

RODRIGO PINHEIRO BALTAZAR

CARACTERIZAÇÃO DO FATOR EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA
EM DIFERENTES PROCESSOS DE CURA PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós - Graduação
em Engenharia Civil, para obtenção do título
de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

RODRIGO PINHEIRO BALTAZAR

CARACTERIZAÇÃO DO FATOR EXPANSÃO DE UMA ESCÓRIA DE ACIARIA
EM DIFERENTES PROCESSOS DE CURA PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós - Graduação
em Engenharia Civil, para obtenção do título
de “Magister Scientiae”.

APROVADA: de 21 de fevereiro de 2001.

Prof. Abdias Magalhães Gomes

Prof. Antônio Carlos Valle de Souza

Prof. Carlos Cardoso Machado

Prof. Cláudio Henrique de C. Silva
(Conselheiro)

Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Presidente)

Aos meus pais Lourdinha Pinheiro e José Luiz Baltazar.

Aos meus irmãos, Patrícia e Ricardo.

**À minha namorada Vilmara e
Conceição "Dida".**

AGRADECIMENTO

A Deus, por ter me proporcionado saúde no desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Federal de Viçosa pela possibilidade de desenvolvimento e formação profissional.

Ao Professor Dario Cardoso de Lima, meu orientador, pela sua capacidade, conhecimento e empenho profissional na realização deste trabalho.

Ao Professor Lauro Couto Gontijo, pelo incentivo, conhecimento, auxílio nas várias etapas desta pesquisa, paciência e, sobretudo, por todos os momentos de atenção.

Aos Professores Carlos Alexandre B. de Carvalho, Antônio Carlos Valle, Abdias Magalhães Gomes, Cláudio Henrique de Carvalho Silva pelo conhecimento ensinado, pelo profissionalismo e pelos momentos de atenção dispensada.

A Açominas, em especial ao Engenheiro Alexandre Ribeiro Valle, pela oportunidade e apoio concedidos e pelo fornecimento do material necessário para execução deste trabalho.

Ao Engenheiro Eudier Antônio da Silva, pela sua prática profissional colocada a disposição, pelo apoio e entusiasmo desde os primeiros passos desta pesquisa.

Aos amigos Gilmar, Rogério, Marco Antônio, Dionísio, José Roberto Charles e Pierre pelo companheirismo, paciência e aconselhamento no

decorrer do curso.

Aos colegas da pós-graduação, em especial Emerson, Plínio, Israel, Iracema, Mário, Débora, Wânderson, Éder, Erisvaldo, Cristina, Anete, Alex, Waldson, Marcelo e Gláucio pela excelente convivência, apoio, amizade e respeito.

A todos funcionários, professores e estudantes do Setor de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da UFV e a todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos funcionários e amigos Tarcísio, José Carlos, José Dias, Toninho, Hilário e Geraldo.

Ao CNPq pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

Aos meus pais, pelo incentivo, pela compreensão e dedicação ao longo de toda vida acadêmica.

À minha eterna namorada Vilmara e toda sua família pela compreensão, paciência e carinho durante todo este trabalho.

BIOGRAFIA

RODRIGO PINHEIRO BALTAZAR, filho de José Luiz Baltazar e Maria de Lourdes Pinheiro Baltazar, nasceu em 9 de julho de 1972, na cidade de Viçosa, Minas Gerais.

Em julho de 1997, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em agosto de 1997, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Civil na UFV, concentrando seus estudos na área de Geotecnia com ênfase em Pavimentação.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Abrangência e limitações do presente trabalho	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Processo siderúrgico.....	4
2.2. Produção e parque siderúrgico	5
2.3. Escórias siderúrgicas	7
2.3.1. Escória de alto forno.....	8
2.3.2. Escória de aciaria.	9
2.3.2.1. Escória de forno de arco elétrico.....	11
2.3.2.2. Escória de forno de oxigênio básico.....	11
2.4. Características da escória de aciaria	12
2.4.1. Composição química da escória de aciaria	14
2.4.2. Características físicas e propriedades mecânicas das escórias de aciaria.....	15
2.4.2.1. Resfriamento.....	16
2.4.2.2. Beneficiamento, armazenamento e amostragem	17

2.4.2.3. Identificação	18
2.4.2.4. Expansão.	19
2.4.2.4.1. Método PTM130 / Jun 76 e ASTM D 4792/95.	22
2.4.2.4.2. Método JIS A 5015 - 1992.	23
2.4.2.5. Cura.	24
2.4.3. Características tecnológicas.....	26
2.5. Possíveis aplicações da escória de aciaria.....	28
2.6. Emprego da escória de aciaria em pavimentação rodoviária	32
2.6.1. Especificações técnicas.....	32
2.6.2 Experiências de obras executadas.....	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1. Considerações Gerais	39
3.2. Material	41
3.2.1. Composição química da escória de aciaria da Açominas	41
3.2.2. Caracterização física da escória de aciaria da Açominas	41
3.3. Métodos	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. Resultados climáticos	54
4.2. Ensaios físicos de laboratório	56
4.3. Análise granulométrica.....	57
4.4. Expansão inicial da amostra no primeiro dia de cura ao ambiente	59
4.5. Expansão volumétrica versus teor de umidade, tipo e tempo de cura....	60
4.6. Curvas granulométricas do material antes e após os ensaios de expansão.....	66
5. CONCLUSÕES	71
6. RECOMENDAÇÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 - Produção de aço e a capacidade de produção instalada das indústrias siderúrgicas brasileira nos últimos cinco anos (10^3 t).....	07
Quadro 2 - Composição química da escória de alto forno.....	09
Quadro 3 - Composição química da escória de aciaria EAF e BOF.....	14
Quadro 4 - Faixas granulométricas empregadas na classificação da escória de aciaria da Açominas.....	39
Quadro 5 - Caracterização física da escória de aciaria da Açominas..	57
Quadro 6 - Composição granulométrica da amostra inicial da escória de aciaria - Açominas.....	58

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Localização das principais siderúrgicas: A - Usiminas, B - Cosipa, C - CSN, D - CST, E - Açominas e F - a posição favorável da cidade de Viçosa UFV – MG.....	06
Figura 2 - Resultado da expansão provocada pela oxidação das partículas metálicas ou hidratação dos óxidos de cálcio e/ou magnésio.....	10
Figura 3 - Detalhe do "quebra-mola" provocado pela expansão da escória de aciaria na ciclovia da Av. Fernando Ferrari que liga Vitória-ES ao litoral norte.....	21
Figura 4 - Detalhe do "vulcão" nome dado às pequenas erupções que apresenta o pavimento quando da expansão da escória de aciaria.....	21
Figura 5 - Processo de cura acelerada com vapor pressurizado - SKAP.....	26
Figura 6 - Estrada Imperial que liga Ouro Branco a Ouro Preto em Minas Gerais – escória utilizada da Açominas.....	29
Figura 7 - Avenida Fernando Ferrari (BR-101) que liga Vitória ao litoral norte do Espírito Santo.....	33
Figura 8 - Detalhe de uma trinca no pavimento feito com escória de aciaria.....	34

Figura 9 -	Detalhe de um vulcão no pavimento feito com escória de aciaria, localizado abaixo da roda dianteira do carro.....	35
Figura 10 -	Detalhe da boca de lobo-dispositivo de drenagem na Avenida Fernando Ferrari (BR-101).....	36
Figura 11 -	Ciclovia da BR-101 onde a expansão da escória gerou um quebra-mola de, aproximadamente, 15 cm de altura, sendo este localizado logo atrás da boca de lobo.....	36
Figura 12 -	Quebra-mola formado pela expansão da escória.....	37
Figura 13 -	Fluxograma do beneficiamento da escória de aciaria na Açominas.....	39
Figura 14 -	Processos de cura a que foram submetidas às amostras de escórias de aciaria "A", "B", "C" e "D".....	44
Figura 15 -	Escória "A" acondicionada dentro do laboratório.....	45
Figura 16 -	Escória "B" exposta no pátio do laboratório.....	46
Figura 17 -	Escória "C" imersa em água durante todo período de ensaio.....	47
Figura 18 -	Detalhe da caixa de argamassa armada onde foi acondicionada a escória "D", e parte da ramificação da caldeira entrada de vapor.....	48
Figura 19 -	Detalhe do manômetro e caixa de argamassa armada com vapor.....	48
Figura 20 -	Detalhe da injeção do vapor na escória "D".....	49
Figura 21 -	Vista externa do tanque onde foi feito o ensaio de expansão dos corpos-de-prova.....	50
Figura 22 -	Vista interna do tanque onde foram feitas as leituras de expansão.....	51
Figura 23 -	Detalhe do quadro de comando de energia.....	52
Figura 24 -	Detalhe das resistências utilizadas no tanque para aquecimento da água de ensaio.....	52
Figura 25 -	Detalhe do controlador de temperatura do ensaio.....	53
Figura 26 -	Variação da temperatura na cidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.....	55
Figura 27 -	Variação da umidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.....	55

Figura 28 -	Variação da precipitação na cidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.....	56
Figura 29 -	Curva granulométrica da escória de aciaria - amostra inicial.....	58
Figura 30 -	Curva de expansão volumétrica da amostra inicial.....	60
Figura 31 -	Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "A" versus o tempo de cura.....	61
Figura 32 -	Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "B" versus o tempo de cura.....	62
Figura 33 -	Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "C" versus o tempo de cura.....	63
Figura 34 -	Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "D" versus o tempo de cura.....	64
Figura 35 -	Curva de expansão da escória de aciaria no ramo seco a 6% de umidade versus o fator tempo.....	65
Figura 36 -	Curva de expansão da escória de aciaria no ramo ótimo a 8% de umidade versus o fator tempo.....	65
Figura 37 -	Curva de expansão da escória de aciaria no ramo úmido a 10% de umidade versus o fator tempo.....	66
Figura 38 -	Curva granulométrica da escória "A" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	67
Figura 39 -	Curva granulométrica da escória "A" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	67
Figura 40 -	Curva granulométrica da escória "B" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	68
Figura 41 -	Curva granulométrica da escória "B" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	68
Figura 42 -	Curva granulométrica da escória "C" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	69
Figura 43 -	Curva granulométrica da escória "C" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	69
Figura 44 -	Curva granulométrica da escória "D" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	70

Figura 45 -	Curva granulométrica da escória "D" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.....	70
-------------	---	----

RESUMO

BALTAZAR, Rodrigo Pinheiro, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2001. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação.** Orientador: Dario Cardoso de Lima. Conselheiro: Carlos Alexandre Braz de Carvalho e Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

No presente trabalho, procedeu-se à caracterização do fator expansão da escória de aciaria da Açominas, situada no município de Ouro Branco - MG, através da metodologia proposta pelo método de ensaio para avaliação do potencial de expansão volumétrica da escória de aciaria, denominado – PTM 130, revisado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais em 1978 (DER-MG, 1982). A necessidade de se fazer um estudo de caracterização da apassivação volumétrica nas escórias de aciaria abre uma perspectiva comercial de grande interesse para o setor siderúrgico brasileiro, haja vista que ele poderá agregar custo a este co-produto e revendê-lo às empresas de pavimentação e prefeituras como um excelente agregado para a construção e recuperação de estradas de rodagem. Outro aspecto que merece destaque é que o emprego dessas escórias em pavimentação poderá levar, também, a uma redução dos custos de estocagem e armazenamento destes produtos nas próprias siderúrgicas. Quanto ao ponto de vista dos empreiteiros rodoviários, o quilômetro pavimentado poderá tornar-se, também, mais barato, mantendo-se uma boa qualidade técnica. Adotou-se o tempo de apassivação

do fator expansão de seis meses, em concordância com as recomendações da literatura técnica que o considera como o período mínimo de apassivação volumétrica de escórias de aciaria quando expostas nos pátios de estocagem sob as condições intempéricas do meio ambiente. Quatro processos de cura foram considerados no estudo, com o intuito de simular condições de intemperização extremas de campo, analisando-se, também, as variações granulométricas sofridas pelo material durante os ensaios de expansão. Foi analisado um lote de uma tonelada de escória, sendo esta homogeneizada e quarteada em quatro amostras de 250 kg, denominadas amostras A, B, C e D. A amostra A foi acondicionada em um tambor dentro do Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), com o objetivo de simular uma situação de completa ausência de chuva; a amostra B foi empilhada e exposta no pátio do LEC, onde foi monitorada a variação intempérica do meio ambiente (regime de chuvas e temperatura) nos meses de março a setembro de 2000; a amostra C foi acondicionada em um tambor sob condição de saturação, com o objetivo de simular um regime ininterrupto de chuvas durante todo o período de ensaio; e, por último, a amostra D foi acondicionada numa caixa de argamassa armada e submetida à condição de cura a vapor na caldeira do Departamento de Laticínios, simulando condições de cura acelerada. Essas amostras foram ensaiadas nos seguintes períodos de cura: 3, 7, 28, 63, 91 e 180 dias. Os resultados do estudo experimental permitiram concluir que: o ensaio de expansão mostrou-se eficiente na determinação das relações expansão versus teor de umidade, expansão versus tipo de cura, expansão versus tempo de cura, bem como permitiram proceder à análise da granulometria antes e após a realização dos ensaios de expansão, para fins de verificação da ocorrência de mudanças na granulometria do material.

ABSTRACT

BALTAZAR, Rodrigo Pinheiro, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February, 2001.

Characterization of the expansion factor of a steel mill slag under different processes of curing for road engineering applications. Advisor: Dario Cardoso de Lima. Committee members: Carlos Alexandre Braz de Carvalho and Cláudio Henrique de Carvalho Silva.

This research was directed to the characterization of the expansion factor of a steel mill slag from the company Açominas, located in the municipal district of Ouro Branco, Minas Gerais State, Brazil, through the standard PTM 130. This standard was revised in 1978 by the Minas Gerais State Highway Engineering Department (DER-MG) and recommended to the determination of the expansion factor of steel mill slags (DER, 1982). From an economic point of view, this study opens an interesting perspective to the Brazilian metallurgical companies and contractors, considering the following items: (i) It can open a field of application of slags in road engineering; (ii) Certainly, storage costs of this co-product in the companies will drop drastically; (ii) Concerning the road engineering contractors, the paved road kilometer may become, also, cheaper, although keeping the good technical quality. It was adopted the maximum expansion control time of 6 months in agreement with the recommendations of the technical literature that considers it as the minimum period of time to control the slag volumetric expansion when it is exposed to atmospheric conditions in the storage pile. Four curing processes were considered throughout the study,

in order to simulate field-curing conditions. Sieve analysis was also performed in order to take into account the slag size variations during the expansion tests. A 1 ton slag sample was collected in the Açominas storage pile and subdivided in four samples of 250 kg each, called samples A, B, C and D. Sample A was placed in a container inside the Laboratory of Civil Engineering (LEC) of the Federal University of Viçosa (UFV) in order to simulate weather conditions of complete absence of rain. Sample B was heaped and exposed to atmospheric conditions in the LEC backyard; rain and temperature conditions during the curing process, from March to September 2000, were monitored. Sample C was placed inside a container and submitted to saturation condition in order to simulate an uninterrupted rain season. In order to simulate conditions of accelerated curing, finally, sample D was placed inside a steel concrete box and submitted to water vapor in the boiler of the Department of Laticínios, simulating conditions of accelerated cure. All samples were submitted to curing times of 3, 7, 28, 63, 91 and 180 days. The experimental data was used to determine the following relationships: expansion versus water content, expansion versus curing type, expansion versus curing time, as well as sample gradation variations during the expansion tests.

INTRODUÇÃO

Considerações gerais

A escória de aciaria é um co-produto siderúrgico, obtido mediante transformação do ferro gusa líquido em aço. Essa transformação, ou refino como é chamado o processo, ocorre em fornos tipo LD (conversores a oxigênio) e/ou nos fornos elétricos a arco (FEA). O processo do refino baseia-se na redução do teor de carbono de 4% do ferro gusa para algo em torno de 1,7% encontrado na composição química do aço.

As siderúrgicas brasileiras geram em média de 100 a 150kg de escória de aciaria por tonelada de aço bruto, sendo a maior aplicação voltada para a construção de estradas (bases e misturas betuminosas). Essa aplicação corresponde a 30% da destinação total das escórias de aciaria ou 59% da destinação com algum retorno econômico às siderúrgicas. No Brasil, a escória pode ser vendida para bases de estrada a um preço máximo de R\$ 3,50/t, mas freqüentemente é doada às prefeituras locais (IBS, 1999).

O enorme volume produzido e o baixo custo agregado fazem da escória de aciaria um co-produto siderúrgico de baixo custo, porém com características físicas e mecânicas iguais ou superiores aos agregados naturais normalmente encontrados tais como a brita.

Indubitavelmente, um campo importante de aplicação das escórias de aciaria é a pavimentação rodoviária, em especial quando se considera que, no Brasil, as rodovias são responsáveis por, aproximadamente, 63% das cargas transportadas.

Presentemente, nota-se que o quadro de descaso e abandono das rodovias brasileiras pouco se alterou nos últimos anos. Destaca-se que a rede pavimentada nacional, somada as redes federais, estaduais e municipais, conta com aproximadamente 150.000 quilômetros, perfazendo apenas 9% da rede total, bem como que as rodovias municipais participam com 84% da rede total brasileira, com aproximadamente 1,4 milhões de quilômetros, dos quais apenas 1% encontra-se pavimentada. Supondo-se que parcela dessas rodovias em terra justificasse os serviços de pavimentação, seja pelo número de veículos, como pela importância regional ou estratégica, algumas centenas

de milhares de quilômetros necessitariam ser pavimentados nos próximos anos.

Somando-se ao quadro apresentado a crise econômica que o país tem enfrentado nos últimos anos e a escassez de recursos financeiros, quando se considera a totalidade das obras viárias a serem recuperadas ou implantadas, torna-se necessário envidar esforços no sentido de se empregar materiais alternativos na construção rodoviária. É nesse contexto técnico e econômico que cresce a importância de se implementar, no Brasil, o uso de escórias de aciaria nos serviços de pavimentação rodoviária.

Contudo, o grande problema encontrado no destino imediato da escória de aciaria como material de construção rodoviária está na sua reatividade e/ou expansibilidade causada pela hidratação e/ou carbonatação dos óxidos de cálcio e magnésio presentes em sua composição química. Não existe ainda um tratamento padrão, rápido e econômico que permita o seu uso na construção civil, apesar de se ter consciência de que todos os tratamentos sugeridos até o momento visam a eliminação ou diminuição da taxa de óxidos presentes e responsáveis pela expansão da escória de aciaria.

Objetivo

Este projeto tem por objetivo caracterizar o fator expansão de uma escória de aciaria, considerando diferentes teores de umidade, processos e períodos de cura.

Abrangência e limitações do presente trabalho

Este projeto de pesquisa considera o emprego de diferentes processos de cura para a estabilização do fator expansão de uma escória de aciaria compactada na energia do ensaio AASHTO Normal, considerando-se três teores de umidade de compactação, com vistas ao seu emprego em obras viárias. Nesse contexto, pode-se referir a:

- ✓ Direcionamento do estudo apenas à escória de aciaria produzida pela companhia Açominas, localizada na cidade de Ouro Branco, Estado de Minas Gerais;
- ✓ Análise do fator expansão da escória de aciaria, com base em procedimentos que considerem processos normais e um processo acelerado de cura.

Busca-se desta forma apresentar uma visão diferenciada do tratamento desta escória, com vistas a torná-la apta a ser usada em pavimentação rodoviária.

Destaca-se, também, que neste projeto de pesquisa, o qual tem o potencial de geração de banco de dados para outras análises de caráter técnico e econômico, não se vai proceder à caracterização tecnológica do produto escória de aciaria.

O Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa foi escolhido para a realização dos trabalhos, tendo em vista a sua localização geográfica com relação às companhias siderúrgicas da região Sudeste e, em particular, com relação a Açominas.

REVISÃO DE LITERATURA

Processo siderúrgico

Quando o homem conseguiu calor necessário para fundir o ferro, encerrou-se a idade do bronze e deu-se início à idade do aço. O desenvolvimento dessa nova era se deu, em maior ênfase, na revolução industrial.

O aço hoje é uma das principais matérias-primas do mundo moderno e representa cerca de 90% de todos os metais consumidos pela civilização industrial.

Basicamente, o aço é uma liga de ferro e carbono, que são facilmente encontrados na crosta terrestre. O ferro encontrado está fortemente associado ao oxigênio, à sílica e o carvão, relativamente abundante na natureza, apresenta-se na forma de carvão mineral e, em alguns casos, carvão vegetal.

O carvão, no processo siderúrgico, exerce duplo papel na fabricação do aço. Como combustível, permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500°C) necessárias à fusão do minério. Como redutor, associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de um alto forno. No processo de redução, o ferro se liquefaz, transformando-se em ferro gusa.

A etapa seguinte do processo é o refino. O ferro gusa é levado para a aciaria, ainda em estado líquido, para ser transformado em aço, mediante queima de impurezas e adições. O refino do aço se faz em fornos a oxigênio

básico (BOF), fornos de arco elétrico (FEA) e outros.

Finalmente, a terceira fase clássica do processo de fabricação do aço é a laminação. O aço, em processo de solidificação, é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras etc.

Impurezas como calcário, sílica, fósforo, óxidos básicos, dentre outros, que se separam da fase metálica durante a produção do aço, por diferença de densidade, são chamadas de escória. A escória é, pois, um co-produto inevitável tanto nas fases de redução (escória de alto-forno), quanto na fase de refino (escória de aciaria), respondendo por todo o material não aproveitado no processo siderúrgico.

A composição e as propriedades de uma escória em um dado processo determinam: a qualidade do metal obtido, a velocidade de produção, o desenvolvimento e a eficiência do processo, a quantidade e a composição do fundente a ser utilizado. Sendo comum à afirmativa: “escória boa, aço bom”.

Produção e parque siderúrgico

A siderurgia brasileira é responsável por 3,3% da produção mundial e nos últimos três anos ocupa a sétima posição no ranking internacional. Nesse período, foram produzidos, em média, 26 milhões de toneladas de aço por ano (CRUZ, 1999).

A indústria siderúrgica, portanto, desempenha papel fundamental na indústria moderna e no desenvolvimento industrial do país, não só por sua capacidade inerente de gerar divisas, exportação de produtos acabados e semi-acabados, bem como pelos investimentos aplicados na indústria nacional. Prevêem-se, por exemplo, investimentos internos da ordem de US\$ 12,2 bilhões, até o fim do ano 2000. A siderurgia brasileira emprega, diretamente, mais de 67 mil trabalhadores, sendo que o consumo brasileiro médio per capita é de 99 kg de aço por ano (CRUZ, 1999).

O parque siderúrgico brasileiro é composto por 26 indústrias siderúrgicas, concentrando-se as cinco maiores na região sudeste do País. Estas indústrias são responsáveis por 98,4% da produção brasileira. A Figura 1 ilustra a localização das cinco principais siderúrgicas da região Sudeste (MARQUES, 1994).

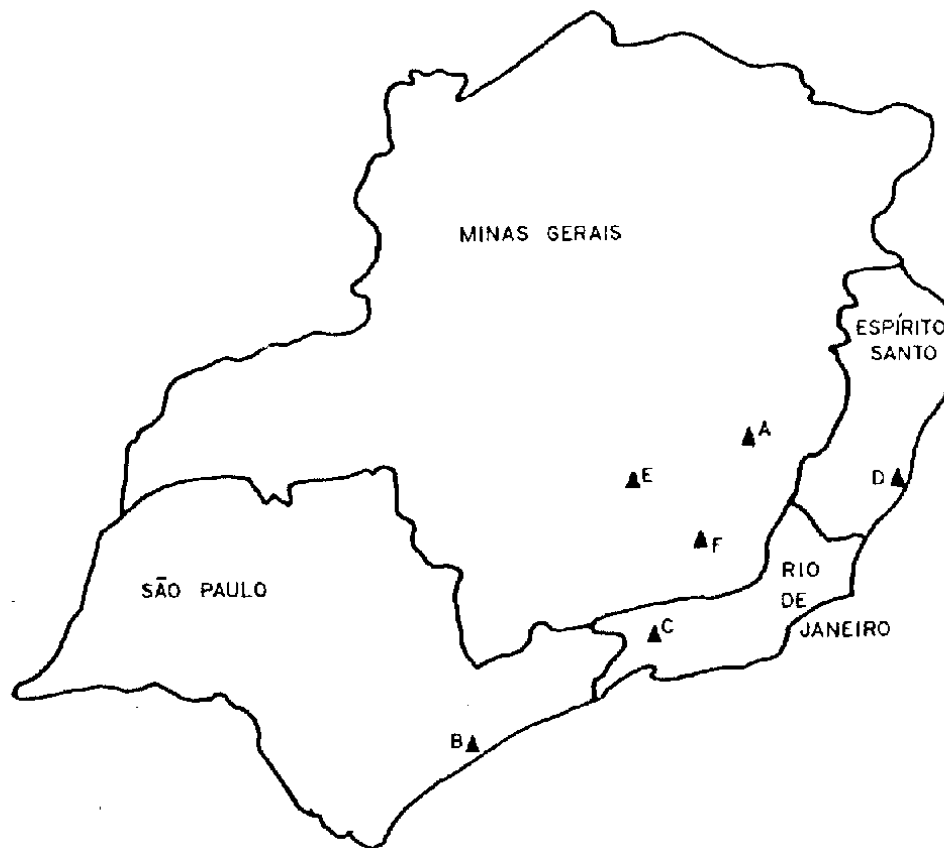


Figura 1 - Localização das principais siderúrgicas: A - Usiminas, B - Cosipa, C - CSN, D - CST, E - Açominas e F - a posição favorável da cidade de Viçosa UFV – MG.

Ao nível mundial, as usinas siderúrgicas estão classificadas segundo o seu processo produtivo, como se segue: (i) integradas – que operam as três fases básicas, de redução, refino e laminação; (ii) semi-integradas – que operam apenas as fases de refino e laminação. De acordo com YUAN (1998), as usinas integradas são responsáveis por 86,3% da produção e as semi-integradas por apenas 13,7%.

No Brasil, assim como em outros países, são produzidos em média 400 a 500kg de escória por tonelada de aço bruto numa usina integrada (CRUZ, 1999).

Segundo levantamento feito sob solicitação do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) em 1999, feito pela Arthur Dr. Little & SETEPLA TECNOMETAL, menos da metade da grande quantidade de materiais

consumidos na produção do aço se incorpora ao produto final, ou seja, dos 56,5 milhões de toneladas de material consumido apenas 25,8 milhões de toneladas se incorpora ao aço bruto, 8,3 milhões de toneladas formam as escórias de alto-forno e aciaria sendo que o restante não incorporado ao aço constituiu-se de finos de carvão e coque, produtos carboquímicos, pós, lamas, refratários, metais separados das escórias, etc.

Esses valores são comparáveis aos apresentados por outras usinas, visto que este trabalho do IBS, envolve os nove países que são os maiores produtores de aço mundial. Porém a tendência com o tempo tem sido a redução na geração de resíduos, não só em virtude de alteração dos próprios processos, como também pela maximização da reciclagem destes materiais através de unidades de sinterização, instalação de numerosos equipamentos de controle, de poluição e/ou a venda destes materiais a terceiros.

Produção de aço e a capacidade de produção instalada das indústrias siderúrgica brasileira nos últimos cinco anos (10^3 t).

Ano	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Produção de Aço	25.747	25.076	25.237	26.153	25.760	24.700	26.000
Capacidade instalada	28.234	28.308	29.548	30.417	31.198	29.856	31.046

Fonte: ILAFA – IBS.

Escórias siderúrgicas

O termo “escória” é aplicado ao material fundido formado por reações químicas entre a matéria prima, os materiais fundidos no forno e as impurezas oxidadas durante o refino do metal.

A função da escória siderúrgica é agregar as impurezas do processo, separando-as dos metais. As escórias podem ser resultantes de diversos processos siderúrgicos, como por exemplo, do ferro, aço, níquel, manganês, cromo, cobre, etc. O diverso tipo de escórias tem funções semelhantes, porém variam extremamente nas suas propriedades químicas e físicas.

As escórias siderúrgicas mais utilizadas no campo da engenharia de construção são as da fabricação do ferro e do aço. Ambas são formadas pela mistura de ferro e carbono em diferentes proporções. A escória do gusa (ferro

de primeira fusão) ou escória de alto-forno apresenta cerca de 4% de carbono em sua constituição química, enquanto as escórias de aciaria (do aço) apresentam até 1,7% (SILVA, 1988).

Do ponto de vista de definição, destaca-se que escória (do latim "scoria" e do grego "skória") significa resíduo silicoso que se forma juntamente com a fusão de metais, sem valor agregado, mas de importância fundamental no processo siderúrgico.

Outras definições de escória são, como se segue: (i) a NBR-5019/82 define escória siderúrgica como sendo um produto líquido ou pastoso produzido durante operações pirometalúrgicas, geralmente contendo sílica, que se torna sólida à temperatura ambiente; (ii) WAELKENS e CARMINE (1985) consideram a escória líquida como sendo um material fundido homogêneo de um ou mais compostos químicos formados de vários óxidos, o qual se separa da fase metálica devido a sua insolubilidade e baixa densidade.

Escória de alto-forno

As escórias de alto-forno têm seu emprego difundido há mais de 100 anos, onde os primeiros relatos publicados foram do ano de 1862, quando Eugene Langen, demonstrou que escórias básicas moídas e misturadas com a cal hidratada davam lugar a um material, que não alcançava as qualidades do cimento Portland, mas que superava os sistemas que só utilizavam cal como ligante. Esta descoberta foi de fundamental importância e contribuição para a reciclagem desse co-produto, pois só no Brasil 93,3% da produção total das escórias de alto-forno são empregadas pela indústria cimenteira, para obtenção do cimento portland tipo-II composto com escória CP II E – 32 (LIMA, 1999).

A composição química da escória de alto-forno é expressa em óxidos, tendo como principais constituintes a sílica, alumina, cálcio e magnésio, que correspondem a 95% do total. Composições químicas típicas são apresentadas no Quadro 2.

A composição mineralógica depende do tipo de resfriamento a que foi submetida à escória.

Composição química das escórias de alto-forno

Constituintes	Média da escória de AF a carvão vegetal no Brasil (%)	Média da escória de AF a coque no Brasil (%)	Faixa global (%)
CaO	26 – 35	41 – 44	30 – 46
SiO ₂	41 – 45	35 – 40	31 – 42
MgO	6 – 13	6 – 7	5 – 18
Al ₂ O ₃	10 – 16	10 – 13	7 – 18
FeO	Máx: 1,5	Máx: 1,8	Máx: 1,5
S (total)	0,05	0,8 – 1,1	0,8 – 2,0
P ₂ O ₅	-	-	-
Basicidade (*)	0,87 – 0,99	1,22 – 1,41	1,0 – 1,8

Fonte: IBS & 1999

(*) relação $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$

Escória de Aciaria

A escória de aciaria é resultante da transformação do ferro gusa líquido e/ou sucata em aço. Em essência, trata-se de uma oxidação seletiva de várias impurezas. Essa transformação é obtida através da adição de fundentes, principalmente óxido de cálcio e fluorita, à carga metálica (gusa líquido e/ou sucata) para a formação da escória. A fusão e o refino da carga se processam através das reações de oxidação das impurezas do aço, tais como silício, fósforo, enxofre, manganês e através da redução do teor de carbono (LEITE, 1997).

A escória é fundamental no processo siderúrgico, pois tem a função de reter a maior parte dos compostos não desejados no banho metálico. Para a fabricação do aço são utilizados, principalmente, dois tipos de processos: forno de oxigênio básico (BOF) e forno de arco elétrico (FEA).

As escórias podem também apresentar uma grande quantidade de partículas metálicas incorporadas em sua matriz final. Sendo possível de encontrar escória que tenham sofrido desintegração devido a uma possível expansão provocada pela corrosão dessas partículas metálicas e/ou pela hidratação dos óxidos básicos (cálcio e magnésio). A figura 2 apresenta os resultados catastróficos da expansão no comportamento de escórias

empregadas como material de construção rodoviária na Rodovia Fernando Ferrari, no Estado do Espírito Santo.



Figura 2 - Resultado da expansão provocada pela oxidação das partículas metálicas e hidratação dos óxidos cálcio e/ou magnésio

A escória de aciaria tem as seguintes funções: servir como um receptor para os constituintes indesejáveis do banho metálico; agir como um reservatório oxidante, dissolvendo uma quantidade considerável do composto portador, sem se combinar com o mesmo, o que a tornaria inerte; controlar o suprimento de oxigênio da atmosfera para o metal; e, agir como uma barreira física dificultando a transferência para o metal de gases como o hidrogênio, oxigênio, enxofre (GEYER, 1995).

Escória de forno de arco elétrico

A produção do aço em fornos de arco elétrico utiliza 90 a 100% de sucata como matéria prima mais os fundentes, formando assim dois tipos de escórias, denominadas de oxidantes e redutoras, ou escórias negras e brancas

respectivamente (LIMA, 1999).

As escórias de forno de arco elétrico apresentam sua composição química mais homogênea que as escórias de forno de oxigênio básico e possuem menor quantidade de cal livre (CaO), apresentando características menos expansivas.

As escórias negras são compostas principalmente por ferro, cálcio, silício e alumínio, enquanto as escórias brancas apresentam uma quantidade reduzida de ferro, mas são ricas em cálcio e silício (LIMA, 1999).

Escória de forno de oxigênio básico

As escórias de forno a oxigênio básico são também chamadas de escórias de conversor ou LD, que são as iniciais da cidade de Linz Donavick, local onde foi desenvolvido e utilizado pela primeira vez o método de sopro a oxigênio no conversor com lança vertical (LEITE, 1997).

Estas escórias têm composição química variável, em função do tipo de forno, tipo de aço fabricado, da matéria prima utilizada e das práticas de funcionamento. Isso torna o estudo das características, propriedades e aplicações das escórias de aciaria um pouco confuso, já que existe muita informação que não distingue a procedência da escória, classificando-a apenas como escória de aciaria, dificultando assim a caracterização da mesma já que as escórias de aciaria resultantes dos dois processos são distintas entre si.

Um dos problemas encontrados na hora de utilizar as escórias de aciaria é sua expansão, pela presença de cal (CaO) e magnésio (MgO) livres, o que obriga a se efetuar um rigoroso controle de sua estabilidade volumétrica, principalmente quando empregadas em corpos rígidos.

Em geral, as escórias BOF são formadas principalmente por ferro, silício e cálcio. Este último é adicionado por imposições metalúrgicas e, devido a razões cinéticas, nem toda cal adicionada é dissolvida pelo processo ou precipitado, chegando à saturação de cal. Por isto, a escória BOF contém uma quantidade considerável de cal livre, que desestabiliza o volume através da hidratação (LIMA, 1999).

A escória de aciaria contém muito mais ferro do que a escória de alto-forno, sendo que, por essa razão, é utilizada como fonte de ferro na

agricultura, como fertilizante e/ou corretivo para o solo e na produção de cimento. Neste caso, seu emprego permite a obtenção de cimento Portland férrico, representando economia de recursos naturais e de energia. Porém esse uso pode ser dificultado por razões de custo e transporte.

A escória de aciaria é adequada à utilização como cascalhamento, leito de estradas de rodagem e lastro de ferrovias, onde cerca de 44% da produção é absorvida. Entretanto, destaca-se que uma grande quantidade dessa escória é descartada ou estocada, podendo-se citar o valor de cerca de 56% de um total de 3,2 milhões de toneladas/ano (YUAN, 1998).

Refere-se que acumular estas escórias em aterros representa um certo desconforto ambiental e um custo elevado de armazenagem, o que, segundo SILVA (1998), pode situar-se na faixa de US\$ 20 a 30 por tonelada de escória.

Características das escórias de aciaria

A caracterização da escória tem como objetivo conhecer melhor as suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, bem como para que se possa analisar e entender melhor o seu comportamento frente às diversas aplicações e solicitações a que se destina.

Do ponto de vista dos seus vários empregos, a escória de aciaria apresenta uma série de características e propriedades que em muito superam os agregados naturais, podendo-se referir aos seguintes aspectos (SILVA, 1998):

- ✓ Econômico: por ser a escória um agregado de grande produção nas usinas siderúrgicas. Assim, se este material não tiver um destino específico, ele começa a ocupar as áreas de estocagem das usinas, ao custo de US\$20 a US\$30 por tonelada de resíduo depositado. Por ser um co-produto, o custo da escória é baixo ou nulo e se for possível determinar o seu emprego a pequenas distâncias de transporte do seu local de origem, ela torna-se um material de custo bastante acessível;
- ✓ Técnico: a escória pode ser usada em diversos campos de aplicação, englobando desde a agricultura, a fabricação de cimento, a construção civil até as ferrovias e rodovias. Isso se deve ao fato de que este material atende às faixas granulométricas exigidas por especificações técnicas de serviços,

bem como apresenta alto índice de suporte Califórnia (CBR ou ISC), baixa abrasão Los Angeles, boa adesividade e excelente poder hidráulico. Esta última característica é de grande importância nos casos rodoviários e ferroviários, por exemplo, abrangendo o emprego deste material nos locais onde o sub-leito é de baixa capacidade de suporte, evitando assim o emprego de grandes espessuras de substituição de materiais;

- ✓ Ambiental: a utilização de rejeitos de quaisquer tipos, se processada dentro de critérios de engenharia adequados, deve ser encarada como uma prática preservacionista/restauradora de elevado sentido ambiental e ecológico. Destaca-se que muitos dos impactos ambientais que possam resultar do processamento da escória são menos significativos do que as operações de extrações, beneficiamento e manuseio dos materiais concorrentes, de origem primária.

Segundo SILVA (1997), os produtores de escória têm adotado estratégias de venda ou doação, na busca de se substituir, na construção civil, o agregado natural por outro de menor custo e propriedades mecânicas similares. Esta abordagem pode ser considerada relativamente eficiente, mas deve-se lembrar que o emprego dessas escórias na construção civil apresenta limitações quanto ao controle de qualidade deficiente e à forma de utilização do produto, ainda não padronizada tecnicamente. Esses fatos podem levar à ocorrência de acidentes ambientais e mesmo a problemas de saúde por parte dos usuários, contribuindo assim para gerar uma imagem negativa da escória como material de construção civil.

Composição química da escória de aciaria

O conhecimento dos componentes químicos da escória é necessário para identificar o comportamento da mesma frente às possíveis aplicações e, por outro lado, na determinação dos componentes perigosos para o meio ambiente e para a saúde humana (LIMA, 1999).

A composição química da escória varia segundo o tipo de fomo e os materiais constituintes. O Quadro 3 apresenta valores médios da composição química de escórias de aciaria nos processos EAF e BOF.

Composição química de escórias de aciaria EAF e BOF

Constituintes	Média da escória de aciaria (EAF) no Brasil (%)	Média da escória de aciaria (BOF) no Brasil (%)	Média Global (%)
CaO	28 – 50	36 – 46	24 – 60
MgO	4 – 17	5 – 12	1 – 15
SiO ₂	8 – 25	11 – 16	10 – 20
Al ₂ O ₃	2 – 13	1 – 4	1 – 13
FeO	10 – 28	14 – 22	14 – 30
S (total)	0,1– 0,3	0,1 – 0,3	0,1 – 0,2
P ₂ O ₅	0,2 – 0,7	1,0 – 2,5	ND
Basicidade (*)	~ 3,00	> 3,00	> 3,00

Fonte: IBS &(1999).

(*) relação (CaO + MgO) / SiO₂

ND – não disponível

Observa-se, no Quadro 3, que as escórias de EAF e BOF são compostas basicamente por cálcio, silício e ferro. Nota-se, também, que a escória tipo BOF é mais ácida que a escória EAF.

A possibilidade de utilização de um resíduo não deve ser avaliada somente pelo ponto de vista de suas características técnicas para a aplicação que se planeja, como também pela perspectiva de um possível impacto que possa a vir causar no meio ambiente quando se avalia o contato entre o material sólido (resíduo) e um líquido. Alguns de seus componentes podem se dissolver em menor ou maior extensão, tornando interessante saber o grau de dissolução para cada constituinte individualmente. A lixiviação dos materiais pode ocorrer no lugar em que está sendo aplicada a escória, por infiltração natural das águas, pelas chuvas, exposição da água do mar, etc. (LIMA, 1999).

Preocupado com a contaminação de lençóis freáticos e mesmo do próprio solo, o IBS, no ano de 1997 elaborou um estudo conjunto para classificar os diversos agregados siderúrgicos quanto à lixiviação e solubilidade dos materiais de acordo com:

- ✓ NBR 10004 – Resíduos Sólidos (classificação);
- ✓ NBR 10005 – Lixiviação de Resíduos (procedimento);

- ✓ NBR 10006 – Solubilização de Resíduos (procedimento);
- ✓ NBR 10006 – Amostragem de Resíduos (procedimento).

A análise foi feita pelo laboratório da empresa PURIQUIMA LTDA – localizado em São Paulo - SP. Os nomes das empresas participantes foram suprimidos destes relatórios e nos resultados todos os materiais analisados enquadraram-se na Classe 2 (Resíduo não inerte – NBR 10004), exceto a amostra de uma siderúrgica onde o agregado granulado de alto-forno (AGNF) foi classificado com inerte (Classe 3 – NBR 10004).

Características físicas e propriedades mecânicas das escórias de aciaria

As características físicas e mecânicas dos agregados são importantes para as aplicações a que se destinam. Essas mesmas características estão associadas à composição mineralógica da rocha de origem (agregado natural) ou da composição química na produção do agregado artificial.

Para que seja feita uma caracterização das propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria, vai-se abordar as fases dos processos de produção que estão intimamente ligados e influenciam diretamente sobre as mesmas, que são como se segue: resfriamento, beneficiamento, armazenamento, amostragem, identificação, expansão e cura.

Resfriamento

Antes de ser beneficiada, a escória necessita ser submetida ao resfriamento. Sabe-se que ao se resfriar um material em estado líquido e a alta temperatura (1500°C), lentamente os elementos tendem a se agrupar ordenadamente formando estruturas cristalinas estáveis. Porém, quando se resfria o material bruscamente os elementos se agrupam de forma desordenada, formando compostos amorfos. O conteúdo de matéria amorfa está ligado à propriedade da reatividade hidráulica, se o material reage com a água, e da reatividade pozolânica, se reage com o hidróxido de cálcio. Já a determinação das estruturas cristalinas é importante, do ponto de vista em que o material possa vir a reagir e a sofrer aumentos consideráveis de volume, considerando os óxidos de cálcio e magnésio, bem como os sulfatos de ferro e micas (LIMA, 1999).

A diferença de temperatura a ser vazada (1500°C) do pote de escória

para a área de resfriamento faz com que ocorra um choque térmico, onde os blocos de escórias se fragmentam, gerando o que se denomina de escória bruta de aciaria. A granulometria dessas escórias varia de 0 a 500 mm, dependendo do processo de resfriamento empregado (LEITE, 1997).

Os diferentes processos de resfriamento a que são submetidas às escórias de aciaria muito se assemelham aos das escórias de alto-forno, podendo-se citar:

- ✓ Resfriamento lento (RL): Ocorre quando a escória é resfriada naturalmente ao ar. Nesse processo, os seus óxidos se cristalizam e perdem suas características hidráulicas, sendo a escória considerada inerte. Outro processo ocorre quando a escória é basculada nas baias de resfriamento e recebem jatos d'água dirigidos no sentido do fluxo da escória. Nesse caso não há preocupação de molhar ou resfriar toda a superfície livre da escória depositada, levando dias o processo para a sua conclusão;
- ✓ Resfriamento rápido (RR): Este processo consiste no resfriamento através de jatos de água, por meio de bicos aspersores instalados nas laterais das baias, permitindo uma distribuição homogênea da água por toda a superfície da escória. A escória resfriada é previamente expandida, aumentando sua natureza vesicular, produzindo assim um material leve que pode ser moído e classificado granulometricamente. Este processo dura cerca de horas;
- ✓ Resfriamento ultra-rápido (UR): Neste processo a escória é basculada diretamente numa baia ou tanque contendo água na proporção de 50 vezes o seu volume. A escória obtida é conhecida como escória granulada (vítrea), apresentando pouca ou quase nenhuma cristalização, estrutura porosa e textura áspera. Este tipo de material é bastante utilizado na pavimentação por causa da sua excelente ligação hidráulica.

Beneficiamento, armazenamento e amostragem

A escória bruta depois de resfriada é separada e classificada em frações metálicas e escória propriamente dita. Parte da fração metálica retorna ao alto-forno onde é reaproveitada e a outra parte é britada e vendida a terceiros. A escória é então levada através de correias transportadoras até a unidade de

britagem. Nesta unidade produz-se a última etapa de classificação, pois a escória é disposta granulometricamente de acordo com as exigências de mercado. As escórias deverão ser beneficiadas e classificadas separadamente em lotes ou pilhas de estocagem.

Um fato importante é que a escória de alto-forno poderá, após uma análise e liberação, ser despachada para uso imediato. Já a escória de aciaria, mesmo as que são retirada de lotes envelhecidos e as obtidas diretamente do processo de fabricação do aço, deverá ser analisada para identificar o seu potencial de expansão volumétrica, para uma possível e posterior liberação para emprego como material de construção civil. As pilhas de estocagem devem apresentar em torno de 500 toneladas e terem as suas condições de saturação controlada inicialmente, afim de que toda a expansão seja eliminada ou minimizada num período de, no mínimo, 6 a 8 meses. O método construtivo e o controle de cada lote de estocagem deve ficar a cargo de um engenheiro responsável. Cada lote deve ser perfeitamente identificado de acordo com as normas do DNER (SILVA, 1988). Durante o período de cura citado, o lote de estocagem deve ser novamente amostrado por um engenheiro e a escória testada quanto à sua característica expansiva, de acordo com o método adotado na análise. Portanto, o lote de escória só deve ser aprovado e/ou liberado para o uso se a expansão for compatível com a aplicação prevista. Caso contrário, o lote deve ser re-amostrado, após respeitar-se um período de cura adicional de 2 meses. Destaca-se que as amostras devem ser formadas, sempre que possível, com o material ligeiramente úmido, evitando assim a segregação da parte pulverulenta. A amostragem deve contemplar cada lote de estocagem, assim como a identificação e o ensaio de expansão. Deve-se, também, tomar cuidado para que as amostras enviadas ao laboratório para ensaio sejam representativas, recomendando-se:

- ✓ Escória britada graduada: uma caixa de 40x40x30 cm;
- ✓ Escória corrida: duas caixas de 40x40x30 cm;
- ✓ Escória britada nº 0, 1, 2, 3 ou 4: uma caixa de 40x40x30 cm para cada bitola;
- ✓ Escória de granulação de areia ou pó de pedra: uma caixa de 40x40x30 cm.

Identificação

Segundo SILVA (1988), para uma identificação adequada, as amostras enviadas aos laboratórios devem estar devidamente acondicionadas e apresentar pelo menos as seguintes informações: natureza do material, procedência e número da amostra, responsável pela amostragem, local de amostragem, fim a que se destina o material e local de aplicação do mesmo. A identificação da amostragem deverá ocorrer sob o comando de um engenheiro, que deverá identificar visualmente se o lote não contém qualquer outro produto, escória de alto-forno ou sucata, que não seja a escória de aciaria.

Expansão

LOPEZ (1989) acreditam que, apesar de apresentarem inúmeras vantagens do ponto de vista técnico, a utilização da escória de aciaria como agregado natural apresenta o inconveniente de sua baixa estabilidade volumétrica, como consequência da ação da sua cal livre constituinte.

Isso se deve ao fato de que a cal virgem é introduzida no processo de refino com o objetivo de retirar elementos como fósforo, enxofre e silício do ferro gusa na produção de aço, sendo que esta cal exposta ao ar pode apresentar expansão por hidratação (CINCOTTO citado por GEYER, 1996).

Assim, de acordo com LEA citado por LIMA, (1999), o óxido de cálcio livre na constituição da escória, ao reagir com a água, forma compostos volumetricamente menores; no entanto, suas partículas hidratadas formadas crescem em uma orientação preferencial produzindo pressão ao seu redor, causando assim o conhecido fenômeno de expansão. A reatividade da cal livre depende da temperatura à qual é preparada. Quando não tem sido preparada a mais de 1000°C, a cal reage instantaneamente com a água, porém se a reação não ocorrer será preciso um tempo maior para se hidratar, já que os cristais formados serão mais densos e compactos possuindo menor superfície específica para reagir com a água.

Refere-se esse autor, que o óxido de magnésio (MgO) tem sua

instabilidade causada ao longo do tempo já que se hidrata mais lentamente causando uma expansão que pode levar à ruptura da escória. O grau de instabilidade está diretamente ligado ao tamanho dos cristais, enquanto que este último é influenciado diretamente pela velocidade do resfriamento a que foi submetida à escória. No caso de resfriamento lento, serão formados cristais grandes que ao se hidratarem lentamente causam grandes expansões e o contrário ocorre quando se forma cristais pequenos que se hidratam rapidamente ou não, chegam à ruptura.

Portanto, para se utilizar os agregados de escória de aciaria deve-se assegurar que estes óxidos livres estejam hidratados, ou seja, que esta escória tenha sido envelhecida por um determinado período de cura.

A expansão máxima admissível para que o agregado siderúrgico seja considerado inerte para utilização em pavimentação está diretamente relacionado ao período de cura a que foi submetido, sendo que os percentuais podem variar de 1,5 a 3,0%, de acordo com a norma considerada.

SILVA (1988) comparou a expansão de escórias produzidas de sucatas e de minério de ferro, tendo por base várias amostras coletadas em duas siderúrgicas com processos de produção diferentes e ensaiadas sob mesmas condições de laboratório. Observou-se, nesse caso, que as escórias de sucata apresentaram expansões menores do que as escórias produzidas do minério de ferro.

A expansão da escória quando maior que a prevista pela norma de pavimentação chega a causar fraturas prematuras e trincas aleatórias em pavimentos feitos com mistura de asfalto e escória de aciaria, segundo COOMARASAMY e WALZAK (1995) detectadas em Ontário, no Canadá. As causas dessas fraturas foram investigadas com o emprego da microscopia eletrônica e de difratogramas de raios-X, onde os resultados indicavam que a fratura neste meio deve-se à formação de depósitos ricos em cálcio, principalmente carbonato de cálcio, ao longo da superfície de interface. Esse efeito interfacial de bordo pode ser a causa da expansão excessiva das escórias, causando o rompimento das misturas asfálticas. A Figura 3 apresenta uma visão dos danos causados pela expansão em revestimentos asfálticos, tendo por base o pavimento da Av. Fernando Ferrari. A Figura 4 ilustra pequenas erupções num pavimento, devido à expansão da escória de aciaria.



Figura 3 - Detalhe do "quebra-mola" provocado pela expansão da escória de aciaria na ciclovia da Av. Fernando Ferrari que liga Vitória-ES ao litoral norte



Figura 4 - Detalhe do "vulcão" nome dado às pequenas erupções que apresenta o pavimento quando da expansão da escória de aciaria

JOHN (1995) considerou que a natureza expansiva da escória de aciaria e a inexistência de critério técnico de execução simples para que se possa detectar a sua estabilização tem sido o principal fator que influencia na durabilidade das obras de engenharia realizadas com este material. Por outro lado, poucos resultados têm sido publicados a nível nacional e internacional nesta área, sendo este um campo aberto a novas investigações.

Segundo GEYER (1996), o fator limitante da reutilização das escórias de aciaria é exatamente a cal livre que permanece como parte de sua matéria-prima que ainda não reagiu. Neutralizar a ação desta cal ou ainda eliminá-la da escória de forma econômica, bem como identificar um método de ensaio expedito que permita avaliar o aspecto estabilidade volumétrica das escórias é um desafio a ser vencido para o melhor aproveitamento deste resíduo industrial.

Com o propósito de analisar a expansão das escórias sob diferentes processos de cura, foram avaliados os seguintes métodos de caracterização do fator expansão das escórias de aciaria:

- ✓ Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria – PTM 130 – JUN/76. Rev. MAIO/78 e adaptado pelo DER-MG/82;
- ✓ ASTM D 4792 – 95. Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions.
- ✓ Método de ensaio de dilatação em água para escória siderúrgica – JIS A 5015 – 1992 – Escórias Siderúrgicas para Construção de Estradas.

Métodos da PTM-130/Jun 76 rev. 1982 e ASTM D 4792/95

O método da PTM-130/82 ou o método da ASTM D4792/95 apresentam as mesmas particularidades no ensaio de expansão. Sendo que o método PTM-130/82 apresenta uma redação confusa e algumas vezes dúbia, como:

- ✓ Algumas incorreções nas unidades de medidas, como por exemplo, a transformação de polegada em centímetro;
- ✓ Item 5, que trata da relação entre umidade ótima e densidade máxima, determina que ensaio seja feito segundo o método DNER-DPT 49/64. Porém, este método de ensaio não pode ser localizado no próprio arquivo do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem;
- ✓ No item de número 6.1 do ensaio, talvez por um erro de digitação, faz-se referência ao item 5.5, mas a norma só apresenta a sequência até o item 5.3;
- ✓ Já no item 6.2 pede que a amostra seja submersa em água a 38°C, não especificando, contudo, qual o período de tempo;
- ✓ Quanto ao procedimento de ensaio, item 7.3, fala-se sobre a adição de água para que a amostra permaneça completamente submersa; contudo, não menciona se esta água deve estar pré-aquecida, conforme a recomendação de alguns autores.

Porém, este método tem também as seguintes vantagens: a aparelhagem utilizada é comum a todos os laboratórios de geotecnia e estradas e as empresas que atuam na área de pavimentação rodoviária. Basicamente, os equipamentos são os recomendados pela norma NBR 9895 – Solo – Índice de Suporte Califórnia. A preparação da amostra segue os mesmos critérios estabelecidos na NBR 9895.

Método da JIS A 5015/92

Trata-se de uma normalização japonesa, que estabelece os procedimentos para o ensaio de dilatação em água da escória de aciaria. É uma norma pouco difundida no meio rodoviário brasileiro, sendo, portanto de acesso mais restrito. A Norma adota, também, uma série de ensaios complementares que se encontram padronizados por outras normas japonesas, envolvendo ensaios de compactação via apiloamento, CBR e peneiramento, dentre outros. Assim, o emprego dessa Norma no presente trabalho teve como principal óbice à dificuldade de obtenção de material bibliográfico de consulta relativa aos ensaios complementares a serem realizados.

Cura

Segundo a JIS 5015 (1992), a cura é a reação com ar e água da escória de aciaria solidificada e submetida a britagem, tendo por finalidade estabilizar a sua expansão. A cura consiste no tratamento de estabilização química através da reação de hidratação e carbonatação de substâncias expansíveis (como cal livre) da escória com água e ar. Durante a cura, essas substâncias reagem, transformando-se em hidróxidos e carbonatos estáveis. A Norma também faz referências a vários países que pesquisam diferentes modos de acelerar o processo de cura desse tipo de escória, sendo comum classificar a cura como normal, quando realizada com ar e água, e acelerada, quando realizada com água aquecida ou vapor.

No processo de cura lenta ou normal, a escória produzida é beneficiada e estocada em pilhas, nos pátios a céu aberto, sendo seu principal controle o modo e o tempo de estocagem que varia conforme cada autor. Na cura normal, a escória siderúrgica é solidificada por resfriamento, britada e empilhada ao ar livre, mantendo-se nessa situação até sua estabilização. Como inconveniente desse processo de cura pode-se citar o longo período de estocagem necessário que varia de 6 meses a 2 anos. Apesar de ser um processo

bastante utilizado, é muitas vezes inviável para as siderúrgicas de grande porte, haja vista o enorme volume de escória produzido, o que demandaria uma área considerável de estocagem.

Segundo SILVA (1988), a cura lenta se dá após um período mínimo de 6 a 8 meses de estocagem, desde que seja mantida uma condição de umidade razoavelmente uniforme, com temperatura média mensal superior a 5°C. Contudo, HILTUNEM citado por LEITE (1997) refere que a cura da escória se processa em um período de no mínimo 18 meses, quando estocada em pilhas nos pátios a céu aberto. SILVA (1998), no entanto, considera o período de 6 meses como o tempo de cura recomendado para escória de aciaria, referindo que este período prolongado de cura talvez seja função da hidratação do óxido de cálcio e magnésio, principalmente este último que tem uma hidratação mais lenta. KOIDE citado por LEITE (1997) informa que a cura natural pode-se estender a até dois anos (17500 h). Observa-se, então, a existência de diferentes e divergentes opiniões em relação ao tempo de cura das escórias de aciaria, sendo comum, porém o conhecimento de que este tempo é função do processo de cura, do tipo de escória produzida em cada siderúrgica e das matérias primas utilizadas na fabricação do aço.

Na cura acelerada busca-se a velocidade de ocorrência das reações ligadas aos fenômenos expansivos da escória, sendo que as técnicas utilizadas encontram-se ainda em estudo e desenvolvimento. De acordo com LEITE (1997), são conhecidos dois processos de aceleração de cura. No primeiro, a escória é submetida a um "spray" de água quente (cura por água quente); no segundo, a escória passa através de uma zona de vapor (cura a vapor). Em ambos os casos o tempo de cura fica reduzido a aproximadamente 2 dias (ou 48 horas).

Recentemente, duas siderúrgicas japonesas, a Sumitomo Metal Industries Ltda. (SMI) e a Kawasaki Heavy industries Ltda. (KHI), desenvolveram um processo denominado SKAP ("Sumitomo Kawasaki Aging Process") que reduz o período de cura da escória para duas horas. Neste processo, onde se faz a injeção de vapor sob pressão, o aumento da temperatura e a alteração da pressão aceleram em muito as reações químicas, reduzindo assim substancialmente o período de cura. A Figura 5 apresenta os resultados de ensaios realizados em amostras de escória, considerando as

situações de aplicação de vapor na pilha de escória estocada a céu aberto no pátio (cura acelerada) e amostras submetidas a vapor pressurizado (processo SKAP) (LEITE, 1997).

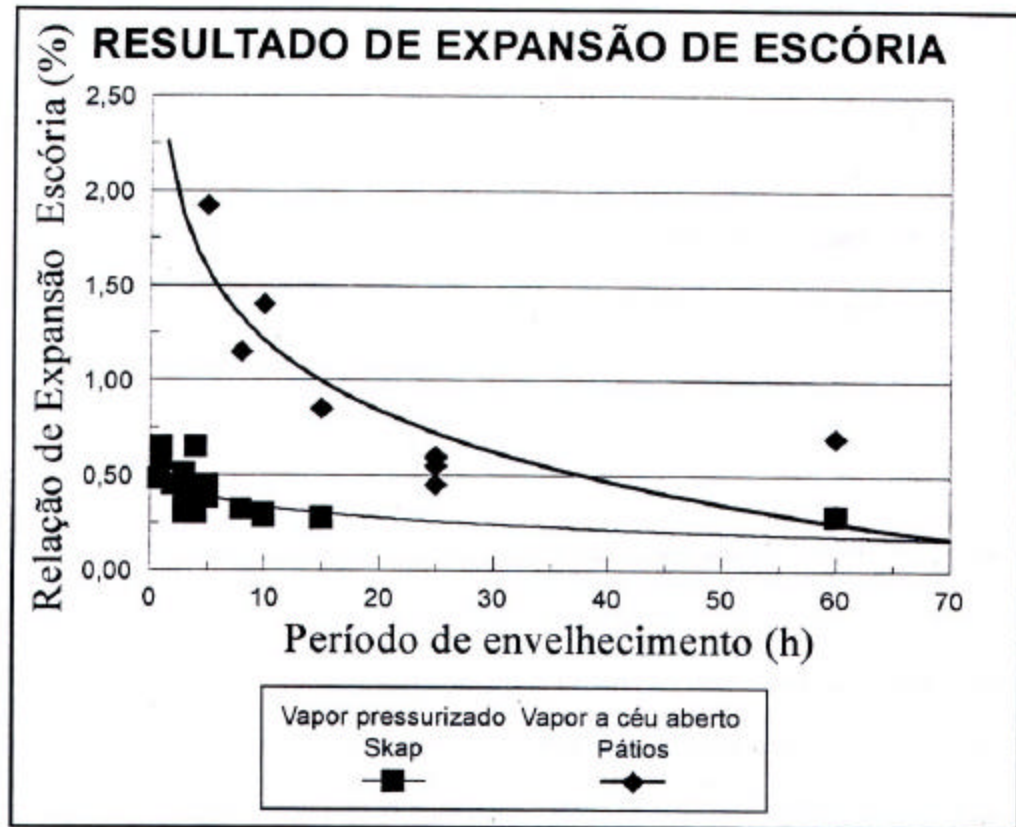


Figura 5 - Processo de cura da escória versus expansão (LEITE et al., 1997).

Observa-se na Figura 5 que os resultados de expansão de amostras de escória colhidas nas primeiras horas de produção do processo SKAP (tempo inferior a 2 horas) estão próximos ao valor de 0,5%, enquanto que os resultados obtidos nas amostras de escória submetidas à cura acelerada são bem superiores, ocorrendo concordância entre os resultados de ambos os processos após 70 horas de cura acelerada. Esse fato comprova a maior eficiência do processo SKAP (LEITE, 1997).

Características Tecnológicas

Resultados dos ensaios comumente utilizados na caracterização dos agregados naturais britados mostram que a escória de aciaria é um produto tecnicamente competitivo no mercado de agregados para a construção civil, em especial para a pavimentação rodoviária.

Do ponto de vista das vantagens do emprego em obras civis do agregado graúdo obtido da britagem da escória sobre o agregado natural britado, BRUN & YUAN (1994) destacam: menor custo, já que não requerem explosivos para desmonte; maior resistência à abrasão; estrutura vesicular, permitindo perfeita drenagem quando utilizados em drenos e lastros ferroviários; forma de grão cúbica, que confere ótima consistência e adesividade às misturas asfálticas; maior peso próprio, resultando em economia de material no dimensionamento, de contenções e lastros, assegurando grande estabilidade. Destaca-se que ao se utilizar a escória como agregado graúdo, ela normalmente é considerada como material inerte capaz de proporcionar boa capacidade de suporte. Historicamente, a Argentina é o país que mais se beneficiou dessa experiência devido à carência de brita.

Contudo, com vistas a se obter um agregado de boa qualidade, alguns aspectos devem ser observados, em especial evitando que o agregado produzido seja contaminado com outros materiais, como o lixo industrial, plástico, refratário, etc. Vale referir que não se deve, também, misturar escórias de diferentes tipos, como por exemplo, escória de aciaria e alto-forno, bem como que as propriedades dos agregados variam conforme a composição e o resfriamento de escórias. Assim, geralmente, escórias ácidas produzem agregados mais densos e escórias básicas agregados com estrutura vesicular.

Nesse sentido, pode-se referir aos seguintes aspectos como de interesse:

- ✓ Através de ensaios de laboratório pode-se verificar que o agregado proveniente da escória de aciaria possui alta resistência à abrasão Los Angeles (da ordem de 20 a 30%), demonstrando durabilidade excepcional como material a ser empregado em serviços de pavimentação;

- ✓ Por não apresentar formato lamelar, como acontece com a maioria dos agregados naturais, este agregado siderúrgico fornece misturas de elevada estabilidade estrutural;
- ✓ Recomenda-se o seu emprego em misturas betuminosas, por apresentar alta resistência mecânica, forma cúbica de partículas e boa adesividade ao material betuminoso;
- ✓ Observa-se que as características físicas e químicas deste agregado possibilitam uma economia em torno de 20% no combustível utilizado na queima em usinas de asfalto à quente;
- ✓ Pela formação de suas células internas, este agregado permite, também, um escoamento da água mais efetivo, melhorando assim as condições de drenagem das camadas do pavimento rodoviário;
- ✓ Quando se emprega este produto em obras de contenção, sejam rodoviárias ou não, o seu peso próprio leva dificuldades para que haja movimentação pela ação de agentes externos, em especial as águas de chuvas;
- ✓ A escória quando usada para encascalhamento de vias não pavimentadas é classificada como resíduo de Classe 2 (não inerte, não perigosos) pela NBR – 10004 – Resíduos Sólidos. BERNARDES (1992) destacam que medições de campo mostram que os teores de metais lixiviado estão muito próximos dos limites de detecção dos métodos analíticos utilizados, ou seja, são valores muito pequenos e, portanto, pouco relevantes do ponto de vista ambiental.

Estes fatos técnicos, aliados a aspectos de natureza econômica, levam a concluir que existe um campo recente para o emprego desse material em obras de pavimentação rodoviária no Brasil, em especial quando se levam em conta as necessidades de nossa malha viária. Mas para que isto ocorra, deve-se buscar novas formas de avaliação do potencial de expansão das escórias de aciaria, o que demanda que, pesquisas sejam desenvolvidas levando-se em conta as particularidades de produção dos vários tipos deste material.

Possíveis aplicações da escória de aciaria

Uma das aplicações mais comuns das escórias de refino, após a

estabilização da expansão, é como agregado em obras de engenharia civil, podendo-se citar, do ponto de vista de estradas, o seu emprego em ferrovias, como lastro e sub-lastro, em rodovias, como serviços de pavimentação e infraestrutura. Pode-se referir, também, ao seu uso na contenção de encostas, na forma de gabiões, na indústria do cimento e como fonte de ferro na agricultura, dentre outros.

Domesticamente, a AÇOMINAS vem utilizando o agregado 2 (faixa de 10 a 32 mm) na pavimentação de suas vias internas e comercializando a produção excedente para a prefeitura de Ouro Branco - MG, que a utiliza em trabalhos de pavimentação urbana, na preparação de sub-base de escória e base de vias com solo – escória, conforme figura 6.



Figura 6 - Estrada imperial que liga Ouro Branco a Ouro Preto em Minas Gerais – Escória utilizada da Açominas.

No caso ferroviário, as escórias de aciaria têm sido empregadas como substituto das rochas britadas com certa vantagem em lastro e sub-lastro. A escória não apenas possui características físicas equiparáveis à brita, como também pode ter, neste caso, a sua estabilização química acelerada, pois irá trabalhar constantemente exposta ao meio ambiente e às intempéries. Pela facilidade de se aliar o transporte de grandes volumes de escória ao baixo custo com o seu emprego na linha férrea, as ferrovias são hoje uma área

bastante atraente para o emprego deste produto como camadas de lastro e sub-lastro. A Companhia Vale do Rio Doce - ES Vitória/Minas tem apresentado bons resultados nesta experiência.

Segundo LEITE (1997), a Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) vem executando desde 1985 uma série de experiências para utilização da escória beneficiada de aciaria como lastro ferroviário. Foi feito durante todos esses anos um acompanhamento sistemático do comportamento da superestrutura da linha férrea, não tendo sido observada nenhuma anormalidade, quando comparado ao comportamento de um mesmo lastro de rocha britada. Também se observou uma substancial redução na necessidade de socaria e alinhamento da linha.

Indubitavelmente, um campo importante de aplicação das escórias em geral é a pavimentação rodoviária, em especial quando se considera que, no Brasil, as rodovias são responsáveis por, aproximadamente, 63% das cargas transportadas. Contudo o quadro em que se encontra a malha rodoviária brasileira é preocupante. De acordo com CARDOSO (1994), com base em dados de 1992, a rede rodoviária federal brasileira apresentava o seguinte estado de funcionamento: 36% encontrava-se em bom estado, 34% em estado regular, 23% em péssimo estado e 7% em mau estado. O autor refere, ainda, que a cada ano cerca de 3.000 km passa do estado regular para mau, bem como é possível estimar que as demais classes venham a sofrer alterações nestes mesmos percentuais, este autor estimou serem necessários investimentos da ordem de US\$ 1,4 bilhões anuais apenas para a recuperação e manutenção da malha rodoviária federal existente, número este que está muito além do que se tem observado nos investimentos públicos feitos no setor rodoviário para esta finalidade.

Para BERNUCCI (1997), o quadro de descaso e abandono das rodovias brasileiras pouco se alterou nos últimos anos. Esta autora destaca que a rede pavimentada nacional, somada as redes federais, estaduais e municipais, conta com 148.750 quilômetros, perfazendo apenas 9% da rede total, bem como que as rodovias municipais participam com 84% da rede total brasileira, com 1.391.241 quilômetros, dos quais apenas 1% encontra-se pavimentada. Supondo-se que parcela dessas rodovias em terra justificasse os serviços de pavimentação, seja pelo número de veículos como pela importância regional ou

estratégica, algumas centenas de milhares de quilômetros necessitariam ser pavimentados nos próximos anos. Somando-se a esse quadro a crise econômica que o país tem enfrentado nos últimos anos e a escassez de recursos financeiros, quando se considera a totalidade das obras viárias a serem recuperadas ou implantadas, torna-se necessário envidar esforços no sentido de se empregar materiais alternativos na construção rodoviária. É nesse contexto técnico e econômico que cresce a importância de se implementar, no Brasil, o uso de escórias nos serviços de pavimentação rodoviária.

Historicamente, a aplicação da escória de aciaria na construção de rodovias foi uma das primeiras preocupações da indústria siderúrgica. Porém, muitas dessas obras já executadas tiveram sérios problemas técnicos com origem na falta de conhecimento e domínio do fator expansão destes materiais. Presentemente, tem-se obra rodoviária com mais de dez anos de serventia que atendem satisfatoriamente às exigências de projeto.

Outro emprego da escória é na indústria do cimento. Segundo GEYER (1995), a escória de aciaria contém muito mais ferro do que a escória de alto forno, como se mostra nos Quadros 1 e 3, razão pela qual ela é comumente utilizada como fonte de ferro na produção de cimento. O seu emprego permite a obtenção do cimento Portland férrico, representando economia de recursos naturais e de energia.

Pode-se citar, também, o emprego da escória na agricultura, sendo que durante muitos anos o mercado de fertilizantes foi o grande consumidor das escórias de aciaria geradas pelo Processo Thomas. A característica deste processo era a geração de escória com alto teor fosfórico. O fato que levou ao emprego dessas escórias em trabalhos agrícolas foi à constatação de que elas apresentavam em sua constituição mineralógica fósforo, óxido de cálcio e magnésio, entre outros elementos, que são capazes de modificar o pH do solo, reimplantando uma série de micronutrientes responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento das culturas, principalmente em solos pobres e muito ácidos. Por outro lado à adição das escórias de aciaria no solo produz importante melhoria nas propriedades físicas (densidade e porosidade), favorecendo o transporte hídrico do mesmo. Os países da Comunidade Econômica Européia (CEE) e da antiga União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) são os

depositários de larga experiência nesta área.

Emprego da escória de aciaria em pavimento rodoviário

Serão abordados neste item aspectos ligados às especificações técnicas e experiência de utilização da escória de aciaria em pavimentação rodoviária.

Especificações técnicas

No campo das especificações técnicas para pavimentação rodoviária em conformidade com as normas do DNER-EM 262/94, empregada no Brasil, pode-se referir a:

- ✓ Teor de impurezas: as escórias de aciaria devem estar isentas de impurezas orgânicas, de contaminação com outras escórias, solos que possam prejudicar os valores especificados em projeto;
- ✓ Granulometria: a composição granulométrica deve-se manter na proporção de 40% na faixa de $\frac{1}{2}$ "(1,27 cm) e 60% na faixa que vai de $\frac{1}{2}$ " a 2 "(1,27 a 5,08 cm) de abertura nominal e deve atender a granulometria de projeto. Destaca-se que a granulometria da escória de aciaria destinada a revestimento deve ser função do estudo em laboratório para atendimento das características exigidas no projeto";
- ✓ Absorção de água: 1 a 2% em peso, sendo determinada pela ABNT MB-2698, de 1987;
- ✓ Massa específica: 3 a 3,5g/cm³, determinada pela ABNT MB-2698, de 1987;
- ✓ Massa unitária: 1,5 a 1,7 kg/dm³, determinada pela ABNT MB-1665, de 1982;
- ✓ Desgaste a abrasão Los Angeles: dever ser no máximo igual a 25% para sub-base e revestimento, determinada pela ABNT MB-170, de 1983;
- ✓ Avaliação do potencial de expansão: determinada pelo Método PTM 130, desenvolvido pela "Pensylvania Testing Material e adaptado pelo DNER-MG, onde é permitido um máximo 3% de expansão ou o valor determinado pela especificação particular de projeto";

Experiências de obras executadas

Neste desenvolvimento vai-se abordar a experiência de obras executadas no Brasil e nos Estados Unidos da América.

- ✓ BR 101 - Norte-Espírito Santo, trecho Aeroporto — Carapina: obra com sub-base e base estabilizadas granulometricamente, com mistura de 50% de escória curada, proveniente da Companhia Siderúrgica Tubarão (CST), com granulometria na faixa de 0 a 1" e 50% de argila A.7.6, apresentando CBR $\geq$ 80. Atualmente, a pista de rolamento encontra-se em perfeitas condições de tráfego, como se mostra na Figura 7;



Figura 7 - Av. Fernando Ferrari (BR-101) que liga Vitória ao litoral norte do Espírito Santo.

- ✓ Coronel Fabriciano - Ipatinga (BR/381): trecho na extensão de 13 km, com sub-base e base com 15 cm de escória de aciaria bruta envelhecida (USIMINAS). Revestimento em CBUQ executado com brita convencional. Embora seja um trecho submetido ao tráfego pesado, datado de 1980, o pavimento apresenta bom comportamento em serviço;
- ✓ Pavimentação urbana em Mogi das Cruzes, São Paulo: trecho executado

no período de 1981 a 1983. Utilização de 100.000 toneladas de escória de aciaria envelhecida da COSIM, em todas as camadas do pavimento (base, sub-base e revestimento). Trecho em bom estado de conservação;

- ✓ Acesso a São Domingos do Prata à BR - 262/MG: obra de 1978, com extensão de 9km, revestimento em tratamento superficial de penetração invertida (TS) com brita convencional. Na execução da base desse trecho, foi utilizada escória de aciaria bruta, proveniente da siderúrgica Belgo Mineira, forno Siemens Martin, sem se observar um período mínimo de cura. O trecho apresentou comportamento não satisfatório, observando-se o aparecimento de inúmeros pontos com trincas radiais no revestimento, denominadas de “formigueiro e/ou vulcão”, impedindo a boa condição de rolamento, desagregando-se posteriormente. Após os estudos e análises químicas realizadas pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais foi constatado que o fato se originou pela hidratação do óxido de cálcio e do óxido de magnésio livres presentes na escória de aciaria, do que resultou considerável expansão volumétrica (Figura 8).



Figura 8 - Detalhe de uma trinca no pavimento com escória de aciaria.

A Figura 9 mostra detalhe de um "vulcão" num pavimento construído com escória de aciaria.



Figura 9 - Detalhe de um "vulcão" no pavimento feito com escória de aciaria, localizado abaixo da roda dianteira do carro.

- ✓ Acostamento da BR-101 em Vitória-ES, trecho aeroporto – Carapina. Executado com escória de aciaria na faixa de 0-1“. Observou-se em todo acostamento ocorreu formação de "quebra-molas", ou seja, elevação do revestimento devido à expansão da escória de aciaria, conforme se mostra nas Figuras 10, 11 e 12.



Figura 10 - Detalhe da boca de lobo-dispositivo de drenagem na Av. Fernando Ferrari (BR-101).



Figura 11 - Ciclovia da BR-101, onde a expansão da escória apresentou um "quebra-mola" de ± 15 cm de altura, sendo este localizado logo atrás da boca de lobo.



Figura 12 - "Quebra-mola" formado pela expansão da escória.

Com relação às obras realizadas nos Estados Unidos da América, destaca-se que, naquele país, as escórias de alto forno estão sendo usadas há mais de 30 anos e as escórias de aciaria há 20 anos. Entre outras obras, pode-se referir a:

- ✓ Filadélfia - Estado da Pensilvânia: Rodovias SH-76 e H-200: obra com revestimento de CBUQ com agregado de escória de aciaria envelhecida. Foi constatado que as rodovias estão em excelentes condições, sendo que a SH-76 suporta um tráfego pesado, em torno de 20.000 veículos por dia e foi construída há mais de 20 anos;
- ✓ Pista do Aeroporto Internacional de Pittsburgh: Revestimento em concreto asfalto usinado a quente, onde se empregou cerca de 600.000 m³ de escória de aciaria envelhecida. Com relação a este aeroporto, ele apresentava à época dados de tráfego (operações de decolagem e aterrissagem) de 1500 aviões/dia; sub-base e base de escória na espessura de 18 "cada. Na inspeção feita na pista de pouso, foi verificado que a mesma se encontra em excelente estado, não apresentando nenhum sintoma de degradação ou defeito;
- ✓ State Highway 40 - Rodovia executada com 22 Km de extensão em St.

Louis – Illinois. Nesta o recapeamento foi feito com 5 cm de espessura em CBUQ, onde a fração graúda da mistura era composta por 50% de escoria de aciaria envelhecida e 50% de brita calcária. Esta mistura teve o objetivo principal de tornar a pista de rolamento com características antiderrapantes, uma vez que o calcário produz superfície lisa e polida. Após abertura ao tráfego de 15.000 veículos/dia por um período de 3 anos, a pista apresentava-se em excelentes condições de tráfego;

- ✓ State Highway 115 - Rodovia executada com 8 Km de extensão em St. Louis – Illinois. Restauração feita com 4 cm de espessura em CBUQ, com escoria de aciaria envelhecida. Pista de rolamento com características antiderrapantes, tráfego de 15.000 veículos/dia, com 30% de tráfego pesado em ótimas condições de tráfego;
- ✓ State Highway 159 - Rodovia executada em 1978 com 8 Km de extensão em St. Louis – Illinois. Restauração feita com 5 cm de espessura em CBUQ, com escoria de aciaria envelhecida. Pista de rolamento com características antiderrapantes, tráfego de 10.000 veículos/dia em ótimas condições.

materiais e métodos

Considerações gerais

Torna-se relevante às considerações sobre o material utilizado na pesquisa experimental e a metodologia de trabalho empregada para investigar e caracterizar a estabilidade volumétrica da escória de aciaria, uma vez que seu comportamento está diretamente ligado a seu processo de produção e beneficiamento (resfriamento e cura).

A escória estudada neste trabalho tem procedência do forno de oxigênio básico (BOF) da empresa Açominas - Aço Minas Gerais S.A., situada no município de Ouro Branco – MG.

A Açominas produz, mensalmente, cerca de 27.000 toneladas de agregado. Este material, denominado de escória, é resfriado no pátio nas condições ambientes e, posteriormente, transportado até um britador.

A fração metálica é separada e a escória propriamente dita é classificada de acordo com as faixas granulométricas apresentadas no quadro 4.

Faixas granulométricas empregadas na classificação das escórias da Açominas

TIPO DE AGREGADO	FAIXA GRANULOMÉTRICA
1	0 a 10mm;
2	10 a 32 mm;
3	> 32 mm

A escória de aciaria é beneficiada na Açominas segundo o fluxograma apresentado na Figura 13.

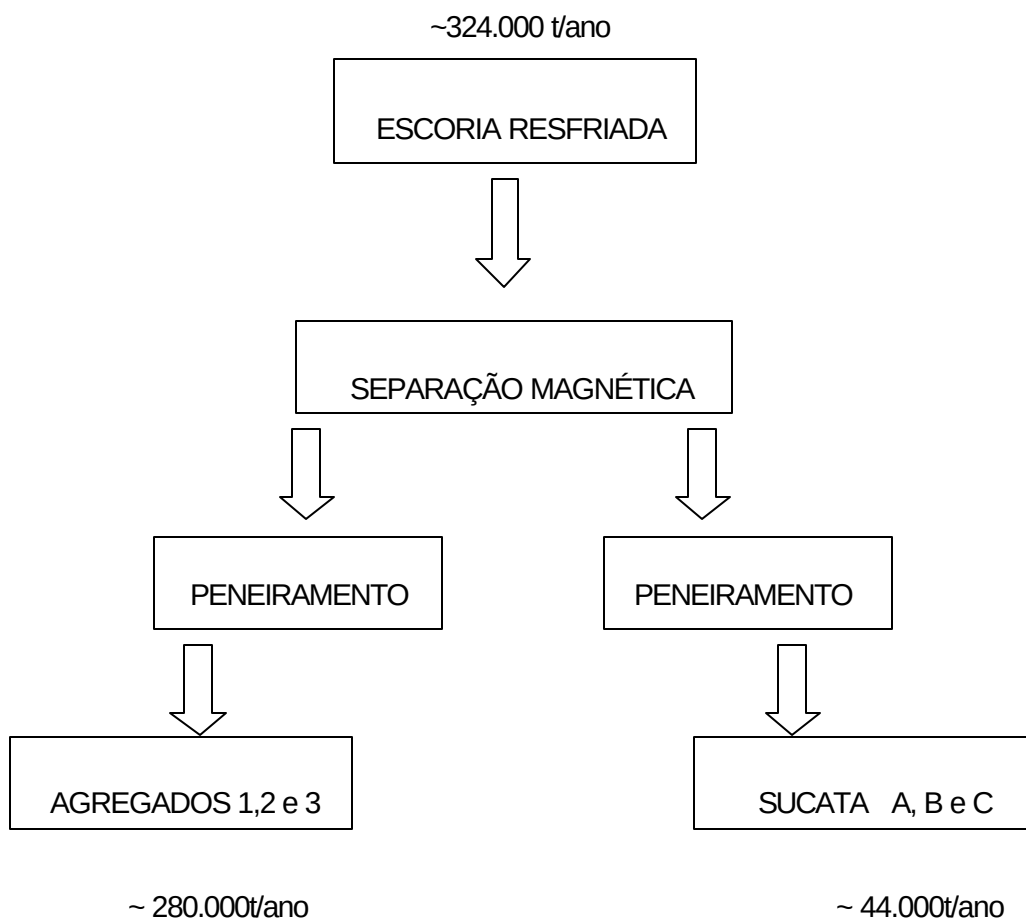


Figura 13 - Fluxograma do beneficiamento da escória de aciaria na Açominas.

Material

Foram coletadas, diretamente ao pé do britador localizado no pátio de beneficiamento da Açominas, 3 toneladas do agregado tipo 1, no dia 21 de dezembro de 1999. A escória coletada estava ainda em processo de resfriamento, pois havia sido produzida naquele dia.

Tomou-se o devido cuidado na coleta do material para que se tivesse uma amostra representativa do lote produzido.

Composição química da escória de aciaria da Açominas

O conhecimento dos componentes químicos de uma escória é de fundamental importância para se identificar e explicar o comportamento mecânico, físico e ambiental.

Caracterização física da escória de aciaria da Açominas

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – LEC/UFV, no período de janeiro a outubro de 2000, como se segue:

- ✓ **Massa unitária no estado solto** – quociente da massa do agregado lançado no recipiente e o volume desse mesmo, conforme estabelecido pela norma – NBR 7251 (MB-1665);
- ✓ **Massa específica na condição saturada de superfície seca** – relação entre a massa do agregado com seus vazios permeáveis preenchidos com água e o seu volume – NBR 9937 (MB-2698). Os vazios permeáveis são as descontinuidades ligadas diretamente à superfície externa do agregado, que na condição saturada de superfície seca, são passíveis de reter água;
- ✓ **Absorção** – aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expressa em porcentagem de sua massa seca, de acordo com a NBR 9937 (MB-2698);

- ✓ **Impurezas húmicas** – segundo a NBR 7220 (MB-10), é uma determinação colorimétrica das impurezas orgânicas húmicas que possam estar presentes no agregado;
- ✓ **Material pulverulento** – este método determina as partículas minerais com dimensões inferiores a 0,075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presente nos agregados e determinados segundo a NBR 7219 (MB-9);
- ✓ **Abrasão “Los Angeles”** – permite verificar o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com a carga abrasiva. O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem em peso do material que após o ensaio passa pela peneiras de malha de 1,7 mm (NBR 6465 / MB170);
- ✓ **Análise granulométrica** – a análise granulométrica consiste em passar os agregados através de uma série de peneiras para a determinação de sua granulometria. A granulometria é a distribuição dos agregados em frações de mesmo tamanho, expressa como porcentagem em massa que passa numa determinada peneira. O tamanho do agregado é expresso por uma faixa de acordo com órgão em questão. Para a avaliação dos agregados existentes vários são os limites granulométricos recomendados pelas normas ou consagrados na prática, sendo que os utilizados neste trabalho são os da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. A granulometria é muito importante para a avaliação do potencial de expansão volumétrica, uma vez que agregados maiores precisam de intervalos de tempos maiores para que ocorra a hidratação dos óxidos livres presentes na sua composição;
- ✓ **Expansão** – este ensaio descreve a determinação do grau de expansão da escória de aciaria quando compactada e ensaiada em laboratório, por meio de hidratação a uma temperatura de $71 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Este método, designado como PTM-130 – Jun/76 rev. Maio/78 foi adaptado pelo DER-MG, em 1982. Como já se relatou na revisão de literatura, trata-se de uma tradução do método ensaio da ASTM D 4792 – 95 (“Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions”).

Métodos

Visto que o processo de cura no qual é submetida à escória de aciaria

influi diretamente na forma de apassivação da sua expansão volumétrica, optou-se por submeter o mesmo lote de escória a condições adversas de cura e caracterizar o fator expansão separadamente para cada amostra. Para isso, procedeu-se à homogeneização e ao quarteamento de 1 tonelada de escória, dividindo-se o lote em 4 amostras menores de 250 Kg. Essas amostras foram denominadas escórias A, B, C e D. Cada amostra foi submetida a um tipo de cura diferente conforme mostrado no diagrama apresentado na Figura 14.

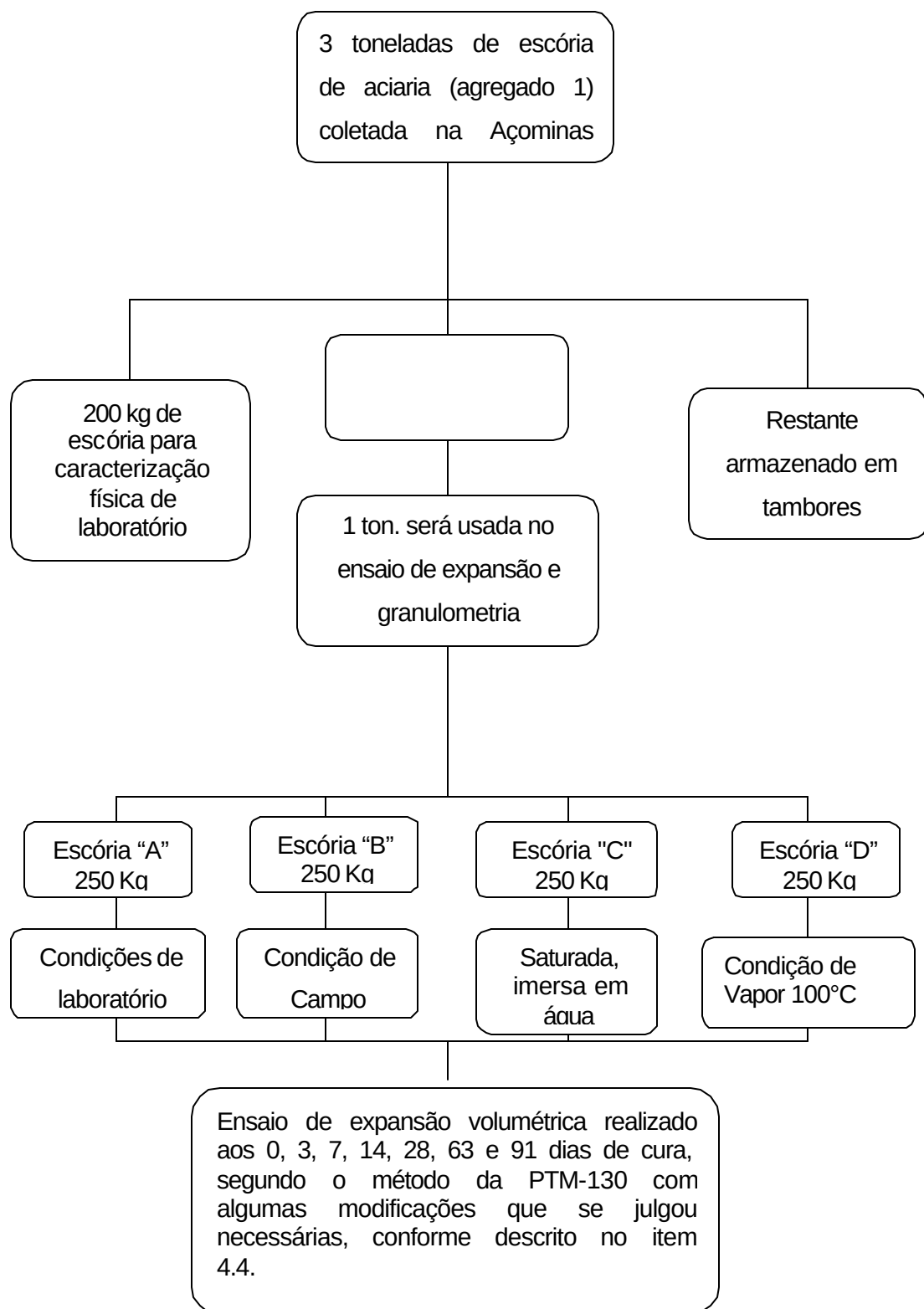


Figura 14 - Processos de cura a que foram submetidas às amostras de escórias de aciarias A, B, C e D.

Os ensaios de expansão volumétrica foram realizados sob as seguintes condições de cura:

A escória "A" foi acondicionadas num tambor dentro do laboratório, não se permitindo contato com agentes intempéries externo, tais como chuva, umidade e sol excessivo, como se mostra na Figura 15.



Figura 15 - Escória "A" acondicionada dentro do laboratório

A escória "B" foi exposta no pátio externo do LEC, estando diretamente sujeita a todas variações ambientais, como chuva, umidade, sol e vento, como se apresenta na Figura 16. As condições atmosféricas foram monitoradas na Estação de Meteorologia de Viçosa nº 83642, do Instituto Brasileiro de Meteorologia. O período de leitura foi feito nos seguintes horários 9:00, 15:00 e 21:00 horas;



Figura 16 - Escória "B" exposta no pátio do laboratório

A

escória "C" foi acondicionada num tambor com água ultrapassando 10 cm acima do seu topo superior, ou seja, na condição de amostra totalmente submersa durante todo o período de ensaio, como ilustrado na Figura 17;



Figura 17 - Escória "C" imersa em água durante todo período de ensaio

Já a escória "D" foi acondicionada em uma caixa de argamassa armada nas dimensões de 65 x 80 x 50 cm, com tampa por onde se introduziu vapor em um determinado ponto, observando-se a temperatura média de 100°C, como se apresenta nas Figuras 18, 19 e 20. O período de exposição ao vapor foi de 13:00 às 19:00 horas, de segunda a sexta-feira, e de 7:00 às 12:00 horas, nos finais de semana, de acordo com o funcionamento da caldeira do Departamento de Laticínios da UFV.



Figura 18 - Detalhe da caixa de argamassa armada onde foi acondicionada a escória e parte da ramificação da caldeira entrada do vapor.



Figura 19 - Detalhe do manômetro e caixa de argamassa armada com vapor



Figura 20 - Detalhe da injeção do vapor na escória "D"

Essa divisão da amostra inicial em sub-amostras teve o intuito de simular situações diferentes de cura, levando a escória a condições extremas de armazenamento e verificando assim qual tipo de cura pode ser mais eficiente para que se venha a ter um material mais estável a um baixo custo e que possa atender às diversas aplicações em engenharia civil.

O método usado para determinação da expansão volumétrica foi o PTM-130 – JUN/76, VER. MAIO/78, adaptado pelo DER-MG/82. Foram feitas, contudo, algumas modificações que se julgaram necessárias para facilitar a operacionalização do ensaio. O ensaio determina que se tenha para cada amostra 3 corpos-de-prova, ou seja, o item 6 determina que se molde um corpo-de-prova no ramo seco, outro no ramo úmido e no ponto ótimo, conforme umidade ótima determinada no item 5.3 desta mesma norma.

Para que se pudesse determinar a expansão de todos os 12 corpos-de-prova simultaneamente, considerando-se 3 corpos de prova para cada amostra e 4 tipos de cura diferente, foi necessário adaptar esse método à realidade do

LEC, utilizando-se de recursos disponíveis para a construção de um tanque de amianto com capacidade de 1000 litros, revestido com carvão na parte inferior e vermiculita nas laterais, e usando revestimento subsequente com o emprego de uma parede de lajota no objetivo de reduzir as perdas de calor para o meio externo. O tanque foi mantido fechado por uma tampa de amianto revestida com isopor, como se mostra nas Figuras 21 e 22.



Figura 21 - Vista externa do tanque onde foi feito o ensaio de expansão dos corpos-de-prova.



Figura 22 - Vista interna do tanque onde foram feitas as leituras de expansão.

Para aquecer a água foram utilizadas 4 resistências blindadas do tipo U, de 6000 W à tensão de 220 V, imersas no tanque. As resistências foram ligadas cada uma a um contactor e estes por sua vez ligados a um disjuntor trifásico, conforme se apresenta na Figura 23 e 24.

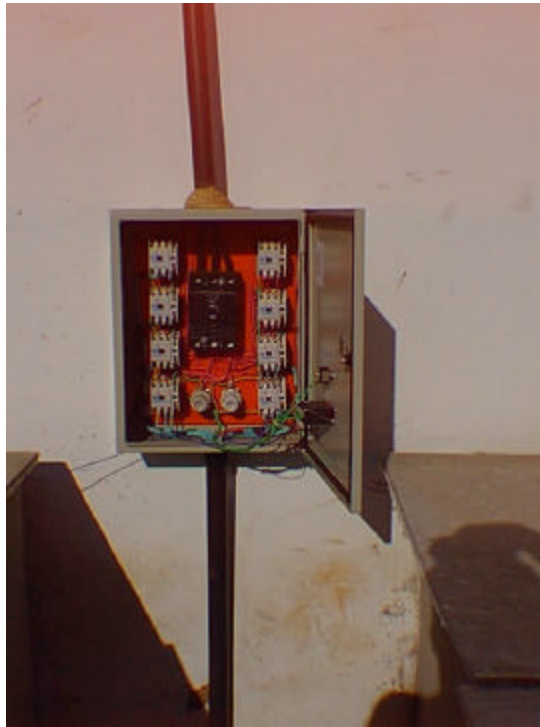


Figura 23 - Detalhe do quadro de comando de energia



Figura 24 - Detalhe das resistências utilizadas no tanque para aquecimento da água de ensaio.

No controle de temperatura empregou-se um termostato duplo MT-519R da Full Gage, com as seguintes especificações: alimentação 220V, faixa de temperatura de -50 a 150°C com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, carga de 5A por saída e dimensões de 70x28x60 mm, como se mostra na Figura 25.



Figura 25 - Detalhe do controlador de temperatura do ensaio

RESULTADOS e discussões

Resultados climáticos

Os resultados climáticos foram obtidos junto ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, através da Estação de Meteorologia de Viçosa nº 83642, do Instituto Brasileiro de Meteorologia. O período de leitura foi feito nos seguintes horários 9:00, 15:00 e 21:00 horas. As Figuras 26, 27 e 28 contém os resultados de variações de temperatura, umidade e precipitação respectivamente, observados na cidade de Viçosa, no período de janeiro a setembro de 2000.

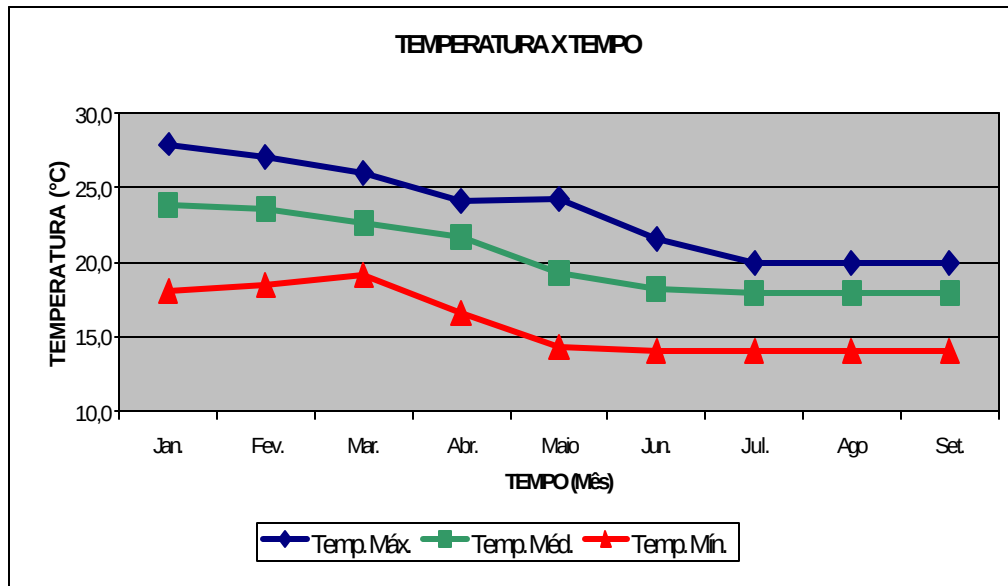
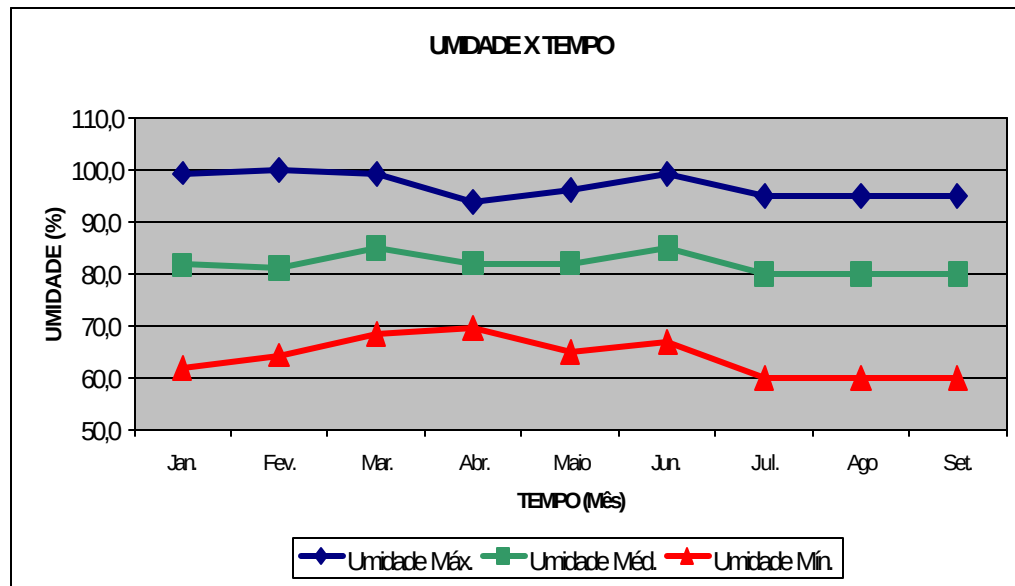


Figura 26 - Variação da temperatura na cidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.

Figura 27 - Variação da umidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.



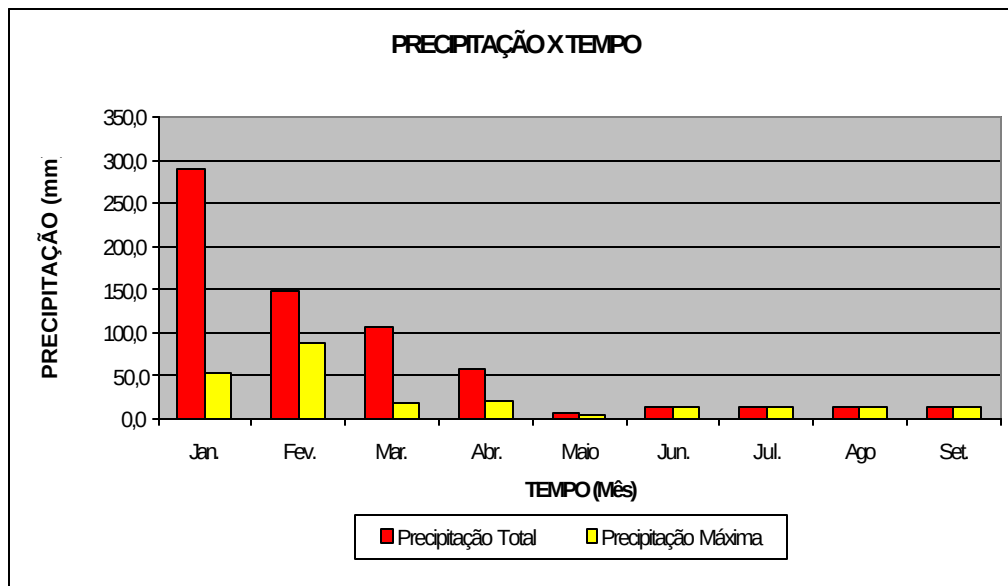


Figura 28 - Variação da precipitação na cidade de Viçosa no período de janeiro a setembro/2000.

Ensaio físico de laboratório

A caracterização física da escória de aciaria, conforme ilustra o Quadro 5, é de fundamental importância, pois para a sua utilização é preciso conhecer se as suas características físicas atendem às normas de especificações técnicas citados no item 2.6.1.

Caracterização física da escória de aciaria - Açominas

Massa unitária no estado solto	1,92	Kg/dm ³
Massa específica na condição de saturada de superfície seca	3,47	Kg/dm ³
Absorção	1,62	%
Impurezas húmicas	Isenta	-
Material pulverulento	5,53	%
Abrasão "Los Angeles"	20	%
Categoria	C	-
Teor de umidade ótimo	8	%

Análise granulométrica

O ensaio granulométrico seguiu a normalização do DNER assim como a abertura das peneiras. Conforme mencionado anteriormente no item 2.1, o material coletado foi o agregado 1 da Açominas, ou seja, o agregado de granulometria inferior a 10mm. O Quadro 6 e a Figura 29 contêm os resultados de granulometria da escória de aciaria-Açominas.

Composição granulométrica da amostra inicial da escória de aciaria - Açominas.

Granulometria da escória de aciaria da Açominas - Amostra inicial		
Peneiras (#)	% Retida	% Passante
25.4	0.0	100
19.5	0.0	100
12.7	0.0	100
9.5	18.2	81.8
4.7	65.0	35.0
2.0	83.4	16.6
0.42	94.2	5.8
0.074	98.2	1.8
Fundo	100	0.0

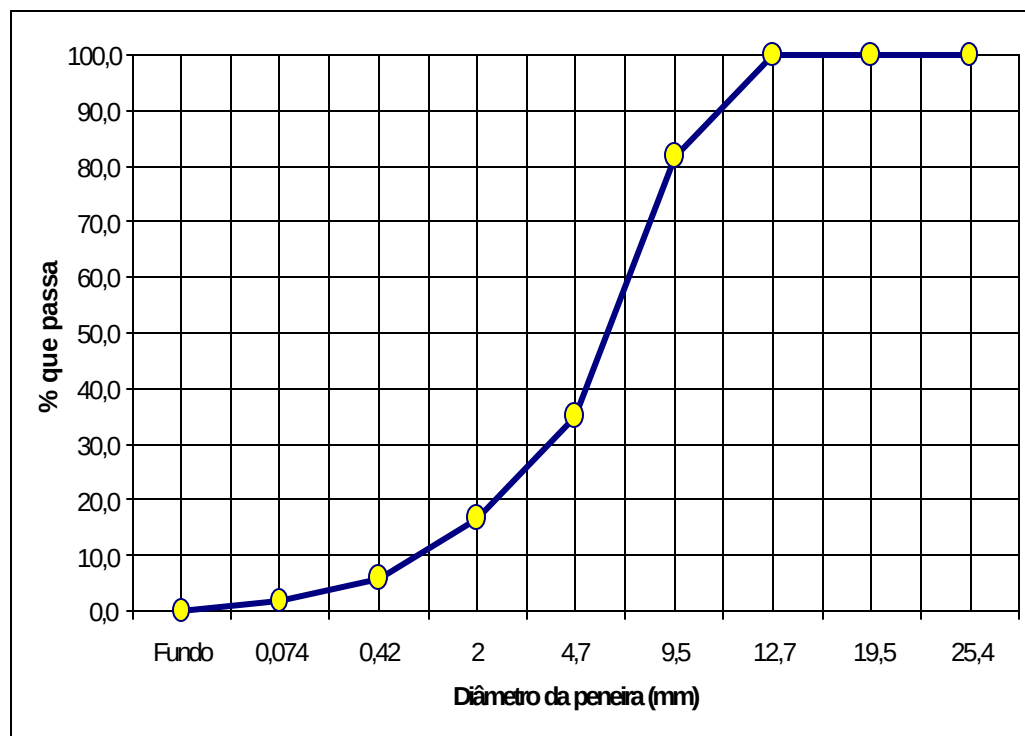


Figura 29 - Curva granulométrica da escória de aciaria - Amostra inicial.

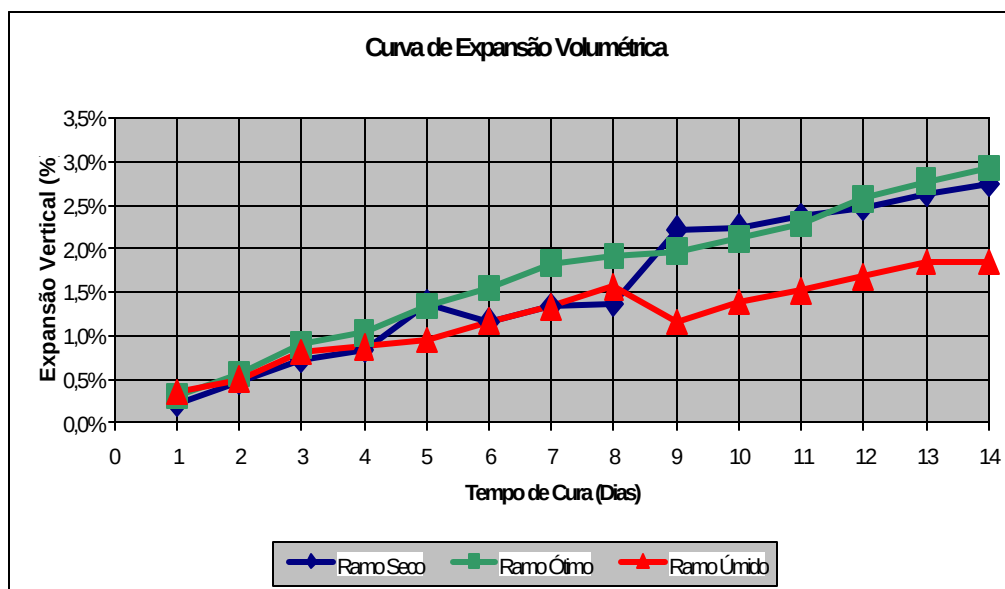
Expansão inicial da amostra no primeiro dia de cura ao ambiente

O ensaio de expansão volumétrica foi realizado utilizando a normalização da PTM-130 – JUN/76, VER. MAIO/78, adaptado pelo DER–MG/82, porém algumas modificações foram feitas em função das dificuldades de interpretação, quais sejam:

- ✓ Nova rosca no disco espaçador para facilitar a retirada do disco;
- ✓ Amostras ensaiadas na umidade ótima e densidade máxima (Energia AASHTO Normal);
- ✓ Também no item 6 da norma PTM-130 - a inversão do molde é difícil, caso se tenha uma granulometria grossa e pouco uniforme;
- ✓ Redução no comprimento da barra/parafuso lateral do cilindro CBR;
- ✓ Também no item 6.2 da norma PTM-130 - submergir a amostra em água pré-aquecida (38°C): não especifica o período de tempo → portanto não foi feito;

Em concordância com as recomendações da literatura técnica, adotou-se o tempo de seis meses como o período mínimo de apassivação do fator expansão das escórias de aciaria quando expostas nos pátios de estocagem, sob as condições intempéricas do meio ambiente. A figura 30 apresenta os resultados da escória de aciaria da Açominas com apenas 1 dia de cura ao ambiente, levando em consideração o teor de umidade: 6% para o ramo seco; 8% para o teor ótimo de umidade e 10% para o ramo úmido.

Figura 30 - Curva de expansão volumétrica da amostra inicial



Expansão volumétrica "versus" teor de umidade, tipo e tempo de cura

As figuras 31 e 32 apresentam os resultados de expansão das amostras ensaiadas nos seguintes períodos de cura: 3, 7, 28, 63, 91 e 180 dias.

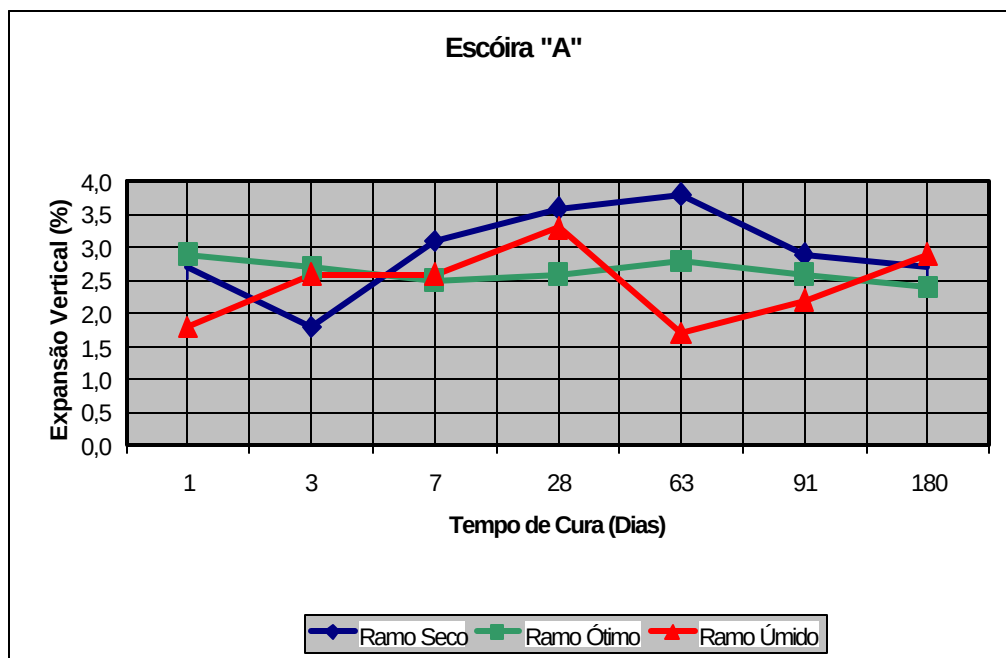
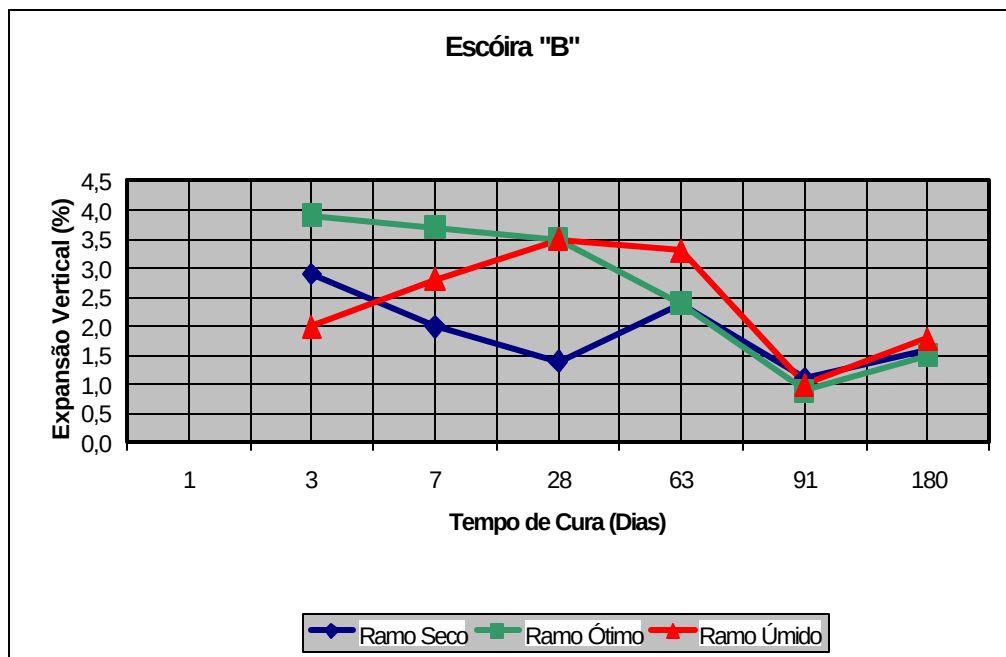


Figura 31 - Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "A" versus o tempo de cura.

Nota-se na Figura 31, que o ramo ótimo teve uma pequena variação na taxa de expansão variando de 2,5 a 3%. Já o ramo seco e o úmido houve uma variação significativa em relação ao ramo ótimo.

Portanto, quando analisada a escória de aciaria no ambiente fechado deve-se levar em conta o ramo ótimo de compactação, segundo os resultados deste trabalho.

Figura 32 - Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "B" versus o tempo de cura.



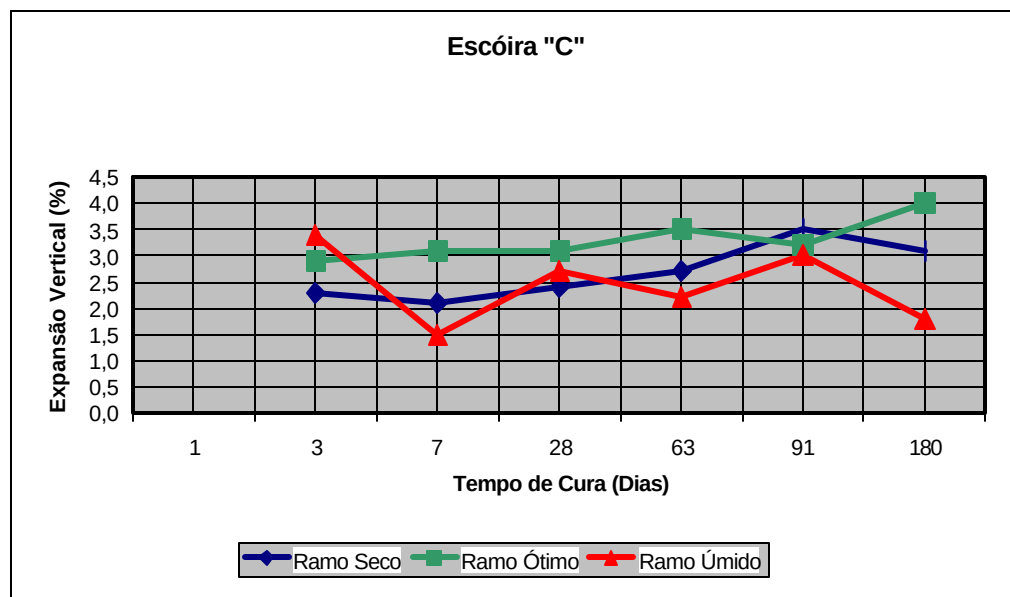
A Figura 32 representa a escória curada ao ambiente externo, onde fica

claro que para os 3 e 7 dias de cura, ocorreu uma expansão bastante diferenciada em relação aos teores de umidade utilizados nas amostras.

Já aos 63 dias de cura, houve uma tendência de queda na apassivação da expansão no ramo ótimo e no ramo úmido, enquanto o ramo seco observou-se um aumento da taxa de expansão.

No entanto, nota-se que após terceiro mês de cura (91 dias) a escória começou a ter o mesmo comportamento, independente do teor de umidade analisado, devido a sua exposição ao ambiente.

Figura 33 - Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "C" versus o tempo de cura.

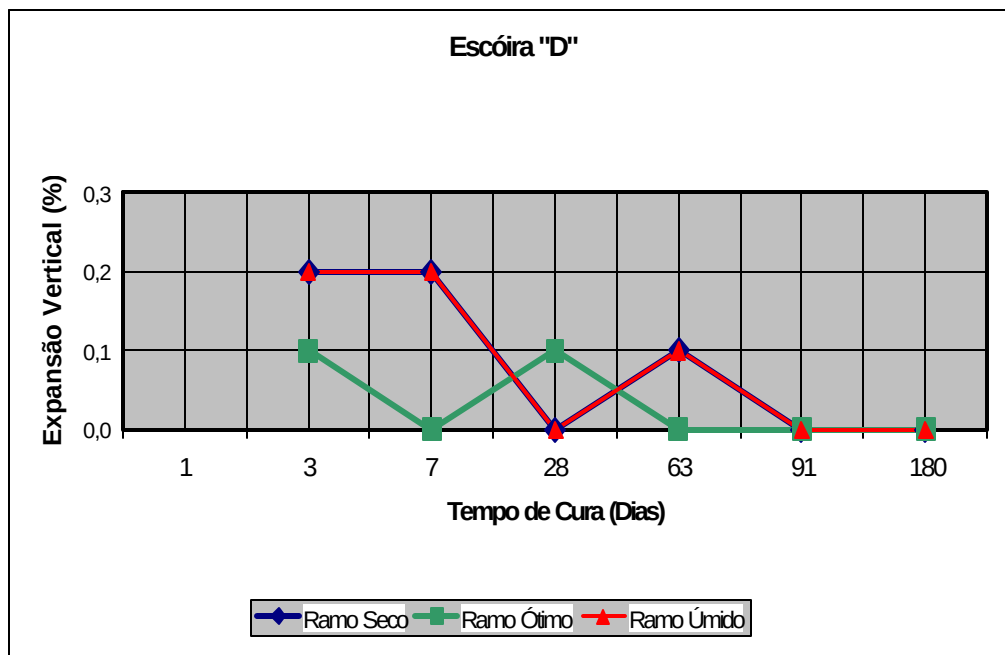


A Figura 33 apresenta os resultados com taxas de expansão maiores aos seis meses do que aos três dias para o ramo seco e ótimo. Já o ramo

Figura 34 - Curva de expansão nos três teores de umidade da escória "D" versus o tempo de cura.

úmido apresentou uma apassivação neste período.

Sendo assim, a escória quando submersa não apresentou resultados satisfatórios neste intervalo de tempo pré-estabelecido.



A Figura 34 teve sua escala reduzida em relação ao eixo vertical para que fosse representada a cura a vapor, onde foram obtidos os melhores resultados de apassivação da escória de aciaria. Já aos três dias de ensaios a escória apresentou uma expansão na ordem de 0,2% para os ramos seco e úmido e 0,1% para o ramo ótimo. Isto mostra que quando a escória é submetida a condições de temperatura e pressão elevadas, a reação de hidratação é acelerada fazendo com que a escória se estabilize mais rapidamente, conforme mencionado por LEITE, 1997 (processo SKAP).

As Figuras 35, 36 e 37 mostram a variação da expansão vertical para os três ramos de compactação, isto é, seco, ótimo e úmido, sob diferentes tempos de cura a que foram submetidas às amostras. Deve-se levar em consideração os excelentes resultados apresentados pela cura a vapor (escória tipo "D") em relação às demais.

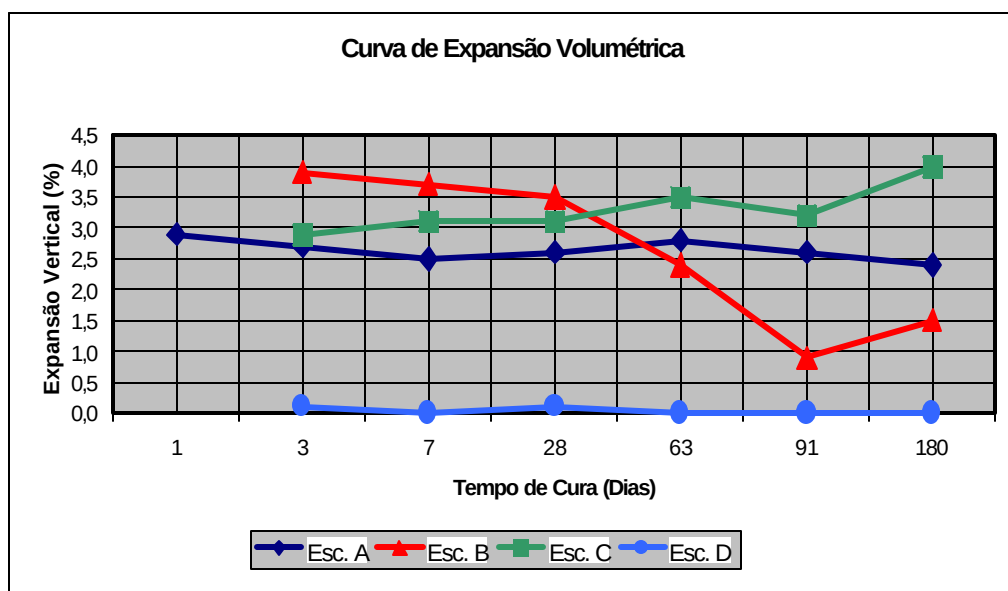
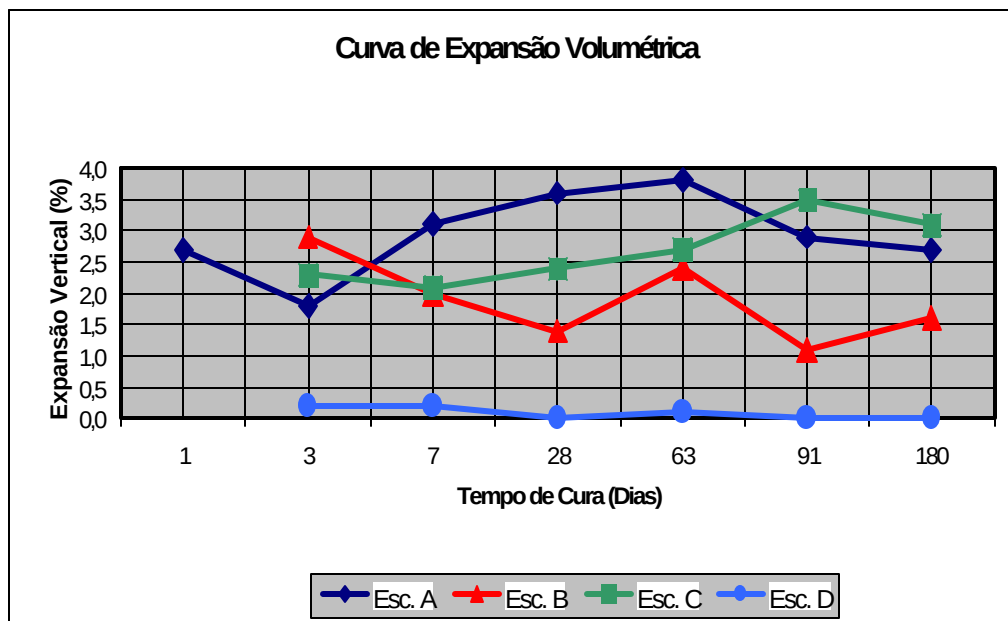


Figura 35 - Curva de expansão da escória de aciaria no ramo seco a 6% de umidade versus o fator tempo.

Figura 36 - Curva de expansão da escória de aciaria no ramo ótimo a 8% de umidade versus o fator tempo.

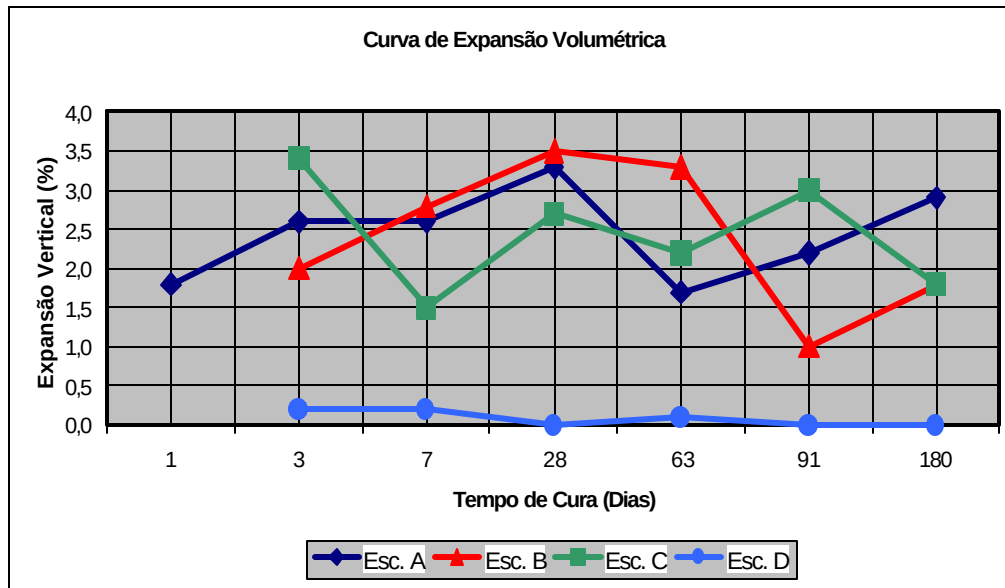


Figura 37 - Curva de expansão da escória de aciaria no ramo úmido a 10% de umidade versus o fator tempo.

Curva granulométrica do material antes e após o ensaio de expansão

Por último, serão apresentados os gráficos da granulometria do material antes e após a realização dos ensaios de expansão, para fins de verificação da ocorrência de mudanças na granulometria do material. Em primeiro lugar, serão mostradas as curvas granulométricas da escória "A" antes e após o ensaio, depois as da escória "B", "C" e "D".

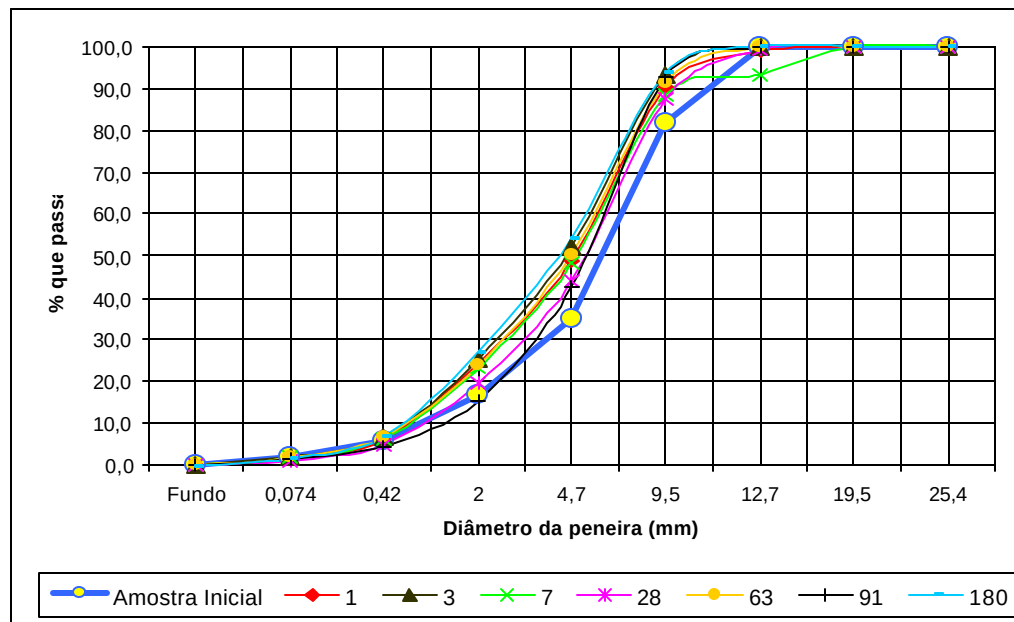


Figura 38 - Curva granulométrica da escória "A" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

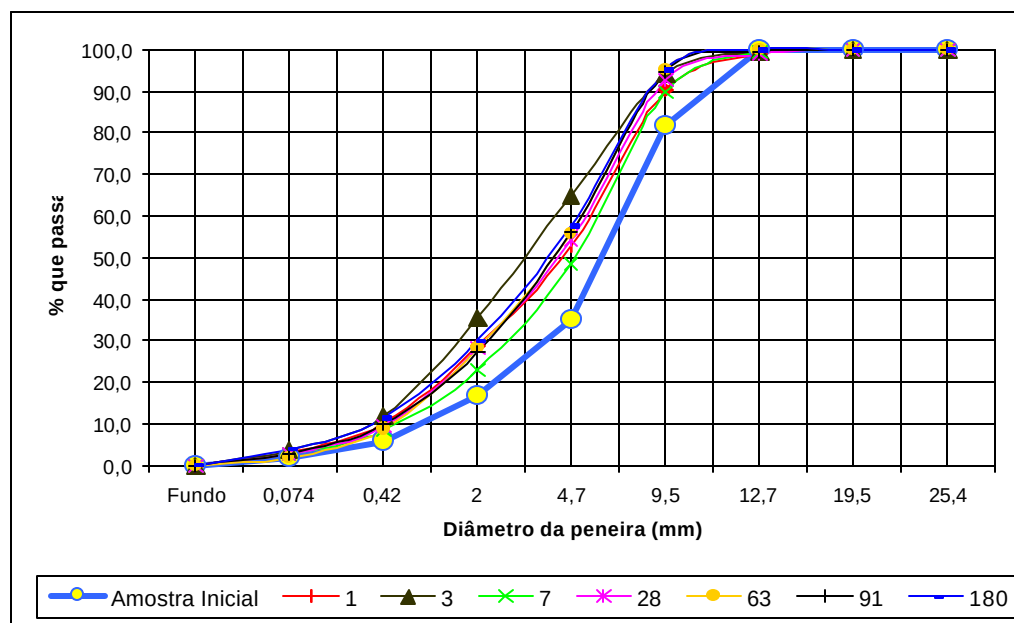


Figura 39 - Curva granulométrica da escória "A" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

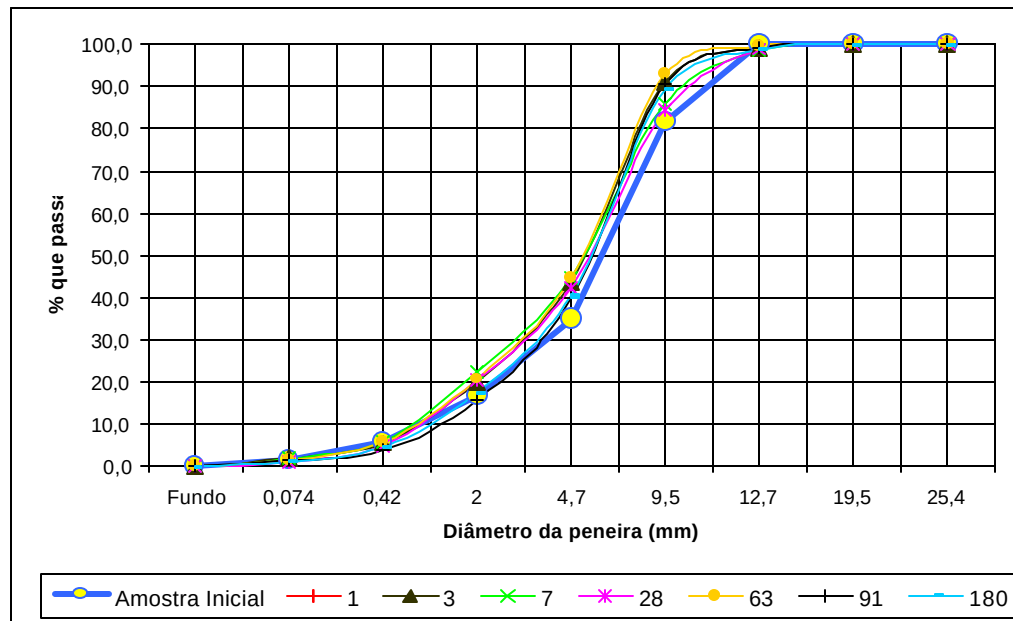


Figura 40 - Curva granulométrica da escória "B" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

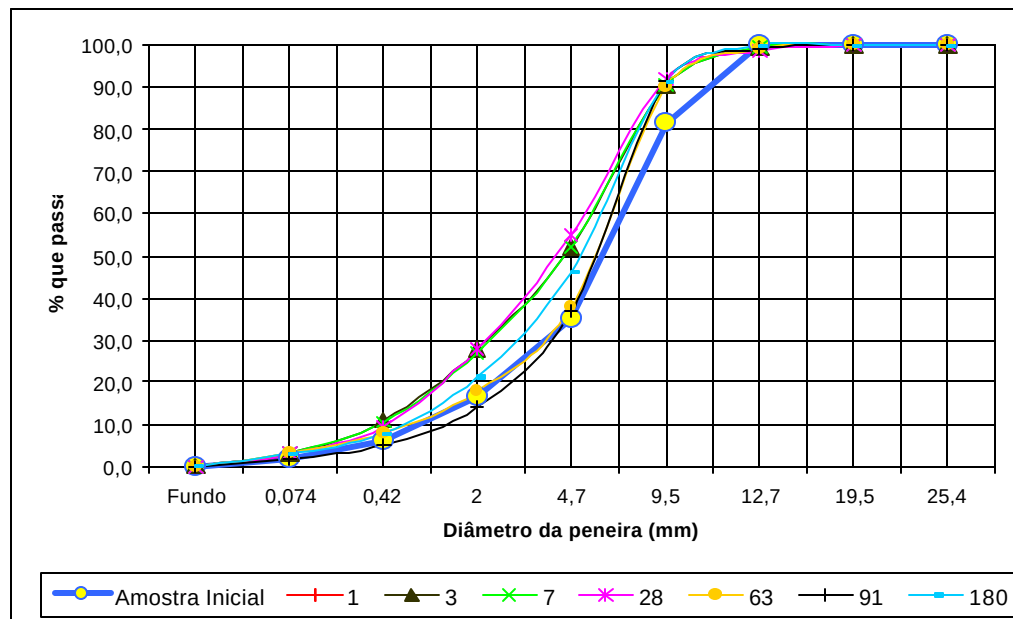


Figura 41 - Curva granulométrica da escória "B" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

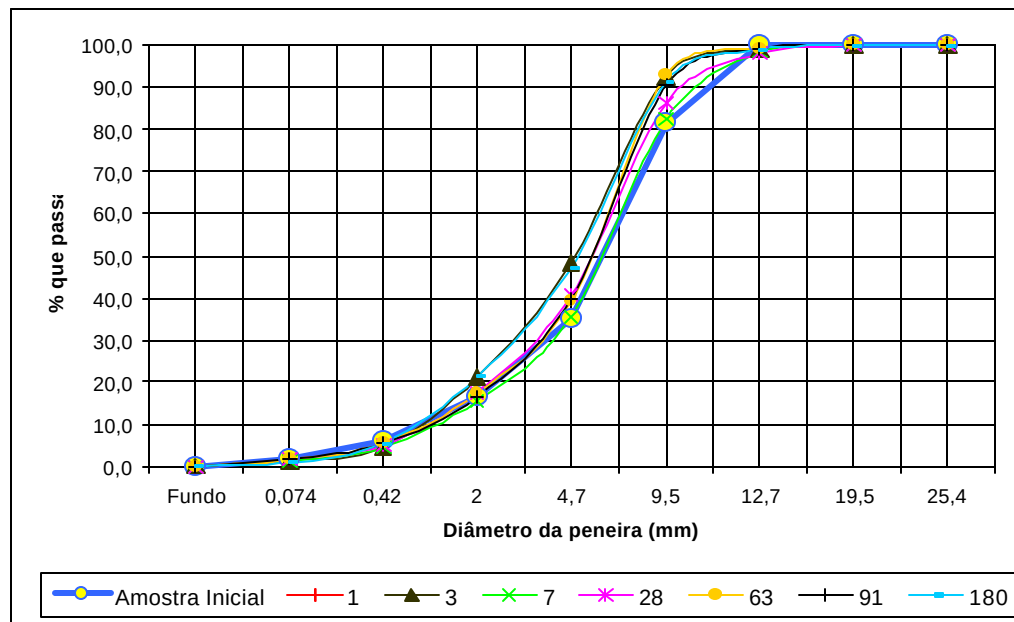


Figura 42 - Curva granulométrica da escória "C" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

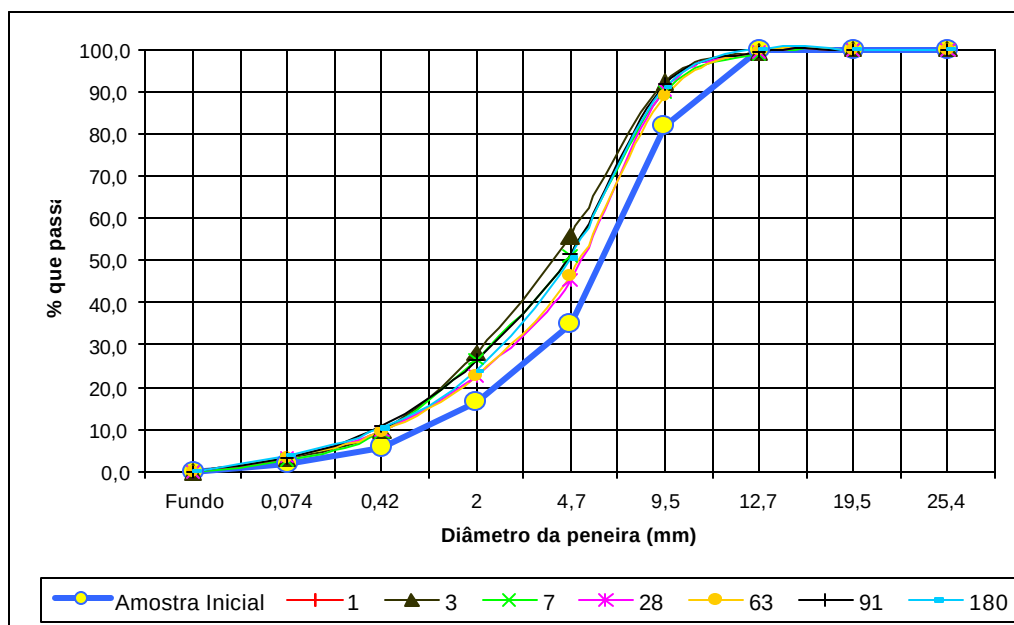


Figura 43 - Curva granulométrica da escória "C" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

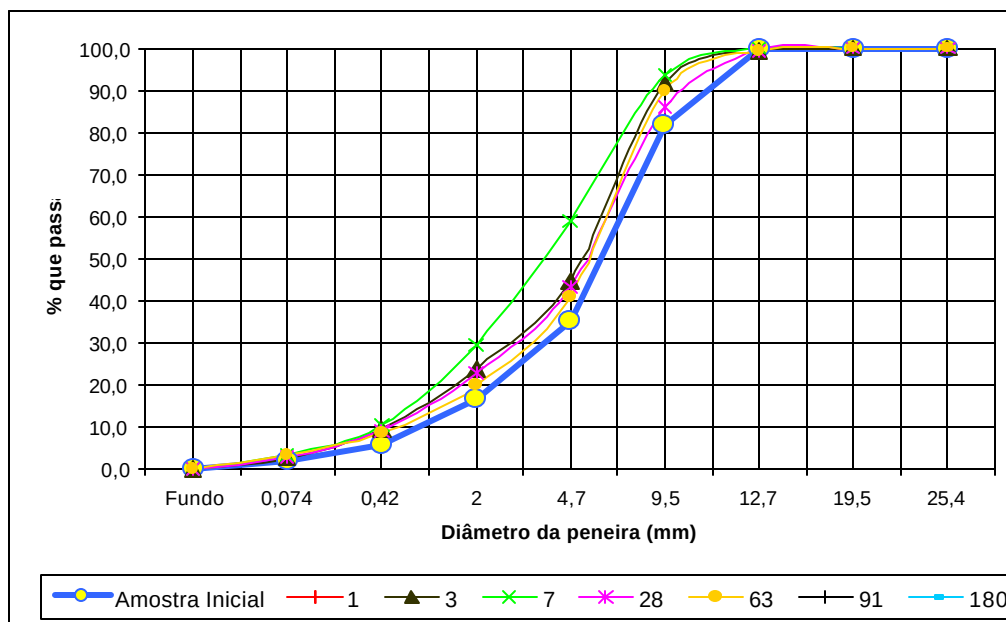


Figura 44 - Curva granulométrica da escória "D" após do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

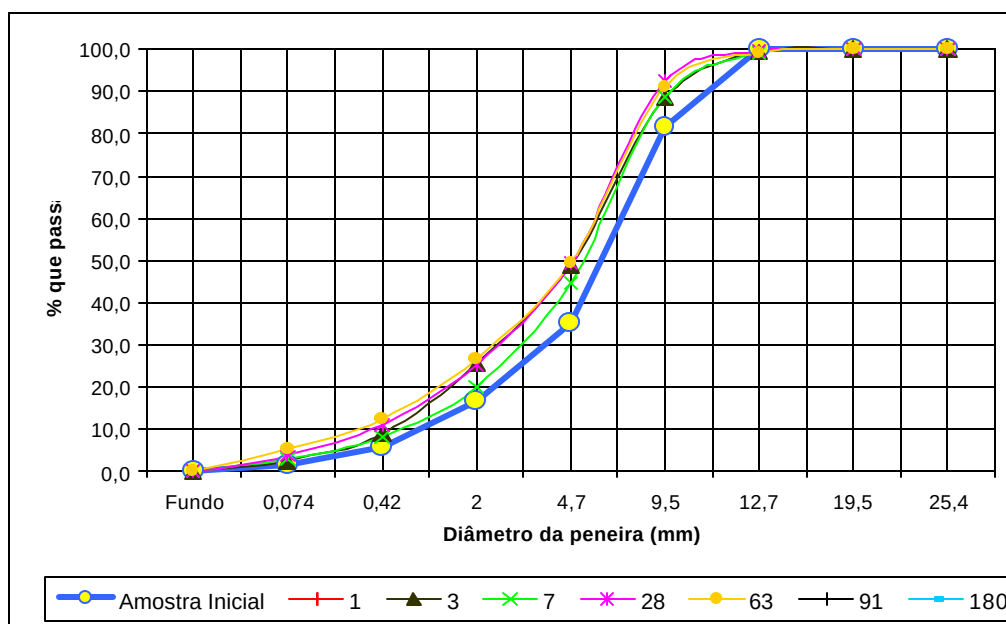


Figura 45 - Curva granulométrica da escória "D" antes do ensaio de expansão levando em consideração: tipo e tempo de cura.

ConcluSões

- 1) O teor de umidade de compactação da escória de aciaria é essencial para a expansão volumétrica do material;
- 2) Ocorre uma variação nos estágios iniciais de cura tendendo a uniformização aos 91 dias;
- 3) O processo de cura a vapor (escória "D") foi mais eficiente proporcionando uma expansão inferior a 0,2% já no terceiro dia;
- 4) O processo de cura saturada (escória "C"), fez com que o valor máximo ocorresse com poucos dias de cura da amostra no ramo ótimo, mantendo o comportamento estabilizado, próximo de 3%, ao longo do tempo. Já o ramo seco e o úmido sob imersão, os resultados de expansão mantiveram-se na faixa de 1 a 4%, variando com o período de cura das amostras e com o teor de umidade de compactação;
- 5) O processo de cura em condições ambientais (escória "B") não apresentou resultados satisfatórios da expansibilidade até os 180 dias;
- 6) O processo de cura em condições controladas de laboratório (escória "A") não apresentou resultados satisfatórios da expansibilidade até os 180 dias;
- 7) O ensaio granulométrico é essencial para controlar a qualidade e garantir homogeneização do material.

Recomendações

Recomendações para futuros trabalhos com a escória de aciaria e sua expansão:

a) Caracterização do fator expansão de escórias de aciaria de Minas Gerais e Rio de Janeiro, considerando-se o fator expansão:

- ✓ Norma PTM 130 (DER-MG), com modificações propostas por Baltazar (2001);
- ✓ Ensaio compactação AASHTO Intermediário (amostras compactadas na umidade ótima);
- ✓ Cura: vapor, submersa, condições ambientais;
- ✓ Períodos de cura: 1, 2, 3, 7, 28, 63, 91 e 180 dias.

b) Influência da energia e do processo de compactação na resistência mecânica das escórias de aciaria, para as condições de cura a vapor e ambiental:

- ✓ Cura a vapor: 1, 3, 7 e 28 dias;
- ✓ Cura em condições ambientais: 1, 7, 28, 63, 91 e 180 dias;
- ✓ Energias de compactação: AASHTO Normal e Intermediário;
- ✓ Compactação vibratória (tipo Concreto Rolado);
- ✓ Caracterização mecânica das escórias via resultados do ensaio CBR.

c) Caracterização tecnológica das escórias de aciaria em laboratório, considerando-se as condições de cura a vapor e ambiental:

- ✓ Períodos de cura: a vapor: 1, 3, 7 e 28 dias e ambiental: 1, 7, 28, 63, 91 e 180 dias;
- ✓ Energia: AASHTO Intermediário;
- ✓ Ensaios: granulometria, CBR, Los Angeles e Triaxial Cíclico, segundo a norma AASHTO 307/99.

d) Caracterização mineralógica de escórias de aciaria, considerando-se o Fator expansão.

- ✓ Influência das condições de cura: cura a vapor e cura em condições ambientais;
- ✓ Influência do tempo de cura;
- ✓ Cura a vapor: Períodos de cura de 1, 3, 7 e 28 dias;
- ✓ Cura em condições ambientais: Períodos de cura de 1, 7, 28, 63, 91 e 180 dias.

e) Ensaios em amostras de grandes dimensões de escórias de aciaria, para fins rodoviários, considerando-se o fator expansão.

f) Concreto siderúrgico rolado:

- ✓ aglomerante: escória granulada de auto forno móida e rejeitos de calcinação;
- ✓ Agregado miúdo / graúdo: escória de auto forno e escória de aciaria.

referências bibliograficas

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard Practice for Sampling Aggregates** - D 75. Philadelphia, 1987 (Reapproved, 1992). 4p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard Practice for Reducing Field Samples of Aggregate to Testing Size** – D 702. Philadelphia, 1987. 4p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports** – D 2940. Philadelphia, 1992. 2p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard Test Method for Potencial Expansion of Aggregates from Hydration Reactions** – D 4792. Philadelphia, 1995. 2p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils** – D 1883. Philadelphia, 1987. 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS-ASTM. **Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf / ft³ (600 kN-m/m³))** – D 698. Philadelphia, 1991. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **Solo-ensaio normal de compactação** – NBR 7182. Rio de Janeiro, 1982d. 1p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **Solo-índice de suporte Califórnia** – NBR 9895. Rio de Janeiro, 1987. 14p.
- BERNADES, C.Jr., GARCIA, I., ALBOREDA, S. FRASSI, R. **Aspectos ambientais do uso de resíduo da escória de aciaria em**

encascalhamento de estrada. In: RECICLAGEM DE REJEITOS DA INDUSTRIA MINERO-METARLÚRGICA, 1992, Ouro Preto. p.119-138.

CARDOSO, S.H. **Discurso de Abertura Solene da 28ª Reunião Anual de Pavimentação.** Belo Horizonte: 1992.

COOMARASAMY, A., WALZAK, T.L. **Effects of moisture on Surface chemistry of steel slags and steel slag-asphalt paving mixes.** In: COMMITTEE on CHARACTERISTICS of BETUMINOUS PAVING MIXTURES to MEET STRUCTURAL REQUERIMENTS. Ontário, 1995. p.85-95.

CRUZ, E.B., NETO, F.B., TOSETTI, J.P.V., NETO, J.B.F. **Pyrometallurgical Treatment of BOF Slags for the Production fo Construction Materials and Refining Fluxes.** In: First Japan-Brazil Symposium on Dust Processin-energy-Environment in metallurgicla Industries. São Paulo, 1999. p.97-115.

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES DA PENSILVANIA – LABORATORIO DE MATERIAIS, TESTES E PESQUISAS. **Método de Ensaios para Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria** – PTM 130 – JUN/76 (REVISADO MAIO/78). Adaptado pela DMA –1/DER-MG – 1982.8p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. **Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários** – DNER-PRO 263. Rio de Janeiro, 1994. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. **Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários** – DNER-EM 262. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. **Escórias de alto-forno para pavimentos rodoviários – Procedimentos** - DNER-EM 261. Rio de Janeiro, 1994. 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM-DNER. **Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários – Especificação de Materiais** - DNER-EM 260. Rio de Janeiro, 1990. 6p.

Escória Siderúrgica para Construção de Estradas – JIS A 5015. 1992. 48p.

GEYER, R.T., MOLIN, D.D., VILELA, A.C.F. **Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na industria da construção civil.** In: V ENCONTRO REGIONAL SOBRE MEIO AMBIENTE NA SIDERÚRGICA e SEMINÁRIO SOBRE GESTÃO AMBIENTAL NA SIDERÚRGIA. 1995, Vitória, ES. p.44-79.

GEYER, R.T., MOLIN, D.D., VILELA, A.C.F. **Possibilidade e fatores limitantes da reutilização de aciaria na construção civil.** In: 51º CONGRESSO ANUAL DA ABM, 1996, Porto Alegre, RS. p.305-314.

- HAGA, N., KONNO, M., MIZAGUCHI, I., OHKAWA, Y., KAWAMOTO, T. **Utilization of blast furnace and steel slags in road construction.** In: NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. 1981, Japan. p.73-89.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERÚRGIA – IBS, ARTHUR Dr. LITTLE LTDA & SETEPLA TECNOMETAL ENGENHARIA LTDA. **Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas no Brasil e em outros oito Países.** Sumário Executivo. Setembro – 1999. 29p.
- JIS A 5015 – **Escória Siderúrgica para Construção de Estradas.** Normas Japonesa, 1992.
- JOHN, V.M., CINCOTTO, M.A., AGOPYAN, V. **Novos mercados para as escórias de alto-forno.** In: ENCONTRO REGIONAL SOBRE MEIO AMBIENTE NA INDUSTRIA SIDERÚRGICA, 1995, Vitória. p.74-79.
- KOS, B., MAYER, F.W., KOHLBACHER, M. **Reciclage de escoria de aciaria.** In: Manual II – ILAFA. 1995. 73p.
- LEITE, P.P.N., BUZATO, A., COSTA, L.R.T. **Uma contribuição para pesquisa e desenvolvimento da escória de aciaria da Companhia Siderúrgica de Tubarão.** 1997, Vitória, ES. p.12-70.
- LIMA, L.A. **Hormigones con Escória de Horno Eléctrico como Árido: Propriedades, Durabilidade y comportamientos Ambiental** – Tese Apresentada na Universitat Politècnica de Catalunya, para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia, Barcelona, 1999, p.243.
- LÓPEZ, F.A., FORMOSO, A., MEDINA, F. **Escorias LD. Coproductos de la industria siderúrgica.** 1989, Madrid. p.247-254.
- MARQUES, J.C. **Escória de Alto Forno: Estudo Visando seu Emprego no Preparo de Argamassa e Concretos** – Tese Apresentada na Escola Politécnica da USP para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 1994, p. 175.
- NICOLAU, L.V., BASTOS, A.M., LOPES, M.L., FIGUEIRAS, J., ALMEIDA, M.F., CARDOSO, A. **Caracterização de Escórias com Vistas à sua Valorização na Construção Rodoviária.** In: Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia – nº 87. 1999, Lisboa-Portugal, p.63-71.
- NOMURA, T., ENOKIDO, T. **Study on utilization of BOF slags as road base material.** In: NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. 1981, Japan. p.22-32.
- RUBIO, A.R., CARRETERO, J.G. **La Aplicación de las Escorias de Aciaria en Carreteras,** Ingeniería Civil. 1991, p.5-9.
- SILVA, E.A. **Uso de escória de aciaria em pavimentação viária.** In: 9ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA – ABPv. 1998, Vitória, ES. p.67-90.

SILVA, M.G., SILVA, V.G., OLIVEIRA, C.T.A., JOHN, V.M. Agopyan, V. **Reciclagem de escórias siderúrgicas: A importância da parceria tecnológica.** In: SEMINÁRIO DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS, 1997, Vitória. p.29-43.

SILVA, G.A., SCHLOSSER, R., MACEDO, P.H.S, SANNA, H.A.E. **Escórias Siderúrgicas – Materiais de Múltiplas Aplicações** MT – DNER – INSTITUTO DE PESQUISA RODOVIARIAS – DIVISÃO DE PESQUISA, 1988.

WAEKENS, G.S., CARMINE, C.O. **Generacion y propiedades de las escorias siderurgicas - SOMISA.** 1985 Argentina. p.1-31.

YUAN, M. C. **Escórias siderúrgicas novas tendências.** In: 9^a REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA – ABPv. 1998, Vitória, ES. 21p.