miols de abóbada de forno elétrico a arco; sedes de válvulas e plug para fundo de panela de transporte de aço; lanças para injeção de pó dessulfurante de gusa em carro torpedo; impeller para dessulfuração em panela de gusa; lanças de injeção de argônio, para borbulhamento do aço em substituição ao plug; lança de injeção de oxigênio para o sistema de aquecimento do aço por aluminotermia.

3.6.1.1 Exemplos de aplicações de concretos refratários na siderurgia

Os exemplos dessas aplicações são mostrados nas Figuras 3.21 a 3.26.

- Lanças de injeção de pós e gases:



Figura 3.21 - Lanças de aciaria
Fonte: MAGNESITA, 2004.

- Impeller Sistema KR de dessulfuração de gusa



Figura 3.22 - Peça antes do uso



Figura 3.23 - Peça após o trabalho

Fonte: MAGNESITA, 2004.

- Snorkel de Desgaseificador RH

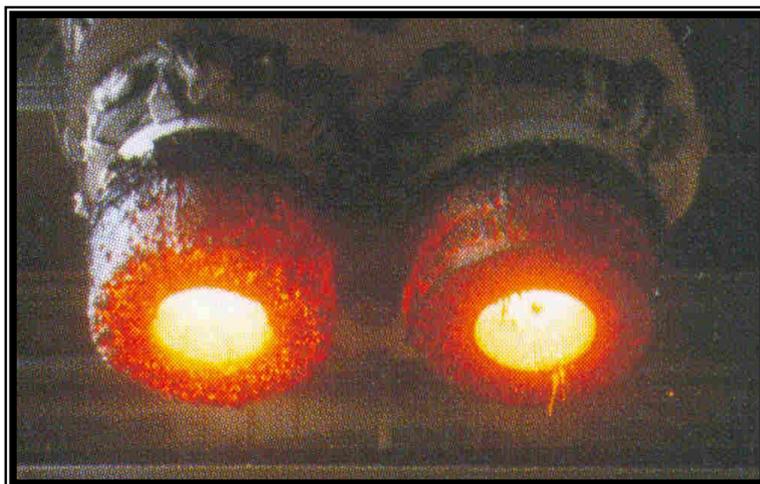
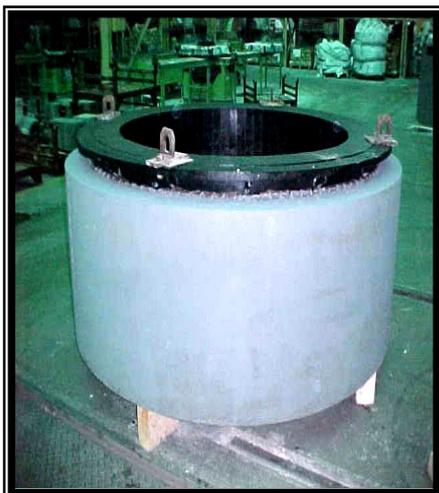


Figura 3.24: Peça antes do uso

Figura 3.25 - Peças após o trabalho

Fonte: MAGNESITA, 2004.

- Delta de Forno Elétrico à Arco (FEA)

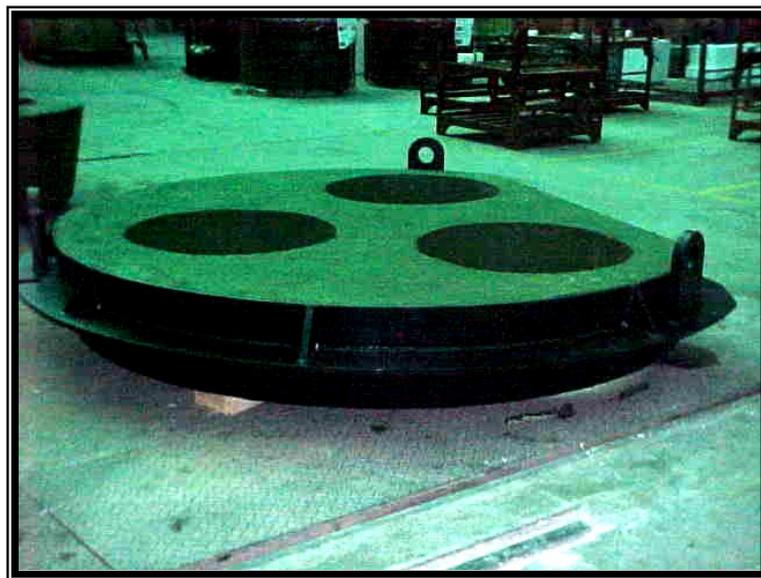


Figura 3.26 – Peça antes do uso

Fonte: MAGNESITA, 2004.

3.7 Concreto comum de construção civil

John (1999) apud Giffoni (2004) afirma que a construção civil é o ramo industrial responsável pelo maior volume de recursos naturais extraídos em estimativas que variam entre 15 e 50%, além de seus produtos serem grandes consumidores de energia. Assim, ela pode ser amplamente indicada para absorver um grande número de resíduos sólidos gerados em outros ramos de atividade industrial.

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Portanto, o concreto é constituído por uma mistura de cimento, agregados e água.

Quando misturados cimento e água formam uma pasta que se endurece com o tempo adquirindo resistência mecânica e aderindo às partículas de agregados. Dessa forma, ela liga as partículas de agregados entre si, preenchendo os vazios entre estas e formando um novo material resistente e monolítico (GIAMMUSSO, 1992).

3.7.1 Componentes do concreto comum

Como mencionado anteriormente, o concreto é constituído por uma mistura de cimento, agregados (grãos e miúdos) e água. As características e propriedades desses concretos e argamassas (misturas de cimento, areia e água) vão depender da qualidade e proporções dos materiais que os compõem. De todos eles, o cimento é o de maior atividade do ponto de vista químico, sendo o principal responsável pela transformação da mistura de materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado.

3.7.1.1 Cimento Portland

De acordo com a NBR 5732:1991 o Cimento Portland comum é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland (produto constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas), ao qual se adicionam, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

O cimento Portland é uma denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. É o mais importante material de construção, com vastíssimo campo de aplicação, incluindo desde a construção civil de habitações, estradas, barragens até outros tipos de produtos acabados como telhas de fibrocimento, pré-moldados, caixas d'água e outros.

Portanto, trata-se de um pó fino que sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, quando misturado com a água, como resultado da hidratação, que é uma reação química entre os minerais do cimento com a água.

O cimento é um produto constituído principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, que, depois de hidratados, funcionam como uma cola que liga as partículas de agregados entre si (GIAMMUSSO, 1992).

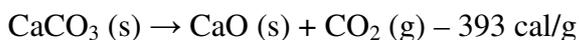
Quando misturado com a água e outros materiais de construção como areia, brita, pó de pedra, cal, produz o concreto e as argamassas, usados na construção civil. Esse material é composto de clínquer Portland e de adições, sendo o clínquer o principal componente, estando presente em todos os tipos de cimento Portland fabricados. As adições variam com o tipo de cimento e são elas que definem os diferentes tipos desses.

Kihara e Centurione (2005) afirmam que o clínquer Portland é o principal constituinte do cimento Portland, material sinterizado e peletizado, resultante da calcinação a aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, empregados de modo a garantir o quimismo da mistura dentro de limites específicos. Para a sua fabricação, o material de partida deve conter em sua composição química os óxidos principais do clínquer, quais sejam: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Raramente esses componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas. Por isso, é necessário preparar misturas de dois ou mais tipos de rochas. O calcário (75% a 80%) e a argila (20% a 25%) são as matérias primas do clínquer. Quando um componente químico essencial não estiver presente na proporção adequada, eventuais aditivos corretivos, como o minério de ferro, a areia, a bauxita, são utilizados.

Essencialmente as operações unitárias preparam as matérias primas, nas proporções necessárias e no estado físico apropriado de cominuição e de contato intenso, para que as conversões químicas possam ocorrer na temperatura de calcinação reinante no forno. O K₂O e o Na₂O estão presentes em pequenas quantidades e formam compostos com o CaO, o Al₂O₃, o SiO₂ e SO₃, por exemplo KC₂₃S₁₂, cujas propriedades são semelhantes ao C₂S. Os óxidos alcalinos não alteram as propriedades do cimento, em virtude da semelhança de propriedades dos compostos formados com eles e dos compostos semelhantes que não os contêm.

O calcário é britado e moído e misturado com a argila moída, em proporções adequadas. Essa mistura é levada então a um forno rotativo de grandes dimensões, onde é aquecida a temperaturas da ordem de 1450°C – 1500°C. Como resultado do intenso calor a que a mistura é submetida, obtém-se o clínquer Portland, que tem a forma de pelotas, e que na saída do forno, ainda incandescente, é submetido a um resfriamento brusco. Posteriormente é moído transformando-se em pó.

Ao ser aquecida, a matéria prima passa pelos processos de evaporação da água livre, liberação da água combinada com a argila, dissociação do carbonato de cálcio com liberação de cal livre conforme a reação:



A desidratação da argila e a descarbonização ou calcinação do calcário, são duas reações endotérmicas e a formação do clínquer é exotérmica. Deve-se notar que a maioria das reações no forno ocorre na fase sólida, mas que no final ocorre uma importante fusão (SHREVE e BRINK Jr., 1980).

De acordo com Tenório et al. (2003) as propriedades do cimento Portland estão diretamente relacionadas às concentrações de suas fases constituintes, principalmente a alita, a belita, a fase ferrítica e o aluminato. Estas fases são resultados da queima de uma mistura contendo rocha calcária e argila, com altos teores de CaCO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 .

A alita, de composição $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ e abreviada por C_3S , deve ser o constituinte majoritário do clínquer após o processamento, pois é sua reação de hidratação que confere a resistência mecânica ao cimento curado. A belita, de composição $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ e abreviada por C_2S , está presente como o primeiro complexo de cal e sílica formado no aquecimento e, sendo mais estável que o C_3S , volta a se formar no resfriamento. O aluminato está presente principalmente na forma de $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$, abreviado por C_3A , enquanto a ferrita aparece como constituinte principalmente na forma $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$, abreviada por C_4AF . O C_3A e o C_4AF formam uma fase líquida a altas temperaturas, que envolve os grãos de C_3S e C_2S .

Finalmente, ocorre a clinquerização entre 1300°C e 1450°C e consiste na fusão do aluminato e da ferrita, na formação de cristais de C_2S e sua conversão em C_3S na presença do material fundido. No processo de resfriamento do clínquer ocorre a solidificação do líquido contendo C_3A e C_4AF e a reação de decomposição de parte do C_3S em C_2S e CaO .

O C_2S é o primeiro complexo de cal e sílica formado, de maneira que, em misturas estequiométricas, toda a sílica combinada está presente na forma de $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ a 1200°C . A formação se dá segundo a reação:



Não há formação apreciável de C_3S abaixo de $1250^{\circ}C$, que é indicado como a temperatura em que se inicia a formação do líquido. A formação do C_3S se inicia a temperaturas da ordem de $1400^{\circ}C$, seguindo lenta até $1500^{\circ}C$. A presença de alumina e óxido de ferro na mistura para a produção do clínquer acelera a formação do C_3S . Isto é consequência do aparecimento da fase líquida, com a fusão das fases C_3A e C_4AF , a aproximadamente $1300^{\circ}C$. A presença da fase líquida acelera a difusão dos íons em direção ao C_2S .

A maior estabilidade do C_3S ocorre em temperaturas acima de $1400^{\circ}C$, de maneira que, a temperaturas mais baixas, essa fase tende a se decompor em CaO e C_2S . A fase C_3S fica presente à temperatura ambiente como metaestável e sua alta reatividade é fundamental para o comportamento de hidratação do cimento. O resfriamento do clínquer, para a obtenção de um alto teor de C_3S ao final, deve ser rápido, de modo a evitar sua decomposição em CaO e C_2S .

De acordo com a natureza do processo de fabricação do clínquer, além dos compostos de cálcio, silício, ferro e alumínio, outros compostos, inclusive compostos metálicos, estão presentes na matéria prima e influenciam tanto na formação quanto à estabilidade do C_3S . A Figura 3.27 mostra o esquema com as transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer, em função da temperatura.

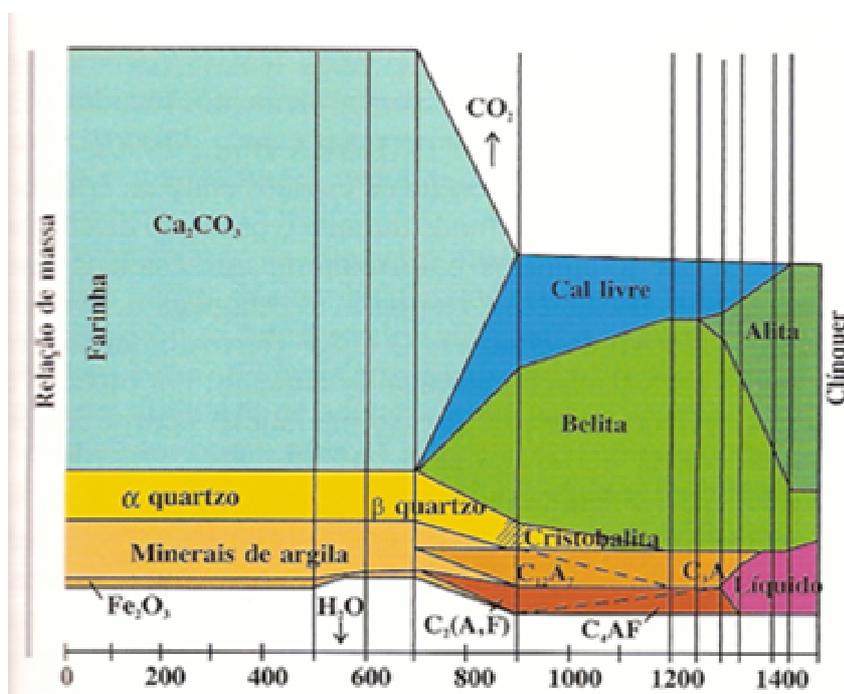


Figura 3.27: Transformações mineralógicas no interior do forno de clínquer.

Fonte: Kihara e Centurione, 2005.

O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, prioritariamente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante (ABCP, 2002).

As adições são outras matérias primas como o gesso, escória de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos, que são misturadas ao clínquer durante a sua moagem, permitindo a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado.

Cada uma dessas adições tem uma função específica:

- o gesso controla o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando misturado com água. O gesso é adicionado em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena, 3% de gesso para 97% de clínquer moído;
- a escória de alto forno tem a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, reage em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer;
- os materiais pozolânicos são definidos como produtos silicosos ou sílico-aluminosos, que, estando predominantemente na forma vítrea, se solubilizam em meio alcalino e reagem em solução com íons Ca^{2+} . O resultado final da reação é o silicato de cálcio hidratado, principal produto da hidratação dos cimentos tipo Portland (JOHN et al, 2003); os materiais pozolânicos, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas quando finamente moídos e na presença de água, reagem com o Ca(OH)_2 à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades aglomerantes (LEA, 1970; NBR 12653, 1992; MEHTA e MALHORTA, 1996; TAYLOR, 1997, apud GUMIERI et al, 2004). Outros tipos de materiais pozolânicos são: cinzas de casca de arroz, sílica ativa, metacaulinita, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550° a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros;
- os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição tais como o próprio calcário. Tal adição serve também para tornar os concretos e as argamassas mais trabalháveis, porque os grãos ou partículas desses materiais moídos têm dimensões adequadas para se alojar entre os grãos ou partículas

dos demais componentes do cimento, funcionando como um verdadeiro lubrificante. Quando presentes no cimento são conhecidos como filer calcário.

Do que foi exposto anteriormente sobre as adições, conclui-se que o gesso não pode, em hipótese alguma, deixar de ser misturado ao cimento, e que as outras são totalmente compatíveis com o clínquer que é o principal componente do cimento Portland, conferindo ao cimento pelo menos uma qualidade a mais (ABCP, 2002).

a) Componentes principais do Cimento Portland

O cimento é um produto constituído por vários óxidos combinados, formando compostos complexos, que apresentam a propriedade de se combinarem com água. O resultado é um material cristalino com características de resistência e aderência aos agregados e ao aço da armadura (GIAMMUSSO, 1992). A Tabela 3.7 mostra a relação dos principais óxidos de elementos presentes no cimento Portland e as abreviações usualmente utilizadas.

Tabela 3.7 - Compostos presentes no cimento Portland

Compostos	Abreviação	Denominação
3CaO. SiO ₂	C ₃ S	Silicato tricálcico – alita
2CaO. SiO ₂	C ₂ S	Silicato dicálcico - belita
3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminato tricálcico
4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico

Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994.

As características principais desses compostos são:

- C₃S: reage mais rapidamente com a água, desprendimento moderado de calor de hidratação, altas resistências iniciais;
- C₂S: reage mais lentamente com a água, baixo calor de hidratação atingindo após maiores períodos de tempo, a mesma resistência mecânica que a alita (C₃S);
- C₃A: reage muito rapidamente com a água, calor de hidratação muito alto, resistência muito baixa;
- C₄AF: reação muito rápida com a água, calor de hidratação alto, resistência desprezível.

b) Principais tipos de cimento Portland

De acordo com a ABCP (2002) existem no Brasil vários tipos de cimento portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são: o cimento Portland comum (NBR 5732), o cimento Portland composto (NBR 11578), o cimento de alto forno (NBR 5735) e o cimento pozolânico (NBR 5736). Em menor escala são consumidos, sejam pela menor oferta, sejam pelas características especiais de aplicação, os seguintes tipos de cimento: cimento Portland de alta resistência inicial – CP V – ARI (NBR 5733), cimento Portland resistente aos sulfatos (NBR 5737), cimento Portland branco (NBR 12989), cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116) e cimento para poços petrolíferos (NBR 9831).

São ainda contempladas as normas brasileiras específicas para cada tipo de cimento, os limites estabelecidos de exigências químicas, físicas e mecânicas. As exigências químicas visam limitar o teor de adições, a pré-hidratação e as falhas no processo de fabricação, enquanto que as exigências físico-mecânicas garantem o desempenho mecânico e reológico (a reologia é a parte da mecânica que investiga as propriedades e o comportamento mecânico dos corpos deformáveis que não são nem sólidos, nem líquidos newtonianos). A Tabela 3.8 apresenta a composição de alguns dos diversos tipos de cimento mencionados.

Tabela 3.8 - Composição de alguns tipos de cimento Portland

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto forno (E)	Material pozolânico (Z)	Material carbonático (F)	
Comum	CP I	100		-		NBR 5732
	CP I-S	99 - 95		1 - 5		
Composto	CP II-E	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10	NBR 11578
	CP II-Z	94 - 76	-	6 - 14	0 - 10	
	CP II-F	94 - 90	-	-	6 - 10	
Alto forno	CP III	65 - 25	35 - 70	-	0 - 5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85 - 45	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP V - ARI	100 - 95	-	-	0 - 5	NBR 5733

Fonte: ABCP, 2002.

c) Cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI)

O cimento Portland de alta resistência inicial é um tipo particular de cimento Portland comum que tem a peculiaridade de atingir altas resistências iniciais nos primeiros dias de aplicação. O desenvolvimento da elevada resistência inicial é devido a alterações nos fatores químicos (dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer) e físicos (moagem mais fina do cimento, que aumenta a velocidade da reação cimento/água).

O aumento da resistência do cimento de alta resistência inicial é conseguido com um teor mais elevado de C_3S (maior que 55% e às vezes superior a 70%) e por uma moagem ainda mais fina do que a do clínquer do cimento.

Este cimento é recomendado em aplicações nas quais ele torna mais fácil a remoção do excesso de água do concreto durante o adensamento, sendo a finura mais importante do que a resistência à compressão. Na prática, o cimento ARI tem uma finura maior do que a do cimento Portland comum.

O uso do cimento ARI é indicado onde se necessita uma evolução rápida da resistência, por exemplo, quando as formas têm que ser removidas logo para reutilização ou quando se necessita de certa resistência para prosseguimento da construção.

Como alta resistência inicial significa grande desprendimento de calor de hidratação, esse cimento não deve ser usado em concreto massa ou em peças estruturais com grandes dimensões (NEVILLE, 1997).

3.7.2 Agregados

O agregado é um componente inerte que desempenha a função de material de enchimento e resistente, constituído por partículas que devem ser cimentadas entre si pela pasta, resultante da hidratação da mistura de cimento e água (GIAMMUSSO, 1992).

O arranjo das partículas de agregados definido como empacotamento é de fundamental importância na confecção do concreto. McGeary apud Oliveira et al. (2003), define o estudo do empacotamento de partículas como: *“o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente”*.

Concluimos que a seqüência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a distribuição granulométrica do sistema, determina o aumento ou não da densidade de empacotamento da monodispersão (partículas de um único tamanho, tanto esférico como não esférico).

Oliveira et al. (2003) cita outros fatores que afetam o empacotamento das partículas como a sua morfologia (forma), a porosidade e a sua densidade.

Com relação à morfologia, quanto mais afastada do formato esférico for a partícula, menor é a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha. Isso ocorre devido à fricção interparticular, que surge pelo contato das superfícies irregulares das mesmas. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior esse efeito, em função da maior área superficial específica.

Através do controle da distribuição granulométrica é possível aperfeiçoar a densidade de empacotamento em sistemas compostos por partículas não esféricas.

A porosidade interna das partículas é outro fator complicador na obtenção de empacotamentos de alta densidade. As partículas podem ser totalmente densas, com porosidade interna fechada, ou com porosidade aberta.

Para se obter um empacotamento de máxima densidade para uma dada distribuição granulométrica, é necessário que se utilizem partículas densas e com a menor porosidade possível.

Com relação à densidade das partículas, se em uma distribuição granulométrica houver uma acentuada diferença de densidade entre seus componentes, o processo de compactação deve ser bastante cauteloso para evitar possíveis segregações, que podem gerar gradientes de empacotamento na mistura, o que, do ponto de vista de propriedades do material, pode levar a diferenças de desempenho.

Na verdade, o agregado não é inerte na exata acepção da palavra, e suas propriedades físicas, térmicas, e, às vezes, também químicas têm influência no desempenho do concreto (NEVILLE, 1997).

O agregado ocupa entre 60 e 80% do volume total do concreto e custa menos que o cimento, sendo, portanto, mais econômico usar no concreto mais agregado e menos cimento. No

entanto, a economia não é a única razão de se usar agregado, pois este confere vantagens técnicas consideráveis ao concreto, como maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta pura de cimento.

3.7.2.1 Classificação dos agregados

Os agregados se classificam em graúdos e miúdos, de acordo com o tamanho das partículas.

A norma brasileira NBR NM 53:2003 define o agregado graúdo como sendo o agregado cuja maior parte de suas partículas fica retida na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ou a porção retida nessa mesma peneira.

As partículas arredondadas ou subarredondadas e de textura superficial lisa, como o seixo rolado, favorecem a plasticidade do concreto, exigindo menos água de amassamento. Em contrapartida, a ligação matriz-agregado, no estado endurecido, é prejudicada (RODRIGUES, 1995).

Agregados provenientes de britagem que possuam forma cúbica e com textura superficial rugosa apresentam maior área específica e requerem, portanto, maior quantidade de água de molhagem. As arestas vivas desses grãos provocam também maior atrito entre eles, aumentando, conseqüentemente, o consumo de água, areia e cimento.

Os agregados cujas partículas são lamelares ou alongadas necessitam de uma maior quantidade de areia para uma dada plasticidade, aumentando, conseqüentemente, o consumo de água e cimento da mistura.

Agregado miúdo é definido na norma brasileira NBR NM 52:2003, como aquele que passa na peneira com abertura de malha de 9,5 mm, que passa quase totalmente na peneira 4,75 mm e fica retido, em sua maior parte na peneira 75 μ m, ou se define como a porção que passa na peneira de 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira de 75 μ m.

3.7.2.2 Caracterização dos materiais

O objetivo é conhecer as características dos materiais, que têm grande influência no processo de dosagem do concreto.

Para o cimento destacamos as seguintes características:

a) Finura:

É um fator que governa a velocidade de reação da hidratação. Seu aumento melhora a resistência, principalmente nas primeiras idades, diminui a exsudação e outros tipos de segregação, aumenta a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão do concreto. Em contrapartida, ocorre a liberação de maior quantidade de calor e uma retração maior, ficando o concreto mais sensível ao fissuramento.

b) Perda ao fogo e resíduo insolúvel:

Fornece indicações como ocorrerá a carbonatação e a hidratação devido à exposição do cimento ao ar, ou seja, o envelhecimento do cimento.

c) Resistência à compressão:

Através dessa verificação é possível conhecer previamente o comportamento mecânico do cimento. Normalmente os testes são feitos nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias.

Para os agregados miúdos, destacamos:

a) Composição granulométrica (granulometria):

É a expressão das proporções de partículas de diferentes tamanhos que compõem o agregado. Tem influência direta sobre a qualidade dos concretos e argamassas, principalmente nos aspectos relativos à trabalhabilidade, à compacidade e à resistência aos esforços mecânicos (RIBEIRO et al. 2006).

b) Módulo de finura (MF):

O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100. Está relacionado com a área superficial do agregado e o seu valor conseqüentemente altera a água de molhagem, para certa consistência. Deve ser mantido constante dentro de certos limites para evitar alteração do traço.

c) Massa unitária:

É a relação entre a massa e o volume de sólidos, incluindo os vazios, sob determinadas condições de compactação (RIBEIRO et al., 2006). É por meio da massa unitária que são feitas as transformações dos traços em massa para volume e vice-versa.

d) Massa específica:

Segundo a NBR NM 52:2003, a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

e) Inchamento:

É o aumento de volume de uma determinada massa de agregado, causado pela absorção de água. É de fundamental importância na dosagem dos materiais em volume, pois dependendo da umidade, obtêm-se diferentes massas de agregados para um mesmo volume desses, sendo necessária a correção do traço.

Para os agregados graúdos, as características de maior influência na dosagem do concreto são a composição granulométrica (granulometria), a massa específica e a dimensão máxima característica (DMC).

A DMC é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura de malha quadrada, em milímetros, à qual corresponde uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Quanto maior for a DMC, mais barato o concreto. Ela está relacionada ao concreto fresco, portanto, depende das formas, do espaçamento entre as armaduras e do processo de transporte do concreto.

3.7.3 Aditivos Químicos

Um aditivo pode ser definido como um produto químico que, exceto em casos especiais, é adicionado à mistura de concreto em teores não maiores que 5% em relação à massa de cimento. Essa adição ocorre durante a mistura ou durante uma mistura complementar, antes do lançamento do concreto com a finalidade de se obter alguma modificação específica ou modificação das propriedades normais do concreto (NEVILLE, 1997).

Mehta (1994) define o aditivo como um material constituinte do concreto e/ou das argamassas como a água, os agregados, o cimento hidráulico e as fibras. A sua adição ocorre junto com a água. Os aditivos são usados para as seguintes finalidades importantes: aumentar a plasticidade do concreto sem aumentar o teor de água, reduzir a exsudação e a segregação, retardar ou acelerar o tempo de pega, acelerar a velocidade de desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, retardar a taxa de evolução do calor e aumentar a durabilidade em condições específicas de exposição.

3.7.3.1 Classificação dos aditivos químicos

Os aditivos são geralmente classificados pela função no concreto, mas muitas vezes apresentam mais de uma função.

Tipos e funções dos aditivos:

Eles podem ser orgânicos ou inorgânicos quanto à sua composição, mas a sua natureza química é a sua principal característica, ao contrário dos aditivos minerais.

São geralmente designados pela sua forma de atuação no concreto.

- aceleradores: sua função é principalmente acelerar a evolução da resistência inicial do concreto durante o endurecimento, podendo ter algum efeito também de acelerar a pega. O melhor acelerador de endurecimento de concreto é o cloreto de cálcio (CaCl_2), que, como todos os cloretos, apresenta o inconveniente de provocar a corrosão do aço na armadura de concreto. Podem ser usados quando o concreto for aplicado em temperaturas baixas, na produção de concreto pré-moldado (quando se necessita de desforma rápida) ou em serviços de reparos urgentes. Os teores geralmente usados se situam entre 1 e 2% em relação à massa de cimento (GIAMMUSSO, 1992).
- retardadores: são produtos que retardam o início da pega da pasta de cimento, dilatando o tempo de transporte e aplicação do concreto. Os retardadores não alteram a composição ou a identidade dos produtos da hidratação. Estes aditivos são úteis em concretagens em tempo quente, quando o tempo de pega normal fica reduzido pela temperatura mais elevada. São constituídos à base de açúcares, carboidratos derivados, sais solúveis de zinco, boratos solúveis e outros sais; o metanol também é um retardador possível. Estas substâncias reagem com os compostos de cálcio, formando produtos instáveis que depois de algum tempo se decompõem, passando a hidratação ter um curso normal. É necessário ter muito cuidado com a utilização desses aditivos retardadores, pois, em teores incorretos, eles podem inibir completamente a pega e o endurecimento do concreto. Os teores normalmente usados são de 0,2 a 0,3%, em relação à pasta de cimento (GIAMMUSSO, 1992).
- plastificantes ou redutores de água: os produtos tensoativos englobam aditivos geralmente empregados para incorporação de ar ou redução de água nas misturas de concreto. O aditivo incorporador de ar é definido como um dos constituintes do

concreto, que é empregado com a finalidade de incorporar ar. O redutor de água é um aditivo que reduz a quantidade requerida de água de amassamento requerida para produzir um concreto com uma dada consistência. Cuidados devem ser tomados na utilização desses aditivos, pois o emprego de quantidades maiores do que as normalmente necessárias para um efeito plastificante ou redutor de água, podem retardar o tempo de pega, evitando a floculação dos produtos da hidratação (formação de ligações) (MEHTA, 1994). Portanto, a finalidade de utilização de um aditivo plastificante ou redutor de água em um concreto é reduzir a relação água/cimento (a/c), mantendo a trabalhabilidade desejada (plasticidade), ou, como alternativa, aumentar a trabalhabilidade com a mesma relação água/cimento.

- superplastificantes: apresenta ação semelhante a dos plastificantes, porém com efeito muito mais intenso. São também denominados aditivos redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água de três a quatro vezes, em um dado traço de concreto, quando comparados a aditivos redutores de água normais, sem redução da consistência. Usando-se os superplastificantes sem redução de água, podem-se obter concretos com consistência fluída que dispensam vibração para adensamento: são os concretos superfluídos, ou auto-adensantes, também denominados reoplásticos. Em geral, o uso de superplastificantes exige uma modificação do traço do concreto, aumentando-se o teor de material fino. Sem essa providência pode ocorrer segregação da mistura. Os teores típicos em que são usados os superplastificantes se situam geralmente entre 0,8 e 1,2%, em relação à massa de cimento (GIAMMUSSO, 1992).
- incorporadores de ar: estes aditivos atuam formando, no concreto, bolhas de ar que não coalescem; essas bolhas não se aglutinam, formam bolhas maiores que tendem a escapar da pasta. Sua atuação é semelhante à de um agente formador de espuma (GIAMMUSSO, 1992). A aplicação mais importante de aditivos incorporadores de ar é em misturas de concretos dosados para resistir a ciclos de congelamento e descongelamento. Devem-se evitar grandes quantidades de ar incorporado, pois isso pode provocar a diminuição da resistência correspondente (MEHTA, 1994).
- outros tipos de aditivos: Existem diversos outros tipos de aditivos como os pigmentos, geralmente óxidos metálicos, utilizados para dar cor ao concreto; os expansores, que produzem a expansão do concreto pela produção de gases no interior da pasta, através de reações que se processam no início da hidratação do cimento; os compensadores de

retração, que são aqueles que reagem com compostos de cimento, resultando em substâncias expansivas, que compensam a retração da pasta de cimento; os impermeabilizantes, que por serem constituídos de sabões de sódio, através da troca de íons, se transformam em sabões de cálcio, que vão obstruir os poros capilares da pasta; e os bactericidas, usados com a finalidade de evitar a formação de fungos, nos concretos de contato direto com alimentos.

3.8 Pavimentos Intertravados

A pavimentação que utiliza peças pré-moldadas de concreto teve seu desenvolvimento acelerado na Europa nas obras de reconstrução após a 2ª Guerra Mundial. Vem experimentando um rápido crescimento, tanto na área de construção residencial quanto na área de construção comercial.

A sua popularidade é medida pela quantidade de sua utilização: na Europa, há uma instalação de cerca de 100 ft² (33 m²) de pavimentos por habitante, por ano, enquanto nos Estados Unidos, esse valor é da ordem de 1 ft² (0,11 m²). Segundo especialistas, as perspectivas são de contínuo crescimento desse mercado, assim que os benefícios da construção com pavimentos de concreto sejam mais conhecidos. Um dos principais benefícios dos pavimentos de concreto é que eles podem ser removidos e reinstalados, o que reduz significativamente os custos de manutenção e interrupção de uso (CONCRETENetwork, 2007).

No Brasil, os pisos intertravados são utilizados desde a década de 50. A norma brasileira NBR 9781:1987 – Peças de Concreto para Pavimentação - Especificação, define uma peça de concreto para pavimentação como sendo uma peça de formato geométrico regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima de 100 mm e altura mínima de 60 mm. Define ainda o comprimento como sendo a maior distância entre duas faces paralelas entre si e perpendiculares aos planos de topo e base. A largura, como a menor distância entre duas faces paralelas entre si e perpendiculares aos planos de topo e base e a altura, como a distância entre dois planos paralelos nos quais estão contidos o topo (superfície de rolamento) e a base. São fabricados com diferentes formas, texturas e cores.

Para a Bloco Brasil (2007) os pavimentos intertravados são compostos por peças pré-moldadas de concreto e constituem uma brilhante e eficaz solução para uso em ruas, calçadas, calçadões e praças, estando esse mercado em crescimento no Brasil, tanto na construção como

na reconstrução e reabilitação desse tipo de instalação urbana. A Figura 3.28 mostra exemplos de diversos tipos de peças para pavimentação intertravada.



Figura 3.28: Tipos de pavimentos intertravados

Os pavimentos intertravados de concreto são geralmente usados para as seguintes aplicações: calçadas, pátios de estacionamento e manobras, ruas, estradas, loteamentos, praças, “decks” de piscinas, entradas de edifícios, contornos de fontes, portos, aeroportos, taludes e pisos industriais.

Os pavimentos intertravados têm uma habilidade, que lhe é única, de transferir cargas e tensões sobre grandes áreas de pavimentação através da criação um efeito de “bridging” (efeito ponte) entre as peças individuais. Tal espalhamento de cargas permite tráfego mais pesado sobre uma sub-base que normalmente requereria um concreto armado com reforço de aço (PBC Companies, 2007).

Outras vantagens da pavimentação intertravada que podem ser citadas, são: quando propriamente instalados, os pavimentos resistem à sua movimentação, a seu afundamento ou à sua quebra, possibilitando dessa forma que se tenha uma excelente superfície para caminhar, andar de bicicleta, escoamento de carros, caminhões, e até mesmo de empilhadeiras industriais; o emprego de peças furadas é ecologicamente correto, pois, os furos permitem o retorno das águas de chuva para o solo, evitando assim a sua perda com o seu escoamento; marcas permanentes em estacionamentos, em cruzamentos de pedestres, pistas de tráfegos e outras áreas que necessitam de identificação; manutenção simplificada, pois as peças do pavimento são recolocadas nos seus locais originais após o reparo, sem necessidade de outras adicionais. A Tabela 3.9 mostra a comparação do piso intertravado com o asfalto e o paralelepípedo.

Tabela 3.9 – Comparação entre tipos de pavimentação

Característica (x = pontos positivos)	Intertravado	Asfalto	Paralelepípedo
Durabilidade ilimitada	X	-	X
Baixo custo com obras subterrâneas	X	-	X
Removível e reaproveitável	X	-	X
Dispensa equipamentos caros, especiais e barulhentos para sua remoção	X	-	X
Dispensa manutenção periódica	X	-	-
Dispensa capina periódica	X	X	-
Insensível a agentes químicos	X	-	X
Não sujeito a trincas por fenômenos de dilatação, retração, flexão e oxidação	X	-	X
Tem duas faces de uso	X	-	X
Boa velocidade de aplicação	X	X	-
Dispensa mão de obra especializada para sua aplicação	X	-	X
Dispensa equipamentos caros e especiais para a sua aplicação	X	-	X
Dispensa betume para rejuntamento	X	X	-
Não é perecível, é estocável	X	-	X
Confortável e adequado ao trânsito veloz de veículos modernos	X	X	-
Antiderrapante	X	-	-
Proporciona trânsito silencioso e isento de vibrações	X	X	-
Cor clara, proporcionando maior eficiência da iluminação pública e melhor visibilidade	X	-	-
Não aquece o ambiente	X	-	-
Confortável ao trânsito de pedestres	X	X	-
Confortável ao trânsito de patins, skates, bicicletas e cadeira de rodas	X	X	-
Satisfaz necessidades estáticas	X	-	X
O próprio pavimento possibilita demarcação ou decoração indelével	X	-	-
É intertravado	X	-	-
Redistribui cargas estáticas e dinâmicas	X	X	-
ASPECTOS POSITIVOS			
PONTUAÇÃO FINAL	25	08	11

Fonte: INTERPAVI (2005/2007) e UNI-STEIN (2005)

A Tabela 3.10 apresenta uma avaliação entre o que se tem como mito e o que realidade sobre os pavimentos intertravados.

Tabela 3.10 - Pisos intertravados – Mitos X Realidade

Mitos	Realidade
“Pavimentos intertravados servem apenas para tráfego leve”	Existem portos, terminais de carga e estacionamento de veículos pesados pavimentados com blocos intertravados há décadas, com ótimo desempenho.
“Em declives, as peças intertravadas se soltam”	Pavimentos intertravados com mais de 28% de inclinação funcionam em diversas partes do mundo, sem problemas.
“Os blocos quebram com facilidade”	Quando projetados em acordo com as normas, os intertravados suportam condições duríssimas de carga. E mesmo no caso de quebra de um bloco por impacto, basta trocá-lo.
“Não existem métodos confiáveis para o cálculo de pisos intertravados”	Desde a 2ª Guerra Mundial, os intertravados têm sido estudados, como nenhuma outra técnica de pavimentação. Assim, existem inúmeras formas de cálculo adequadas para cada situação.
“Fabricar peças para pisos intertravados é a mesma coisa que fabricar blocos de alvenaria”	São produtos completamente diferentes, que estarão sujeitos a esforços muito distintos. A única coisa em comum é o material de que são feitos o concreto.
“Os pavimentos intertravados se desmancham”	Se construídas as estruturas adequadas de confinamento, os pisos intertravados mantêm-se íntegros, mesmo sob tráfego intenso.
“A superfície dos pavimentos intertravados é irregular”	Quando as peças são produzidas em acordo com as normas e a execução é adequada, o nivelamento é absoluto.

Fonte: Revista Prisma – n° 3 – junho 2002 apud Toniolo Pré-Moldados

Alguns exemplos de utilização da pavimentação intertravada na região metropolitana de Belo Horizonte são mostrados nas Figuras 3.29 até 3.36.



Figura 3.29 - Pavimentação de rua



Figura 3.30 - Tipo de pavimento usado

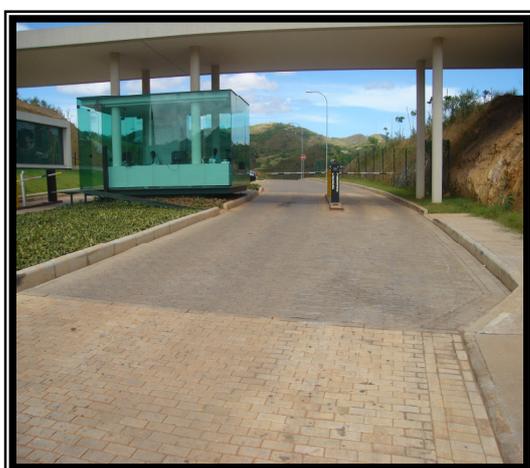


Figura 3.31 - Entrada de condomínio

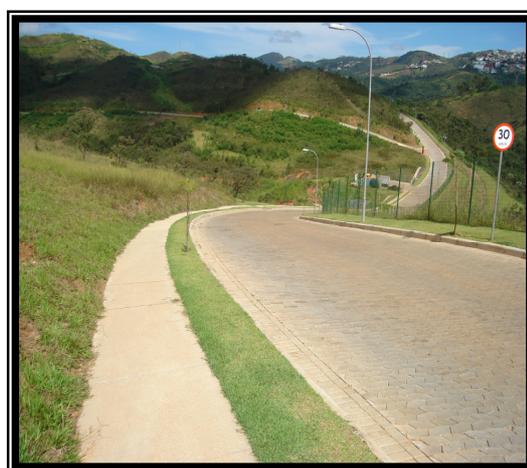


Figura 3.32 - Rua interna do condomínio

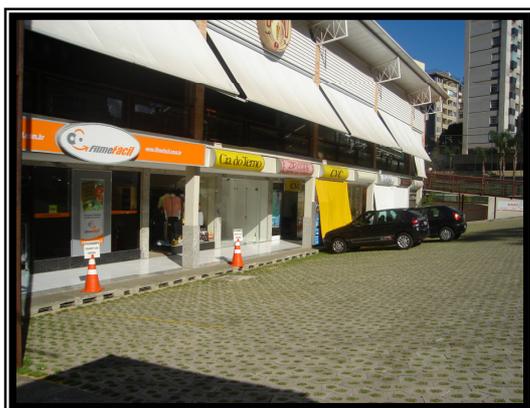


Figura 3.33 - Shopping no bairro Luxemburgo

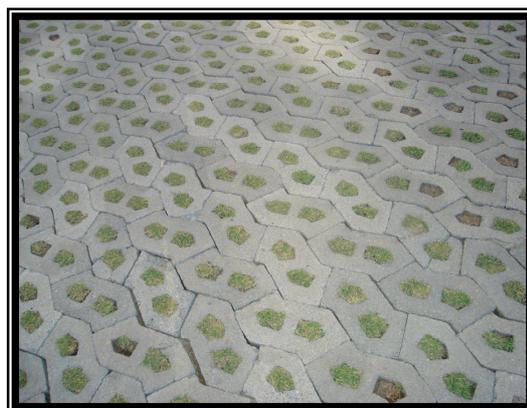


Figura 3.34 - Pavimento vazado (ecológico)



Figura 3.35 - Pátio de posto de gasolina na BR 040



Figura 3.36 - Pavimentação com peças coloridas

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Seleção e amostragem dos resíduos estudados

A amostragem é o ato ou processo de seleção de amostra para ser analisada como representante de um todo (FERREIRA, 1999). Foi feita pela própria usina geradora, de acordo com a NBR 10007:2004.

Os materiais utilizados nesta pesquisa são oriundos de usina siderúrgica integrada. A escolha dos resíduos, escória de aciaria LD estabilizada volumetricamente, de concreto refratário de canal de vazamento de gusa (CG), de concreto refratário de carro torpedo (CT) e de concreto de degaseificador RH (RH), está embasada em critérios de quantidade de geração, de facilidade e de oportunidade de reciclagem, do custo de disposição e do interesse dos geradores dos resíduos.

Os quatro resíduos substituem os agregados graúdo e miúdo na confecção do concreto utilizado na fabricação das peças para pavimento.

a) Agregado graúdo

A escória escolhida é aquela proveniente de aciaria LD, submetida a um processo de estabilização volumétrica, com dimensão na faixa de 19 a 32 mm após beneficiamento na usina. Posteriormente a escória foi britada para dimensão < 12 mm, que já é aplicada em um grande número de obras da construção civil. Também por apresentar características superiores às da brita de calcário é usada para substituí-la como agregado graúdo.

A Figura 4.37 mostra um exemplo de escória de aciaria LD, já beneficiada, que deverá ser britada para utilização na fabricação do concreto.

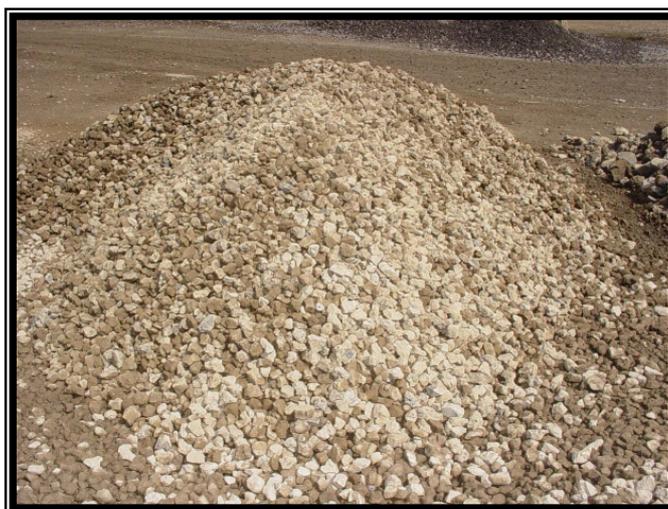


Figura 4.37 - Escória britada (19 a 32 mm)

Fonte: SILVA, 2002.

b) Agregados miúdos

Os resíduos de concretos refratários escolhidos para utilização nesta pesquisa como agregados miúdos são:

- do Canal Principal de Vazamento de Gusa (CG);
- de rebote de Carro Torpedo (CT);
- do Desgaseificador (RH);

As Figuras 4.38, 4.39 e 4.40 mostram os resíduos de concretos refratários no “estado bruto”.



Figura 4.38 - Resíduo CG
Fonte: MAGNESITA, 2005.



Figura 4.39 - Resíduo CT
Fonte: MAGNESITA, 2004.



Figura 4.40 - Resíduo RH
Fonte: MAGNESITA, 2004.

Os resíduos foram britados e moídos para a sua adequada utilização, conforme já definido anteriormente, na planta da MAGNESITA S.A. As Figuras 4.41 e 4.42 mostram um britador de mandíbula e um moinho de rolos, respectivamente, usados na preparação física desses.

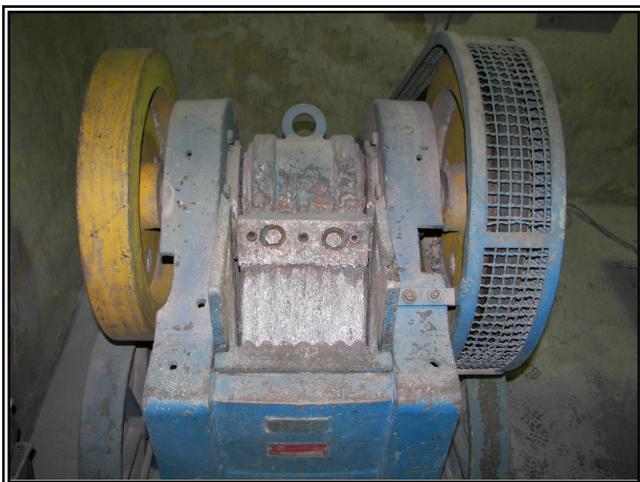


Figura 4.41 – Britador de mandíbula

Fonte: MAGNESITA, 2007.



Figura 4.42 – Moinho de rolos

Fonte: MAGNESITA, 2007.

As Figuras 4.43 e 4.44 mostram os resíduos das figuras anteriores, já britados e moídos na sua fase final, para serem usados como agregados de concreto.



Figura 4.43 - Resíduos LD e CG



Figura 4.44 - Resíduos CT e RH

4.2 Caracterização dos resíduos

A caracterização dos resíduos deve compreender a análise química completa, a análise granulométrica, a análise por difração de raios-X, o ensaio de lixiviação e o ensaio de solubilização.

4.2.2 Características químicas e físicas

A composição química dos quatro resíduos utilizados é apresentada na Tabela 4.11 e foi obtida no laboratório do CPqD da MAGNESITA.

Tabela 4.11 - Composição química dos resíduos (%)

Composto	Escória de Aciaria (LD)	Conc. Refrat. Canal de Gusa (CG)	Conc. Refrat. Carro Torpedo (CT)	Conc. Refrat. Desgaseificador (RH)
SiO ₂	10,82	19,11	28,38	0,22
TiO ₂	0,53	1,36	2,16	0,01
Al ₂ O ₃	4,98	76,72	46,23	96,40
Cr ₂ O ₃	0,15	-	0,06	0,14
Fe ₂ O ₃	26,61	1,34	18,62	1,00
MnO	4,74	-	0,26	-
CaO	41,68	3,60	3,02	1,16
MgO	8,90	0,49	0,39	0,76
Na ₂ O	-	-	0,38	0,24
K ₂ O	-	-	0,32	0,03
ZrO ₂	-	-	0,09	0,01
SO ₃	0,16	-	-	-
P ₂ O ₅	1,43	-	0,09	0,03
C _{total}	0,56	3,77	-	-

Fonte: MAGNESITA, 2006.

A composição granulométrica dos agregados foi determinada de acordo com a NBR NM 248:2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Para essa etapa foram utilizados o quarteador de 16 grelhas e o conjunto de 7 peneiras das Figuras 4.45 e 4.46, respectivamente.



Figura 4.45 – Quarteador – UFMG



Figura 4.46 – Conjunto de peneiras - DESA

A Tabela 4.12 apresenta o resultado do ensaio da análise granulométrica feita do resíduo LD.

Tabela 4.12 - Análise granulométrica do resíduo LD

Peneira	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,5 mm	111,2	22,23	22,23
4,75 mm	373,9	74,75	96,98
2,36 mm	12,05	2,41	99,39
1,18 mm	0,3	0,06	99,45
600 µm	0,2	0,04	99,49
300 µm	0,4	0,08	99,57
150 µm	0,4	0,08	99,65
Fundo	1,6	0,32	99,97
DMC = 9,5 mm		MF = 6,16	

A Tabela 4.13 mostra o resultado da análise granulométrica do resíduo CG.

Tabela 4.13 - Análise granulométrica do resíduo CG

Peneira	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
4,75 mm	0	0	0
2,36 mm	20,8	4,16	4,16
1,18 mm	50,4	10,08	14,24
600 µm	98,10	19,62	33,86
300 µm	140,8	28,17	62,03
150 µm	130,7	26,13	88,16
Fundo	59,4	11,88	100,04
DMC = 2,36 mm		MF = 2,02	

A Tabela 4.14 mostra o resultado da análise granulométrica do resíduo CT.

Tabela 4.14 - Análise granulométrica do resíduo CT

Peneira	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
6,3 mm	12,5	2,50	2,50
4,75 mm	18,0	3,60	6,10
2,36 mm	136,7	27,32	33,42
1,18 mm	147,8	29,54	62,96
600 µm	71,7	14,33	77,29
300 µm	41,2	8,24	85,53
150 µm	25,3	5,06	90,59
Fundo	47,1	9,41	100,00
DMC = 6,30 mm		MF = 3,58	

A Tabela 4.15 mostra o resultado da análise granulométrica do resíduo RH.

Tabela 4.15 - Análise granulométrica do resíduo RH

Peneira	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
6,3 mm	0	0	0
4,75 mm	0	0	0
2,36 mm	32,7	6,54	6,54
1,18 mm	186,3	37,25	43,79
600 µm	87,5	17,50	61,29
300 µm	72,3	14,46	75,75
150 µm	43,2	8,64	84,39
Fundo	78,1	15,62	100,01
DMC = 4,75 mm		MF = 2,72	

A determinação da massa específica dos agregados miúdos foi feita a título de comparação, de acordo com a NBR 9776:1987 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados

miúdos por meio do frasco Chapman e de acordo com a NBR NM 52:2003 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

A determinação da massa específica do resíduo LD (agregado graúdo) foi feita somente conforme a NBR 9776: 1987.

A Tabela 4.16 mostra os resultados encontrados na determinação da massa específica dos resíduos de concretos refratários (agregados miúdos) e escória LD (agregado graúdo).

Tabela 4.16 - Massa específica dos resíduos (g/cm³)

Resíduo	Massa específica (frasco de Chapman) NBR 9776:1987	Massa específica NBR NM 52:2003
Concreto refratário CG	2,98	2,94
Concreto refratário CT	2,79	2,77
Concreto refratário RH	3,27	3,30
Escória LD	3,31	-

A Figura 4.47 mostra a determinação da massa específica coma a utilização do frasco de Chapman.



Figura 4.47 - Utilização do frasco de Chapman

4.2.3 Características mineralógicas – Difração por Raios-X

Alguns compostos inorgânicos apresentam uma estrutura de átomos e moléculas regularmente distribuídos, denominada estrutura cristalina. A técnica de difração de raios-X tem por finalidade a identificação da composição cristalina de um determinado material. A identificação é baseada na interação dos raios-X com a amostra. Os picos que aparecem no difractograma são as distâncias interplanares características dos minerais presentes (MACHADO, 2000).

A Figura 4.48 mostra o difractograma da amostra do resíduo LD. Os componentes encontrados na análise do resíduo foram:

W = wustita (FeO) C₂S = belita C₂F = cálcioferrita C₃S = alita

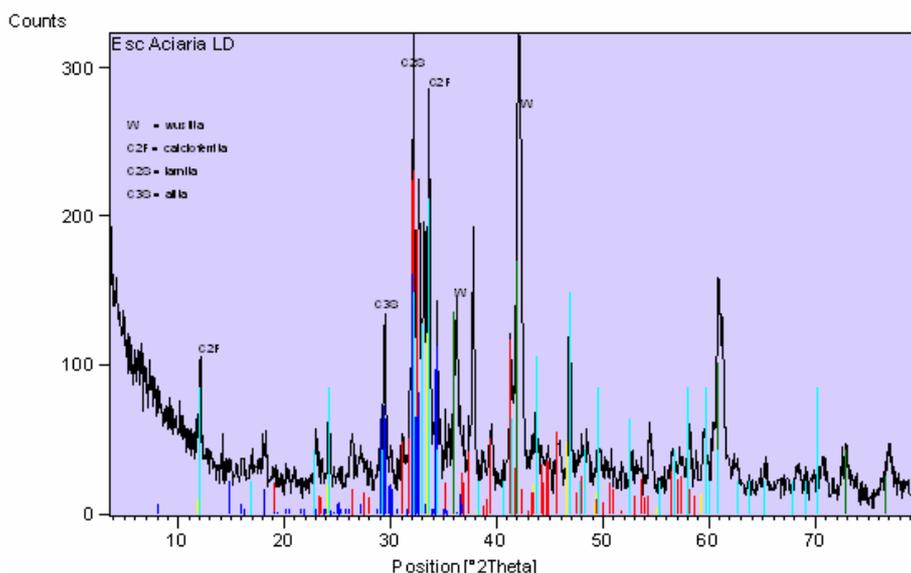


Figura 4.48 - Difractograma do resíduo LD

Fonte: UFMG e CPqD – Magnesita, 2006.

A Figura 4.49 apresenta o difractograma do resíduo CG. Os componentes encontrados na análise do resíduo foram:

Q = quartzo H = hematita (Fe₂O₃) MA = magnetita (Fe₃O₄)

C = coríndon (Al₂O₃) M = mulita (3Al₂O₃.2SiO₂) SiC = carbetto de silício

G = gelenita (2CaO.Al₂O₃.SiO₂)

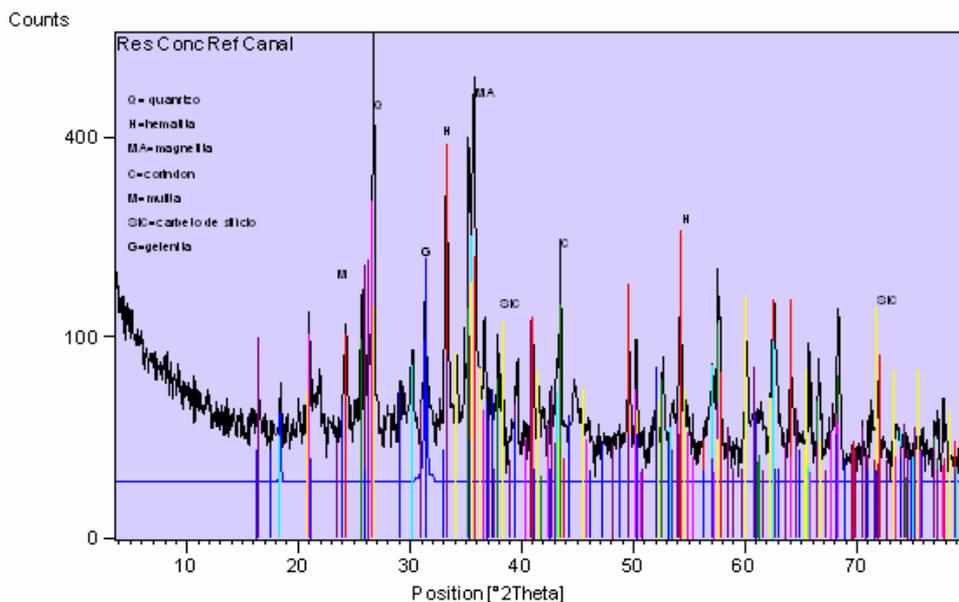


Figura 4.49 - Difractograma do resíduo CG
Fonte: UFMG e CPqD Magnesita, 2006.

A Figura 4.50 mostra o difractograma do resíduo CT. Os componentes encontrados na análise de difração de raios-X do resíduo foram:

M = mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) CR = cristobalita (SiO_2) Coríndon = (Al_2O_3)

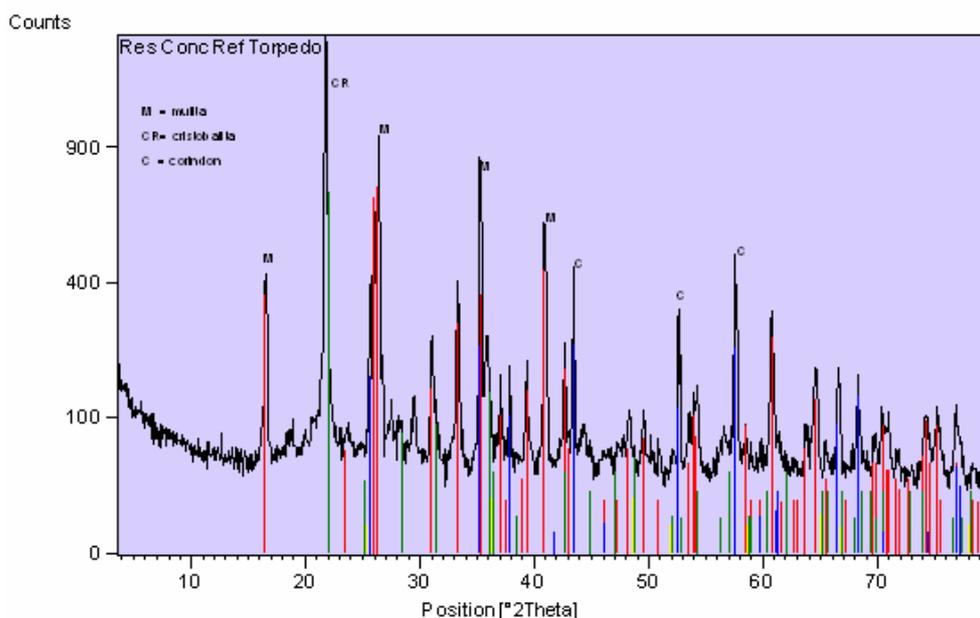


Figura 4.50 - Difractograma do resíduo CT
Fonte: UFMG e CPqD Magnesita, 2006.

A Figura 4.51 mostra o difractograma do resíduo RH. Os componentes encontrados na análise de difração de raios-X do resíduo foram:

C = coríndon (Al_2O_3)

E = espinélio ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)

P = periclásio (MgO)

B = alumina beta

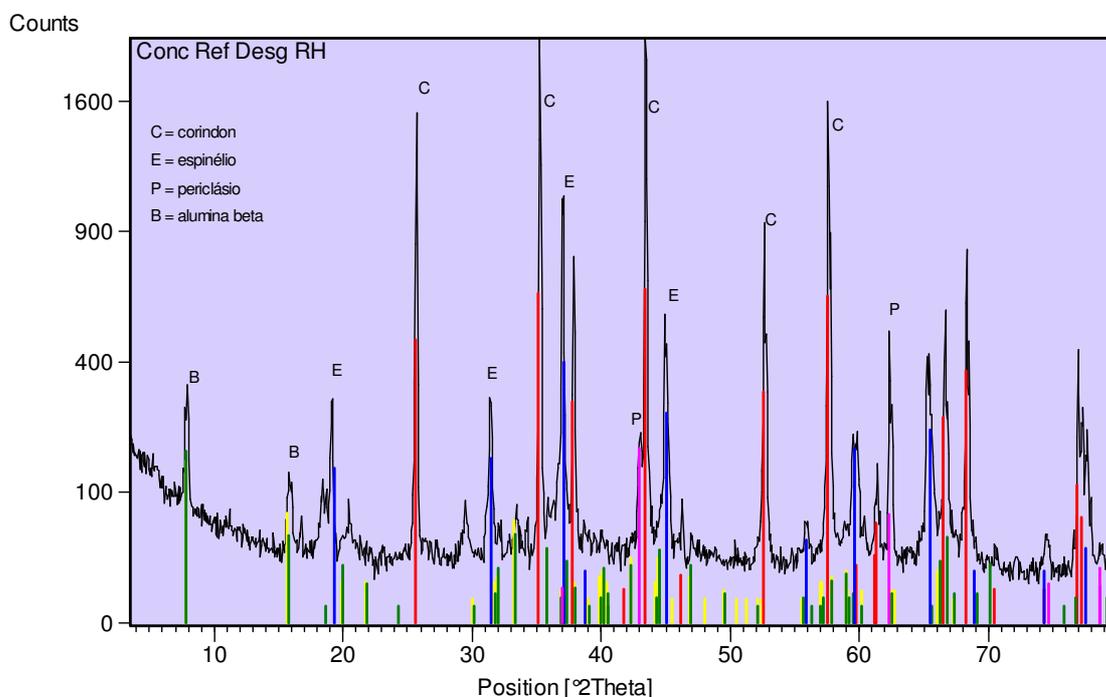


Figura 4.51- Difractograma do resíduo RH
Fonte: UFMG e CPqD Magnesita, 2006.

A caracterização mineralógica dos resíduos foi feita com a utilização de um aparelho de Difração de Raios-X, marca PHILIPS, modelo PW 3719, no Laboratório de Análises por Raios-X, do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

4.2.4 Caracterização e classificação ambiental dos resíduos

A caracterização e classificação ambiental dos resíduos foi feita de acordo com o estabelecido na coletânea de normas ABNT NBR 10004:2004 - Resíduos sólidos – Classificação; ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos e ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.

a) Ensaio de lixiviação

A lixiviação é o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

O ensaio de lixiviação de inorgânicos dos resíduos de concretos refratários utilizados nos experimentos foi conduzido em dois locais diferentes. A obtenção do lixiviado e análise dos elementos As_{total} , Hg_{total} e Se_{total} foi conduzida na SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA, que utilizou como referência analítica o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21ª edição, 2005. Os outros elementos Ba_{total} , Cd_{total} , Pb_{total} , Cr_{total} e Ag_{total} , foram determinados no laboratório do DESA da UFMG, utilizando espectrofotômetro de absorção atômica, Perkin Elmer, Modelo 3300 Modo Chama.

A Figura 4.52 mostra o equipamento de agitação de amostras, para obtenção do extrato lixiviado, marca Marconi, pertencente à SGS GEOSOL LTDA.

O agitador rotatório de frascos deve ser capaz de:

- evitar a estratificação da amostra durante a agitação;
- submeter todas as partículas da amostra ao contato com o líquido extrator;
- garantir agitação homogênea de (30 ± 2) rpm, medida de ponto a ponto do frasco durante o período de funcionamento do agitador.



Figura 4.52 - Equipamento agitador rotatório de frascos

Os parâmetros analisados no ensaio de lixiviação são aqueles estabelecidos no Anexo F, (normativo) – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação, da ABNT NBR 10004:2004.

Os elementos inorgânicos (parâmetros) que precisam ser determinados são: Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cromo total, Fluoreto, Mercúrio, Prata e Selênio.

A Tabela 4.17 apresenta os valores obtidos no ensaio de lixiviação de inorgânicos dos resíduos: LD, CG, CT, RH.

Tabela 4.17 - Resultado do ensaio de lixiviação

Parâmetro	Limite máx. no lixiviado (mg/L)*	Escória de Aciaria LD** (mg/L)	Conc. Ref. CG (mg/L)	Conc. Ref. CT (mg/L)	Conc. Ref. RH (mg/L)
Arsênio	1,0	< 0,010	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Bário	70,0	0,75	0,30	< 0,20	< 0,20
Cádmio	0,5	0,022	< 0,020	< 0,020	< 0,020
Chumbo	1,0	< 0,010	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Cromo total	5,0	0,012	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Fluoreto	150,0	nd	nd	nd	nd
Mercúrio	0,1	< 0,0010 µg/L	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002
Prata	5,0	0,0039	< 0,04	< 0,04	0,09
Selênio	1,0	< 0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01

*Anexo F (normativo) da ABNT NBR 10004:2004

**Os resultados relatados são de REIS da SILVA et al., 2005.

4.3 Programa Experimental

O programa experimental foi desenvolvido para fabricação de um produto que utilizasse os resíduos escolhidos, escória de aciaria LD e três diferentes tipos de concretos refratários (CG, CT, RH). O produto desse processo de reciclagem escolhido é “Peças de Concreto para Pavimentação”, que é definido, como sendo “peça pré-moldada, de formato geométrico

regular, com comprimento máximo de 400 mm, largura mínima 100 mm e altura mínima de 60 mm”, de acordo com a NBR 9781:1987.

Esse programa é composto de duas partes: na primeira, foi desenvolvido o experimento em laboratório, compreendendo a caracterização dos resíduos conforme item 4.2.

Para isto foi utilizado o Laboratório de Concreto do DEMC da UFMG na confecção das peças, sua cura e posteriormente os ensaios mecânicos de compressão, de abrasão, e ensaio de absorção de água. Os ensaios de lixiviação e de solubilização foram executados pela SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

Na segunda parte procurou-se fabricar as peças em escala industrial, utilizando-se as instalações da UNI-STEIN, uma empresa situada em Pedro Leopoldo, na região da Grande Belo Horizonte.

4.3.1 Produção de peças em laboratório

Várias misturas, com diferentes composições, contemplando os diversos resíduos foram feitas, com o objetivo de obter as condições gerais (item quatro) e as condições específicas (item cinco) da norma NBR citada anteriormente.

a) Condições gerais

- o concreto deve ser constituído de cimento Portland, agregados e água;
- o cimento Portland pode ser de qualquer tipo e classe, devendo obedecer às NBR 5732, NBR 5733, NBR 5735 e NBR 5736;
- os agregados devem ser naturais ou artificiais obedecendo à NBR 7211;
- a água deve ser limpa, isenta de produtos nocivos à hidratação do cimento;
- o uso de aditivos é permitido inclusive pigmentos, desde que não provoquem efeitos prejudiciais ao concreto, devidamente comprovados por ensaios específicos.

b) Condições específicas

1. a resistência característica estimada à compressão, calculada de acordo com item 6.5 da norma deve ser:
 - maior ou igual a 35 MPa, para solicitações de veículos comerciais de linha;
 - maior ou igual a 50 MPa, quando houver tráfego de veículos especiais ou solicitações capazes de produzir acentuados efeitos de abrasão.
2. As variações máximas permissíveis nas dimensões são:
 - 3 mm, no comprimento e largura das peças;
 - 5 mm, na altura das peças.

4.3.1.1 Procedimento de fabricação das peças

No processo de fabricação dos componentes de pavimentação intertravada foram utilizados os seguintes equipamentos e acessórios:

- formas de plástico para moldagem das peças;
- betoneira de eixo vertical;
- mesa vibratória;

As Figuras 4.53 até 4.56 mostram estes equipamentos e acessórios.



Figura 4.53 - Formas de plástico



Figura 4.54 - Formas com desmoldante



Figura 4.55 - Betoneira de eixo vertical



Figura 4.56 - Mesa vibratória

A ordem de carregamento dos materiais na misturadora (betoneira) pode influir significativamente no valor de resistência do concreto.

A colocação do agregado graúdo e da água em primeiro lugar apresenta a vantagem prática adicional de limpar o interior da betoneira, removendo os restos de concreto deixados na betonada anterior.

Colocando-se em seguida o cimento, tem-se a formação de uma pasta e um bom envolvimento das partículas do agregado graúdo.

Completando-se a mistura com o agregado miúdo, tem-se o envolvimento de suas partículas e a finalização da mistura.

Aparentemente, a adição do agregado miúdo antes do graúdo prejudica a formação de película em torno das partículas deste último, prejudicando também a sua aderência com a pasta, sendo esta aderência um fator fundamental da resistência do concreto.

Portanto, a ordem de adição dos materiais na confecção das misturas deve ser a seguinte:

- todo o agregado graúdo e parte da água (70 a 80%), ligando-se a misturadora por alguns segundos;
- todo o cimento, misturando-o com o agregado graúdo, fazendo com que as partículas do agregado sejam envolvidas por uma camada de pasta de cimento;
- todo o agregado miúdo e o restante da água misturada ao aditivo.

O aditivo usado na fabricação dos corpos de prova foi o SIKA VISCOCRETE^R 3535 CB, definido pelo fabricante como sendo de última geração. É usado para produzir concreto de

alto desempenho (CAD), concreto de pega normal, concreto para indústria de pré-moldados e concretos com alta resistência inicial. Esse aditivo apresenta as seguintes características:

- ação principal: redutor de água de altíssima eficiência;
- composição básica: solução de policarboxilato em meio aquoso;
- aspecto: líquido;
- cor: castanho claro;
- densidade a 25°C: 1,05 a 1,10 g/cm³;
- pH: 3,6 a 6,0.

Ainda segundo o fabricante, são obtidas as seguintes propriedades no concreto com o uso do VISCOCRETE 3535 CB:

- extremo redutor de água, resultando em altas resistências à compressão;
- excelente fluidez, resultando em grandes reduções nos custos de lançamentos e adensamento;
- redução de retrações e fissuras;
- possibilidade de redução ou eliminação da cura a vapor;
- redução da taxa de carbonatação;
- concreto fluído com mínimo fator água/cimento (a/c) sem segregação e exsudação;
- melhora a aderência e textura da superfície do concreto;
- aumento do módulo de elasticidade;
- aumento da impermeabilidade e durabilidade.

Após terminar a colocação dos materiais, a misturadora deve permanecer ligada até que se obtenha um concreto homogêneo em seu aspecto visual.

Para a fabricação das peças (corpos de prova), partiu-se de uma mistura que foi denominada Padrão (P1), onde foram empregados apenas recursos naturais, tais como Areia Natural (AN), Areia Artificial (AA), Pó de Pedra (PP) e Brita Zero (B0). A partir daí foram formuladas várias outras misturas, com composições diversas, procurando substituir total ou parcialmente os recursos naturais da mistura P1, pelos resíduos do processo siderúrgico. Essas misturas

experimentais feitas no Laboratório de Concreto do DEMC-UFMG estão apresentadas na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Misturas experimentais de laboratório

Mistura/ Componente	P1 (RN)	M1 (LD)	M2 (GTH)	M3 (RH)	M17	M19	M21	M22	M23	M24	M25
AN (%)	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	1,0 (11,5)	1,0 (12,0)	2,5 (29,4)	1,0 (11,8)	X	X	X
AA (%)	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PP (%)	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	X	5,4 (20,5)	X	X	X	X	X	X	X
B0 (%)	5,4 (20,5)	X	5,4 (20,5)	5,4 (20,5)	X	X	4,0 (47,1)	4,0 (47,1)	4,0 (44,9)	25,5 (48,8)	X
CP V - ARI (%)	3,5 (13,3)	3,5 (13,3)	3,5 (13,3)	3,5 (13,3)	2,2 (25,3)	1,8 (21,7)	2,0 (23,5)	2,0 (23,5)	1,7 (19,1)	10,8 (20,7)	5,4 (20,9)
Escória AF (%)	1,2 (4,6)	1,2 (4,6)	1,2 (4,6)	1,2 (4,6)	X	X	X	X	X	X	X
CG (%)	X	X	4,0 (15,2)	X	0,5 (5,7)	0,5 (6,0)	X	0,5 (5,9)	1,2 (13,5)	5,3 (10,1)	2,8 (10,9)
CT (%)	X	X	3,4 (12,9)	X	0,5 (5,7)	0,5 (6,0)	X	0,5 (5,9)	1,1 (12,4)	5,3 (10,1)	2,8 (10,9)
RH (%)	X	X	3,4 (12,9)	5,4 (20,5)	0,5 (5,7)	0,5 (6,0)	X	0,5 (5,9)	0,9 (10,1)	5,3 (10,1)	2,8 (10,9)
LD (%)	X	5,4 (20,5)	X	X	4,0 (46,0)	4,0 (48,2)	X	X	X	X	12,0 (46,5)
Peso seco da mistura (kg)	26,3	26,3	26,3	26,3	8,7	8,3	8,5	8,5	8,9	52,2	25,8
Relação a/c (L/kg)	0,42	0,42	0,42	0,42	0,35	0,40	0,32	0,32	0,35	0,35	0,35
Aditivo (mL)	não	não	não	não	33	30	33	33	33	81	81

AN = Areia Natural; AA = Areia Artificial; PP = Pó de Pedra; B0 = Brita Zero; CP V – ARI = cimento de alta resistência inicial; AF = Alto Forno; CG = Concreto Refratário de Canal de Vazamento de Gusa; CT = Concreto refratário de rebote de Carro Torpedo; RH = Concreto Refratário de Desgaseificador RH; LD = Escória de Aciaria LD; RN = recursos naturais; GTH = CG+CT+RH; X = ausência do referido componente.

Pode-se verificar na tabela que o peso de cada uma das misturas P1, M1, M2, foi de 26,3 kg, suficiente para a fabricação de 6 corpos de prova (peças). Usou-se também 1,2 kg de escória

de alto forno moída como complemento do cimento, por sua característica de pozolana. A mistura P1, tomada como padrão, foi constituída apenas com componentes de recursos naturais (RN).

Na mistura M1, a escória de LD substituiu a brita zero como agregado graúdo, permanecendo os outros componentes constantes da mistura P1 (RN).

Para a mistura M2 (GTH) os recursos naturais areia artificial (AA) e pó de pedra (PP) foram substituídos inteiramente pelos resíduos de concretos refratários CG, CT e RH.

A mistura M3 (RH) foi composta com a substituição da areia artificial pela mesma quantidade de concreto refratário RH.

A relação água/cimento (a/c) para as quatro primeiras misturas foi mantida constante em 0,42 L/kg e não a foi feita utilização de aditivo químico.

No caso das misturas M17, M19, M21, M22 e M23, como os valores da resistência à compressão obtidos nas misturas anteriores foi muito baixo, resolveu-se aumentar a quantidade de cimento, diminuir a relação água/cimento (a/c) e incorporar o aditivo químico com o intuito de aumentar essa propriedade mecânica. Passou-se também a fabricar apenas duas peças, como medida de economia de material e então testá-las verificando se a resistência foi obtida ou não.

Com a mistura M24 foram produzidos 12 corpos de prova para que se pudesse testá-los com diferentes idades a partir da data de fabricação (14, 28 e 62 dias), mantendo-se a quantidade de cimento, a relação água/cimento (a/c) e quantidade proporcional de aditivo.

Seis corpos de prova foram fabricados com a mistura M25 e testados. Foi usada a mesma quantidade de cimento, a mesma relação água/cimento (a/c) e também a mesma quantidade de aditivo químico. No entanto, diferentemente da M24, a brita zero foi substituída pela escória de LD como agregado graúdo.

A etapa seguinte do processo é a moldagem dos corpos de prova nas formas de plástico que já devem estar devidamente untadas com o desmoldante para facilitar a desmoldagem.

Preenchidas as formas, essas são levadas para a mesa vibratória para conseguir o adensamento e compactação do concreto produzido.

Mesas vibratórias não são os equipamentos mais indicados para a moldagem dos corpos de prova, uma vez que possuem baixa energia de adensamento, exigindo assim que as misturas sejam mais ricas em cimento, acarretando aumento de custo do concreto produzido.

A Figura 4.57 mostra seis corpos de prova obtidos de uma das misturas feitas no laboratório.



Figura 4.57 - Corpos de prova produzidos

Após a etapa de vibração, os corpos de prova são submetidos à cura, que é a operação final de obtenção do concreto, que consiste em evitar a retração hidráulica nas primeiras idades, através da hidratação do cimento, pelo controle do tempo, da temperatura e da umidade.

Nesse trabalho adotamos o procedimento de cura para os corpos de prova fabricados em escala de laboratório, colocando-os em uma sala com umidade variando entre 50% e 75%, pelo prazo de três dias, sendo então desmoldados e retornando para uma sala úmida por mais um dia, conforme mostrado na Figura 4.58.



Figura 4.58 - Sala úmida

A desmoldagem das peças é feita no quarto dia após a fabricação, conforme mostrado nas Figuras 4.59 e 4.60.



Figura 4.59 - Corpos de prova desmoldados **Figura 4.60** - Face oposta dos corpos de prova

Finalizando o processo de produção de concreto no laboratório, procedeu-se o capeamento dos corpos de prova antes do ensaio de compressão, atendendo ao item 5.1, letra b, da NBR 9780:1987. Preferiu-se o uso de argamassa colante ao da argamassa de enxofre por ser mais barata. O procedimento consiste em misturar a argamassa colante com água, obtendo-se uma pasta que é depositada sobre uma folha de jornal colocada sobre uma superfície plana. Aguarda-se a secagem da argamassa por um dia, e então se faz o mesmo procedimento para a outra face. A Figura 4.61 mostra a etapa de capeamento.



Figura 4.61 - Capeamento dos corpos de prova

4.3.2 Produção de peças em escala industrial

A produção das peças em escala industrial foi feita nas instalações da UNI-STEIN, localizada no Município de Pedro Leopoldo, na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

A UNI-STEIN é a única empresa credenciada pelo maior fabricante mundial de pavimentação articulada/intertravada, o grupo alemão F. von Langsdorff, a fabricar no Brasil a sua linha de produtos.

A UNI-STEIN está estruturada e capacitada a fabricar e assentar os blocos pré-moldados em qualquer parte do território nacional.

A Figura 4.62 mostra os galpões da parte fabril e parte do estoque da empresa.



Figura 4.62 - Vista parcial da empresa UNI-STEIN

4.3.2.1 Processo industrial de fabricação

O processo industrial comumente utiliza recursos naturais como brita (agregado graúdo), areia natural de rio (agregado miúdo), pó de brita que é utilizado para dar um melhor acabamento às peças produzidas e cimento Portland.

Os concretos empregados na fabricação de tubos, de blocos, de concreto projetado, de concreto compactado a rolo e de pavimentos são enquadrados como “concretos secos” (FRASSON JÚNIOR citado por PAGNUSSAT, 2004).

Os equipamentos de moldagem são de dois tipos: os vibratórios e os vibro compactadores (vibro prensas). Os primeiros não são os mais indicados, uma vez que exigem, para a moldagem misturas ricas em cimento, enquanto que as vibro prensas, possuindo dispositivo de compactação, além do de vibração, podem moldar peças com menor consumo de cimento (VARGAS, 2002).

As peças produzidas em vibro prensas nas quais é empregada alta pressão e vibração do equipamento possuem melhor acabamento de superfície e melhor resistência ao desgaste e, conseqüentemente, maior durabilidade dessas (CRUZ, 2003).

Nas vibro prensas, que são equipamentos multifuncionais, é produzida uma grande gama de artefatos de cimento tais como: blocos de concreto, tijolos, meio fio, grelhas, peças pré-moldadas de concreto usadas na pavimentação e outras mais.

As Figuras 4.63 e 4.64 mostram a vista de frente e a vista posterior da vibro prensa pertencente a UNI-STEIN que foi utilizada na fabricação das peças dessa pesquisa.



Figura 4.63 - Vista frontal da vibro prensa



Figura 4.64 - Vista posterior da vibro prensa

Foram utilizadas diferentes misturas (traços - T) baseadas na experiência da UNI-STEIN. No entanto, ajustes foram necessários de acordo com a análise granulométrica dos resíduos, quantidade de cimento e relação água/cimento (a/c) usada. A fabricação foi feita em duas datas distintas, 15/06/2007 e 29/06/2007.

O aditivo utilizado foi o GOLDEN BLOCK, fabricado pela empresa SPARTAN DO BRASIL, que apresenta as seguintes características:

- aparência: líquido viscoso transparente;
- cor: rosa;
- odor: citronela;
- pH: 7,0 – 8,0
- peso específico: 1,01 – 1,03 g/cm³;
- viscosidade: 600 – 900 cts.

Ainda segundo o fabricante, o GOLDEN BLOCK é um aditivo para concreto que melhora a resistência, reduz o tempo de secagem em 30 a 40% e produz um sensível aumento de qualidade no acabamento.

A dosagem recomendada é diluir a uma proporção de uma parte do produto em cinquenta partes de água (1:50) ou mesmo utilizar 500 gramas da solução por saco de cimento usado, junto com a água de amassamento.

A Tabela 4.19 mostra as misturas experimentais feitas na planta da UNI-STEIN. São seis misturas diferentes com valores semelhantes de agregados de resíduos (gráudo e miúdo), mas com diferentes valores de adição de cimento CP V procurando obter valores de 35 MPa e de 50 MPa. Como consequência desses valores diferentes de cimento, a quantidade de água também foi modificada para se obter uma relação a/c adequada.

Tabela 4.19 - Misturas experimentais em escala industrial (kg)

Mistura/Componente	Traço 1 (T1)	Traço 2 (T2)	Traço 3 (T3)	Traço 4 (T4)	Traço 5 (T5)	Traço 6 (T6)
CG (%)	20 (18,3)	20 (19,2)	20 (18,9)	20 (17,9)	20 + 10 (19,0)	30 (27,8)
CT (%)	20 (18,3)	20 (19,2)	20 (18,9)	20 (17,9)	20 + 10 (19,0)	15 (13,9)
RH (%)	20 (18,3)	20 (19,2)	20 (18,9)	20 (17,9)	20 + 10 (19,0)	15 (13,9)
LD (%)	30 (27,5)	30 (28,8)	30 (28,3)	30 (26,8)	20 + 15 (22,1)	15 (13,9)
LD < 4,75mm (%)	-	-	-	-	-	15 (13,9)
CP V – ARI (%)	19 (17,4)	14 (13,5)	16 (15,1)	22 (19,6)	22 + 11 (20,9)	18 (16,7)
Peso seco da mistura (kg)	109	104	106	112	158	108
Relação a/c (L/kg)	0,58	0,53	0,56	0,77	0,51	0,50
Aditivo (mL)	200	200	200	200	200	200

CP V – ARI = cimento de alta resistência inicial; CG = Concreto Refratário de Canal de Vazamento de Gusa; CT = Concreto refratário de rebote de Carro Torpedo; RH = Concreto Refratário de Desgaseificador RH; LD = Escória de Aciaria LD; a/c = relação água/cimento.

4.4 Avaliação do produto fabricado

Deve ser feita uma avaliação dimensional nas peças fabricadas para se determinar a conformidade com os requisitos da NBR 9781:1987, item 3.1: ... comprimento máximo de 400 mm, largura mínima 100 mm e altura mínima de 60 mm.

A absorção de água é determinada em peças que são pesadas, mergulhadas por 24 horas em água e depois repesadas. A diferença percentual em peso é o valor da quantidade de água absorvida.

A determinação do desgaste por abrasão é feita conforme requisitos da NBR 12042:1992 – Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. A única exceção aos requisitos da norma é que se usa a perda de peso em lugar da perda de espessura do corpo de prova.

Os ensaios de lixiviação e solubilização deverão ser conduzidos em amostras retiradas das peças fabricadas, para a caracterização ambiental. Devido ao tempo de reação do cimento (hidratação), os testes de lixiviação e solubilização, conforme as NBRs 10.005:2004 e 10.006:2004, respectivamente, devem ser realizados a, pelo menos, 28 dias após a fabricação dessas.

O produto fabricado de acordo com a ABNT NBR 9781:1987 – Peças de Concreto para Pavimentação – Especificação, deve ser ensaiado para a determinação da resistência à compressão simples de acordo com a ABNT NBR 9780:1987 – Peças de Concreto para Pavimentação – Determinação da Resistência à Compressão – Método de Ensaio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Verificação Dimensional

Em escala de laboratório foram fabricadas peças denominadas pavimento de 16 faces, conforme a Figura 5.65.

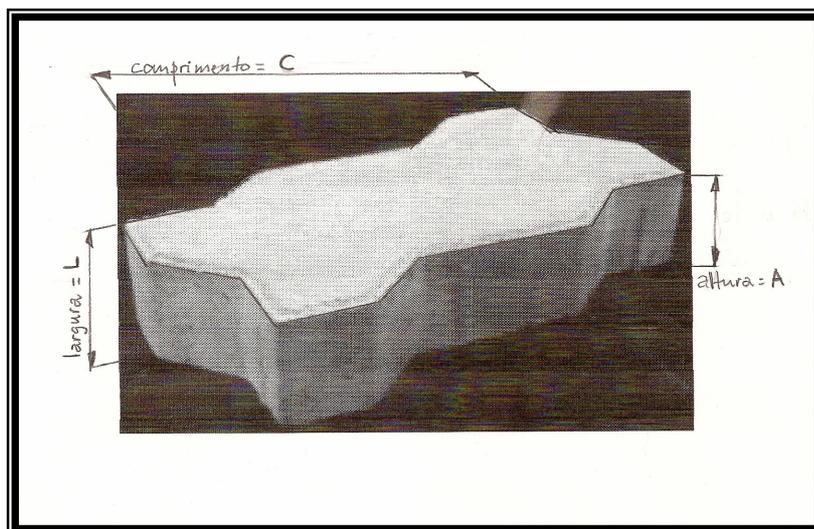


Figura 5.65 - Peça de 16 faces

O resultado da inspeção dimensional das peças está mostrado na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Valores dimensionais das peças de laboratório

Peça /Dimensão especificada (mm)	P1.5	P1.6	P1.7	M24.1	M24.2	M24.3	M24.4	M24.5	M24.6
Comprimento (C) (400 máx.)	215	213	215	215	215	215	217	216	215
Largura (L) (100 mín.)	103	102	102	103	105	102	106	106	104
Altura (A) (60 mín.)	78	75	78	75	73	74	73	74	76

As peças fabricadas em escala industrial são na forma de S conforme mostrado na Figura 5.66.

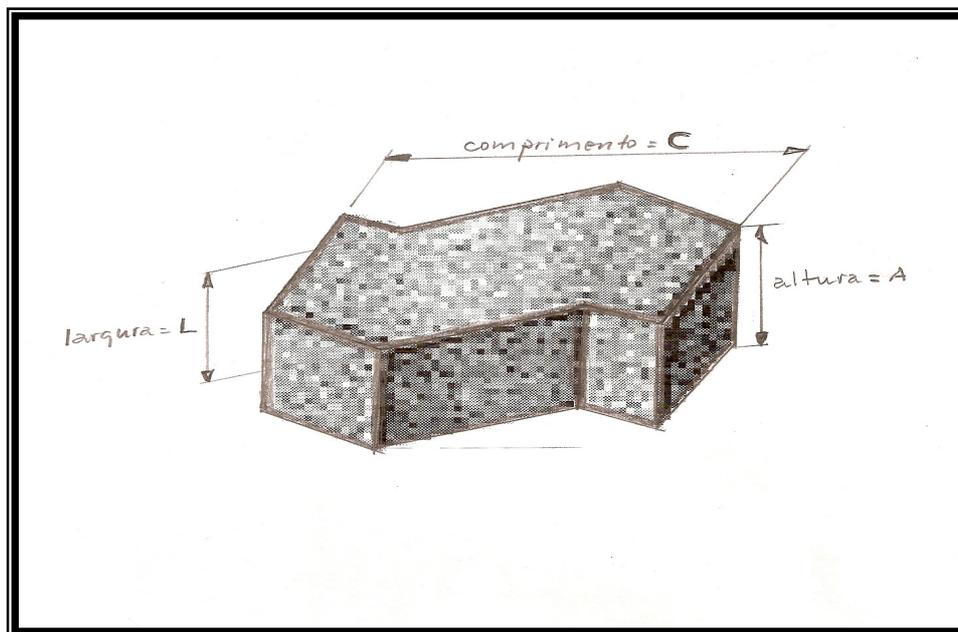


Figura 5.66 - Peça em formato S

O resultado da inspeção dimensional das peças fabricadas em escala industrial é mostrado na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Valores dimensionais das peças do processo industrial

Dimensão (mm)/Peça	T1.1	T1.2	T1.3	T1.4	T1.5	T2.1	T2.2	T2.3	T2.4	T2.5
C (400 máx.)	172	170	173	170	170	173	172	172	171	170
L (100 mín.)	100	100	100	100	100	100	101	101	101	102
A (60 mín.)	86	87	85	88	88	78	79	80	83	80

De acordo com a inspeção dimensional, verifica-se que todas as peças satisfazem as exigências da NBR 9781:1987, tanto para as peças produzidas em laboratório quanto para aquelas fabricadas na indústria.

5.2 Ensaio de Absorção de Água

Este ensaio foi realizado apenas em caráter informativo, já que não é exigido na NBR 9781:1987. Foram utilizadas 9 peças da mistura M24 (mistura de laboratório) e 11 peças fabricadas na UNI-STEIN em 15/06/2007, com 3 misturas diferentes (T1, T2 e T3), usando três quantidades diferentes de cimento (T1 = 19 kg; T2 = 14 kg e T3 = 16 kg) para a realização desse ensaio. Os resultados médios de cada parâmetro são apresentados na Tabela 5.22

Tabela 5.22 - Valores médios de absorção

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Diferença (g)	Diferença percentual
M24	4.389	4.440	23	0,53
T1	3.808	3.848	40	1,05
T2	3740	3.874	134	3,63
T3	3.831	3.919	87	2,29
UNI-STEIN	3.432	3.480	47	1,38

Na Tabela 5.22 pode-se verificar que as peças fabricadas em escala de laboratório (M24) apresentam um percentual de absorção de água muito menor do que os das peças fabricadas em escala industrial (T1, T2 e T3).

Entre as peças produzidas em escala industrial, as que apresentaram melhores resultados estão na ordem decrescente da quantidade de cimento usada.

A Figura 5.67 mostra a qualidade da superfície das peças fabricadas em escala industrial. Verifica-se que o melhor acabamento é das peças com maior quantidade de cimento (T1 melhor que T3, que é melhor que T2).



Figura 5.67 - Peças fabricadas na UNI-STEIN usando resíduos

Na Figura 5.68 faz-se uma comparação de acabamentos de superfícies entre as peças usualmente fabricadas pela UNI-STEIN (as duas das extremidades) e as peças fabricadas com os resíduos da siderurgia.



Figura 5.68 - Comparação de acabamento de superfície

Ao se comparar o acabamento de superfície das peças de fabricação normal da UNI-STEIN com o das peças fabricadas com resíduos, deve-se salientar que o processo de fabricação da UNI-STEIN já é um processo consolidado e muito bem controlado, com a utilização de matérias primas bem conhecidas e testadas.

Para fabricação das peças usando os resíduos, é necessário que se desenvolva o processo, onde será necessário um grande número de testes. Nesses testes devem ser experimentadas

diferentes misturas, com diferentes quantidades de agregados graúdos e miúdos, de cimento e relação água/cimento (a/c).

5.3 Ensaio de Abrasão

Já foi dito anteriormente, que este ensaio não faz parte dos requisitos de especificação da norma NBR 9781:1987 – Peças de concreto para pavimentação. Ele foi feito apenas com caráter informativo. Procura-se apenas fazer uma comparação entre as peças fabricadas em escala de laboratório e peças de fabricação normal da UNI-STEIN.

Os ensaios foram realizados no Laboratório do DEM da UFMG. Foram obedecidas as condições de ensaio recomendadas na NBR 12042:1992, exceto no cálculo do percentual de perda por abrasão, que foi determinado por decréscimo de massa e não por decréscimo de espessura.

A Figura 5.69 mostra a máquina de ensaio do fabricante CONTENCO, modelo PAVITEST.



Figura 5.69 - Máquina de ensaio de abrasão

A Tabela 5.23 apresenta o resultado dos ensaios realizados em algumas amostras de misturas fabricadas em laboratório e de uma amostra do fabricante UNI-STEIN.

Os resultados obtidos mostram que os valores de perda de massa por abrasão das misturas fabricadas em laboratório são inferiores ao valor da peça fabricada pela UNI-STEIN, excetuando apenas o valor da M1.

Isso não nos permite concluir que os valores de abrasão são piores nas peças fabricadas pela UNI-STEIN, pois foi feito apenas um teste. Na realidade, acredita-se que nas peças fabricadas em escala industrial com resíduos siderúrgicos usados nessa pesquisa, sejam obtidos valores

semelhantes aos apresentados na Tabela 5.23, para as misturas produzidas em laboratório. Justifica-se essa afirmativa pelo fato do agregado graúdo escória de LD ser mais duro que o agregado de brita calcária.

Tabela 5.23 - Valores de abrasão

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Diferença de massa (g)	Perda de massa (%)
M1	209,7	194,5	15,2	7,2
M2	241,4	235,7	5,7	2,4
M3	229,7	224,1	5,6	2,4
M17	297,1	287,9	9,2	3,1
M19	373,9	367,0	6,9	1,8
M23	281,4	276,4	5,0	1,8
M24	307,7	302,3	5,4	1,7
UNISTEIN	310,9	298,0	12,9	4,1

5.4 Ensaios de Classificação das Misturas dos Resíduos Sólidos

Estes ensaios foram feitos pela SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA., que emitiu o Relatório Técnico de Classificação Parcial de Resíduos Sólidos ABNT NBR 10.004:2004 – Avaliação de Corrosividade, Reatividade e Toxicidade (parâmetros inorgânicos).

5.4.1 Ensaio de lixiviação

A lixiviação é o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. O ensaio foi realizado tomando como referências a ABNT NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21^a Ed. (2005). Os parâmetros do ensaio estão mostrados na Tabela 5.24 e os resultados de análise das amostras da mistura M19 e do fabricante UNISTEIN (amostra de pavimento fabricada com recursos naturais e visando resistência de 50 MPa) estão na Tabela 5.25.

Tabela 5.24 - Parâmetros do ensaio de lixiviação

Amostra	Peso Amostra (g)	pH Ext. Lixiviado	Tempo Lixiviação (h)	Volume Líquido obtido (mL)	Sólidos Secos (%)	Corrosividade (pH)	Reatividade
M19	25	11,49	18	500	95,9	12,48	não
UNISTEIN	25	11,01	18	500	93,1	12,40	não

Tabela 5.25 - Classificação da toxicidade por lixiviação

Parâmetro	Limite máximo permitido na norma (mg/L)	Concentração no resíduo lixiviado M19 (mg/L)	Concentração no resíduo lixiviado UNISTEIN (mg/L)
Arsênio	1,0	< 0,01	< 0,01
Bário	70,0	0,185	0,160
Cádmio	0,5	< 0,001	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,001	0,01
Cromo	5,0	< 0,01	< 0,01
Total			
Fluoretos	150,0	0,68	0,98
Mercúrio	0,1	< 0,0002	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,01	< 0,01
Selênio	1,0	< 0,01	< 0,01

5.4.2 Ensaio de solubilização

A norma ABNT NBR 10006:2004 fixa os requisitos exigíveis para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na ABNT NBR 10004:2004, como classe IIA – não inertes – e classe IIB – inertes. O ensaio foi realizado tomando como referências a ABNT NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos e Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21ª Ed. (2005). Os resultados de análise e os parâmetros de ensaio das amostras M19 e amostra do fabricante UNI-STEIN (amostra de pavimento fabricada com recursos naturais e visando uma resistência de 50 MPa) estão mostrados na Tabela 5.26.

Tabela 5.26 - Resultado do ensaio de solubilização

Amostra	pH extrato solubilizado	Umidade	Al Total mg Al/L	As Total mg As/L	Ba Total mg Ba/L	Cd Total mg Cd/L	Pb Total mg Pb/L	Cianeto Total mg CN-/L	Cloreto mg Cl-/L	Cu Total mg Cu/L	Cr Total mg Cr/L	Fenois mg C₆H₅OH/L
M19	12,44	4,07	0,53	< 0,01	0,280	< 0,001	< 0,01	< 0,01	< 2,0	< 0,01	< 0,01	< 0,001
UNISTEIN	12,29	6,91	0,85	< 0,01	0,332	< 0,001	< 0,01	< 0,01	< 2,0	< 0,01	< 0,01	< 0,001
Anexo G*	-	-	0,2	0,01	0,7	0,005	0,01	0,07	250	2	0,05	0,01
Amostra	Fe Total mg Fe/L	Fluoreto mg F-/L	Mn Total mg Mn/L	Hg Total mg Hg/L	N Nítrico mg NO₃- N/L	Ag Total mg Ag/L	Se Total mg Se/L	Na Total mg Na/L	Sulfato mg SO₄/L	Surfactantes mg MBAS/L	Zn Total mg Zn/L	
M19	< 0,05	0,64	< 0,02	< 0,0002	1,58	< 0,01	< 0,01	92,5	3,08	< 0,10	< 0,01	
UNISTEIN	< 0,05	0,22	< 0,02	< 0,0002	0,10	< 0,01	< 0,01	26,9	2,68	< 0,10	< 0,01	
Anexo G*	0,3	1,5	0,1	0,001	10	0,05	0,01	200	250	0,5	5,0	

*Anexo G (normativo) da ABNT NBR 10004:2004 – Padrões para o extrato de solubilização – limite máximo no extrato

5.4.3 Classificação dos resíduos

A classificação da mistura de resíduos M19 (Relatório Técnico SG-0242-CR/07) e da amostra do fabricante UNI-STEIN (SG-0241-CR/07) foram realizadas parcialmente, pois foi baseada exclusivamente nos parâmetros inorgânicos, não tendo sido analisados os parâmetros orgânicos.

a) De acordo com as normas ABNT NBR 10004:2004, 10005:2004 e 10006:2004, o resíduo da amostra da mistura **M19** é classificado com **Classe I (Perigoso)**, com **Código(s) de identificação do resíduo: D002** por apresentar característica **Corrosiva**, conforme item 4.2.1.2, letra a. O valor do pH da mistura encontrado foi de 12,44.

O item acima mencionado recomenda a classificação D002 para o resíduo cuja amostra apresentar a propriedade de “ser aquosa e apresentar pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5, ou sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2 ou superior ou igual a 12,5”.

b) De acordo com as normas ABNT NBR 10004:2004, 10005:2004 e 10006:2004, o resíduo da mistura do fabricante UNI-STEIN (mistura que utiliza recursos naturais como areia de rio e brita calcária) é **classificada como Classe II A (Não Perigoso – Não Inerte)** por apresentar teor de **Alumínio** acima do limite máximo permitido.

Este resíduo não é Corrosivo, por não apresentar características corrosivas segundo item 4.2.1.2, letra a, e não é Reativo, por não apresentar características reativas segundo item 4.2.1.3, letras a, b, c, e.

5.5 Ensaio de Compressão Simples

A resistência à compressão (RC) é um importante parâmetro a ser considerado na produção de pavimentos. De acordo com Helene e Terzian (1995), a RC de um concreto não tem um único valor. Ela deve ser descrita como uma população com $n \rightarrow \infty$ valores. A experiência tem demonstrado que quando o concreto é fabricado sob condições usuais e constantes, a distribuição desta população pode ser considerada normal (ou distribuição de Gauss) e ser descrita por dois parâmetros: a média e o desvio padrão.

Os ensaios de compressão simples das peças fabricadas em laboratório foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMC da UFMG e o procedimento de ensaio foi de acordo com as recomendações da NBR 9780:1987.

A máquina de ensaio usada é uma prensa hidráulica da marca EMIC, modelo PC 2001, equipada com programa de automação de ensaios. Os corpos de prova foram dispostos entre dois cilindros metálicos de diâmetro $90 \pm 0,5$ mm, conforme mostrado na Figura 5.70.



Figura 5.70 - Máquina de ensaio de compressão

Em conformidade com a NBR 9780:1987 a resistência à compressão das peças (em MPa) foi obtida dividindo-se a carga de ruptura (em N), pela área de carregamento (em mm^2), multiplicando-se o resultado por um fator multiplicativo “p”, que é função da altura da peça, que nessa pesquisa é sempre de 80 mm ($p = 1,00$).

A Tabela 5.27 apresenta os valores de resistência à compressão, obtidos nas peças produzidas em laboratório, usando misturas com resíduos siderúrgicos. Os ensaios foram feitos com a idade de 14 dias.

Tabela 5.27 - Resistência à compressão (MPa)

Composição	Tensão de Ruptura	Média
M1	11 / 12 / 10	11
M2	26 / 28 / 31	28
M3	33 / 28 / 25	29
M17	37 / 43 / 43	41
M24	47 / 42 / 53	47
M25	43 / 43 / 46	44

A Figura 5.71 mostra a representação gráfica da RC das misturas constantes da Tabela 5.27. Pode-se notar que os valores de RC estão crescentes de acordo com a ordem também crescente de fabricação das misturas (M1 → M24), mostrando o aprimoramento do processo de produção.

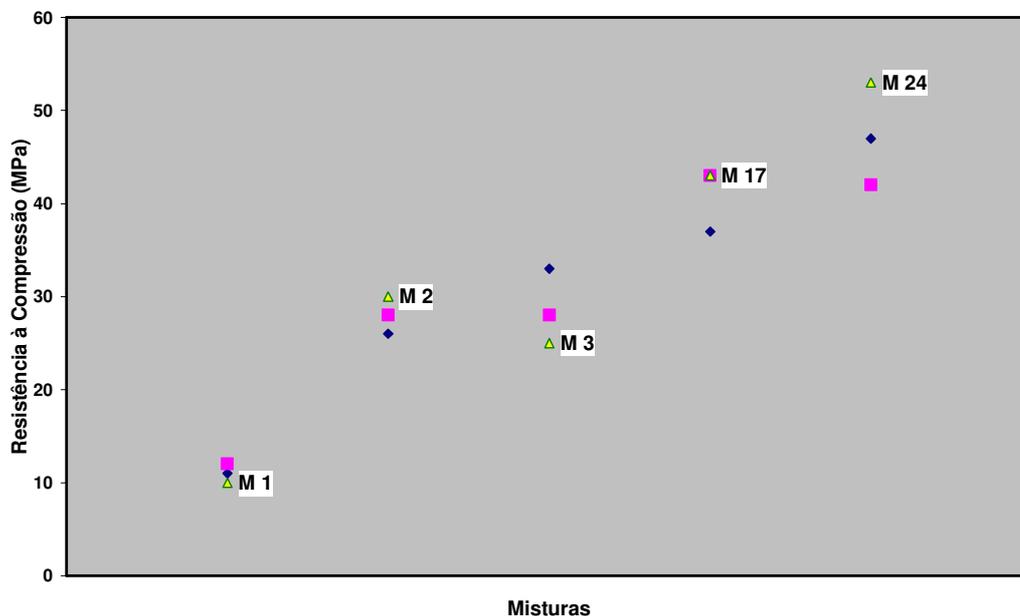


Figura 5.71 - Valores de RC para diversas misturas de laboratório

Vale salientar que as três primeiras misturas, M1, M2 e M3, foram produzidas apenas com a substituição parcial dos recursos naturais. No caso de M1 foi utilizada a escória de LD como substituta da brita zero (B0). Na mistura M2 os agregados miúdos naturais (AA e PP) foram substituídos pelos concretos CG, CT e RH. E na mistura M3 foi utilizado o concreto RH em substituição ao agregado miúdo areia artificial (AA).

Na M17 foram usados os quatro resíduos: LD como agregado graúdo e os concretos CG, CT e RH, como agregados miúdos.

Na M24 usou-se a B0 como agregado graúdo e os concretos CG, CT e RH como agregados miúdos.

A Tabela 5.28 apresenta os valores da RC obtidos nos corpos de prova M24 para diferentes idades.

Tabela 5.28 - Valores de RC da M24 (MPa)

Amostra	Carga de Ruptura (kgf)	Tensão de Ruptura (MPa)	Idade dos corpos de prova (dias)
M24.1	32.566	50	14
M24.5	37.472	58	14
M24.9	30.898	48	14
Média ± δ	-	52 ± 5,3	-
M24.2	30.265	47	28
M24.6	27.343	42	28
M24.10	34.222	53	28
Média ± δ	-	47 ± 5,5	-
M24.3	39.000	60	62
M24.7	36.000	55	62
M24.11	34.400	53	62
M24.4	37.000	57	62
M24.8	31.000	48	62
M24.12	40.600	63	62
Média ± δ	-	56 ± 5,3	-

A Figura 5.72 mostra a representação gráfica dos dados da Tabela 5.28 para os corpos de prova da mistura M24.

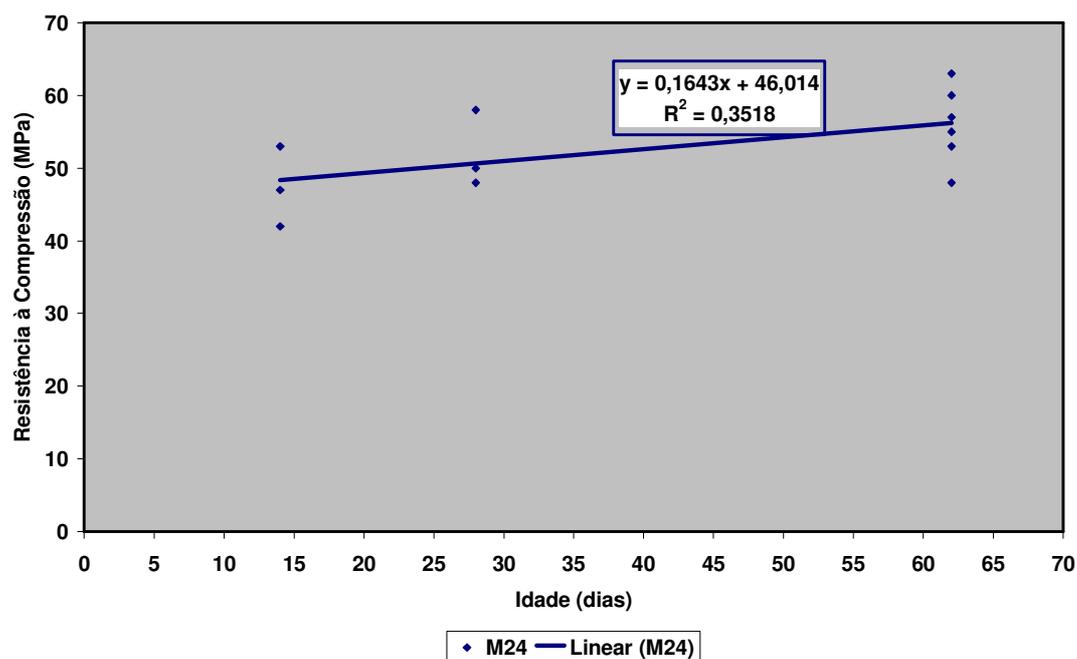


Figura 5.72 - Valores de RC da M24 em diferentes idades

Da Tabela 5.28 e da Figura 5.72 verifica-se que a RC média decresceu cerca de 10% da idade de 14 para 28 dias. Esse decréscimo não é usual e credita-se tal ocorrido a uma heterogeneidade no processo de mistura dos componentes do concreto e/ou do emprego da mesa vibratória e/ou da etapa de cura úmida.

No entanto, quando se compara os valores de RC da idade de 14 dias para os obtidos na idade de 62 dias, verifica-se um aumento de cerca de 8%. Esse crescimento da RC pode-se dizer que é mais usual.

As peças fabricadas na UNI-STEIN foram testadas em seu laboratório utilizando uma prensa hidráulica manual marca CONTENCO, modelo PAVITEST, escala de 0 – 120.000 Kgf, com subdivisão de 200 Kgf conforme mostrada na Figura 5.73.



Figura 5.73 - Máquina de ensaio da UNI-STEIN

As três primeiras misturas (traços) T1, T2 e T3 foram feitas utilizando o próprio misturador da vibro prensa que é muito grande em relação à quantidade da mistura que se utilizou 104 a 109 kg. A UNI-STEIN utiliza normalmente um traço com peso > 500 kg. Verificou-se durante o processo de mistura muito material agarrado às paredes do misturador, fazendo com que se interrompesse a operação para desprendê-lo e recolocá-lo de novo na mistura. Esta produção foi realizada em 15/06/2007.

Na produção realizada em 29/06/2007, utilizou-se uma betoneira em lugar do misturador da própria prensa. Procurou-se evitar os problemas de heterogeneidade das misturas anteriores. A

mistura (traço) T4, cuja relação $a/c = 0,77$, foi considerada “muito molhada” no julgamento depois que as peças saíram da prensa. Assim, decidiu-se que deveria ser acrescentado mais material, formando o traço T5, com uma nova relação $a/c = 0,51$ e T6 com $a/c = 0,50$.

Os corpos de prova foram capeados e imersos em água por 24 horas para a sua saturação conforme recomendado pela NBR 9780:1987.

Os ensaios foram realizados no laboratório da UNI-STEIN nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme padrão interno da empresa, utilizando-se 6 corpos de prova para cada traço.

Foram calculados a média e o desvio padrão de todas as idades para os seis corpos de prova de cada mistura e também para apenas quatro corpos de prova, quando se expurgou os menores e maiores valores de cada série.

A Tabela 5.29 apresenta os resultados dos ensaios realizados no conjunto de amostras das misturas T1, T2 e T3, da Tabela 4.19, que foram fabricadas em 15/06/2007.

Tabela 5.29 - Valores de RC das misturas T1, T2 e T3 (MPa)

Mistura	Idade- 3 dias	Idade – 7 dias	Idade – 28 dias
T1.1	31	36	44
T1.2	34	46	42
T1.3	43	30	42
T1.4	35	30	34
T1.5	43	26	50
T1.6	20	49	55
Média ± δ (6 CPs)	34 ± 8,6	36 ± 9,4	44 ± 7,2
Média ± δ (4 CPs)	36 ± 5,1	35 ± 7,5	44 ± 3,8
T2.1	23	22	36
T2.2	29	26	22
T2.3	21	19	40
T2.4	15	34	28
T2.5	37	20	28
T2.6	16	32	25
Média ± δ (6 CPs)	23 ± 8,3	25 ± 6,3	30 ± 6,8
Média ± δ (4 CPs)	22 ± 5,4	25 ± 5,3	29 ± 4,7
T3.1	30	33	33
T3.2	17	29	26
T3.3	35	43	17
T3.4	26	38	26
T3.5	25	34	36
T3.6	25	10	50
Média ± δ (6 CPs)	26 ± 6,0	31 ± 11,4	31 ± 11,3
Média ± δ (4 CPs)	26 ± 2,4	33 ± 3,7	30 ± 5,0

Pode-se verificar uma grande variação dos valores de RC nos 3 traços (misturas) fabricados (as), provavelmente devida à heterogeneidade verificada durante a fabricação dentro do misturador da vibro prensa, a uma granulometria mais grossa dos agregados miúdos e uma relação água/cimento (a/c) baixa;

Na mistura T1 na qual se usou maior quantidade de cimento (19 kg) e uma relação a/c mais elevada, verificou-se que os valores de RC ≥ 35 MPa são perfeitamente atingíveis e alguns valores ≥ 50 MPa já foram obtidos.

As Figuras 5.74 e 5.75 são representações gráficas da Tabela 5.29 dos valores de seis e quatro corpos de prova, respectivamente.

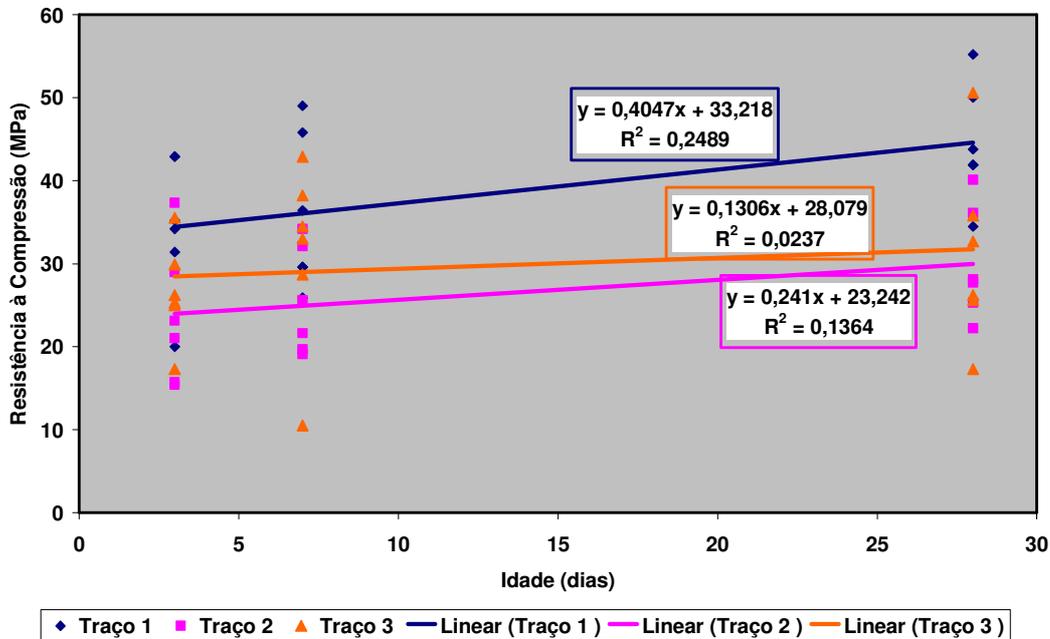


Figura 5.74 - Resistência à Compressão de T1, T2 e T3 (6 CPs)

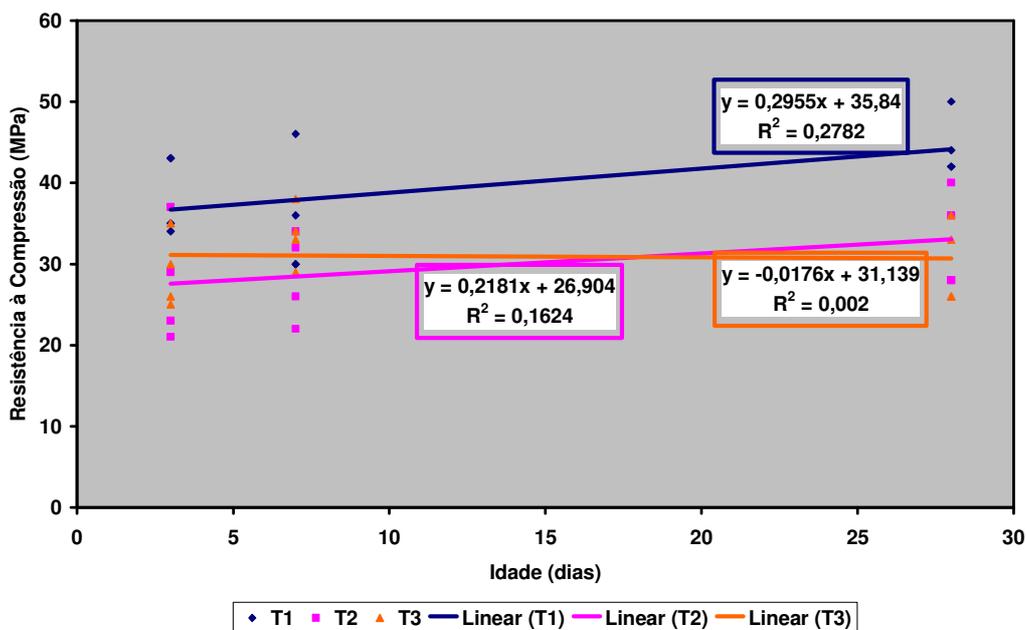


Figura 5.75 - Resistência à Compressão de T1, T2 e T3 (4 CPs)

A Figura 5.76 representa graficamente os valores de RC para as misturas (traços) T1, T2 e T3, comparando-os com os valores da mistura M24.

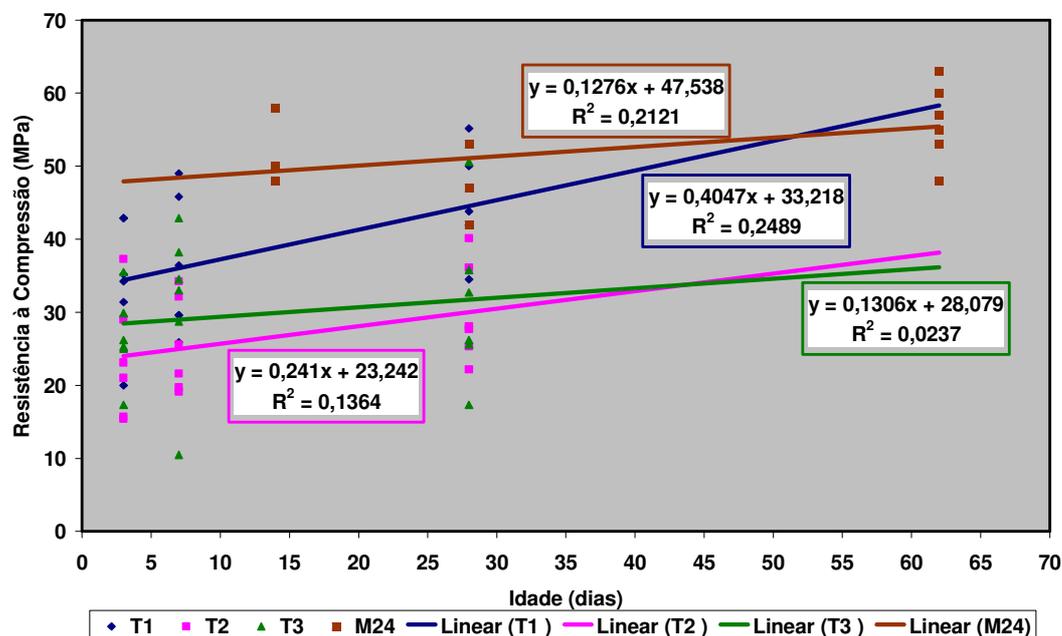


Figura 5.76 - Resistência à Compressão de T1, T2, T3 e M24

Como já dito anteriormente, os resultados dos testes de compressão mostram uma dispersão muito grande. O quadrado do coeficiente de correlação de Pearson é chamado de coeficiente de determinação ou simplesmente R^2 . É uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. É pouco comum que tenhamos uma correlação perfeita ($R^2 = 1$) na prática, porque existem muitos fatores que determinam as relações entre variáveis na vida real (SHIMAKURA, 2007). Mesmo assim, os valores de RC de T1 e M24 são bem semelhantes.

A Tabela 5.30 apresenta os resultados dos ensaios realizados no conjunto de amostras das misturas T4, T5 e T6, da Tabela 4.19, que foram fabricadas em 29/06/2007.

Tabela 5.30 - Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (MPa)

Mistura	Idade- 3 dias	Idade – 7 dias	Idade – 28 dias
T4.1	45	56	54
T4.2	48	57	68
T4.3	49	58	64
T4.4	51	57	51
T4.5	48	54	50
T4.6	45	56	65
Média ± δ (6 CPs)	48 ± 2,3	56 ± 1,4	59 ± 7,4
Média ± δ (4 CPs)	47 ± 1,7	56 ± 1,4	58 ± 7,0
<hr/>			
T5.1	49	30	43
T5.2	31	49	51
T5.3	31	35	49
T5.4	25	33	36
T5.5	51	33	45
T5.6	25	55	43
Média ± δ (6 CPs)	35 ± 11,7	39 ± 10,2	44 ± 5,3
Média ± δ (4 CPs)	34 ± 10,4	37 ± 7,7	45 ± 2,8
<hr/>			
T6.1	17	26	37
T6.2	35	35	18
T6.3	34	28	43
T6.4	30	32	30
T6.5	30	34	51
T6.6	11	44	34
Média ± δ (6 CPs)	26 ± 9,8	33 ± 6,3	35 ± 11,3
Média ± δ (4 CPs)	28 ± 7,4	32 ± 3,1	36 ± 5,5

Mesmo tendo utilizado uma betoneira de menor capacidade do que o misturador da vibro prensa, ainda ocorreram problemas de homogeneização, com o material agarrando nas paredes do equipamento, sendo necessário parar a operação para desgarrá-lo;

A mistura T4 foi a que apresentou a melhor homogeneidade de resistências, com menor dispersão nos valores e mostrando que é capaz de produzir peças com exigência de $RC \geq 50$ MPa;

A mistura T5 é capaz de produzir peças com $RC \geq 35$ MPa. No entanto, devido a sua heterogeneidade e alto consumo de cimento, deve-se desconsiderá-la;

A mistura T6 é capaz de produzir peças com $RC \geq 35$ MPa, desde que se resolva o problema da homogeneização da mistura, da granulometria e de uma adequada relação a/c.

A Figura 5.77 apresenta os valores de resistência à compressão das misturas T4, T5 e T6 nas idades de 3, 7 e 28 dias, conforme os dados da Tabela 5.30, para seis corpos de prova.

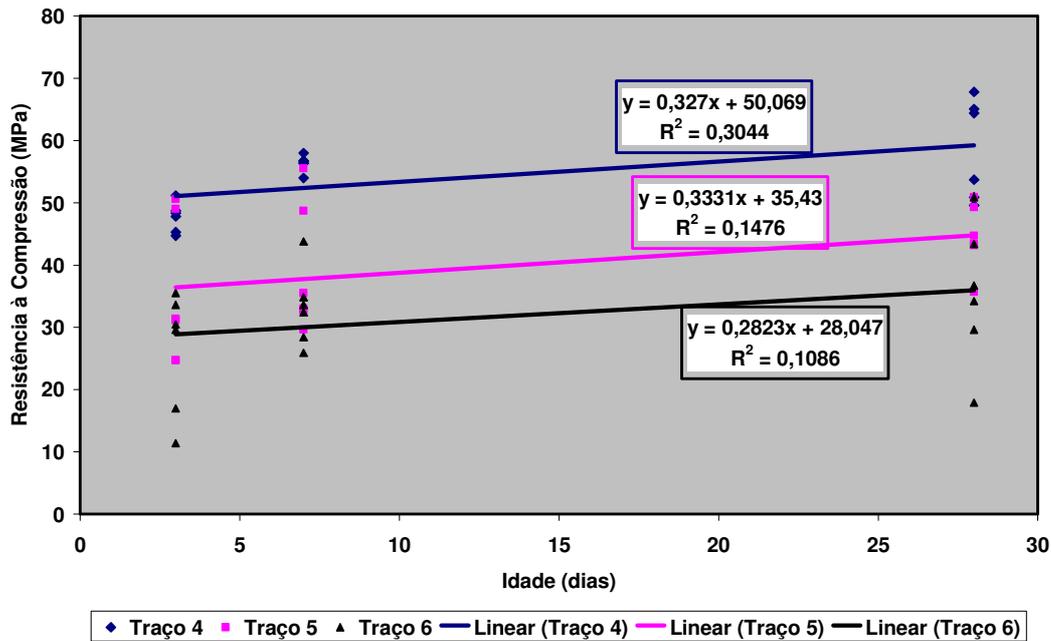


Figura 5.77 - Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (6 CPs)

A Figura 5.78 mostra os valores de RC das mesmas misturas para apenas quatro corpos de prova, expurgando os valores extremos para cada idade. Verifica-se que o valor de R^2 da mistura T4 é o mais elevado embora ainda baixo.

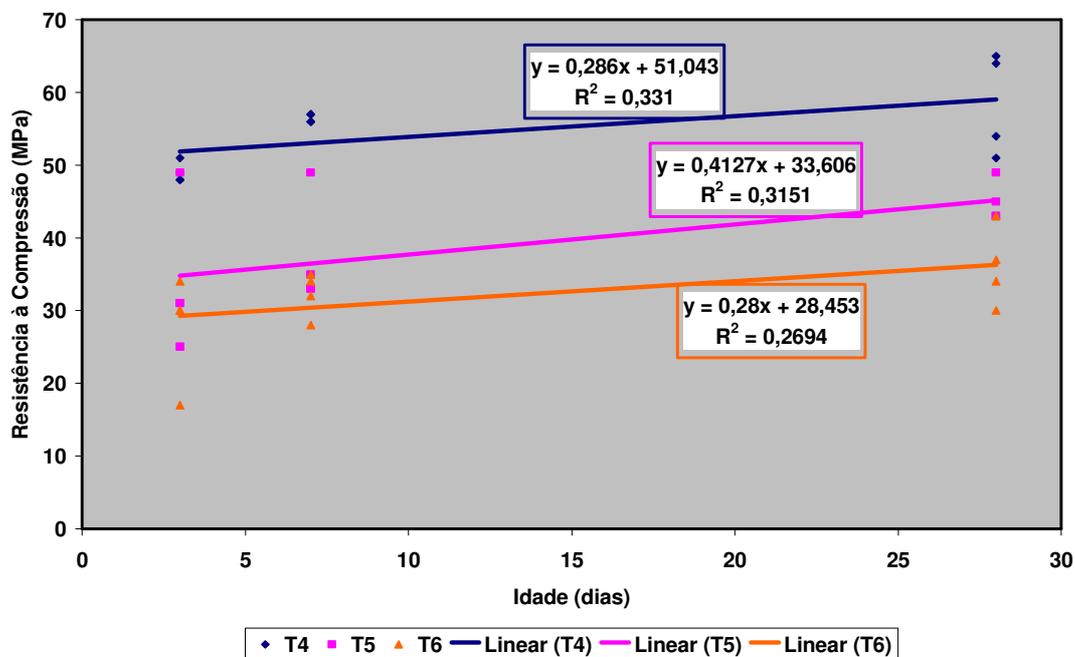


Figura 5.78: Valores de RC das misturas T4, T5 e T6 (4 CPs)

A Figura 5.79 representa graficamente os valores de RC para as misturas (traços) T4, T5 e T6, comparando-os com os valores da mistura M24.

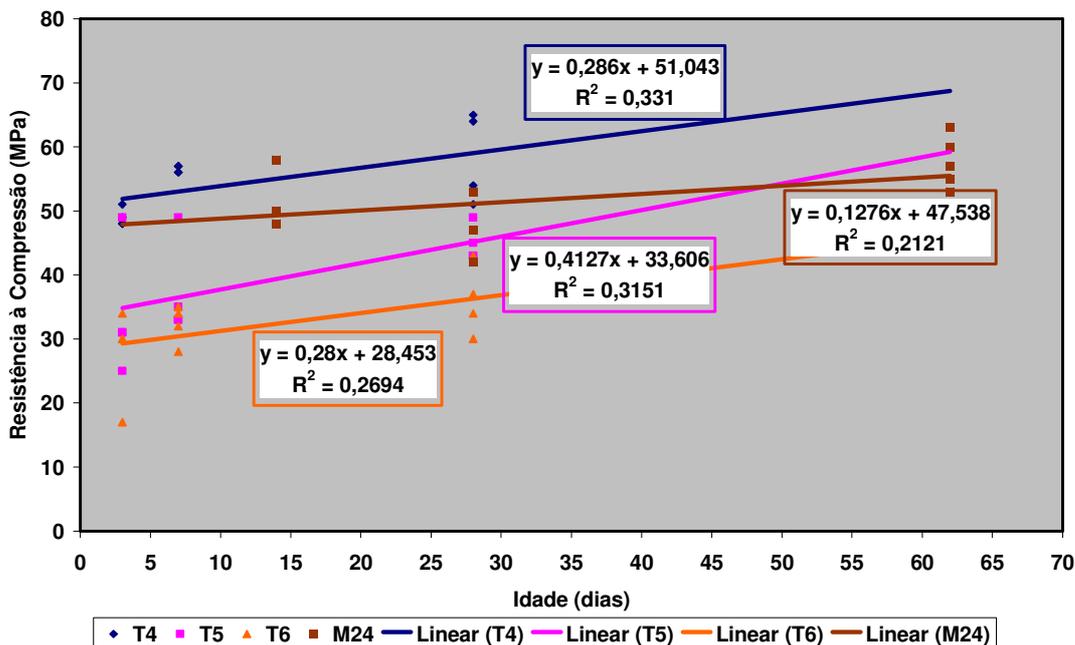


Figura 5.79 - Resistência à Compressão de T4, T5, T6 e M24

Com o objetivo de fazer comparação é mostrada a seguir a Figura 5.80 que é a representação gráfica de valores de RC para ensaios feitos pela UNI-STEIN em seus produtos. São peças de diferentes espessuras 60, 80 e 100 mm, para uma especificação de RC ≥ 35 MPa. Verifica-se que os R^2 das curvas de 80 e 100 mm são muito semelhantes ao obtido para a curva da mistura T4.

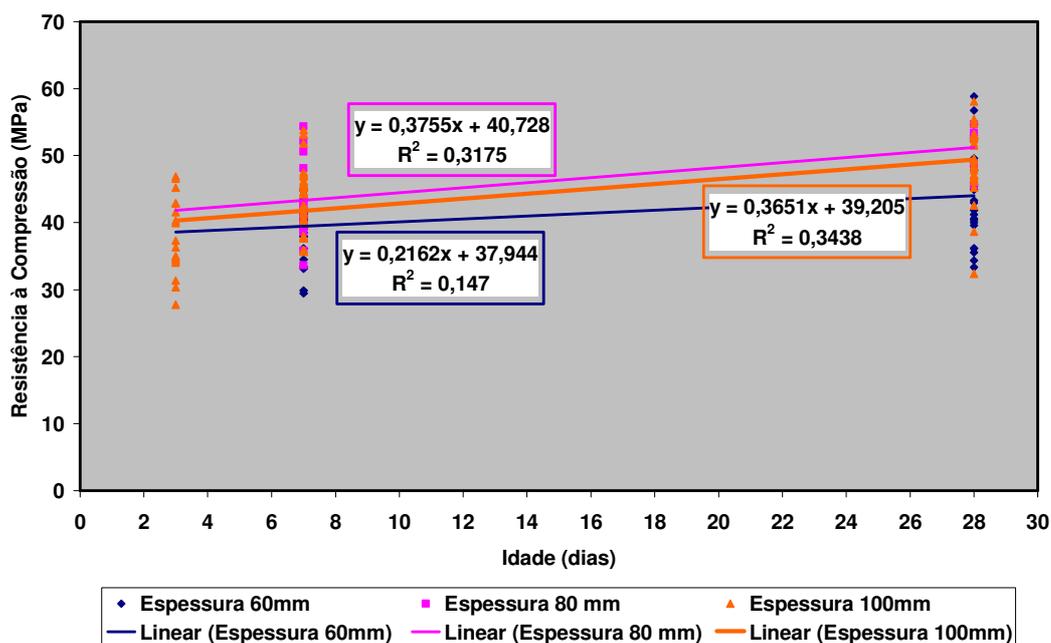


Figura 5.80 - Resultados de RC para produtos UNI-STEIN

A Figura 5.81 apresenta o gráfico obtido pela UNI-STEIN em seus produtos de 100 mm de espessura e RC ≥ 50 MPa, nas idades de 3, 7 e 28 dias. Nota-se que o R^2 da curva é semelhante ao obtido para T4 e também para os valores da Figura 5.74, construída com apenas quatro corpos de prova.

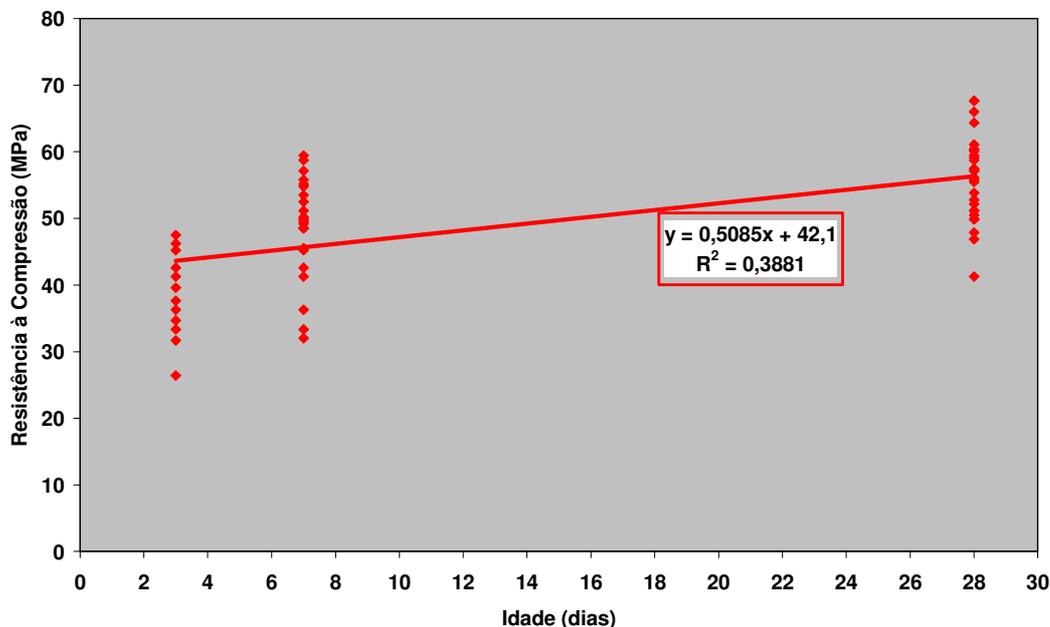


Figura 5.81 - Valores de produto UNI-STEIN de 100 mm e RC ≥ 50 MPa

A Figura 5.82 mostra a comparação das resistências à compressão entre misturas fabricadas em escala de laboratório (M24), em escala industrial (T1 e T4) e peças de produção normal da UNI-STEIN de espessura 10 cm e RC ≥ 50 MPa.

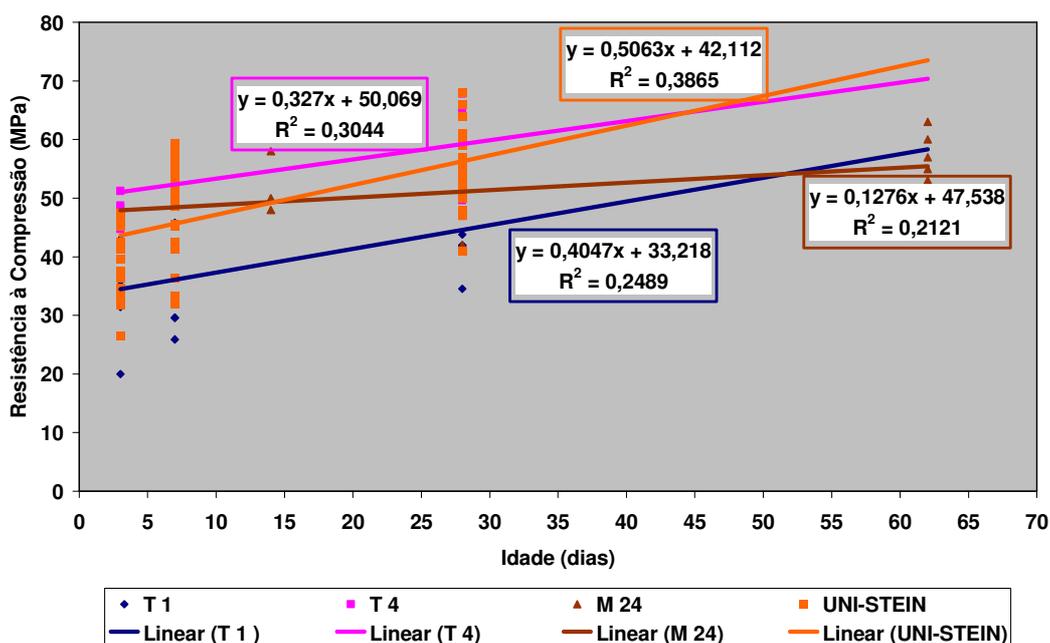


Figura 5.82 – Comparação de RCs entre misturas de laboratório e industriais

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi o de estudar e avaliar a possibilidade de fabricação de elementos de pavimentação, para aplicação em pisos industriais e não industriais em conformidade com a norma brasileira NBR 9781:1987, empregando escória de Aciaria LD estabilizada volumetricamente e resíduos de concretos refratários oriundos da indústria siderúrgica.

Tendo como objetivos específicos:

- Classificar os resíduos sólidos escória de Aciaria LD e os concretos refratários, de acordo com as normas brasileiras NBR 10004:2004, NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004;
- Classificar e caracterizar ambientalmente as misturas de resíduos sólidos de escória de Aciaria LD estabilizada volumetricamente e de resíduos de concretos refratários, de acordo com as normas brasileiras NBR 10004:2004, NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004;
- Analisar as propriedades mecânicas do produto obtido – componentes de pavimentação – de acordo com a norma brasileira NBR 9780:1987.

A reciclagem de resíduos sólidos como material utilizável é uma ferramenta muito importante no gerenciamento ambiental visando o desenvolvimento sustentável. De outra forma, essa mesma reciclagem se for feita de uma maneira inadequada, sem uma boa base de pesquisa e desenvolvimento, pode resultar em maiores problemas ambientais do que o próprio resíduo individualmente.

Por se tratar de uma atividade complexa e multidisciplinar, o sucesso em desenvolver um novo produto utilizando resíduos sólidos envolve aspectos técnicos, ambientais, legais, financeiros, sociais e outros.

A mistura de resíduos foi classificada como Classe I – Perigoso, por apresentar $\text{pH} \geq 12,5$, conforme item 4.2.1.2 – Corrosividade da NBR 10.004:2004.

Na tentativa de solucionar esse problema fez-se a determinação do pH individual da mistura de cada resíduo com água na proporção 1:1 em peso. Encontraram-se os seguintes valores médios: LD = 12,7; CG = 8,8; CT = 10,0 e RH = 11,4.

De uma peça fabricada pela UNI-STEIN onde se usa apenas recursos naturais, obteve-se $\text{pH} = 13,68$, que também é superior a 12,5 da norma.

Determinações de pH feitas em misturas com percentuais diferentes de resíduos, mostraram que é possível obter-se valores de pH da ordem de 12,0, o que satisfaria a especificação da norma, tornando essa mistura não corrosiva e alterando a sua classificação de Classe I – Perigoso para Classe II – Não Perigoso – Não Inerte.

Com relação aos resultados de ensaios mecânicos, pode-se concluir que é possível a utilização dos resíduos estudados na fabricação de peças para pavimentação de pisos industriais e não industriais que satisfaçam os requisitos da norma NBR 9781:1987, desde que sejam feitas as seguintes adaptações e/ou mudanças no processo de fabricação industrial:

- A escória de aciaria LD, que substitui a brita zero como agregado graúdo deve ser moída de tal forma que se obtenha a DMC da ordem 9,5 mm e o seu MF da ordem de 5,0/ 6,0;
- Os concretos refratários, que substituem a areia natural como agregado miúdo, devem ser moídos de tal forma a se obter a DMC da ordem de 4,8 mm e um MF da ordem de 2,5/3,0 mm;
- A relação água/cimento (a/c) deve estar entre 0,60 e 0,70 L H_2O / kg de cimento.

Portanto, a utilização desses resíduos abundantes na indústria siderúrgica, em substituição aos recursos naturais atualmente utilizados na fabricação desses produtos, propiciará um ganho ambiental significativo e também um ganho financeiro para as empresas geradoras por evitar que eles sejam dispostos em aterros.

7 REFERÊNCIAS

- ABRAFAR – Associação Brasileira de Refratários – 2002/2003. Disponível em www.abceram.org.br/asp/abc_289.asp. Acesso em 08/05/2006.
- AHN, J. S.; CHON, C. M.; MOON, H. S.; KIM, K. W. Arsenic removal using steel manufacturing byproducts as permeable reactive materials in mine tailing containment systems. *Water Research* n. 37. 2003. p. 2478 – 2488.
- ALMEIDA, F. *O Bom Negócio da Sustentabilidade*. Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira. 2002. 191p.
- ARTHUR D. LITTLE e SETEPLA TECNOMETAL ENGENHARIA Ltda. *Estudo sobre Aplicações de Escórias Siderúrgicas – Sumário Executivo*. Preparado para: Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS e Empresas Siderúrgicas Associadas. Setembro 1999.
- ARAÚJO, L. A. *Manual de Siderurgia. Vol. 1. Produção*. São Paulo. Editora Arte & Ciência. 1997. 470p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. *Boletim Técnico: Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. BT-106. Revisão 7*. São Paulo. 2002. 26p. Disponível em www.abcp.org.br/downloads/arquivos_pdf/BT106_2003.pdf. Acesso em 27/09/2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro. 2004. 71p.
- _____. NBR 10005. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 16p.
- _____. NBR 10006. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 3p.
- _____. NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004. 21p.
- _____. NBR 9781. Peças de concreto para pavimentação – Especificação. Rio de Janeiro. 1987. 4p.
- _____. NBR 5732. Cimento Portland comum. Rio de Janeiro. 1991. 5p.
- _____. NBR 9780. Peças de concreto para pavimentação – Determinação da resistência à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 1987. 3p.
- _____. NBR 7211. Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2005. 11p.
- _____. NBR NM 52:2003. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2003. 6p.
- _____. NBR NM 53:2003. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003. 8p.
- _____. NBR 12042. Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro. 1992. 3p.
- BELLO, C. V. V. Zeri – Uma proposta para o Desenvolvimento Sustentável, com enfoque na Qualidade Ambiental voltada ao Setor Industrial. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina. 1998.
- BENQUERER, R. A. *Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Siderúrgicas Integradas a Coque*. 2000. 225p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

- BLOCO BRASIL. www.blocobrasil.com.br. Acesso em 14/10/2006.
- CALDERONI, S. *Os Bilhões Perdidos no Lixo*. São Paulo. Ed. Humanitas FFLCH/USP. 2003. 346p.
- CONCRETENetwork.com. Applications for Concrete Pavers. Disponível em www.concretenetwork.com/concrete/pavers/applications. Acesso em 20/03/2007.
- CRUZ, L. O. M. *Pavimento Intertravado de Concreto: Estudo dos Elementos e Métodos de Dimensionamento*. 2003. 175p. Tese submetida ao Corpo Docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2003.
- CST – Companhia Siderúrgica de Tubarão. Disponível em www.cst.com.br. Acesso em 24/03/2006.
- DNER – EM 262/94. Norma rodoviária. Especificação de material. Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários. 04p.
- _____.PRO 263/94. Norma rodoviária. Procedimento. Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. 03p.
- _____. ME 035/98. Norma rodoviária. Método de Ensaio. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. 06p.
- EUROSLAG. *Legal Status of Slags. Position Paper*. January 2006. Disponível em <www.euroslag.org/medis/Position_paper_Jan_2006.pdf>. Acesso em 18/06/2006.
- FABRICAÇÃO de cimento. Disponível em www.cienciaquimica.hpg.ig.com.br/interessante/cimento.htm. Acesso em 31/07/2006.
- FERREIRA, A. B. de H. *Aurélio Século XXI – O Dicionário da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro. Editora Nova Fronteira. 3ª edição. 1999. 2128p.
- GEISELER, J. EUROSLAG – Objectives and Tasks. In: 2nd EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 9th to 11th October, 2000. Dusseldorf, Germany.
- GIAMMUSSO, S. E. *Manual do Concreto*. São Paulo. Editora PINI. 1ª edição. 1992. 145p.
- GIFFONI, P. O. *A Utilização de Borra de Fosfato com Matéria Prima Alternativa para a Fabricação de Tijolos*. 2004. 80 f. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- GRILLO, N. *Tecnologia de Aplicação de Concretos Refratários*. IBAR S.A. Brasil. 1990.
- GUMIERI, A. G. *Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD como Adição em Cimentos*. 2002. 226p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- GUMIERI, A.G., DAL MOLIN, D. C. C., VILELA, A. C. F. Avaliação da Atividade Pozolânica de Escória de Aciaria. In: 59º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL. 2004. São Paulo – SP.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo. Ed. Pini Ltda. Reimpressão da 1ª edição. 1995. 349p.
- IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Canal de Notícias: Usiminas é premiada pela FEAM por sua Gestão de Resíduos Sólidos. Disponível em www.ibs.org.br/noticias_exibe.asp?Codigo=256&Refresh=200694166. Acesso em 02/06/2007.

- IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. *Anuário Estatístico*. Rio de Janeiro. 2005.
- INTERPAVI. Comparativo Técnico: Piso Intertravado x Asfalto x Paralelepípedo. Disponível em www.interpavi.com.br/brazil/tecnico.htm. Acessos em 19/10/2005 e 09/10/2007.
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G da. *Cinzas e Aglomerantes Alternativos*. In: *Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção*. 1ª ed. Campinas. Ed. Unicamp. 2003. Cap. 6. p. 145-190.
- JOOST, M. The Utilization of Steel Slag in Waterway Construction. In: 3rd EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 2nd to 4th October, 2002. Keyworth, UK. Proceedings of the 3rd European Slag Conference. Duisburg: EUROSLAG, 2003.
- KUEHN, M.; DRISSEN, P.; SCHREY, H. Treatment of Liquid Steel Slags. In: 2nd EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 9th to 11th October, 2000. Dusseldorf, Germany. *Proceedings of the 2nd European Slag Conference*. Duisburg: EUROSLAG, 2001.
- KIHARA, Y., CENTURIONE, S. L. *O Cimento Portland*. In: *CONCRETO - Ensino, Pesquisa e Realizações Vol. 1*. 2ª ed. São Paulo. IBRACON. Editor Geraldo C. Isaia. 2005. cap. 10. p. 295-322.
- LENZ e SILVA, G. F. B. *Curso intensivo: Siderurgia, Tratamento Metalúrgico, Escórias e Refratários. Parte 2*. Programa de Capacitação Técnica. Magnesita S.A. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento - CPqD. 2004.
- LI, Y. S. The use of waste basic oxygen furnace slag and hydrogen peroxide to degrade 4-chlorophenol. *Waste Management*. Vol. 19. 1999. p. 495 – 502.
- MACHADO, A. T. *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para Avaliação de Expansibilidade das Escórias de Aciaria*. 2000. 125p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000.
- MASLEHUDDIN, M.; SHARIF A. M. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*. 17. 2003. p. 105 – 112.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo. Editora PINI. 1ª edição. 1994. 573p.
- MENEGAZZO, A. P. M. *Concretos Refratários Aluminosos Sem Cimento*. 1996. 153p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- MERKEL, Th. Successful Utilization of Steel Slags in Germany. In: 2nd EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 9th to 11th October, 2000. Dusseldorf, Germany.
- MOTZ, H. The European Standardization of Slags. In: 2nd EUROPEAN SLAG CONFERENCE. 9th to 11th October, 2000. Dusseldorf, Germany.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 2ª ed. Ed. PINI. São Paulo. 1997. 828p.
- NASCIMENTO, J. F. do. *Estudo da Expansibilidade em Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária*. 2003. 163p. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- OLIVEIRA, I. R. de; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. *Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo. Fazendo Arte Editorial. 2003. 195p.
- PÁDUA, J. A. *Um Sopro de Destruição*. Jorge Zahar Editor. Rio de Janeiro. 2002. 318p.

PAGNUSSAT, D. T. *Utilização de Escória Granulada de Fundição (EGF) em Blocos de Concreto para Pavimentação*. 2004. 145p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PBC Companies. What are the advantages of Interlocking Pavers? Disponível em <http://pbc-online.com//Homeowners/faqs.html>. Acesso em 03/01/2007.

PINTO, A. L. de T.; WINDT, M. C. V. dos S.; SIQUEIRA, L. E. A. de. *Constituição da República Federativa do Brasil*. São Paulo. Editora Saraiva. 27ª edição. 2001.331p.

POLISSENI, A. E. Caracterização da escória de aciaria oriunda de Juiz de Fora destinada à fabricação de cimento. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. 2002. Belo Horizonte – MG.

PROCTOR, D. M.; SHAY, E. C.; FHELING, K. A.; FINLEY, B. L. Assessment of Human Health and Ecological Risks Posed by the Uses of Steel-Industry Slags in the Environment. *Human and Ecological Risk Assessment*. Vol. 8. N° 4. 2002. pp 681 – 711.

RAMAKRISHNA, K. R.; VIRARAGHAVAN, T. Use of slag for dye removal. *Waste Management*. Vol. 17. N° 8. 1997. pp. 483 – 488.

REIS da SILVA, J. B.; CARVALHO, K. M. G.; BICUDO FILHO, P. S.; ROSSI, L. A. Análise de Risco Ambiental no Uso de Escória de Aciaria para Aplicações Rodoviárias. In: 1ª JORNADA IAS (INSTITUTO ARGENTINO DE SIDERURGIA) SOBRE MEDIO AMBIENTE Y RECICLADO. 2005. San Nicolas. Argentina. p. 13 – 32.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. *Materiais de Construção Civil*. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2ª edição. 1ª reimpressão. 2006. 101p.

RODRIGUES, P. P. F. *Parâmetros de Dosagem de Concreto*. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. ET-67. Reimpressão da 2ª edição. São Paulo. 1995. 26p.

SHIMAKURA, S. CE003 – Estatística II. Disponível em <http://leg.ufpr.br/-silvia/CE003/notes.html>

SILVA, M. V. A. M.; LEITE, P. P. N. *Tratamento de Escória de Aciaria LD para Produção de Acerita*. Disponível em <www.cst.com.br/aplicações/documentos...>. Acesso em 24/03/2006.

SILVEIRA, N. O.; SILVA, M. V. A. M.; AGRIZZI, E. J.; LANA, M. F.; SILVA, E. A.; MENDONÇA, R. L. Acerita – Escória de Aciaria LD com Redução de Expansão. *Revista ABM*. vol. I, nº. I, p. 1 – 5, 2004.

SHREVE, A. N., BRINK Jr., J. A. *Indústrias de Processos Químicos*. 4ª ed. Ed. Guanabara Dois. Rio de Janeiro. 1980. 717p.

SHIH, P. H.; WU, Z. Z.; CHIANG, H. L. Characteristics of bricks made from waste steel slag. *Waste Management*. Vol. 24. p. 1043 – 1047. 2004.

TANABE, H.; NAKADA, M. Steelmaking Technologies Contributing to Steel Industries. *NKK Technical Review* n° 88. p 18 – 27. 2003.

TENÓRIO, J. A. S., ARAÚJO, F. G. da S., PEREIRA, S. S. R., FERREIRA, A. V., ESPINOSA, D. C. R., BARROS, A. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland – Parte I: Alita Pura. *Revista da Escola de Minas*. Vol. 56, n° 2, p. 87 – 90. Abr. – Jun. 2003.

TONIOLO News. Paradigmas e mitos sobre os pavimentos intertravados. Disponível em www.Toniolobloco.com.br. Acesso em 17/07/2007.

UNI-STEIN DO BRASIL. Compare: a melhor relação custo/benefício: mais benefícios do que custos. Disponível em www.unistein.com.br/fique_baixo/asp. Acesso em 02/09/2005.

VANCINI, G. L. *Avaliação de Metais e Não Metais da Escória de Aciaria de Usinas Siderúrgicas Brasileiras Conforme NBR 10004/2004*. 2005. 164p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

VASCONCELOS, W. L. *Introdução aos Materiais Refratários*. Laboratório de Materiais Cerâmicos. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. UFMG. 152p.

VARGAS, A.S. de. *Estudo da Viabilidade do Uso de Pó de Aciaria Elétrica à Arco na Confeção de Blocos de Concreto para Pavimentação*. 2002. 148p. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

YAN, J.; MORENO, L.; NERETNIEKS, I. The long-term acid neutralizing capacity of steel slag. *Waste Management*. Vol. 20. 2000. p. 217 – 233.

ZIEMKIEWICZ, P.; SIMMONS, J. Use of Steel Slag for Treatment of Acid Mine Drainage. In: 3rd EUROPEAN SLAG CONFERENCE, 2nd to 4th October, 2002. Keyworth, UK. Proceedings of the 3rd European Slag Conference. Duisburg. EUROSLAG, 2003.