**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

**Utilização de Escória Proveniente da Reciclagem do
Aço em Concreto de Cimento Portland**

KAMILA ANGELA LEAL DO NASCIMENTO

Dissertação apresentada à Área de Interunidades
em Ciências e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

**São Carlos
2007**

Nascimento, Kamila Angela Leal do
Utilização de Escória Proveniente da Reciclagem
do Aço em Concreto de Cimento Portland / Kamila
Angela Leal do Nascimento. – São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia
de São Carlos / Instituto de Física de São Carlos /
Instituto de Química de São Carlos – Universidade de
São Paulo, 2007.

Área: Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira.

1. Resíduo. 2. Reciclagem. 3. Escória. 4. Aciaria.
5. Agregado. 6. Concreto. I. Título.

Universidade de São Paulo

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal 369 - 13560-970 - São Carlos - SP - Fone (16) 3373-9589 Fax (16) 3373-9777

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KAMILA ÂNGELA LEAL DO NASCIMENTO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 25/04/2007.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof(a). Dr(a). Osny Pellegrino Ferreira (Orientador e Presidente) - EESC/USP

Prof(a). Dr(a). Antonio Ludovico Beraldo - UNICAMP

Prof(a). Dr(a). Eduvaldo Paulo Sighieri - EESC/USP

“O homem pretende ser imortal, e para isso defende princípios efêmeros. Um dia, inexoravelmente, descobrirá que para ser imortal deverá defender Princípios Absolutos. Neste dia, morrerá para a carne, efêmera, e viverá para o Espírito, Eterno. Será Imortal.”

Dr. Celso Charuri

Ao meu marido, Fernando, pelo amor e compreensão, ao meu irmão, João Luiz, pelo amor e incentivo e aos meus pais, Manuel e Vera, pelo amor, oportunidade e sacrifícios.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira, meu orientador, pela incansável e valiosa orientação e principalmente pelo apoio, amizade e confiança, depositados em mim, sem os quais esse trabalho não teria sido realizado.
- Aos técnicos Paulo Wanderley Pratavieira, Sérgio Aparecido Trevelin e Paulo César Albertini pela amizade e apoio técnico.
- Ao amigo Prof. Dr. José Pedro Andreeta pelo companheirismo, incentivo e inestimável ajuda.
- Ao técnico José Augusto Lopes da Rocha, do Grupo de Cristalografia do IFSC – USP, pelas valiosas discussões.
- Ao CNPq, pelo apoio financeiro.
- Aos amigos Evandro Del Guerra e Eliseu Del Guerra Júnior, da EDG Equipamentos e Controles Ltda., pelo apoio e por disponibilizarem o uso de equipamentos da empresa na realização da pesquisa.
- A todos os meus amigos pelo apoio e incentivo nesta gratificante jornada.
- À toda a minha família: meus pais, Manuel e Vera, que sempre me apoiaram e acreditaram em mim; ao meu irmão, João Luiz Leal do Nascimento, pela ajuda direta em todos os trabalhos e discussões; ao meu marido, Fernando, por toda a paciência e compreensão; e a minha cachorra pit-bull, Pandora, pela incansável companhia nas madrugadas de trabalho.
- Agradeço, especialmente, ao Dr. Celso Charuri, meu mestre, pela Amizade e por me ajudar e encontrar o Caminho.
- E finalmente, o mais importante dos agradecimentos: agradeço a Deus por Tudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. A PREOCUPAÇÃO COM O MEIO AMBIENTE	1
1.2. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	3
1.3. IMPACTOS DA RECICLAGEM E DA REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS ..	4
1.4. APROVEITAMENTO DE ESCÓRIAS	7
1.4.1. Escória de Alto-Forno	7
1.4.2. Escória de Aciaria	12
1.5. AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL	13
1.5.1. Classificação Geral dos Agregados	14
1.5.2. Agregados Artificiais	15
2. OBJETIVO	18
3. ESCÓRIA DE ACIARIA PRODUZIDA PELA BMP	19
3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS PELA BMP	19
3.2. OBTENÇÃO DA ESCÓRIA	20

3.3. ESTUDOS PRELIMINARES DA ESCÓRIA DA BMP	21
3.3.1. Composição da Escória da BMP	21
3.3.2. Ensaio de Lixiviação e de Solubilização da Escória da BMP	22
3.3.3. Grau de Cristalinidade	26
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
5. METODOLOGIA	34
5.1. MATERIAIS	34
5.1.1. Características Físicas dos Agregados Convencionais	34
5.1.1.1. Granulometria	35
5.1.1.2. Área Superficial	38
5.1.1.3. Massa Específica Real e Absorção de Água	41
5.1.2. Determinação dos Traços de Referência	41
5.1.2.1. Composição das Britas	42
5.1.2.2. Teor Ideal de Argamassa e Traços Auxiliares	44
5.1.2.3. Determinação da Relação Água/Cimento	45
5.1.3. Características da Escória	47
5.1.3.1. Granulometria	47
5.1.3.2. Área Superficial	55
5.1.3.3. Massa Específica Real e Absorção de Água	57
5.1.4. Determinação dos Traços com Escória	58
5.1.5. Consumo de Cimento	63
5.2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	65
5.2.1. Resistência à Compressão	70
5.2.2. Resistência à Tração na Flexão	72
5.2.3. Módulo de Elasticidade	74
5.2.4. Retração por Secagem	75
5.2.5. Absorção de Água	76
6. RESULTADOS	77
6.1. IDENTIFICAÇÃO DOS TRAÇOS	77
6.2. ENSAIOS MECÂNICOS	77
6.3. ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM	80
6.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO	81
6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	83

7. CONCLUSÃO	86
7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	87
ANEXO A	88
ANEXO B	91
ANEXO C.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. DRX da escória de aciaria, antes dos tratamentos térmicos	27
Figura 2. DRX da escória de aciaria, após a primeira tentativa de choque térmico, com temperatura máxima de 1100 °C	28
Figura 3. Ensaio de DTA da escória de aciaria	30
Figura 4. DRX da escória de aciaria, após a segunda tentativa de choque térmico, com temperatura máxima de 1250 °C	31
Figura 5: Curva granulométrica da areia ($D_{\text{máx}} = 2,40 \text{ mm}$)	36
Figura 6: Curva granulométrica da brita nº 0 ($D_{\text{máx}} = 6,30 \text{ mm}$)	37
Figura 7: Curva granulométrica da brita nº 1 ($D_{\text{máx}} = 19,00 \text{ mm}$)	37
Figura 8. Determinação da relação a/c do concreto TR REF	46
Figura 9. Determinação da relação a/c do concreto TN REF	46
Figura 10. Determinação da relação a/c do concreto TP REF	47
Figura 11. Escória <i>in natura</i> , antes de ser separada em faixas granulométricas	48
Figura 12. Escória <i>in natura</i> , sendo colocada no peneirador mecânico	48
Figura 13. Escória <i>in natura</i> , no peneirador mecânico, antes de ser agitada	49
Figura 14. Escória, no peneirador mecânico, após a agitação	49
Figura 15. Armazenamento da escória fina, com $0,15 < \phi < 2,40 \text{ mm}$	50
Figura 16. Armazenamento da escória média, com $2,40 < \phi < 9,50 \text{ mm}$	50
Figura 17. Armazenamento da escória grossa, com $9,50 < \phi < 19,00 \text{ mm}$	51
Figura 18. Curva granulométrica da escória <i>in natura</i>	52
Figura 19. Curva granulométrica da escória fina ($0,15 \text{ mm} < \phi < 2,40 \text{ mm}$)	52

Figura 20. Curva granulométrica da escória média ($2,40 \text{ mm} < \phi < 9,50 \text{ mm}$)	53
Figura 21. Curva granulométrica da escória grossa ($9,50 \text{ mm} < \phi < 19,00 \text{ mm}$)	53
Figura 22. Comparação da granulometria da escória fina com a da areia	54
Figura 23. Comparação da granulometria da escória média com a da brita nº 0	54
Figura 24. Comparação da granulometria da escória grossa com a da brita nº 1	55
Figura 25. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto TR ESC	62
Figura 26. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto TN ESC	62
Figura 27. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto TP ESC	63
Figura 28. Resumo dos traços de concreto investigados	65
Figura 29. Quantidade de amostras utilizadas em cada ensaio	66
Figura 30. Mistura do concreto, em betoneira, para moldagens dos CPs	66
Figura 31. Concreto fresco, antes da moldagem dos corpos-de-prova	67
Figura 32. Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm	67
Figura 33. Adensamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm	68
Figura 34. Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35 cm	68
Figura 35. Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35 cm	69
Figura 36. Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm	69
Figura 37. Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm	70
Figura 38. Ensaio de Resistência à Compressão de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm	71
Figura 39. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm, durante o ensaio de Resistência à Compressão	71
Figura 40. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm	72

Figura 41. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm, durante o ensaio de Resistência à Tração na Flexão	73
Figura 42. Ruptura de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm, durante o ensaio de Resistência à Tração na Flexão	73
Figura 43. Ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm	74
Figura 44. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm, durante o ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade	75
Figura 45. Resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão	79
Figura 46. Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração na flexão	79
Figura 47. Resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade	80
Figura 48. Resultados do ensaio de retração por secagem	81
Figura 49. Resultados do ensaio de absorção por imersão e índice de vazios	82
Figura 50. Resultados do ensaio de massa específica real do CP seco e do CP saturado	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de resíduos gerados anualmente pela BMP	19
Tabela 2. Composição centesimal da escória da BMP	21
Tabela 3. Determinações sobre a massa bruta da escória da BMP	23
Tabela 4. Determinações sobre o lixiviado obtido da escória da BMP	23
Tabela 5. Determinações sobre o solubilizado obtido da escória da BMP	25
Tabela 6. Abertura das peneiras	35
Tabela 7. Quantidade retida acumulada de cada agregado convencional	36
Tabela 8. Valores relativos de área superficial e de índice de Murdock	39
Tabela 9. Área superficial da areia, segundo o índice de Murdock	39
Tabela 10. Área superficial da brita nº 0, segundo o índice Murdock	40
Tabela 11. Área superficial da brita nº 1, segundo o índice de Murdock	40
Tabela 12. Massa específica real da areia e da brita nº 0	41
Tabela 13. Massa específica real e absorção de água da brita nº 1	41
Tabela 14. Massa unitária em estado compactado da brita nº 1	43
Tabela 15. Determinação da composição ideal entre as britas nº 0 e nº 1	43
Tabela 16. Traço normal e traços auxiliares, de referência, em massa	45
Tabela 17. Traços de referência e relações água/cimento (a/c), em massa	45
Tabela 18. Quantidade retida acumulada de cada tipo de escória	51
Tabela 19. Área superficial da escória fina, segundo o índice de Murdock	56
Tabela 20. Área superficial da escória média, segundo o índice de Murdock	56

Tabela 21. Área superficial da escória grossa, segundo o índice de Murdock	56
Tabela 22. Comparação entre as áreas superficiais das frações granulométricas da escória com os agregados convencionais	57
Tabela 23. Massa específica real das frações granulométricas da escória fina e média	57
Tabela 24. Massa específica real e absorção de água da escória grossa	57
Tabela 25. Substituição da areia pela escória fina	59
Tabela 26. Substituição da brita nº 0 pela escória média	59
Tabela 27. Substituição da brita nº 1 pela escória grossa	60
Tabela 28. Traços do concreto com escória, em massa, onde a quantidade de aditivo é dada em relação à quantidade, em massa, de cimento	61
Tabela 29. Consumo de cimento nos traços de referência	64
Tabela 30. Consumo de cimento nos traços com escória	64
Tabela 31. Resultados dos ensaios mecânicos, nas idades de 28 e 90 dias	78
Tabela 32. Comparação dos resultados obtidos com o concreto de escória e de referência	78
Tabela 33. Resultados do ensaio de retração por secagem	80
Tabela 34. Resultados dos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real seca e saturada	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

BMP – Belgo Mineira de Piracicaba-SP

LQ – limite de quantificação

VMP – valor máximo permitido

DRX – Difração de Raios-X

LCC – Laboratório de Construção Civil

SAP – Departamento de Arquitetura – São Carlos-SP

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

USP – Universidade de São Paulo

DTA – Análise Térmica diferencial

IFSC – Instituto de Física de São Carlos

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

LISTA DE SÍMBOLOS

CaCO_3 – carbonato de cálcio

SiO_2 – sílica

CaO – óxido de cálcio

CO_2 – gás carbônico

MgO – óxido de magnésio

Ca_2SiO_4 – silicato de cálcio

C_2S – silicato dicálcico

C_3S – silicato tricálcico

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

$D_{\text{máx}}$ – diâmetro máximo

MF – módulo de finura

γ - massa específica real

a/c – relação água/cimento

ϕ – diâmetro

CP – corpo-de-prova

U.R. – umidade relativa do ar

DV – desvio padrão

RESUMO

NASCIMENTO, K. A. L. (2007). *Utilização de Escória Proveniente da Reciclagem do Aço em Concreto de Cimento Portland*. São Carlos, 2007. 94p. Dissertação (Mestrado) – Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.

A redução no volume de resíduos produzidos, industriais e agrícolas, vem se tornando uma exigência constante em todos os processos de produção. A falta de espaço físico para a disposição destes resíduos, a contaminação ambiental causada por eles, além da necessidade de preservação dos recursos naturais não-renováveis e da diminuição do consumo de energia e emissão de poluentes, tornam a reciclagem e a reutilização dos resíduos uma alternativa bastante atraente. A construção civil apresenta-se como um setor bastante apto à utilização de técnicas de reaproveitamento de resíduos, provenientes das mais diversas indústrias. Além de todos os benefícios ambientais, esse reaproveitamento, pela construção civil, pode gerar recursos financeiros, bem como, possibilita a melhora das características de alguns materiais de construção, e pode diminuir o custo de construção, fator importante, quando avalia-se o déficit de habitacional existente no Brasil. Neste trabalho, desenvolveu-se um estudo baseado no aproveitamento de escória de aciaria elétrica, resíduo gerado a partir da reciclagem do aço, empregada como agregado para concreto de cimento Portland, em substituição total ou parcial dos materiais convencionais. Os resultados obtidos apontaram para a viabilidade de utilização deste resíduo como agregado.

Palavras-chave: Resíduo, Reciclagem, Escória, Aciaria, Agregado, Concreto.

ABSTRACT

NASCIMENTO, K. A. L. (2007). *The Utilization of the Slag from the Recycling Process of the Steel in the Concrete of Portland Cement*. São Carlos, 2007. 94p. Dissertation (Master) – Science and Engineering, University of São Paulo.

The reduction on the volume of produced wastes, from industries or agriculture, is becoming a current demand in all production processes. The lack of space to dispose these wastes, the environment contamination caused by them, besides the necessity to preserve the non-renewable natural resources, to reduce energy consumption and greenhouse gas emission, are making wastes recycling and reutilization an interesting alternative. The civil construction presents itself as a field quite able to utilise techniques to reuse wastes from different industries. Besides all the environmental benefits, this reuse by the civil construction can create new profits, as well as, the improvement of the characteristics of some construction materials and it can also decrease the costs of the construction, which is a major factor, considering the Brazilian habitation deficit. In the present work a study was developed based on the reutilisation of the electric arc furnace slag, a metallurgic waste from the steel recycling process, employed as an aggregate to the concrete of Portland cement, totally or partially replacing the conventional materials. The obtained results indicate this waste reutilisation viability.

Key word: Waste, Recycling, Slag, Electric Arc Furnace, Aggregate, Concrete.

1. INTRODUÇÃO

1.1. A PREOCUPAÇÃO COM O MEIO AMBIENTE

Até bem pouco tempo atrás, a preocupação com a geração de resíduos não existia. A falsa idéia da abundância dos recursos naturais, renováveis e não-renováveis, tratados como se fossem fontes inesgotáveis, e uma população menor, principalmente no que diz respeito à sociedade consumista que se apresenta atualmente, tornavam a produção de resíduos um problema insignificante. No entanto, nas últimas décadas, com o advento de novas tecnologias, com a diversificação do consumo de bens e serviços, e com o crescimento populacional, principalmente nos centros urbanos, houve um considerável aumento na industrialização. A partir de então, os resíduos se transformaram em um grave problema para toda a sociedade (ANGULO, 2000; JOHN, 2000; SILVEIRA et al, 1997).

No modelo atual de produção, milhares de toneladas de resíduos, industriais e agrícolas, são produzidos anualmente. Considerando este elevado volume de resíduos gerados, pode-se perceber que seu gerenciamento se torna oneroso e demasiadamente complexo. A escassez de espaço físico para a deposição destes resíduos apresenta-se como um dos principais problemas. A utilização de

áreas urbanas, para este fim, provoca uma desvalorização das mesmas, além dos altos custos envolvidos na manutenção destes espaços e para evitar problemas quanto ao saneamento público. Por outro lado, a deposição em áreas mais afastadas e, conseqüentemente, menos valorizadas, acaba se tornando inviável devido aos altos custos necessários para o transporte dos resíduos. E, em ambos os casos citados, existe o custo para o gerenciamento dos resíduos, para se evitar que ocorra qualquer tipo de contaminação ambiental (ANGULO, 2000; JOHN, 2000; MASUERO et al, 1997).

Não se pode, porém, interromper essa análise unicamente no que diz respeito ao incômodo que o excesso de resíduos traz à sociedade. Apesar do gerenciamento dos resíduos representar o maior dos problemas, devido aos altos custos a ele incorporados, deve-se lembrar da necessidade da preservação ambiental, como a redução das matérias-primas utilizadas nas indústrias, principalmente matérias-primas não-renováveis, bem como da energia consumida em seu beneficiamento, além do cuidado com o risco de contaminação ao meio ambiente, decorrente da possível existência de substâncias agressivas contidas nos resíduos (JOHN, 1999; MASUERO et al, 1997).

Portanto, deve-se encontrar uma solução tanto para o problema do excesso de resíduos, quanto para a conservação ambiental, da energia e dos recursos naturais. A redução dos custos, tanto de deposição, quanto de tratamento dos resíduos, pode ser obtida de duas formas complementares: a diminuição na produção de resíduos e a reciclagem ou reutilização dos mesmos. A redução no volume produzido apresenta limitações técnicas difíceis de serem ultrapassadas. Já a reciclagem ou a reutilização apresentam menores dificuldades, além de poderem gerar recursos financeiros. No entanto, o ideal é a utilização das duas soluções, de

modo que a indústria deva tentar fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e o ingresso de matéria-prima (ANGULO, 2000; JOHN, 1997).

Como pode ser observado, o estudo da reutilização e da reciclagem de resíduos tornou-se prioritário quanto ao aspecto ambiental. Além disso, o aproveitamento dos resíduos pode apresentar diversos benefícios técnicos, econômicos, energéticos e, é claro, ambientais, como redução do volume de extração de matérias-primas, conservação de matérias-primas não-renováveis, redução do consumo de energia, menor emissão de poluentes, como o CO₂, e geração de recursos financeiros antes inexistentes (JOHN, 1997).

1.2. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Atualmente, ressurte-se, no Brasil, da falta de moradias para uma grande faixa da população. Tal fato, aliado aos altos custos dos materiais de construção e da mão-de-obra, faz com que todos os setores da sociedade, públicos e privados, se mobilizem em busca de soluções apropriadas, simples, práticas e avançadas, que permitam um considerável barateamento da construção (SARMIENTO e FREIRE, 1997).

A construção civil apresenta-se como um setor de grande potencial para a utilização de resíduos, uma vez que ela chega a consumir até 75% de recursos naturais (ANGULO, 2000).

A reciclagem de resíduos agrícolas e industriais como material de construção civil é uma tendência que vem se consolidando em nível nacional. Uma série de fatores propicia esta prática. Por um lado tem-se o elevado déficit

habitacional existente no país, por outro lado o custo dos materiais tradicionais é alto para poderem ser empregados por uma grande parcela da população. Desta forma, o desenvolvimento de materiais alternativos, que apresentem desempenho similar aos tradicionais, ou de desempenho compatível ao seu uso, com custo inferior e com a vantagem de dar uma destinação ao resíduo, se mostra bastante atrativa (MASUERO et al, 1997; SAVASTANO, 2000).

Os resíduos, de uma forma geral, possuem um grande conteúdo energético. Por isso, ocorre uma diminuição no consumo de energia quando são utilizados. Por exemplo, quando se utiliza escórias ou pozolanas na produção de cimentos, não há a necessidade de calcinação da matéria-prima, permitindo uma redução de até 80% no consumo energético (JOHN et al, 1995). Esta redução é bem significativa, uma vez que a construção civil consome cerca de 4,5% do total de energia, sendo 84% na fase de produção dos materiais (JOHN, 1997).

1.3. IMPACTOS DA RECICLAGEM E DA REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A reciclagem e a reutilização de resíduos, industriais e agrícolas, como novos materiais de construção, têm sido cada vez mais aplicados em diversas linhas de pesquisas. No entanto, o reaproveitamento de cinzas de casca de arroz, de areias de fundição, de escórias, de lodos de estações de tratamento, de entulhos da construção civil, etc, conta apenas com uma abordagem voltada ao desempenho mecânico do novo produto obtido. No entanto, além do estudo voltado às características técnicas relacionadas ao desempenho mecânico, à estabilidade e à viabilidade do novo material, torna-se necessário efetuar-se uma avaliação quanto

aos impactos ambiental e financeiro gerados pelo seu uso (CAVALCANTE e CHERIAF, 1997).

Ou seja, a reciclagem e a reutilização de resíduos, assim como qualquer outra atividade humana, também pode causar impactos ao meio ambiente. Variáveis como o tipo de resíduo, a tecnologia empregada, e a utilização proposta para o material reciclado, podem tornar o processo de reciclagem ainda mais impactante e prejudicial do que o próprio resíduo era, antes de ser reciclado. Dependendo da sua periculosidade e complexidade, estes rejeitos podem causar novos problemas, como a impossibilidade de serem reciclados novamente ou a falta de tecnologia para seu tratamento. Dessa forma, o processo de reciclagem pode acarretar riscos ambientais que precisam ser adequadamente analisados e gerenciados (ÂNGULO et al, 2001; FLESCHE, 2004).

Em todo o processo de reciclagem ou de reutilização são necessárias algumas transformações para tornar o resíduo apropriado para a sua nova utilização. Nesse processo de transformação, existe a necessidade do uso de energia e, em alguns casos, até do uso de novas matérias-primas para modificar o resíduo física ou quimicamente. Dependendo das quantidades de energia e/ou de matérias-primas utilizadas nesta etapa de transformação, a reciclagem pode representar um grande impacto ao meio ambiente (ÂNGULO et al, 2001; FLESCHE, 2004).

Outro impacto bastante relevante é o fato de a reciclagem e a reutilização de resíduos também gerarem resíduos. Estes novos resíduos podem ser gerados tanto com o final da vida útil do material reciclado, quanto durante o próprio processo de reciclagem. Os resíduos podem ser, dependendo do tipo de transformação feita durante a reciclagem, mais prejudiciais ao meio ambiente do que era o resíduo inicial, antes da reciclagem. Deve-se analisar, quanto ao novo resíduo,

as quantidades geradas, a possibilidade de contaminação ao meio ambiente, a disponibilidade de locais de disposição e a existência de tecnologia para efetuar-se um tratamento adequado, juntamente com os respectivos custos, e avaliar se realmente a reciclagem inicial foi viável ambientalmente e financeiramente. Também pode ser estudada a possibilidade de reciclagem e de reutilização deste novo resíduo gerado, mas sem esquecer os aspectos citados anteriormente (ÂNGULO et al, 2001; CAVALCANTE e CHERIAF, 1997; FLESCHE, 2004).

Os riscos de utilização dos novos produtos, gerados a partir da reciclagem ou da reutilização de resíduos, também devem ser avaliados. É necessário efetuar-se um estudo para se certificar de que este novo produto não oferece risco à saúde dos usuários, bem como dos trabalhadores responsáveis pela sua reciclagem. Até mesmo resíduos antes inertes podem sofrer algumas alterações físico-químicas durante o processo de reciclagem (ÂNGULO et al, 2001; CAVALCANTE e CHERIAF, 1997; FLESCHE, 2004).

Portanto, antes de se optar pela reciclagem ou pela reutilização de um resíduo, é necessária uma avaliação bastante criteriosa, ponderando as vantagens que serão obtidas no processo, e o impacto que este processo vai gerar. A reciclagem não pode ser utilizada indiscriminadamente pelas indústrias, com o intuito de cumprir normas ambientais; deve ser feita com base em um estudo bastante amplo, para que não gere, futuramente, maiores custos para a sociedade e para o meio ambiente.

1.4. APROVEITAMENTO DE ESCÓRIAS

As escórias são os resíduos de maior geração no processo siderúrgico. A cada tonelada de aço produzido, gera-se de 70 kg a 170 kg de escória. Podem ser produzidos dois tipos de escória: a de alto-forno e a de aciaria. A escória de alto-forno é gerada durante do processo de obtenção do ferro gusa. A escória de aciaria é obtida na produção do aço (MASUERO et al, 2001). No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), em 2005, a produção de ferro gusa e de aço foram de, aproximadamente, 33,8 e 31,6 milhões de toneladas, respectivamente.

Para o aproveitamento destes resíduos, as escórias, a construção civil apresenta-se como uma das melhores alternativas, pois pode utilizar estes milhões de toneladas de subprodutos siderúrgicos em diversas aplicações: na fabricação de cimento Portland modificado, como agregados de concreto, e em subleito rodoviário ou lastro de ferrovias (ALBUQUERQUE, 2004).

Como há uma extensa bibliografia sobre escórias de alto-forno, inclusive sobre o seu uso na construção civil, incluiu-se um breve resumo de suas características para comparação com as características da escória de aciaria.

1.4.1. Escória de Alto-Forno

A escória de alto-forno é um resíduo gerado na produção do ferro-gusa, a primeira fase de obtenção do aço. Segundo Albuquerque (2004), pode se apresentar de três formas:

➤ Escória resfriada ao ar, ou pelotizada, obtida por resfriamento lento. Resulta num produto inerte utilizado mais comumente como agregado leve; quando finamente moída, apresenta propriedade cimentante satisfatória.

➤ Escória expandida. Obtida por resfriamento rápido pela aplicação de água em quantidade controlada, ar e vapor, resultando em um agregado graúdo.

➤ Escória granulada. Obtida por resfriamento brusco, sendo previamente fragmentada por jato d'água e posteriormente resfriada em tanque com água; o produto possui estrutura cristalina e se apresenta no estado de agregado graúdo úmido, tornando-se, pois, necessário secá-lo e moê-lo em partículas menores do que 45 µm (corresponde praticamente a 500 m²/kg de finura Blaine); nesta condição adquire boa propriedade cimentante podendo ser usado como adição ao clínquer Portland.

Na área de tecnologia do concreto, a maioria das pesquisas busca encontrar melhorias nas propriedades químicas e físicas de seus componentes ou pela substituição dos mesmos por materiais que apresentem melhor desempenho, com o objetivo de se prevenir e remediar patologias, aumentar a resistência do concreto em ambientes agressivos ou até mesmo reduzir o consumo de cimento Portland, tornando o concreto mais econômico (SILVA, 2000).

O aspecto ecológico também deve ser considerado, visto que a redução do consumo de cimento Portland também reduz os danos ao meio ambiente. O cimento Portland é obtido através da calcinação de pedra calcária (carbonato de cálcio) e sílica:

Portanto, além do alto consumo energético deste processo, são liberados ao meio ambiente aproximadamente uma tonelada de gás carbônico (CO₂),

proveniente tanto da calcinação, quanto da queima do combustível fóssil no alto-forno (BARBOSA, 1999).

Como a redução do consumo de energia e da emissão de gás carbônico (CO_2) é uma exigência constante na indústria de cimento Portland, torna-se necessário proceder-se uma melhoria nos processos de fabricação, além de propor-se um aproveitamento de resíduos e de subprodutos de outras indústrias. Com o avanço na tecnologia do concreto, tem-se o emprego de escórias de alto-forno e silicosos de elevada reatividade potencial, o que permite, além de uma melhoria das propriedades do concreto, o aproveitamento de materiais antes sem aplicação. Além disso, esse sistema proporciona a obtenção de produtos mais estáveis, mais resistentes quimicamente e mais duráveis (THOMAZ, 2000).

O processo de obtenção de ferro-gusa gera significativo volume de escória, que é granulada através da sua prévia fragmentação, em estado fundido e posterior resfriamento brusco em água, tendo, nesta forma, bom aproveitamento pela indústria cimenteira. As propriedades físico-químicas deste subproduto o tornam potencialmente útil como adição ou substituição ao cimento Portland. No Brasil, as escórias granuladas de alto-forno vêm sendo empregadas desde a década de 1960, constituindo o chamado “cimento Portland de alto-forno”, normalizado desde 1964 (SILVA, 2000).

O parque siderúrgico nacional produz cerca de 27 milhões de toneladas de ferro-gusa ao ano, deixando, como resíduo, aproximadamente 330 kg de escória para cada tonelada de ferro-gusa produzido. Apenas parte dessa escória é consumida pelas indústrias de cimento, que a empregam como adição, sendo um sério problema o acúmulo desse resíduo, estimado em cerca de 3 milhões de toneladas ao ano.

Portanto, a adição da escória de alto forno ao cimento Portland traz ganhos ao meio ambiente, pois se trata de um material que seria descartado pelas indústrias em aterros, além de propiciar ganhos econômicos, já que esta substitui uma certa quantidade de clínquer que, conforme relatado, demanda um grande consumo de energia para sua produção (PERUZZI, 2002).

Devido à queda no consumo de cimento Portland, ocorrida nas últimas décadas pelo desaquecimento da construção civil brasileira, houve, conseqüentemente, um acúmulo de escória de alto-forno nas siderúrgicas, sem destinação de uso, gerando ônus de transporte e armazenagem e ocupando espaço útil.

Uma das alternativas estudadas, desde a década de 1970, para o aumento da demanda de aproveitamento das escórias de alto-forno é o seu emprego como agregado, em estado bruto, sem sofrer trituração. Estudos realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) sobre caracterização e emprego de escórias de alto-forno brasileiras, como aglomerante e agregado para concreto, vêm contribuindo expressivamente para a consagração do aproveitamento deste resíduo.

Nas escórias de alto-forno são encontrados cristais de silicatos duplos de cálcio e alumínio (gehlenita) e de cálcio e de magnésio que se apresentam como monticelita, ackermanita ou merwinita, além dos silicatos monocálcicos e dicálcicos (SILVA, 2000).

Para aproveitar o comprovado potencial da escória de alto-forno, a indústria do cimento desenvolveu dois tipos distintos de cimento Portland com escória, o Cimento Portland Composto com adição de escória de alto-forno, designado pelas Normas Brasileiras como CPII-E, recebendo até 30% de escória, e o

Cimento Portland de Alto Forno (CPIII), que pode receber até 70% de escória (NBR 5735; ASTM C 1073). O CPII-E apresenta quase que as mesmas propriedades do cimento Portland Comum, devido à pequena fração empregada (~20%), pois trata-se apenas de um esforço para a redução dos custos de fabricação.

Já o CPIII, como recebe quantidades iguais ou superiores a 50%, em massa, apresenta propriedades bastante diferentes, tais como tempos de início e fim de pega mais tardios, baixa resistência mecânica inicial e elevadas resistências química e mecânica finais. Devido à baixa velocidade de ganho de resistência, estes cimentos não são comumente usados, principalmente no que se refere a argamassas de revestimentos.

As partículas de escória menores do que 10 μm contribuem para as resistências iniciais do concreto até 28 dias; partículas de 10 μm a 45 μm contribuem para as resistências a longa idade, mas partículas maiores do que 45 μm são difíceis de hidratar (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Embora apresente propriedades cimentantes, a escória de alto forno finamente moída tem uma reação bastante lenta, necessitando de um ativador para acelerar a sua hidratação. A adição de escória de alto forno confere uma série de características ao cimento Portland, tais como o controle da velocidade e a menor liberação de calor na hidratação, fazendo com que o cimento de alto forno seja adequado para obras de concreto e argamassa em ambientes marinhos e em concretagem de grandes volumes (PERUZZI, 2002).

Por outro lado, a hidratação da escória ocorre mais rapidamente em meio aquoso alcalino e/ou sob vapor, podendo ser ativada por agentes que aceleram essa hidratação, como o cimento Portland, a cal, a soda cáustica, a gipsita ou uma mistura destes.

1.4.2. Escória de Aciaria

Segundo Masuero et al (2001), o aço pode ser produzido de duas formas: ou com o ferro gusa fundido e utilização do oxigênio, ou com a utilização de sucata metálica, em fornos elétricos. No caso de transformação do ferro gusa, o processo é feito a partir do sopro de oxigênio num conversor LD¹, onde não é necessária uma fonte de calor externo, devido à oxidação do carbono, silício e ferro, que geram energia suficiente para o processo; este é o processo mais utilizado no Brasil, e a escória de aciaria, formada neste caso, também é denominada escória de conversor. No processo onde se utiliza a sucata metálica, é utilizado um forno elétrico de fusão, devido à necessidade de uma fonte de calor externo. A escória de aciaria produzida também é chamada de escória de refino oxidante.

A escória de aciaria é um subproduto siderúrgico formado por óxidos básicos, resultantes da agregação de elementos que não estarão presentes na composição do aço. Os tipos e quantidades dos óxidos presentes na escória de aciaria dependem do tipo de matéria-prima utilizada, do tipo de aço que se pretende obter, e até mesmo do tipo de forno e de seu revestimento (ALBUQUERQUE, 2004).

A escória de aciaria apresenta, como maior fator limitante de utilização, sua expansibilidade, sendo recomendável um prévio estudo de seu comportamento. A causa da expansão ocorre principalmente devido à presença de óxido de cálcio (CaO) livre e óxido de magnésio (MgO) reativo. Quando hidratados,

¹ Conversor Linz-Donawitz (LD): Equipamento que refina o ferro gusa, em estado líquido, graças a reações químicas geradas por sopros de oxigênio em alta pressão (Albuquerque, 2004).

ocorre o aumento de volume, ou seja, a expansão das escórias. A cal livre é responsável pela expansão a curto prazo, quando é transformada, em presença de umidade, em cal extinta. Já o óxido de magnésio é responsável pela expansão a longo prazo, devido suas reações serem mais lentas; também não são todos os casos de óxidos de magnésio que são prejudiciais, apenas os que se encontram de forma livre, sem estarem combinados, também denominados periclase (ALBUQUERQUE, 2004; MASSUERO et al, 2001).

Em seu trabalho, Albuquerque (2004) sugeriu que “o tratamento da escória consiste em armazená-la a céu aberto por períodos variáveis de 4 a 6 meses, irrigando periodicamente as pilhas, podendo assim o material ser empregado em diversas aplicações na construção civil”.

1.5. AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Visto que pelo menos três quartas partes do volume de concreto são ocupadas pelos agregados, não se deve surpreender que a sua qualidade seja de considerável importância. O agregado não só pode limitar a resistência do concreto – porque com um agregado fraco não se pode obter um concreto resistente – mas as propriedades têm considerável influência sobre a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto (BAUER, 1979; MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1982).

Anteriormente o agregado era considerado como um material inerte, distribuído pelo meio da pasta de cimento, principalmente por razões de economia. No entanto, é perfeitamente possível inverter o ponto de vista, passando a considerar o agregado como um material de construção interligado num todo monolítico por

meio da pasta de cimento, de forma semelhante a uma construção em alvenaria. Na realidade, o agregado não é, verdadeiramente, inerte, e suas propriedades físicas, térmicas e, às vezes, também as químicas, têm muita influência no desempenho do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1982).

O agregado é um material menos custoso do que o cimento e, portanto, os concretos custarão tanto menos quanto mais agregados e menos cimento forem utilizados. Mas a economia não é a única razão para se usarem agregados no concreto; eles conferem características técnicas extremamente vantajosas ao concreto, que passa a ter maior estabilidade dimensional e maior durabilidade em relação à pasta de cimento pura (BAUER, 1979; NEVILLE, 1982).

1.5.1. Classificação Geral dos Agregados

Os tamanhos dos agregados usados no concreto variam de dezenas de milímetros até atingir partículas da ordem de décimos de milímetro. O tamanho máximo pode variar, mas todos os concretos contém fragmentos e partículas de diversos tamanhos, designando-se a distribuição desses tamanhos como granulometria. Na obtenção de concretos com requisitos de qualidade menos rigorosos, usam-se, às vezes, agregados provenientes de jazidas que contém, praticamente, todos os tamanhos entre um máximo e um mínimo; esses agregados são denominados bica corrida ou brita graduada. Por outro lado – o que é muito mais comum e sempre usado para a obtenção de concretos de boa qualidade – o agregado é obtido em pelo menos dois tamanhos, sendo a principal divisão a que os classifica em agregados miúdos geralmente designados por areias, com partículas não maiores

que 4,8 mm e agregados graúdos, que compreendem materiais com fragmentos de, no mínimo, 4,8 mm (BAUER, 1979; NEVILLE, 1982).

Todas as partículas de agregados são originárias de uma rocha-mãe com dimensões maiores, que podem ter sido fragmentadas, por processos naturais, como intemperismos e abrasão, ou artificiais, como britamento. Assim, muitas propriedades dos agregados dependem inteiramente das propriedades da rocha-mãe, por exemplo, a composição química e mineralógica, petrografia, massa específica, dureza, resistência mecânica, estabilidade física e química, estruturas dos poros, cor, etc. Por outro lado, os agregados apresentam algumas propriedades que não existem na rocha-mãe, como forma e tamanho dos fragmentos, textura superficial e absorção. Todas estas propriedades podem ter grande influência nas qualidades do concreto tanto fresco como endurecido (BAUER, 1979; NEVILLE, 1982).

1.5.2. Agregados Artificiais

Os agregados artificiais possuem massa específica diferente dos agregados naturais. Os de massa específica mais elevada são utilizados cada vez mais em diversos países, por exemplo, como no Reino Unido, porque está sendo observada uma falta cada vez mais acentuada de agregados naturais utilizáveis para concreto. O uso de agregados artificiais é um passo natural para solução desse problema, sendo os mesmos obtidos de detritos, que é outra solução conveniente (BAUER, 1979).

Segundo Chaves (2005), a mineração de agregados graúdos para a construção civil, como granito, calcário e basalto, é um setor muito diferente das demais atividades mineradoras. A importância econômica desse tipo de mineração,

bem como a importância social, também não é muito bem quantificada, mas estima-se que ela possui uma representatividade próxima à do minério de ferro.

O principal diferencial deste setor é que a exploração dos agregados para a construção civil tem que ser feita junto ao mercado consumidor, devido ao baixo preço de seus produtos, ou seja, ela ocorre junto às cidades e próxima das regiões metropolitanas. Dada esta peculiaridade, o impacto ambiental, assim como os conflitos gerados pelo uso e ocupação do solo, são especialmente preocupantes (CHAVES, 2005).

Como impacto inicial, tem-se a lavra destes agregados, que é feita a céu aberto e gera ruídos e vibrações altamente prejudiciais às áreas vizinhas. E, apesar das técnicas de britagem, peneiramento e classificação de britas e areias serem totalmente dominadas, o número de empresas que as praticam criteriosamente é insignificante, fruto dos baixos preços e de um mercado consumidor pouco exigente (CHAVES, 2005).

Outro grande impacto nessa atividade é a geração de resíduos. O decapeamento das jazidas de brita gera uma quantidade muito grande de material a ser depositado em bota-foras. Estes depósitos, muitas vezes localizados em regiões de elevado valor imobiliário, são fonte permanente de conflitos, além de serem caros em termos econômicos e instáveis em termos geotécnicos. Os finos e o pedrisco, decorrentes do processo de britagem do basalto, também são problemáticos, visto que não são consumidos na construção civil em quantidades compatíveis com a sua geração. Faz-se necessário, portanto, uma minimização do volume gerado, além da busca de uma prática de tecnologia limpa e de desenvolvimento auto-sustentável (CHAVES, 2005).

A extração dos agregados para a construção civil também apresenta problemas de ordem técnica, gerados pela má caracterização dos mesmos. É o caso da presença, em algumas areias, de feldspatos alterados, que podem comprometer a sua utilização para finalidades de maior responsabilidade, como por exemplo, a fabricação de concreto (BAUER, 1979; CHAVES, 2005).

2. OBJETIVO

A pesquisa teve por objetivo, inicialmente, a avaliação do emprego da escória de aciaria elétrica, produzida pela BMP², como aglomerante³ e como agregado de concreto, substituindo, em parte ou totalmente, o cimento Portland e os agregados convencionais (areia e brita).

² BMP: Usina Siderúrgica Belgo Mineira de Piracicaba-SP.

³ A avaliação em termos de material aglomerante foi desconsiderada, vide item 3.3.3 deste trabalho.

3. ESCÓRIA DE ACIARIA PRODUZIDA PELA BMP

3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS PELA BMP

A BMP, que tem capacidade para a produção de 1 (um) milhão de toneladas por ano de aço, é especializada na produção de vergalhões e arames para a construção civil, utilizando, em média, 70 mil toneladas por mês de sucata de aço como principal insumo em sua aciaria elétrica. As quantidades de resíduos gerados pela BMP são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de resíduos gerados anualmente pela BMP.

Resíduos Gerados (toneladas)	2000	2001	2002	2003	2004
Escória	47.022	41.604	51.024	52.812	48.020
Pó de Aciaria*	5.130	4.141	5.808	5.168	6.032
Carepa*	7.007	6.804	7.815	7.848	8.522
Terra de Shedder*	7.176	24.034	27.731	46.783	43.512

* Outros resíduos advindos do processo de reciclagem do aço.

Fonte: Valores fornecidos pela Belgo Mineira de Piracicaba-SP.

3.2. OBTENÇÃO DA ESCÓRIA

Diferente das demais escórias utilizadas atualmente em concretos, as chamadas escórias de alto-forno, amplamente descritas na literatura, a escória da BMP, objeto desta pesquisa, não é um resíduo proveniente da produção do ferro-gusa, a partir do minério de ferro.

Ela é o resíduo gerado pela reciclagem do aço, ou seja, a matéria-prima que dá origem ao aço produzido pela BMP, e, conseqüentemente, a escória, é a sucata de ferro e aço, também denominada escória de aciaria. Neste processo, são reciclados diversos tipos de materiais, desde latas de alimentos em conserva e ferragens diversas, passando por eletrodomésticos, transformadores, entulhos metálicos da construção civil, automóveis, e, até mesmo, motores e turbinas de aeronaves. Ou seja, trata-se de uma diversidade enorme de origens e tipos de materiais, sendo todas elas misturadas num mesmo processo. E, como se não bastasse a infinidade de tipos de metais e ligas, são misturados toda uma sorte de polímeros diversos (borrachas, plásticos, etc.), que não são possíveis e/ou viáveis de serem separados, além de pilhas, baterias e óxidos presentes nas pinturas das peças recicladas.

A reciclagem é feita através do processo de aciaria elétrica, em um forno elétrico de fusão, revestido de refratário à base de óxido de magnésio (MgO). A sucata, misturada com uma parte de ferro-gusa, é transformada em diferentes tipos de aço, através de reações de oxidação que separam as impurezas, como gases e escória. É neste processo que são realizadas adições de diversas substâncias, com o objetivo de corrigir os níveis de ferro e carbono, e se obter a liga de aço desejada.

O resultado deste processo são resíduos com propriedades completamente diferentes daqueles já conhecidos e estudados, como da escória de alto-forno, provenientes da produção primária do ferro gusa.

Na realidade, nesta pesquisa se trabalha com uma escória proveniente do aproveitamento de outro resíduo, a sucata; ou seja, se propõe o uso do “lixo do lixo”. Isso gera um número maior de variáveis a serem analisadas, como quantidades de substâncias nocivas e não inertes que podem estar presentes nesta escória.

Em uma primeira fase da pesquisa, foram feitos estudos preliminares, onde analisou-se o grau de cristalinidade desta escória, além da realização de ensaios de lixiviação e de solubilização.

3.3. ESTUDOS PRELIMINARES DA ESCÓRIA DA BMP

3.3.1. Composição da Escória da BMP

A análise da composição da escória foi feita, por solicitação da BMP, pelo laboratório Bioagri Ambiental Ltda, sediado em Piracicaba-SP, e é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição centesimal da escória da BMP.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados
Resultados expressos sobre as Amostras Base Úmida			
Cinzas	% (p/p)	0,05	94,2
Umidade	% (p/p)	0,05	0,69
Fósforo	mg/kg	0,5	257
Nitratos	mg/kg	0,5	1,30
Sulfatos	mg/kg	0,5	60,5

LQ: Limite de Quantificação.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 2 (cont). Composição centesimal da escória da BMP.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados
Resultados expressos sobre as Amostras Base Seca			
Alumínio (Al ₂ O ₃)	mg/kg	0,5	6430
Arsênio (As)	mg/kg	0,5	< 0,5
Antimônio (Sb)	mg/kg	0,5	15,3
Bário (BaO)	mg/kg	0,5	410
Bismuto	mg/kg	0,5	< 0,5
Cálcio (CaO)	mg/kg	0,5	39242
Cádmio (Cd)	mg/kg	0,5	< 0,5
Chumbo (Pb)	mg/kg	0,5	33,2
Cromo Total (Cr)	mg/kg	0,5	670
Cobre (CuO)	mg/kg	0,5	75,2
Cobalto (Co)	mg/kg	0,5	0,87
Estanho (Sn)	mg/kg	0,5	< 0,5
Ferro (Fe ₂ O ₃)	% (p/p)	0,005	7,60
Manganês (MnO)	mg/kg	0,5	8649
Magnésio (MgO)	mg/kg	0,5	23973
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,5	< 0,5
Níquel (Ni)	mg/kg	0,5	7,78
Potássio (K ₂ O)	mg/kg	0,5	522
Sílica + Insolúveis	% (p/p)	0,005	78,6
Selênio (Se)	mg/kg	0,5	< 0,5
Sódio (Na ₂ O)	mg/kg	0,5	128
Titânio (Ti)	mg/kg	0,5	877
Tálio (Tl)	mg/kg	0,5	< 0,5
Telúrio (Te)	mg/kg	0,5	< 0,5
Vanádio (V)	mg/kg	0,5	82,3
Zinco (ZnO)	mg/kg	0,5	40,5

LQ: Limite de Quantificação.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

O boletim completo da análise da composição da escória da BMP encontra-se no Anexo A.

3.3.2. Ensaio de Lixiviação e de Solubilização da Escória da BMP

Os ensaios de lixiviação e de solubilização da escória foram feitos, por solicitação da BMP, pelo laboratório Bioagri Ambiental Ltda, de Piracicaba-SP, e são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Além destes ensaios, também

foram feitas avaliações de umidade, inflamabilidade, corrosividade e reatividade, que são apresentadas na Tabela 3. Todas as análises foram feitas com base nas normas NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006, NBR 10007 e NBR 12988, e o boletim completo encontra-se no Anexo B.

Tabela 3. Determinações sobre a massa bruta da escória da BMP.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Umidade	% (p/p)	0,1	0,66	
Inflamabilidade				
Ponto de Fulgor	°C		> 100	60
Corrosividade				
pH (suspensão a 50%)			9,6	2,0 – 12,5
Reatividade			não reativo	não reativo
Cianeto (como HCN)	mg/kg	10	< 10	250
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	10	< 10	500

LQ: Limite de Quantificação; **VMP:** Valor Máximo Permitido.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 4. Determinações sobre o lixiviado obtido da escória da BMP.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Porcentagem de Sólidos	% (p/p)	0,1	99,3	
pH Final			4,8	
Tempo Total de Lixiviação (h)			18	18 + 2
Inorgânicos				
Arsênio	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Bário	mg/L	0,1	0,12	70,0
Cádmio	mg/L	0,05	< 0,05	0,5
Chumbo	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Cromo Total	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Fluoreto	mg/L	1,0	< 1,0	150,0
Mercúrio	mg/L	0,05	< 0,05	0,1
Prata	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Selênio	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Pesticidas				
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,001	< 0,001	0,003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,005	< 0,005	0,02
DDT (p,p'DDT + p,p'DDD + p,p'DDE)	mg/L	0,01	< 0,01	0,2
2,4 – D	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
Endrin	mg/L	0,01	< 0,01	0,06

LQ: Limite de Quantificação; **VMP:** Valor Máximo Permitido.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 4 (cont). Determinações sobre o lixiviado obtido da escória da BMP.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Heptacloro e Epóxido	mg/L	0,001	< 0,001	0,003
Lindano	mg/L	0,05	< 0,05	0,2
Metoxicloro	mg/L	0,05	< 0,05	2,0
Pentaclorofenol	mg/L	0,05	< 0,05	0,9
Toxafeno	mg/L	0,05	< 0,05	0,5
2,4,5 – T	mg/L	0,05	< 0,05	0,2
2,4,5 – TP	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Outros Orgânicos				
Benzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Benzeno (a) pireno	mg/L	0,01	< 0,01	0,07
Cloreto de Vinila	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	100
Clorofórmio	mg/L	0,01	< 0,01	6,0
o-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
m-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
p-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
1,4 – Diclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	7,5
1,2 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
1,1 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
2,4 – Dinitrotolueno	mg/L	0,01	< 0,01	0,13
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
Metiletilcetona	mg/L	50,0	< 50,0	200,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	2,0
Clorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	100
Clorofórmio	mg/L	0,01	< 0,01	6,0
o-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
m-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
p-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
1,4 – Diclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	7,5
1,2 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
1,1 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
2,4 – Dinitrotolueno	mg/L	0,01	< 0,01	0,13
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
Metiletilcetona	mg/L	50,0	< 50,0	200,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	2,0
Piridina	mg/L	5,0	< 5,0	5,0
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,01	< 0,01	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	4,0
Tricloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	7,0
2,4,5 – Triclorofenol	mg/L	0,1	< 0,1	400,0
2,4,6 – Triclorofenol	mg/L	0,1	< 0,1	20,0

LQ: Limite de Quantificação; VMP: Valor Máximo Permitido.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 5. Determinações sobre o solubilizado obtido da escória da BMP

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
pH final			10,6	
Inorgânicos				
Alumínio	mg/L	0,05	0,05	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,1	0,20	0,7
Cádmio	mg/L	0,005	< 0,005	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	1,0	< 1,0	250,0
Cobre	mg/L	0,05	< 0,05	2,0
Cromo Total	mg/L	0,05	< 0,05	0,05
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,01	0,01
Ferro	mg/L	0,05	0,15	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	0,37	1,5
Manganês	mg/L	0,05	< 0,05	0,1
Mercurio	mg/L	0,001	< 0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	< 0,1	10,0
Prata	mg/L	0,05	< 0,05	0,05
Selênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Sódio	mg/L	0,1	1,30	200,0
Sulfato (como SO ₄)	mg/L	1,0	6,26	250,0
Surfactantes	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Orgânicas				
Aldrin e Diedrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (Isômeros)	mg/L	0,0002	< 0,0002	0,0002
2,4-D	mg/L	0,001	< 0,001	0,03
DDT (Isômeros)	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0006
Heptaclororo e Epóxidos	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,001
Lindano (γ-BHC)	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
Metoxicloro	mg/L	0,005	< 0,005	0,02
Toxafeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	0,03

LQ: Limite de Quantificação; **VMP:** Valor Máximo Permitido.

Fonte: Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Interpretação dos resultados:

- **Lixiviado:** os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos permitidos.
- **Solubilizado:** os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos permitidos.

Portanto, a escória da BMP deve ser considerada, segundo a NBR 10004:2004, como de **Classe II – B – Inerte**⁴.

3.3.3. Grau de Cristalinidade

Na primeira fase da pesquisa, onde foram feitos alguns estudos preliminares, constatou-se que a escória não estava em condições de ser utilizada como adição ao concreto, em substituição ao cimento, da forma original vinda da siderúrgica. A escória, para que tenha propriedades aglomerantes, deve apresentar estrutura atômica amorfa, e não cristalina, além de ser formada predominantemente de sílica. Dessa forma, é possível que ocorra a reação do silicato dicálcico (C_2S)⁵ e do silicato tricálcico (C_3S)⁵ livres, com a água e com o hidróxido de cálcio, dando origem ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), fazendo que a escória apresente propriedades cimentícias (SILVA, 2000).

No entanto, ensaios prévios com a escória *in natura* mostraram que a mesma não manifestava nenhum tipo de reação de hidratação. Portanto, realizou-se um ensaio de Difração de Raios-X (DRX), para se verificar o grau de cristalinidade da escória (Figura 1).

⁴ Classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10004/2004: Classe I (Perigosos), Classe II A (Não Inerte) e Classe II B (Inerte).

⁵ Nomenclatura da química do cimento: C=CaO; S=SiO₂.

Figura 1. DRX da escória de aciaria, antes dos tratamentos térmicos. A partir da composição, foram determinados os prováveis compostos presentes em cada pico do gráfico: 1) Mn_3O_4 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$, MgCaSiO_4 , $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$, $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$; 2) FeO ; 3) FeO , Al_2O_3 , Mn_3O_4 ; 4) MgCaSiO_4 ; 5) Mn_2O_3 , $\text{Ca}_7\text{Mg}(\text{SiO}_4)_4$, Ca_2SiO_4 ; 6) MgCaSiO_4 , Ca_2SiO_4 ; 7) $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$; 8) Al_2O_3 ; 9) MgCaSiO_4 ; 10) MgCaSiO_4 ; 11) FeO ; 12) MgAl_2O_4 ; 13) MgCaSiO_4 ; 14) Al_2O_3 ; 15) MgAl_2O_4 ; 16) MgCaSiO_4 ; 17) $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$, Ca_2SiO_4 ; 18) MgCaSiO_4 , MgFe_2O_4 ; 19) MgFe_2O_4 , MgAl_2O_4 ; 20) $\text{Ca}_2\text{ZnSi}_2\text{O}_7$; 21) Al_2O_3 ; 22) MgCaSiO_4 .

A grande quantidade de picos e a elevada altura que estes apresentam indicam que a escória apresenta um alto grau de cristalinidade. Para diminuir este grau de cristalinidade, ou seja, fazer com que esta amostra apresente uma estrutura atômica mais amorfa, optou-se por um tratamento térmico. Consistiu no aquecimento da amostra a uma temperatura elevada, suficiente para ocorrer uma mudança de fase, e um resfriamento rápido. Durante o aquecimento, há um aumento da vibração atômica, fazendo com que sua estrutura se “desorganize”; ao ser submetida a um rápido resfriamento, esta estrutura não tem tempo suficiente de se “reorganizar” em

cristais, tornando-se, assim, uma estrutura amorfa, com “pontas” livres para que ocorra as reações de hidratação. Como no laboratório (LCC – SAP – EESC) havia apenas um forno em que a temperatura máxima alcançasse 1100 °C, optou-se, então, por aquecer a amostra até esta temperatura máxima e resfriá-la rapidamente, colocando-a sobre uma placa de alumínio à temperatura ambiente.

Após este tratamento, a amostra foi novamente submetida ao ensaio de DRX, para a verificação da cristalinidade após o choque térmico (Figura 2).

Figura 2. DRX da escória de aciaria, após a primeira tentativa de choque térmico, com temperatura máxima de 1100 °C. A partir da composição, foram determinados os prováveis compostos presentes em cada pico do gráfico: 1) Mn_3O_4 , Ca_2SiO_4 , $Ca_7Mg(SiO_4)_4$, $Ca_3Mg(SiO_4)_2$, $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$; 2) FeO ; 3) FeO , Al_2O_3 , Mn_3O_4 ; 5) Mn_2O_3 , $Ca_7Mg(SiO_4)_4$, Ca_2SiO_4 ; 6) Ca_2SiO_4 ; 7) $Ca_2ZnSi_2O_7$; 8) Al_2O_3 ; 9) $MgCaSiO_4$; 11) FeO ; 12) $MgAl_2O_4$; 13) $MgCaSiO_4$; 14) Al_2O_3 ; 15) $MgAl_2O_4$; 16) $MgCaSiO_4$; 17) $Ca_3Mg(SiO_4)_2$, Ca_2SiO_4 ; 18) $MgFe_2O_4$; 19) $MgFe_2O_4$, $MgAl_2O_4$; 20) $Ca_2ZnSi_2O_7$; 21) Al_2O_3 ; 22) $MgCaSiO_4$; 23) Al_2O_3 ; 24) Ca_2SiO_4 ; 25) Ca_2SiO_4 ; 26) Ca_2SiO_4 ; 27) Ca_2SiO_4 ; 28) Mn_3O_4 ; 29) Al_2O_3 ; 30) Al_2O_3 .

Pode-se observar que, com a aplicação deste primeiro choque térmico, a estrutura da escória se tornou ainda mais estável, mais cristalina, pois houve aumento na quantidade de picos e de suas intensidades. Observa-se, em particular, o aumento do grau de cristalinidade do silicato de cálcio (Ca_2SiO_4), o que torna ainda mais improvável qualquer tipo de reação de hidratação. Ou seja, a temperatura máxima a que submeteu-se a escória foi insuficiente para que ela atingisse uma mudança de fase adequada, de modo a ocorrer a quebra de suas moléculas.

O passo seguinte foi determinar a temperatura em que a escória sofria uma grande mudança de fase, ou seja, uma grande transição de estado cristalino para o estado amorfo. Uma vez nesta temperatura, a escória sofreria o choque térmico, tornando-se, então, um material amorfo, susceptível à reações químicas. Para tanto, utilizou-se o ensaio de DTA (Análise Térmica Diferencial), que avaliaria se o tratamento térmico seria viável ou não. O ensaio de DTA foi feito no IFSC, cujo resultado é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Ensaio de DTA da escória de aciaria.

Na Figura 3 pode-se observar que ocorre uma grande mudança de fase entre 1180 °C e 1300 °C. Portanto, fez-se necessário submeter a amostra a um novo choque térmico, com temperatura máxima de 1300 °C. Como o laboratório não possui um forno com esta capacidade (1300 °C), este tratamento térmico teve que ser realizado em outro local.

No entanto, tanto na USP – São Carlos, quanto na UFSCAR, não se obteve autorização de nenhum departamento para a realização deste procedimento. Como a escória é um resíduo, e que possui em sua composição diversos materiais indesejáveis, haveria o risco de se contaminar algum forno e inutilizá-lo para uso em outras pesquisas. Finalmente, após percorrer todos os laboratórios, obteve-se um

forno emprestado de uma empresa, fabricante de fornos industriais e laboratoriais. A temperatura máxima que este forno poderia atingir era de 1250 °C, mas optou-se por realizar o ensaio a esta temperatura mesmo. Após o choque térmico, a amostra foi novamente submetida à Difração de Raios-X (Figura 4).

Figura 4. DRX da escória de aciaria, após a segunda tentativa de choque térmico, com temperatura máxima de 1250 °C. A partir da composição, foram determinados os prováveis compostos presentes em cada pico do gráfico: 3) FeO, Al₂O₃, Mn₃O₄; 5) Mn₂O₃, Ca₇Mg(SiO₄)₄, Ca₂SiO₄; 6) Ca₂SiO₄; 7) Ca₂ZnSi₂O₇; 8) Al₂O₃; 9) MgCaSiO₄; 11) FeO; 12) MgAl₂O₄; 13) MgCaSiO₄; 14) Al₂O₃; 16) MgCaSiO₄; 17) Ca₃Mg(SiO₄)₂, Ca₂SiO₄; 18) MgFe₂O₄; 19) MgFe₂O₄, MgAl₂O₄; 20) Ca₂ZnSi₂O₇; 21) Al₂O₃; 23) Al₂O₃; 25) Ca₂SiO₄; 29) Al₂O₃; 30) Al₂O₃.

Com a queda considerável da cristalinidade, principalmente a do silicato de cálcio (Ca₂SiO₄), pode-se concluir, com base na bibliografia, que a escória tende a apresentar alguma atividade aglomerante. No entanto, não se dispunha de infra-estrutura suficiente (forno até 1300 °C) para dar continuidade à pesquisa. Por

isso, optou-se por dar seqüência apenas à avaliação do emprego da escória de aciaria como agregado de concreto.

Esta análise da escória, em termos de sua capacidade aglomerante, foi assim postergada a um outro momento mais oportuno, quando se possa obter equipamentos específicos para esta finalidade.

4. OBJETIVO ESPECÍFICO

Como o estudo da escória da BMP, como aglomerante, se mostrou inviável neste momento, a pesquisa continuou, com ênfase na avaliação do uso da escória como agregado de concreto de cimento Portland, substituindo totalmente os agregados convencionais (areia e brita). Este estudo foi voltado para as características mecânicas que o concreto com escória apresentaria, com base nos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade, retração por secagem e absorção de água. Para tanto, houve um estudo detalhado das características físicas da escória e dos agregados convencionais, como composição granulométrica e área de superfície, para que fosse possível efetuar-se uma substituição adequada.

5. METODOLOGIA

5.1. MATERIAIS

No programa experimental desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais para a moldagem dos corpos-de-prova:

- Cimento CP V ARI-Plus, Marca Ciminias, NBR 5733;
- Areia Natural Quartzosa ($D_{\text{máx}} = 2,4 \text{ mm}$ e $\text{MF} = 2,18$);
- Brita Basáltica nº 0 ($D_{\text{máx}} = 6,3 \text{ mm}$ e $\text{MF} = 5,41$);
- Brita Basáltica nº 1 ($D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$ e $\text{MF} = 6,80$);
- Escória de aciaria, produzida pela BMP;
- Aditivo Superplastificante Glenium 51.

5.1.1. Características Físicas dos Agregados Convencionais

Os agregados naturais foram ensaiados de forma a se obter os parâmetros necessários para efetuar-se uma adequada substituição destes pela escória no concreto, lembrando que houve a substituição total, ou seja, tanto dos agregados graúdos (britas nº 0 e 1), quanto do agregado miúdo (areia).

A substituição dos agregados convencionais pela escória, no concreto, foi feita em volume, utilizando, para isso, a massa específica real (γ) dos mesmos. O objetivo é que a escória ocupe o mesmo espaço no concreto que era ocupado pelos agregados convencionais. No entanto, além de se observar o volume ocupado, deve-se atentar à granulometria e à área superficial dos agregados.

5.1.1.1. Granulometria

A determinação da granulometria dos agregados foi feita conforme a NBR 7217/87 – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. Utilizou-se as peneiras descritas na norma, de série normal e de série intermediária (Tabela 6), além de um peneirador mecânico. As amostras de cada agregado foram peneiradas e separadas, gerando-se suas respectivas curvas granulométricas, conforme apresentado na Tabela 7 e nas Figuras 5, 6 e 7.

Tabela 6. Abertura das peneiras (NBR 7217/87).

Série Normal	Série Intermediária
76 mm	-----
-----	64 mm
-----	50 mm
38 mm	-----
-----	32 mm
-----	25 mm
19 mm	-----
-----	12,5 mm
9,5 mm	-----
-----	6,3 mm
4,8 mm	-----
2,4 mm	-----
1,2 mm	-----
0,6 mm	-----
0,3 mm	-----
0,15 mm	-----

Tabela 7. Quantidade retida acumulada de cada agregado convencional.

Abertura da Peneira (mm)	Areia (%)	Brita nº 0 (%)	Brita nº 1 (%)
25,00	-----	-----	0,0
19,00	-----	-----	0,6
12,50	-----	-----	36,0
9,50	0,0	0,0	85,6
6,30	0,2	2,2	96,0
4,80	0,3	49,5	97,1
2,40	1,7	96,1	98,3
1,20	7,0	98,0	99,1
0,60	34,9	98,8	99,5
0,30	75,6	99,3	99,7
0,15	98,8	99,5	99,8
Fundo	100,0	100,0	100,0

Figura 5: Curva granulométrica da areia ($D_{\text{máx}} = 2,40$ mm).

Figura 6: Curva granulométrica da brita n° 0 ($D_{\text{máx}} = 6,30 \text{ mm}$).

Figura 7: Curva granulométrica da brita n° 1 ($D_{\text{máx}} = 19,00 \text{ mm}$).

5.1.1.2. Área Superficial

A área superficial total do agregado é o parâmetro que determina a quantidade de água necessária para se obter a trabalhabilidade desejada do concreto no estado fresco. Uma das formas de se chegar ao valor da área superficial total é a utilização dos valores de área superficial relativa dos agregados. No entanto, esta determinação não é confiável em todos os casos, pois a utilização da área superficial relativa se mostra falha para partículas menores, principalmente para aquelas que passam pela peneira 0,15 mm. Estas partículas atuam, na maioria das vezes, como um lubrificante na mistura, e não necessitam de água da mesma forma que as partículas maiores. Para corrigir tal falha, pode-se utilizar o índice de Murdock, onde os valores de área superficial relativa são modificados por um índice de angulosidade do agregado, índice este obtido empiricamente (NEVILLE, 1982).

Os valores de área superficial relativa e os índices de superfícies de Murdock podem ser verificados na Tabela 8. Para se obter o valor da área superficial total, multiplica-se a porcentagem de massa de cada fração do agregado pelo índice desejado da fração equivalente, somando-se todos esses produtos.

Tabela 8. Valores relativos de área superficial e de índice de superfície de Murdock (NEVILLE, 1982).

Fração (mm)	Área Superficial Relativa	Índice de Superfície de Murdock
76,20 – 38,10	½	½
38,10 – 19,05	1	1
19,05 – 9,52	2	2
9,52 – 4,76	4	4
4,76 – 2,40	8	8
2,40 – 1,20	16	12
1,20 – 0,60	32	15
0,60 – 0,30	64	12
0,30 – 0,15	128	10
< 0,15	-----	1

Tabela 9. Área superficial da areia, segundo o índice de superfície de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
9,50	0,00	2	0,00
6,30	0,15	4	0,60
4,80	0,19	4	0,76
2,40	1,37	8	10,96
1,20	5,29	12	63,48
0,60	27,89	15	418,35
0,30	40,69	12	488,28
0,15	23,18	10	231,80
Fundo	1,24	1	1,24
Área Superficial Total da Areia			1215,47

Tabela 10. Área superficial da brita nº 0, segundo o índice de superfície de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
9,50	0,00	2	0,00
6,30	2,17	4	8,68
4,80	47,37	4	189,48
2,40	46,55	8	372,40
1,20	1,87	12	22,44
0,60	0,85	15	12,75
0,30	0,49	12	5,88
0,15	0,25	10	2,50
Fundo	0,46	1	0,46
Área Superficial Total da Brita nº 0			614,59

Tabela 11. Área superficial da brita nº 1, segundo o índice de superfície de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
25,00	0,00	1	0,00
19,00	0,59	1	0,59
12,50	35,37	2	70,74
9,50	49,66	2	99,32
6,30	10,34	4	41,36
4,80	1,18	4	4,72
2,40	1,18	8	9,44
1,20	0,80	12	9,60
0,60	0,36	15	5,40
0,30	0,21	12	2,52
0,15	0,11	10	1,10
Fundo	0,20	1	0,20
Área Superficial Total da Brita nº 1			244,99

5.1.1.3. Massa Específica Real e Absorção de Água

A massa específica real da areia e da brita nº 0 foram determinadas com base na NBR 9776/87 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”. Para a brita nº1, foram determinadas a massa específica real e a absorção de água, segundo a NBR 9937/87 – “Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo”. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12. Massa específica real da areia e da brita nº 0.

Agregado	Massa Específica (g/cm³)
Areia	2,67
Brita nº 0	2,79

Tabela 13. Massa específica real e absorção de água da brita nº 1.

Agregado	Massa Específica Seca (g/cm³)	Massa Específica Saturada (g/cm³)	Absorção (%)
Brita nº 1	2,84	2,88	0,98

5.1.2. Determinação dos Traços de Referência

Os traços de referência são os traços que fornecem os valores padrões para comparação posterior com os traços em estudo, com uso de escória. Portanto, os corpos-de-prova foram moldados apenas com os agregados convencionais, areia, brita nº 0 e brita nº 1, além do cimento e da água. Nestes traços, não foi usado o aditivo superplastificante.

Os traços de referência foram determinados segundo a proposta de HELENE e TERZIAN (1995) em “Manual de dosagem e controle do concreto”.

Primeiramente, foi determinada a composição ideal da britas nº 0 e 1, seguida da determinação do teor ideal de argamassa, dos traços auxiliares e, finalmente, as suas respectivas relações água/cimento.

5.1.2.1. Composição das Britas

O objetivo da composição ideal das britas nº 0 e 1 é o de obter uma mistura das mesmas, no concreto, com a menor quantidade de vazios entre elas. Esta composição foi feita com base na NBR 7810/83 – “Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária”.

Inicialmente, determinou-se a massa unitária da brita nº1. Conforme prescreve a norma, a compactação da brita foi feita em uma caixa de volume igual a 15 litros, através de 25 golpes por camada, em três camadas. No entanto, esta compactação não atenderia as condições reais que as britas sofreriam, pois, na moldagem dos corpos-de-prova, os mesmos seriam adensados em mesa vibratória. Para simular esta situação, optou-se por compactar a brita também na mesa vibratória. Isto fez com que houvesse um melhor preenchimento dos vazios entre as britas, além de evitar uma possível quebra das mesmas durante os golpes manuais. Esta compactação na mesa vibratória, denominada aqui de compactação mecânica, foi feita na mesma caixa de 15 litros, em três camadas, sendo cada camada vibrada por 30 segundos.

Os valores da massa unitária da brita nº 1, obtidos com os dois métodos apresentados, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Massa unitária em estado compactado da brita nº 1.

	Compactação Manual	Compactação Mecânica
Massa Unitária no Estado Compactado (kg/dm³)	1,63	1,69 (+ 4%)

Observando os valores da Tabela 14, pode-se concluir que a compactação mecânica se mostrou mais eficiente do que a compactação manual, pois, para o mesmo material, obteve-se uma massa unitária em torno de 4% mais elevada na compactação mecânica, consequência de um melhor preenchimento dos vazios.

A compactação das britas nº 0 e 1, para se obter a composição ideal, foi feita de forma mecânica. Esta composição consistiu em se acrescentar gradualmente na brita nº 1 uma quantidade pré-definida de brita nº 0, até se obter a maior massa unitária da mistura. A cada mistura, foi acrescentado 10% de brita nº 0 em relação à massa total da mistura. O resultado deste processo está apresentado na Tabela 15.

Tabela 15. Determinação da composição ideal entre as britas nº 0 e nº 1.

Relação Brita nº1 Brita nº0	Massa de Brita nº 1 (kg)	Acréscimo de Brita nº 0 (kg)	Massa de Brita nº 0 (kg)	Massa Total (kg)	Massa Contida na Caixa (kg)	Massa Unitária (kg/dm³)
100/0	25,35	0,00	0,00	25,35	25,35	1,69
90/10	25,35	2,82	2,82	28,17	26,15	1,74
80/20	25,35	3,52	6,34	31,69	26,60	1,77
70/30	25,35	4,52	10,86	36,21	26,75	1,78
60/40	25,35	6,04	16,90	42,25	26,40	1,76
50/50	25,35	8,45	25,35	50,70	26,20	1,75

Portanto, para se obter uma composição ideal entre as britas nº 0 e nº 1, deve-se ter uma mistura com 30% de brita nº 0 e 70% de brita nº 1.

5.1.2.2. Teor Ideal de Argamassa e Traços Auxiliares

Como proposta do método de dosagem de HELENE e TERZIAN (1995), foi utilizado um traço padrão, denominado “traço normal”, também identificado neste trabalho como “TN”; sua relação aglomerante:agregado é de 1:5,0. Também foram utilizados dois traços auxiliares, com maior e menor consumo de cimento em relação ao traço normal (TN), denominados “traço rico” (TR), com a relação de 1:3,5, e “traço pobre” (TP), com a relação de 1:6,5.

A determinação do teor ideal de argamassa no concreto é feita apenas para o traço normal, sendo que, para os traços auxiliares, o teor de argamassa não muda. Esta determinação é feita de maneira empírica e visual. Faz-se várias misturas, com diferentes teores de argamassa, até encontrar-se uma mistura que, visualmente, não possua grande quantidade de vazios e apresente boa coesão.

No caso presente, o teor ideal de argamassa, para o traço normal, foi de 50%. Este mesmo valor, conforme relatado anteriormente, também foi fixado para os traços auxiliares. O traço normal, bem como os traços auxiliares, estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Traço normal e traços auxiliares, de referência, em massa.

	Aglomerante (Cimento)	Agregado Miúdo (Areia)	Agregado Graúdo (Britas nº 0 e nº 1)
Traço Rico (TR) 1:3,5	1	1,25	2,25
Traço Normal (TN) 1:5,0	1	2,00	3,00
Traço Pobre (TP) 1:6,5	1	2,75	3,75

5.1.2.3. Determinação da Relação Água/Cimento

A relação água/cimento (a/c) foi determinada com base na consistência do concreto. Para tanto, foi utilizada a NBR 7223/82 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, com Slump fixado em 10 ± 1 cm, para todos os traços. Os traços de referência, bem como suas respectivas relações a/c, estão apresentados na Tabela 17.

As determinações das relações água/cimento são apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10.

Tabela 17. Traços de referência e relações água/cimento (a/c), em massa.

	Cimento	Areia	Brita nº 0	Brita nº 1	a/c
Traço Rico (TR) 1:3,5	1	1,250	0,675	1,575	0,45
Traço Normal (TN) 1:5,0	1	2,000	0,900	2,100	0,56
Traço Pobre (TP) 1:6,5	1	2,750	1,125	2,625	0,75

Figura 8. Determinação da relação a/c do concreto de referência com traço rico (TR REF). Slump de 10,5 cm, traço 1:3,5 e relação $a/c = 0,45$.

Figura 9. Determinação da relação a/c do concreto de referência com traço normal (TN REF). Slump de 10,0 cm, traço 1:5,0 e relação $a/c = 0,56$.

Figura 10. Determinação da relação a/c do concreto de referência com traço pobre (TP REF). Slump de 9,5 cm, traço 1:6,5 e relação a/c = 0,75.

5.1.3. Características da Escória

5.1.3.1. Granulometria

A escória, por ser um resíduo, não apresenta uma granulometria definida e tampouco é fornecida em faixas granulométricas desejáveis. Sua curva granulométrica foi determinada para o estado bruto, ou seja, *in natura*. No entanto, para maior facilidade na substituição dos agregados convencionais, a escória foi separada em faixas granulométricas, descritas a seguir:

➤ **Escória Fina:** fração de escória que passa pela peneira 2,40 mm e fica retida na peneira 0,15 mm, substituta da areia natural.

➤ **Escória Média:** fração de escória que passa pela peneira 9,50 mm e fica retida na peneira 2,40 mm, substituta da brita nº 0.

➤ **Escória Grossa:** fração de escória que passa pela peneira 19,00 mm e fica retida na peneira 9,50 mm, substituta da brita nº 1.

A separação de toda a escória usada na pesquisa foi feita no peneirador mecânico, em porções de 5 kg, agitadas por 10 minutos. As Figuras 11 até 17 mostram uma sequência de peneiramento.

Figura 11. Escória *in natura*, antes de ser separada em faixas granulométricas.

Figura 12. Escória *in natura*, sendo colocada no peneirador mecânico.

Figura 13. Escória *in natura*, no peneirador mecânico, antes de ser agitada.

Figura 14. Escória, no peneirador mecânico, após a agitação.
A fração visível representa a escória grossa, com $9,50 < \phi < 19,00$ mm.

Figura 15. Armazenamento da escória fina, com $0,15 < \phi < 2,40$ mm.

Figura 16. Armazenamento da escória média, com $2,40 < \phi < 9,50$ mm.

Figura 17. Armazenamento da escória grossa, com $9,50 < \phi < 19,00$ mm.

A determinação da granulometria da escória, tanto *in natura*, quanto depois de separação em faixas granulométricas, foi feita conforme a NBR 7217/87 – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. Suas curvas granulométricas são apresentadas na Tabela 18 e nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

Tabela 18. Quantidade retida acumulada de cada tipo de escória.

Abertura da Peneira (mm)	Escória <i>In Natura</i> (%)	Escória Fina (%)	Escoria Média (%)	Escoria Grossa (%)
19,00	0,00	-----	-----	0,00
12,50	6,20	-----	-----	37,35
9,50	16,60	-----	0,00	100,00
6,30	26,90	-----	51,50	-----
4,80	28,40	-----	59,00	-----
2,40	36,91	0,00	100,00	-----
1,20	54,86	49,01	-----	-----
0,60	62,85	70,82	-----	-----
0,30	69,60	89,24	-----	-----
0,15	73,54	100,00	-----	-----
Fundo	100,00	-----	-----	-----

Figura 18. Curva granulométrica da escória *in natura*.

Figura 19. Curva granulométrica da escória fina ($0,15 \text{ mm} < \phi < 2,40 \text{ mm}$).

Figura 20. Curva granulométrica da escória média ($2,40 \text{ mm} < \phi < 9,50 \text{ mm}$).

Figura 21. Curva granulométrica da escória grossa ($9,50 \text{ mm} < \phi < 19,00 \text{ mm}$).

Figura 22. Comparação da granulometria da escória fina com a da areia.

Figura 23. Comparação da granulometria da escória média com a da brita nº 0.

Figura 24. Comparação da granulometria da escória grossa com a da brita nº 1.

5.1.3.2. Área Superficial

Além da determinação da curva granulométrica, é importante conhecer-se a área superficial total da escória, para efetuar-se uma substituição mais adequada. Utilizando os índices de superfícies de Murdock, descritos na Tabela 8, determinaram-se as áreas superficiais de cada fração granulométrica da escória, que estão apresentadas nas Tabelas 19, 20 e 21.

Tabela 19. Área superficial da escória fina, segundo o índice de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
2,40	0,00	8	0,00
1,20	49,01	12	588,12
0,60	21,81	15	327,15
0,30	18,41	12	220,92
0,15	10,76	10	107,60
Fundo	0,00	1	0,00
Área Superficial Total da Areia			1243,79

Tabela 20. Área superficial da escória média, segundo o índice de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
9,50	0,00	2	0,00
6,30	51,50	4	206,00
4,80	7,50	4	30,00
2,40	41,00	8	328,00
1,20	0,00	12	0,00
Área Superficial Total da Brita nº 0			564,00

Tabela 21. Área superficial da escória grossa, segundo o índice de Murdock.

Abertura da Peneira (mm)	Fração Retida (%)	Índice de Superfície de Murdock	Área da Superfície de cada Fração
19,00	0,00	1	0,00
12,50	37,35	2	74,70
9,50	62,65	2	125,30
6,30	0,00	4	0,00
Área Superficial Total da Brita nº 1			200,00

Tabela 22. Comparação entre as áreas superficiais das frações granulométricas da escória com os agregados convencionais, segundo o índice de superfície de Murdock.

Agregados Convencionais		Frações de Escória	
Areia	1215,47	Escória Fina	1243,79
Brita nº 0	614,59	Escória Média	564,00
Brita nº 1	244,99	Escória Grossa	200,00

5.1.3.3. Massa Específica Real e Absorção de Água

A massa específica real foi o parâmetro utilizado para se efetuar a substituição total dos agregados convencionais pela escória. Foi determinada para cada uma das frações granulométricas da escória individualmente, com base na NBR 9776/87 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”, para as frações fina e média, e segundo a NBR 9937/87 – “Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo”, para a fração grossa de escória, que também teve determinada sua absorção de água. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23. Massa específica real das frações granulométricas da escória fina e média.

Fração de Escória	Massa Específica (g/cm ³)
Escória Fina	3,16
Escória Média	3,32

Tabela 24. Massa específica real e absorção de água da escória grossa.

Fração de Escória	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Massa Específica Saturada (g/cm ³)	Absorção (%)
Escória Grossa	3,27	3,32	1,60

5.1.4. Determinação dos Traços com Escória

O objetivo deste estudo foi o de analisar o comportamento da escória como substituta dos agregados convencionais; para isto, foi importante manter igual o volume ocupado pelos agregados na mistura, em ambos os casos. A substituição de cada agregado convencional foi feita pela escolha de uma fração de escória:

- **Areia** → Escória Fina ($0,15 \text{ mm} < \phi < 2,40 \text{ mm}$).
- **Brita nº 0** → Escória Média ($2,40 \text{ mm} < \phi < 9,50 \text{ mm}$).
- **Brita nº 1** → Escória Grossa ($9,50 \text{ mm} < \phi < 19,00 \text{ mm}$).

Esta substituição só foi possível devido à proximidade entre as áreas superficiais totais de cada uma das faixas granulométricas dos agregados convencionais, com sua fração de escória correspondente, conforme visto na Tabela 22.

Esta determinação de traços não levou em conta a composição ideal de agregados graúdos, o teor ideal de argamassa ou a relação aglomerante:agregado. Foi feita simplesmente substituindo-se o volume de cada agregado convencional, presente em cada traço, pelo mesmo volume de escória, na fração granulométrica correspondente. Para tanto, foram utilizados os traços apresentados na Tabela 17, bem como as massas específicas reais dos agregados convencionais e das frações de escória, presentes nas Tabelas 12, 13, 23 e 24. As substituições de cada agregado convencional estão descritas nas Tabelas 25, 26 e 27.

Tabela 25. Substituição da areia pela escória fina.

	Traço Rico (TR) 1:3,5	Traço Normal (TN) 1:5,0	Traço Pobre (TP) 1:6,5
Massa de Areia (g)	1,250	2,000	2,750
Massa Específica Real da Areia (g/cm³)	2,67		
Volume de Areia (cm³) = Volume de Escória Fina (cm³)	0,4682	0,7491	1,0300
Massa Específica Real da Escória Fina (g/cm³)	3,16		
Massa de Escória Fina (g)	1,480	2,367	3,255

Tabela 26. Substituição da brita nº 0 pela escória média.

	Traço Rico (TR) 1:3,5	Traço Normal (TN) 1:5,0	Traço Pobre (TP) 1:6,5
Massa de Brita nº 0 (g)	0,675	0,900	1,125
Massa Específica Real da Brita nº 0 (g/cm³)	2,88		
Volume de Brita nº 0 (cm³) = Volume de Escória Média (cm³)	0,2344	0,3125	0,3906
Massa Específica Real da Escória Média (g/cm³)	3,48		
Massa de Escória Média (g)	0,816	1,088	1,359

Tabela 27. Substituição da brita nº 1 pela escória grossa.

	Traço Rico (TR) 1:3,5	Traço Normal (TN) 1:5,0	Traço Pobre (TP) 1:6,5
Massa de Brita nº 1 (g)	1,575	2,100	2,625
Massa Específica Real da Brita nº 1 (g/cm³)	2,94		
Volume de Brita nº 1 (cm³) = Volume de Escória Grossa (cm³)	0,5357	0,7143	0,8929
Massa Específica Real da Escória Grossa (g/cm³)	3,48		
Massa de Escória Grossa (g)	1,864	2,486	3,107

Outro fator a ser determinado seria a relação água/cimento (*a/c*). No entanto, o objetivo deste estudo foi o de avaliar o comportamento mecânico da escória como agregado, e, portanto, outras características mecânicas do concreto não poderiam ser alteradas. Mas a relação água/cimento é um fator que interfere diretamente nas propriedades do concreto, pois quanto menor for a relação *a/c*, maior será a resistência do concreto em questão, e vice-versa.

Portanto, se fosse alterada a relação *a/c*, a resistência da pasta de cimento que envolve os agregados (no caso, a escória) também seria alterada, mascarando, assim, os resultados finais.

A escória, porém, possui uma superfície irregular, coberta por orifícios e pontas, que adsorvem uma maior quantidade de água do que os agregados convencionais, que possuem superfície mais lisa. E isso interferiu diretamente na trabalhabilidade do concreto com escória. Optou-se, portanto, pelo uso de um aditivo superplastificante (Glenium 51), que teria a função de dar a trabalhabilidade desejada

ao concreto com escória, mantendo-se, porém, a mesma relação a/c utilizada nos traços de referência.

A determinação da quantidade de aditivo utilizada, para cada traço, foi feita com base na NBR 7223/82 – “Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, com Slump fixo de 10 ± 1 cm, adotando-se o mesmo critério utilizado nos traços de referência. Os traços finais dos concretos com escória são apresentados na Tabela 28, onde a quantidade de aditivo superplastificante é dada em relação à massa de cimento, e, além disso, descontada da massa de água, mantendo-se, portanto, a mesma relação a/c.

As determinações das quantidades de aditivo superplastificante são apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27.

Tabela 28. Traços do concreto com escória, em massa, onde a quantidade de aditivo é dada em relação à quantidade, em massa, de cimento.

	Cimento	Escória Fina	Escória Média	Escória Grossa	Relação a/c	Aditivo (%)
Traço Rico (TR) 1:3,5	1	1,480	0,816	1,864	0,45	0,70
Traço Normal (TN) 1:5,0	1	2,367	1,088	2,486	0,56	0,80
Traço Pobre (TP) 1:6,5	1	3,255	1,359	3,107	0,75	0,55

Figura 25. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto de traço rico com escória (TR ESC). Slump de 9,5 cm, traço 1:3,5 e relação $a/c = 0,45$.

Figura 26. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto de traço normal com escória (TN ESC). Slump de 11,0 cm, traço 1:5,0 e relação $a/c = 0,56$.

Figura 27. Determinação da quantidade de aditivo superplastificante para o concreto de traço pobre com escória (TP ESC). Slump de 9,0 cm, traço 1:6,5 e relação a/c = 0,75.

5.1.5. Consumo de Cimento

O consumo de cimento, por metro cúbico, é dado pela fórmula:

$$C = \frac{1000}{0,32 + \sum (M_{\text{agregado}} / \gamma_{\text{agregado}}) + X}$$

Onde:

C: consumo de cimento, em kg/m³;

M_{agregado}: massa de cada agregado no traço correspondente, em kg;

γ_{agregado}: massa específica real do agregado correspondente, em kg/dm³;

X: relação a/c do traço correspondente, em kg.

Como era esperado, o consumo de cimento foi o mesmo nos casos de uso de agregado convencional ou de escória, devido ao mesmo volume ocupado pelos agregados. Seus valores podem ser observados nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29. Consumo de cimento nos traços de referência.

Massa Específica Real da Areia (kg/dm³)		2,67	
Massa Específica Real da Brita nº 0 (kg/dm³)		2,88	
Massa Específica Real da Brita nº 1 (kg/dm³)		2,94	
Traço	Traço Rico (TR) 1:3,5	Traço Normal (TN) 1:5,0	Traço Pobre (TP) 1:6,5
Massa de Areia (kg)	1,250	2,000	2,750
Massa de Brita nº 0 (kg)	0,675	0,900	1,125
Massa de Brita nº 1 (kg)	1,575	2,100	2,625
Relação a/c	0,45	0,56	0,75
Consumo de Cimento (kg/m³)	498	377	296

Tabela 30. Consumo de cimento nos traços com escória.

Massa Específica Real da Escória Fina (kg/dm³)		3,16	
Massa Específica Real da Escória Média (kg/dm³)		3,48	
Massa Específica Real da Escória Grossa (kg/dm³)		3,48	
Traço	Traço Rico (TR) 1:3,5	Traço Normal (TN) 1:5,0	Traço Pobre (TP) 1:6,5
Massa de Escória Fina (kg)	1,480	2,367	3,255
Massa de Escória Média (kg)	0,816	1,088	1,359
Massa de Escória Grossa (kg)	1,864	2,486	3,107
Relação a/c	0,45	0,56	0,75
Consumo de Cimento (kg/m³)	498	377	296

5.2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa foram investigadas algumas propriedades mecânicas do concreto com escória, bem como do concreto de referência, no estado endurecido.

As propriedades mecânicas analisadas foram:

- Resistência à compressão (28 e 90 dias);
- Resistência à tração na flexão (28 e 90 dias);
- Módulo de elasticidade (28 e 90 dias);
- Retração por secagem;
- Absorção de água.

O resumo dos traços ensaiados e a quantidade de amostras utilizadas em cada ensaio encontram-se nas Figuras 28 e 29, respectivamente. Nas figuras 30 a 37 apresenta-se uma seqüência de moldagem.

Figura 28. Resumo dos traços de concreto investigados.

Figura 29. Quantidade de amostras utilizadas em cada ensaio.

Figura 30. Mistura do concreto, em betoneira, para moldagens dos corpos-de-prova.

Figura 31. Concreto fresco, antes da moldagem dos corpos-de-prova.

Figura 32. Moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm.

Figura 33. Adensamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm, em mesa vibratória.

Figura 34. Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35 cm.

Figura 35. Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35 cm, em mesa vibratória.

Figura 36. Moldagem dos corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, em mesa vibratória.

Figura 37. Adensamento dos corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, em mesa vibratória.

5.2.1. Resistência à Compressão

Foram moldados 6 corpos-de-prova por idade, para cada um dos traços, totalizando 12 corpos-de-prova por traço. O ensaio se baseou na NBR 5739/94 – “Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”. Foram utilizadas formas cilíndricas, de 10 x 20 cm. Após o desmolde, todos os corpos-de-prova foram capeados com pasta de cimento e mantidos em câmara úmida, até a idade de ruptura. As Figuras 38 e 39 mostram o ensaio de um dos corpos-de-prova.

Figura 38. Ensaio de Resistência à Compressão de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm.

Figura 39. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm, durante o ensaio de Resistência à Compressão.

5.2.2. Resistência à Tração na Flexão

As formas utilizadas foram confeccionadas no laboratório, em MDF revestida com fórmica, para a moldagem de corpos-de-prova prismáticos de 10 x 10 x 35 cm. Para cada um dos traços, foram moldados 4 corpos-de-prova por idade, totalizando 8 corpos-de-prova por traço. O ensaio seguiu o procedimento da NBR 12142/91 – “Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos”. Os corpos-de-prova, depois de desmoldados, foram mantidos em câmara úmida, até a idade de ruptura. As Figuras 40, 41 e 42 mostram o ensaio de um dos corpos-de-prova.

Figura 40. Ensaio de Resistência à Tração na Flexão de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm.

Figura 41. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm, durante o ensaio de Resistência à Tração na Flexão.

Figura 42. Ruptura de um corpo-de-prova prismático de 10 x 10 x 35 cm, durante o ensaio de Resistência à Tração na Flexão.

5.2.3. Módulo de Elasticidade

O ensaio se baseou na NBR 8522 – “Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação”. Foram utilizadas formas cilíndricas, de 10 x 20 cm, sendo moldados 4 corpos-de-prova por idade, para cada um dos traços, totalizando 8 corpos-de-prova por traço, que, após o desmolde, foram capeados com pasta de cimento e mantidos em câmara úmida, até a idade de ensaio. As Figuras 43 e 44 mostram o ensaio de um dos corpos-de-prova.

Figura 43. Ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm.

Figura 44. Detalhe do posicionamento de um corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm, durante o ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade.

5.2.4. Retração por Secagem

Para a realização deste ensaio, utilizou-se a norma ASTM C 490 (1997). No entanto, foram moldados corpos-de-prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm, devido ao tipo de equipamento disponível no laboratório. Para cada traço, foram moldados 3 corpos-de-prova. O relógio comparador, utilizado no ensaio, apresenta sensibilidade de 0,001 mm. A desmoldagem ocorreu 24 horas após a colocação da água de amassamento, realizando-se, então, a primeira medição. Em seguida, os corpos-de-prova foram levados à cura por imersão, à temperatura de 23 °C, até os 7 dias. Nesta idade, e os corpos-de-prova foram levados à sala climatizada ($T = 23\text{ °C}$ e U.R. = 50%), onde houve a segunda medição (aos 7 dias). As medições seguintes foram feitas aos 14, 21, 28, 56, 112 e 224 dias.

5.2.5. Absorção de Água

Este ensaio foi feito seguindo a NBR 9778/87 – “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica”. No entanto, não foram moldados corpos-de-prova para este ensaio; foram utilizadas amostras rompidas no ensaio de resistência à tração na flexão, tendo sido selecionadas 3 amostras de cada traço para a determinação da absorção de água.

Esta alternativa visou, além de uma economia de materiais, a eliminação do efeito “parede” que surge no contato do corpo-de-prova com a forma. Este efeito “parede” foi anulado devido à presença de uma face rompida.

6. RESULTADOS

6.1. IDENTIFICAÇÃO DOS TRAÇOS

Os traços são identificados da seguinte forma:

- **TR REF:** Traço rico (1:3,5) do concreto de referência;
- **TR ESC:** Traço rico (1:3,5) do concreto com escória;
- **TN REF:** Traço normal (1:5,0) do concreto de referência;
- **TN ESC:** Traço normal (1:5,0) do concreto com escória;
- **TP REF:** Traço pobre (1:6,5) do concreto de referência;
- **TP ESC:** Traço pobre (1:6,5) do concreto com escória;

6.2. ENSAIOS MECÂNICOS

Os resultados dos ensaios mecânicos, ou seja, Resistência à Compressão, Resistência à Tração na Flexão e Módulo de Elasticidade, estão apresentados na Tabela 31 e nas Figuras 45, 46 e 47. Na Tabela 32, pode-se observar a porcentagem de aumento ou decréscimo das resistências dos concretos com escória, em relação ao concreto de referência.

Tabela 31. Resultados dos ensaios mecânicos, nas idades de 28 e 90 dias.

Traços	Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à Tração na Flexão (MPa)		Módulo de Elasticidade (GPa)	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
TR REF	52,45	60,85	4,43	4,55	39,83	42,89
DP	2,69	1,43	0,22	0,18	0,78	1,33
TR ESC	48,76	56,26	5,31	4,96	40,49	43,29
DP	1,98	3,35	0,17	0,33	0,93	1,00
TN REF	43,42	46,05	3,83	4,57	34,88	35,54
DP	1,42	0,37	0,15	0,20	0,86	1,35
TN ESC	39,85	44,50	5,07	4,45	31,90	36,06
DP	1,92	1,80	0,03	0,25	0,61	0,82
TP REF	23,74	25,42	2,79	3,20	30,40	31,20
DP	0,76	0,96	0,11	0,17	0,45	0,91
TP ESC	29,47	33,22	3,41	3,08	27,26	31,46
DP	0,92	1,40	0,15	0,17	0,63	1,23

DP: Desvio Padrão. A análise estatística completa dos resultados encontra-se no Anexo C.

Tabela 32. Comparação dos resultados obtidos com o concreto de escória e de referência. A tabela apresenta a porcentagem* de aumento ou de decréscimo do concreto de escória em relação ao concreto de referência.

Traços	Resistência à Compressão		Resistência à Tração na Flexão		Módulo de Elasticidade	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
TR (%)	-7,04	-7,54	19,86	9,01	1,65	0,92
TN (%)	-8,22	-3,37	32,38	-2,63	-8,54	1,46
TP (%)	24,14	30,68	22,22	-3,75	-10,33	0,86

* Valores positivos indicam aumento de resistência, enquanto valores negativos indicam queda na resistência.

Figura 45. Resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão.

Figura 46. Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração na flexão.

Figura 47. Resultados do ensaio de determinação do módulo de elasticidade.

6.3. ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

Os resultados do ensaio de Retração por Secagem estão apresentados na Tabela 33 e na Figura 48.

Tabela 33. Resultados do ensaio de retração * por secagem.

Idade (dias)	TR REF	TR ESC	TN REF	TN ESC	TP REF	TP ESC
	Expansão ($\times 10^{-6}$ mm/mm)					
1	0	0	0	0	0	0
7	- 244	+ 37	- 170	+ 164	+ 127	- 59
14	- 17	+ 237	+ 26	+ 345	+ 315	+ 182
21	+ 116	+ 354	+ 142	+ 452	+ 424	+ 322
28	+ 210	+ 437	+ 223	+ 527	+ 502	+ 422
56	+ 436	+ 636	+ 420	+ 709	+ 689	+ 663
112	+ 663	+ 836	+ 617	+ 890	+ 876	+ 903
224	+ 890	+ 1036	+ 814	+ 1072	+ 1063	+ 1144

* Valores positivos indicam expansão, enquanto valores negativos indicam retração.

Figura 48. Resultados do ensaio de retração por secagem. Valores positivos indicam expansão, enquanto valores negativos indicam retração.

6.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO

Neste ensaio foram determinados a absorção de água, o índice de vazios, a massa específica real do corpo-de-prova seco e a massa específica real do corpo-de-prova saturado, e seus valores são apresentados na Tabela 34 e nas Figuras 49 e 50.

Tabela 34. Resultados dos ensaios de absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real seca e saturada.

Traços	Absorção por Imersão (%)	Índice de Vazios (%)	γ_{seca} (g/cm ³)	γ_{sat} (g/cm ³)
TR REF	5,81	13,62	2,34	2,48
TR ESC	6,28	15,93	2,54	2,70
TN REF	6,21	14,41	2,32	2,47
TN ESC	5,63	14,39	2,55	2,70
TP REF	6,85	15,60	2,28	2,43
TP ESC	6,47	16,55	2,56	2,72

Figura 49. Resultados do ensaio de absorção por imersão e índice de vazios.

Figura 50. Resultados do ensaio de massa específica real do corpo-de-prova seco e do corpo-de-prova saturado.

6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme análise estatística (Anexo C), realizada com os resultados do Ensaio de Compressão, do Ensaio de Tração na Flexão e do Módulo de Elasticidade, pode-se afirmar que não existe diferença entre os ensaios mecânicos realizados com o concreto feito com agregado convencional e o concreto feito com escória. Ou seja, estatisticamente, os agregados possuem o mesmo desempenho no concreto.

Isso pode ser observado na Tabela 32, onde o concreto com o uso de escória como agregado apresenta uma queda de resistência máxima, aos 90 dias, de 7,54% no ensaio de Resistência à Compressão. Nos demais ensaios mecânicos, esta queda, aos 90 dias, é insignificante.

Ainda no ensaio de Resistência à Compressão, pode-se observar que o concreto de traço pobre com escória obteve uma resistência média 30,68% superior ao concreto de referência, também com traço pobre. Este fato pode ter ocorrido devido à alta absorção de água que a escória possui, comparada ao agregado convencional, e, paralelamente, ao alto teor de escória existente neste traço de concreto. Durante a moldagem e cura, a possível absorção excessiva da água, pela escória, pode ter diminuído a relação a/c deste concreto na zona de transição da pasta com o agregado, elevando, assim, sua resistência mecânica.

No ensaio de Resistência à Tração na Flexão, aos 28 dias, o concreto com escória apresentou resistência superior do que o concreto de referência, chegando a 32,38% no traço normal. Este aumento de resistência pode ocorrer devido à superfície rugosa e porosa que a escória apresenta, que estaria servido de “ancoragem”, tornando o concreto mais resistente à tração nas primeiras idades. No entanto, o decréscimo da resistência à tração do concreto com escória aos 90 dias deve ser investigado a nível microestrutural, pois existe a possibilidade das reações químicas, de caráter expansivo, prejudicarem a aderência da pasta com o agregado de escória.

Os resultados do Módulo de Elasticidade, tanto no concreto de escória, quanto no concreto de referência, foram, aos 90 dias, equivalentes.

Quanto ao ensaio de Absorção, os corpos-de-prova moldados com escória nos traços rico (TR) e pobre (TP) possuem uma absorção de água maior do

que os concretos com agregados convencionais. O mesmo fato não ocorre com o concreto de traço normal (TN), onde o concreto com escória se mostrou menos absorvente do que o concreto com agregado convencional. Isto pode ter ocorrido devido à elevada absorção do próprio agregado de escória, que diminui a quantidade de água no concreto, sua percolação, e, conseqüentemente, a quantidade de capilares formada, tornando este concreto mais impermeável.

No ensaio de Retração por Secagem, pode-se observar uma expansão maior dos corpos-de-prova moldados com escória do que os corpos-de-prova moldados com agregado convencional, conforme ilustrado na Figura 48 e na análise estatística do Anexo C. Esta característica expansiva, própria da escória de aciaria, deve ser estudada por um período de tempo maior, de preferência com ensaios acelerados, para que se tenha uma melhor avaliação da expansão que o concreto com este tipo de agregado pode sofrer. Esta expansão, que ocorre a longo prazo, ocorre, segundo a bibliografia, devido à presença de óxidos de magnésio. Infelizmente, pelo fato do forno de aciaria ser revestido com refratário à base deste óxido, o magnésio sempre estará presente na escória, tornando-a expansiva.

Por último, pode-se observar, na Tabela 18, a grande quantidade de partículas finas, com $\phi < 0,15$ mm, que compõem a escória, totalizando quase 27% da massa da escória que foi utilizada. No entanto, estas partículas não são utilizáveis como agregado, devido às restrições da NBR 7217, e ainda representam, para a sociedade, um resíduo sem aproveitamento.

7. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a escória de aciaria elétrica, objeto deste estudo, possui potencial para ser utilizada como agregado de concreto de cimento Portland, em substituição total dos agregados convencionais (areia e brita), em obras que não sejam de responsabilidade e em concretos não-estruturais.

No entanto, é necessária uma investigação mais detalhada, principalmente quanto a aspectos de longo prazo, como expansão, reações álcali-agregado, fluência, durabilidade, etc., além de uma avaliação da microestrutura do concreto à base de escória. Também seria interessante a avaliação dos corpos-de-prova, moldados com escória, quanto aos aspectos de lixiviação e de solubilização, classificando-os de acordo com a NBR 10004.

Além disso, deve-se fazer um estudo preliminar da escória, de acordo com o lote de sucata reciclado, para garantir que a escória a ser utilizada possua uma composição o mais próxima possível da escória utilizada neste trabalho.

7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, o estudo deste tipo de agregado merece continuidade. As sugestões para trabalhos futuros seriam:

- Retração por secagem;
- Fluência;
- Análise microestrutural;
- Análise de expansão a longo prazo, com ensaios acelerados;
- Análise da existência de reação álcali-agregado;
- Durabilidade – ensaios acelerados de intempéries;
- Avaliação de propriedades aglomerantes da escória, após choque térmico;
- Utilização dos finos da escória (partículas com $\phi < 0,15$ mm) como filer,

em adição ao cimento Portland.

ANEXO A

BOLETIM DE ANÁLISE Nº 07271/04
Proposta Nº 2004003836-27

Realizado por:
 Bioagri Ambiental Ltda.
 Rua Aujovil Martini, 201 – Bairro Dois Córregos
 Piracicaba / SP

DADOS REFERENTES AO CLIENTE	
Empresa solicitante:	BMP Siderúrgica S/A
Endereço:	Av. Marechal Castel Branco, 101 – Piracicaba / SP
Nome do solicitante:	Sandra Nogueira

DADOS REFERENTES A AMOSTRA			
Identificação da Bioagri:		19712/04	
Identificação do cliente:		Escória	
Amostra rotulada como:		Resíduo	
Coletor: Edson – Bioagri Ambiental		Data Coleta: 02.08.04	Hora coleta: 15:08
Data da entrada no laboratório: 03.08.04		Data elaboração B.A.: 13.08.04	

Resultados Analíticos: Composição Centesimal

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados Analíticos da Amostra: 19712/04
Resultados expressos sobre as Amostras Base Úmida			
Cinzas	% (p/p)	0,05	94,2
Umidade	% (p/p)	0,05	0,69
Fósforo	mg/kg	0,5	257
Nitratos	mg/kg	0,5	1,30
Sulfatos	mg/kg	0,5	60,5
Resultados expressos sobre as Amostras Base Seca			
Alumínio (Al ₂ O ₃)	mg/kg	0,5	6430
Arsênio (As)	mg/kg	0,5	< 0,5
Antimônio (Sb)	mg/kg	0,5	15,3
Bário (BaO)	mg/kg	0,5	410
Bismuto	mg/kg	0,5	< 0,5
Cálcio (CaO)	mg/kg	0,5	39242
Cádmio (Cd)	mg/kg	0,5	< 0,5
Chumbo (Pb)	mg/kg	0,5	33,2
Cromo Total (Cr)	mg/kg	0,5	670
Cobre (CuO)	mg/kg	0,5	75,2
Cobalto (Co)	mg/kg	0,5	0,87
Estanho (Sn)	mg/kg	0,5	< 0,5
Ferro (Fe ₂ O ₃)	% (p/p)	0,005	7,60
Manganês (MnO)	mg/kg	0,5	8649
Magnésio (MgO)	mg/kg	0,5	23973
Mercúrio (Hg)	mg/kg	0,5	< 0,5
Níquel (Ni)	mg/kg	0,5	7,78

Resultados Analíticos (cont): Composição Centesimal

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados Analíticos da Amostra: 19712/04
Potássio (K ₂ O)	mg/kg	0,5	522
Sílica + Insolúveis	% (p/p)	0,005	78,6
Selênio (Se)	mg/kg	0,5	< 0,5
Sódio (Na ₂ O)	mg/kg	0,5	128
Titânio (Ti)	mg/kg	0,5	877
Tálio (Tl)	mg/kg	0,5	< 0,5
Telúrio (Te)	mg/kg	0,5	< 0,5
Vanádio (V)	mg/kg	0,5	82,3
Zinco (ZnO)	mg/kg	0,5	40,5

LQ: Limite de Quantificação.

Nota 1: O(s) resultado(s) refere(m)-se somente à(s) amostra(s) analisada(s). Este Boletim de Análise só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

Nota 2: **Data de realização das análises**
A Bioagri Ambiental garante que todas análises foram executadas dentro do prazo de validade de cada parâmetro segundo o Guia de Coleta e Preservação e Amostra SQB 008 da Bioagri Ambiental, e condições descritas na proposta comercial referente a este trabalho. Todas estas datas constam nos dados brutos das análises e estão à disposição para serem solicitadas a qualquer momento pelo interessado.

Nota 3: **Plano de Amostragem (Coleta Bioagri)**
Local da Coleta: Belgo Mineira – Piracicaba / SP
Tipo de Amostra: Pontual
Ocorrência de chuva nas últimas 24 h: Não

Referências Metodológicas:

Metais (Solo): USEPA 3050 B – Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils
USEPA 6010 B – Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry
Ânions: EPA Method 300.1 – Determination of Inorganics Anions in Drinking Water by Íon Chromatography
Sódio: SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method
Potássio: SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method

ANEXO B

BOLETIM DE ANÁLISE Nº 5000882-A
OS: 2005001418-27

DADOS REFERENTES AO CLIENTE	
Empresa solicitante:	BMP Siderúrgica S/A
Endereço:	Av. Marechal Castel Branco, 101 – Vila Rezende – Piracicaba / SP
Nome do solicitante:	Sandra Nogueira

ESCÓRIA

Amostra Nº 05003569-40

Análise Solicitada: Caracterização de Resíduo segundo NBR 10004

Realizado por:
Bioagri Ambiental Ltda.
Rua Aujovil Martini, 201 – Bairro Dois Córregos
Piracicaba / SP

Data de Entrada no Laboratório:

03.02.05

Data de Conclusão:

02.03.05

Informações Gerais:

- **Identificação da Amostra:** Resíduo (Escória)
- **Coletor:** João Carlos – Bioagri Ambiental Ltda.
A amostragem foi realizada com base na NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduo Sólidos
- **Data / Hora da Coleta:** 02.02.04 / 17:10 h
- **Metodologia:** As metodologias utilizadas pela BIOAGRI foram baseadas “SW 846 (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC” e as referências:
Norma NBR 10004:2004 da ABNT – Classificação de Resíduos Sólidos
Norma NBR 10005:2004 da ABNT – Ensaio de Lixiviação
Norma NBR 10006:2004 da ABNT – Ensaio de Solubilização

Norma NBR 12988 da ABNT – Líquidos Livres

As determinações sobre os extratos do Solubilizado e Lixiviado foram realizadas com base nos seguintes métodos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 20th Edition – 1998:

VOC's:	USEPA SW 846 – 8260B Volatile Organic Compounds by Gas Chromatography / Mass Spectrometry (GC / MS)
	USEPA SW 846 – 5021 Volatile Organic Compounds in Soils and Other Solid Matrices Using Equilibrium Headspace Analysis
SVOC's	USEPA SW 846 – 8270C Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography / Mass Spectrometry (GC/MS)
	SMEWW 6410 B – Extration Liquid / Liquid – GC / MS
Ânions:	EPA Method 300.1 – Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Íon Chromatography
Sódio:	SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method
Metais:	SMEWW 3120 B – Inductively Coupled Plasma (ICP) Method
Mercúrio:	SMEWW 3112 B – Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method
Cianetos:	SMEWW 4500 – CN ⁻ – C – Total Cyanide after Distillation
	SMEWW 4500 – CN ⁻ – F – Cyanide-Selective Electrode Method
Fenóis Totais:	USEPA SW 846 – 9065 – Phenolics (Spectrophotometric, Manual 4-AAP with Distillation)
pH:	SMEWW 4500 – H ⁺ – B – Electrometric Method
Sólidos:	SMEWW 2540 – B – Total Solids Dried at 103 – 105°C
Sulfeto:	SMEWW 4500 – S ²⁻ – F – Iodometric Method
Surfactantes:	SMEWW 5540 – C – Anionic Surfactants as MBAS

Resultados Analíticos da Amostra de Escória (05003569-40):

Tabela 1. Determinações sobre a massa bruta

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Umidade	% (p/p)	0,1	0,66	
Inflamabilidade^a				
Ponto de Fulgor	°C		> 100	60 ^d
Corrosividade^b				
pH (suspensão a 50%)			9,6	2,0 – 12,5
Reatividade^c			não reativo	não reativo
Cianeto (como HCN)	mg/kg	10	< 10	250
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	10	< 10	500

(a) = Para a avaliação da Inflamabilidade foi monitorado o item “a” do tópico 4.2.1.1 da NBR 10004:2004

(b) = Para a avaliação da Corrosividade foi monitorado o item “a” do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Para a avaliação da Reatividade foram monitorados os itens “a”, “b”, “c”, e “e” do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004

(d) = Valor Máximo para Resíduos Líquidos

**Tabela 2. Determinações sobre o lixiviado obtido de acordo com
NBR 10005:2004**

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Porcentagem de Sólidos	% (p/p)	0,1	99,3	
pH Final			4,8	
Tempo Total de Lixiviação (h)			18	18 + 2
Inorgânicos				
Arsênio	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Bário	mg/L	0,1	0,12	70,0
Cádmio	mg/L	0,05	< 0,05	0,5
Chumbo	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Cromo Total	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Fluoreto	mg/L	1,0	< 1,0	150,0
Mercúrio	mg/L	0,05	< 0,05	0,1
Prata	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Selênio	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Pesticidas				
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,001	< 0,001	0,003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,005	< 0,005	0,02
DDT (p,p'DDT + p,p'DDD + p,p'DDE)	mg/L	0,01	< 0,01	0,2
2,4 – D	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
Endrin	mg/L	0,01	< 0,01	0,06
Heptacloro e Epóxido	mg/L	0,001	< 0,001	0,003
Lindano	mg/L	0,05	< 0,05	0,2
Metoxicloro	mg/L	0,05	< 0,05	2,0
Pentaclorofenol	mg/L	0,05	< 0,05	0,9
Toxafeno	mg/L	0,05	< 0,05	0,5
2,4,5 – T	mg/L	0,05	< 0,05	0,2
2,4,5 – TP	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Outros Orgânicos				
Benzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Benzeno (a) pireno	mg/L	0,01	< 0,01	0,07
Cloreto de Vinila	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	100
Clorofórmio	mg/L	0,01	< 0,01	6,0
o-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
m-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
p-Cresol	mg/L	1,0	< 1,0	200,0
1,4 – Diclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	7,5
1,2 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
1,1 – Dicloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
2,4 – Dinitrotolueno	mg/L	0,01	< 0,01	0,13
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,01	< 0,01	3,0
Metiletilcetona	mg/L	50,0	< 50,0	200,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	2,0

**Tabela 2 (cont). Determinações sobre o lixiviado obtido de acordo com
NBR 10005:2004**

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Piridina	mg/L	5,0	< 5,0	5,0
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,01	< 0,01	0,2
Tetracloroeteno	mg/L	0,01	< 0,01	4,0
Tricloeteno	mg/L	0,01	< 0,01	7,0
2,4,5 – Triclorofenol	mg/L	0,1	< 0,1	400,0
2,4,6 – Triclorofenol	mg/L	0,1	< 0,1	20,0

**Tabela 3. Determinações sobre o solubilizado obtido de acordo com
NBR 10006:2004**

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
pH final			10,6	
Inorgânicos				
Alumínio	mg/L	0,05	0,05	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,1	0,20	0,7
Cádmio	mg/L	0,005	< 0,005	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	1,0	< 1,0	250,0
Cobre	mg/L	0,05	< 0,05	2,0
Cromo Total	mg/L	0,05	< 0,05	0,05
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,01	0,01
Ferro	mg/L	0,05	0,15	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	0,37	1,5
Manganês	mg/L	0,05	< 0,05	0,1
Mercurio	mg/L	0,001	< 0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	< 0,1	10,0
Prata	mg/L	0,05	< 0,05	0,05
Selênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Sódio	mg/L	0,1	1,30	200,0
Sulfato (como SO ₄)	mg/L	1,0	6,26	250,0
Surfactantes	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,05	< 0,05	5,0
Orgânicas				
Aldrin e Diedrin	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Clordano (Isômeros)	mg/L	0,0002	< 0,0002	0,0002
2,4-D	mg/L	0,001	< 0,001	0,03
DDT (Isômeros)	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0006
Heptaclororo e Epóxidos	mg/L	0,00003	< 0,00003	0,00003
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,001
Lindano (γ-BHC)	mg/L	0,001	< 0,001	0,002

Tabela 3 (cont). Determinações sobre o solubilizado obtido de acordo com NBR 10006:2004

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Metoxicloro	mg/L	0,005	< 0,005	0,02
Toxafeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	0,03

LQ: Limite de Quantificação

VMP: Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004

Nota 1: Os resultados referem-se somente à amostra analisada.
Este Boletim Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.
Este Boletim Analítico cancela e substitui o de N° 5000882.

Nota 2: **Interpretação dos Resultados:**

Solubilizado: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N° 8 da ABNT NBR 10004.

Lixiviado: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N° 7 da ABNT NBR 10004.

Em relação aos parâmetros monitorados, a amostra de resíduo identificada como “Resíduo de Escória”, deve ser considerado como de Classe II – B – Inerte. Salientamos, porém que a disposição desse resíduo deverá ser recomendada pelo órgão de controle ambiental. Para a interpretação dos dados obtidos para Lixiviado e Solubilizado, foram consultadas os anexos “F” e “G” da Norma ABNT NBR 10004:2004.

Boletim Analítico revisado em 18.03.05

ANEXO C

ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados dos ensaios foi feita com a ferramenta ANOVA. Com ela, foi possível identificar se existiu alguma diferença estatística entre os resultados obtidos pelo concreto à base de agregado convencional e pelo concreto à base de escória. Esta ferramenta não leva em conta apenas as médias dos resultados, e sim o valor de cada uma das amostras ensaiadas. A análise foi feita para os ensaios de Resistência à Compressão, de Resistência à Tração na Flexão, de Módulo de Elasticidade e de Retração por Secagem.

Para que não haja diferença estatística entre o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC), o *valor-P*, na linha de Interações, deve ser menor que 0,05.

Análise 1: Ensaio de Resistência à Compressão, aos 28 dias.

	REF	ESC	TOTAL
<i>TR</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	314,69	292,55	607,24
Média	52,45	48,76	50,60
Variância	7,22	3,93	8,78
<i>TN</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	260,51	239,10	499,60
Média	43,42	39,85	41,63
Variância	2,01	3,70	6,07
<i>TP</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	142,44	176,80	319,24
Média	23,74	29,47	26,60
Variância	0,57	0,85	9,60
<i>TOTAL</i>			
Contagem	18	18	
Soma	717,63	708,45	
Média	39,87	39,36	
Variância	155,00	68,29	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	3529,36	2	1764,68	579,47	0,00	3,32
Colunas	2,34	1	2,34	0,77	0,39	4,17
Interações	175,14	2	87,57	28,75	0,00	3,32
Dentro	91,36	30	3,05			
Total	3798,20	35				

Como o *valor-P* foi de **0,00** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, a mesma Resistência à Compressão aos 28 dias.

Análise 2: Ensaio de Resistência à Compressão, aos 90 dias.

	REF	ESC	TOTAL
<i>TR</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	365,12	337,54	702,66
Média	60,85	56,26	58,55
Variância	2,06	11,20	11,79
<i>TN</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	276,30	266,98	543,28
Média	46,05	44,50	45,27
Variância	0,14	3,24	2,19
<i>TP</i>			
Contagem	6	6	12
Soma	152,52	199,30	351,82
Média	25,42	33,22	29,32
Variância	0,92	1,97	17,89
<i>TOTAL</i>			
Contagem	18	18	
Soma	793,93	803,83	
Média	44,11	44,66	
Variância	224,47	98,53	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	5143,06	2	2571,53	790,04	0,00	3,32
Colunas	2,72	1	2,72	0,84	0,37	4,17
Interações	250,23	2	125,11	38,44	0,00	3,32
Dentro	97,65	30	3,25			
Total	5493,66	35				

Como o *valor-P* foi de **0,00** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, a mesma Resistência à Compressão aos 90 dias.

Análise 3: Ensaio de Resistência à Tração na Flexão, aos 28 dias.

	REF	ESC	TOTAL
<i>TR</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	17,73	21,24	38,97
Média	4,43	5,31	4,87
Variância	0,05	0,03	0,25
<i>TN</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	15,31	20,28	35,59
Média	3,83	5,07	4,45
Variância	0,02	0,00	0,45
<i>TP</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	11,16	13,65	24,81
Média	2,79	3,41	3,10
Variância	0,01	0,02	0,13
<i>TOTAL</i>			
Contagem	12	12	
Soma	44,21	55,17	
Média	3,68	4,60	
Variância	0,52	0,79	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	13,68	2	6,84	306,54	0,00	3,55
Colunas	5,00	1	5,00	224,07	0,00	4,41
Interações	0,39	2	0,19	8,71	0,00	3,55
Dentro	0,40	18	0,02			
Total	19,47	23				

Como o *valor-P* foi de **0,00** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, a mesma Resistência à Tração na Flexão aos 28 dias.

Análise 4: Ensaio de Resistência à Tração na Flexão, aos 90 dias.

	REF	ESC	TOTAL
TR			
Contagem	4	4	8
Soma	18,21	19,86	38,07
Média	4,55	4,96	4,76
Variância	0,03	0,11	0,11
TN			
Contagem	4	4	8
Soma	18,27	17,80	36,07
Média	4,57	4,45	4,51
Variância	0,04	0,06	0,05
TP			
Contagem	4	4	8
Soma	12,82	12,31	25,13
Média	3,20	3,08	3,14
Variância	0,03	0,03	0,03
TOTAL			
Contagem	12	12	
Soma	49,30	49,97	
Média	4,11	4,16	
Variância	0,47	0,75	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	12,13	2	6,07	122,49	0,00	3,55
Colunas	0,02	1	0,02	0,38	0,55	4,41
Interações	0,38	2	0,19	3,80	0,04	3,55
Dentro	0,89	18	0,05			
Total	13,42	23				

Como o *valor-P* foi de **0,04** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, a mesma Resistência à Tração na Flexão aos 90 dias.

Análise 5: Ensaio de Módulo de Elasticidade, aos 28 dias.

	REF	ESC	TOTAL
<i>TR</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	159,32	161,95	321,27
Média	39,83	40,49	40,16
Variância	0,60	0,87	0,75
<i>TN</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	139,52	127,60	267,12
Média	34,88	31,90	33,39
Variância	0,74	0,37	3,01
<i>TP</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	121,60	109,04	230,65
Média	30,40	27,26	28,83
Variância	0,21	0,40	3,07
<i>TOTAL</i>			
Contagem	12	12	
Soma	420,44	398,60	
Média	35,04	33,22	
Variância	16,60	33,20	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	519,78	2	259,89	490,06	0,00	3,55
Colunas	19,89	1	19,89	37,50	0,00	4,41
Interações	18,45	2	9,22	17,39	0,00	3,55
Dentro	9,55	18	0,53			
Total	567,65	23				

Como o *valor-P* foi de **0,00** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, o mesmo Módulo de Elasticidade aos 28 dias.

Análise 6: Ensaio de Módulo de Elasticidade, aos 90 dias.

	REF	ESC	TOTAL
<i>TR</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	171,58	173,16	344,73
Média	42,89	43,29	43,09
Variância	1,76	1,00	1,23
<i>TN</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	142,14	144,22	286,36
Média	35,54	36,06	35,80
Variância	1,82	0,68	1,15
<i>TP</i>			
Contagem	4	4	8
Soma	124,78	125,85	250,64
Média	31,20	31,46	31,33
Variância	0,82	1,52	1,03
<i>TOTAL</i>			
Contagem	12	12	
Soma	438,50	443,23	
Média	36,54	36,94	
Variância	26,63	26,72	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	564,06	2	282,03	222,59	0,00	3,55
Colunas	0,93	1	0,93	0,73	0,40	4,41
Interações	0,06	2	0,03	0,03	0,00	3,55
Dentro	22,81	18	1,27			
Total	587,86	23				

Como o *valor-P* foi de **0,00** ($< 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem, estatisticamente, o mesmo Módulo de Elasticidade aos 90 dias.

Análise 7: Ensaio de Retração por Secagem.

	REF	ESC	TOTAL
TR			
Contagem	8	8	16
Soma	2053,3	3572,8	5626,1
Média	256,7	446,6	351,6
Variância	144458,5	136275,1	140628,5
TN			
Contagem	8	8	16
Soma	2072,3	4158,7	6231,0
Média	259,0	519,8	389,4
Variância	111806,5	129951,3	130958,5
TP			
Contagem	8	8	16
Soma	3995,6	3577,7	7573,3
Média	499,5	447,2	473,3
Variância	131881,0	183210,6	147770,7
TOTAL			
Contagem	24	24	
Soma	8121,2	11309,1	
Média	338,4	471,2	
Variância	131668,1	138018,8	

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	124155,6	2	62077,8	0,44	0,64	3,22
Colunas	211719,7	1	211719,7	1,52	0,22	4,07
Interações	215563,2	2	107781,6	0,77	0,47	3,22
Dentro	5863081	42	139597,2			
Total	6414520	47				

Nesta análise, foram comparadas todas as idades do Ensaio de Retração por Secagem. Como o *valor-P* foi de **0,47** ($> 0,05$), pode-se dizer o concreto de referência (REF) e o concreto com escória (ESC) possuem,

estatisticamente, valores de Retração por Secagem distintos. Isso fica claro na Figura 48, onde o concreto com escória se mostra mais expansivo do que o concreto de referência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE Neto, A. J. P. C. *A reciclagem de resíduos sólidos na construção civil*. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em M.B.E.). COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 72p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Hydraulic Activity of Ground Slag by Reaction with Alkali*. ASTM C 1073-97.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete*. ASTM C 490-97.
- ANGULO, S.C. *Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados*. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. *Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil*. In: Seminário do Comitê Técnico do IBRACON – CT – 206 – Meio Ambiente – Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2001, São Paulo. *Anais*. São Paulo, IBRACON, 2001. v. I. p. 43-56.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735 – *Cimento Portland de alto-forno*. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – *Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 – *Agregados – Determinação da Composição Granulométrica*. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7223 – *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, ABNT, 1982.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7810 – *Agregado em estado compactado e seco – Determinação da massa unitária*. Rio de Janeiro, ABNT, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522 – *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776 – *Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman*. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9937 – *Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004 – *Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005 – *Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006 – *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007 – *Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142 – *Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*. Rio de Janeiro, ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12988 – *Líquidos livres - Verificação em amostra de resíduos*. Rio de Janeiro, ABNT, 1993.
- BARBOSA, V. F. F. *Síntese e caracterização de polissialatos*. Rio de Janeiro, 1999. 150p. Tese (Doutorado). Instituto Militar de Engenharia – IME.
- BAUER, L. A. F. *Materiais de Construção*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1979. 529p.

- CAVALCANTE, J. R.; CHERIAF, M. *Ensaio de avaliação para controle ambiental de materiais com resíduos incorporados*. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p 31-37.
- CHAVES, A. P. *Estado da arte da produção de agregados para construção civil*. In: Seminário de Gestão e Reciclagem de Resíduos de construção e demolição, 2005, São Paulo. *Avanços Recentes e Desafios Futuros*. Anais. São Paulo, EPUSP, 2005.
- FLESCHE, L. A. *Utilização de resíduos sólidos na construção civil*. Núcleo de Pesquisa e Extensão em Gerenciamento de Recursos Hídricos Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo - Comitê Pardo. Boletim Informativo N.º 10/ Ano VI - Outubro/2004.
- HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo, Pini, 1995. 349p.
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V. *Novos Mercados Para As Escórias de Alto Forno*. In: V Encontro Regional do Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica, 1995. Anais. Vitória- ES, 1995
- JOHN, V. M. *Pesquisa e Desenvolvimento de Mercado para resíduos*. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p 21-30.
- JOHN, V.M.J. *Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil*. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2., São Paulo, 1999. Anais. São Paulo, IBRACON, 1999. p. 44-55.
- JOHN, V.M. *Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C.; VILELA, A. *Resíduo da indústria coureira: caracterização e potencialidade de uso da cinza de serragem cromada*. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p 61-68.
- MASUERO, A. B.; VILELA, A. C., DAL MOLIN, D. *Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos*. CPGEC/NORIE – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. p 1-18.
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo, Pini, 1994. 573p.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo, Pini, 1982. 738p.

- PERUZZI, A. P. *Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa*. São Carlos, 2002. 96p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Arquitetura e Urbanismo – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- SARMIENTO, C. S. R.; FREIRE, W. J. *Tratamentos aplicados ao bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização para fins de material de construção*. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p 131-136.
- SILVEIRA, A. A.; FERREIRA, A.; DAL MOLIN D. C. C. *A cinza da casca de arroz como adição mineral*. In: Workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p 39-44.
- SAVASTANO Jr., H. *Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica – USP. 144 p. São Paulo, 2000.
- SILVA, F. J. *Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada*. Rio de Janeiro, 2000. 269p. Tese (Doutorado). Instituto Militar de Engenharia – IME.
- THOMAZ, E. C. S. *Desempenho do concreto geopolimérico*. Rio de Janeiro, 2000. 108p. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia – IME.