UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA, URBANISMO E TECNOLOGIA

ANTONIO CARLOS GIOCONDO CESAR

**USO DO RESÍDUO ESCÓRIA DE ACIARIA EM SISTEMA
CONSTRUTIVO DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

SÃO CARLOS

2014

ANTONIO CARLOS GIOCONDO CESAR

**USO DO RESIDUO ESCORIA DE ACIARIA EM SITEMA
CONSTRUTIVO DE ALVENARIA ESTRUTURAL**

Tese apresentada à Área de Arquitetura,
Urbanismo e Tecnologia da Universidade de
São Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Arquitetura
e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Osny Pellegrino
Ferreira

SÃO CARLOS

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G494u Giocondo, Antonio Carlos Giocondo Cesar
Uso do residuo escoria de aciaria em sistemas
construtivo de alvenaria estrutural / Antonio Carlos
Giocondo Cesar Giocondo; orientador Osny Pellegrino
Ferreira Pellegrino. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Sistema Construtivo. 2. Alvenaria Estrutural. 3.
Escória. 4. Resíduo. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Arquiteto e Urbanista **ANTONIO CARLOS GIOCONDO CESAR**

Título da tese: **"Uso do resíduo escória de aciaria em sistema construtivo de alvenaria estrutural"**

Data da defesa: **21/11/2014**

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Osny Pellegrino Ferreira (Orientador)**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Guilherme Aris Parsekian**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **João Adriano Rossignolo**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP)

Aprovado

Profa. Dra. **Léa Cristina Lucas de Souza**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

Aprovado

Profa. Dra. **Rosana Maria Caram**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

aprovado

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Prof. Dr. **Márcio Minto Fabrício**

As coisas têm Peso, Massa, Volume Tamanho,
Forma, Cor, Posição, Textura, Duração,
Densidade, Cheiro, Valor, Consistência,
Profundidade, Contorno, Temperatura, Função,
Aparência, Preço, Destino, Idade, Sentido. As
coisas não têm paz.

Arnaldo Antunes

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira, meu orientador, pela oportunidade e confiança depositadas em mim, sem o que, não seria possível realizar este trabalho, e pela amizade.
- A Profa. Dra. Léa Cristina Lucas de Souza, pela contribuição e críticas, indicando um novo rumo para o desenvolvimento do trabalho.
- Ao Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian, pela disponibilização e ajuda do Laboratório de Sistemas Estruturais _ LSE _ da UFSCar, sem o qual não teríamos dados importantes do comportamento da alvenaria.
- Ao Prof. Dr. Wilson Nunes dos Santos, pela disponibilidade do Laboratório de Propriedades Térmicas da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), contribuindo para o desenvolvimento das propriedades térmicas da peça escória-cimento.
- A Aluna Marília Bertolini, pela ajuda nos ensaios de transmitância térmica no Laboratório de Propriedades Térmicas da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar),
- Ao Técnico de Laboratório Ricardo Luis Canato, pela ajuda nos ensaios de prisma de blocos e mini-paredes, no Laboratório de Sistemas Estruturais _ LSE _ da UFSCar.
- Aos técnicos Paulo Wanderley Pratavieira, Sérgio Aparecido Trevelin e Paulo Cesar Albertini, do Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos _ IAU _ USP, pelo apoio técnico.
- A minha filha Julia Morena C. Cesar, pela ajuda na confecção dos exemplares do trabalho.
- E a todos que contribuíram para a viabilização deste trabalho.

RESUMO

GIOCONDO, A.C.C. 2014. Uso do resíduo escória de aciaria em sistema construtivo de alvenaria estrutural. 331p. Tese (Doutorado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU, São Carlos – Universidade de São Paulo, USP, 2014.

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um componente construtivo para alvenaria estrutural, utilizando o resíduo industrial escória de aciaria elétrica como matéria-prima em substituição a todos os agregados naturais. Para desenvolver este componente, inicialmente foram verificadas suas propriedades físicas, químicas e toxicidade, para caracterizar o material e estabelecer metodologias de dosagens dos agregados. Nos ensaios para estabelecer dosagem, foi constatado que a matriz cimentícia estava contaminada, requerendo redução da fração de cimento para assegurar que o composto atendesse os parâmetros normativos ambientais. Uma linha experimental de fabricação foi implantada no laboratório para verificar a viabilidade técnica e econômica da industrialização das peças do componente construtivo. Foi observado que os custos de produção do novo componente são inferiores aos das unidades comumente produzidas no mercado. As propriedades físicas, mecânicas, dimensionais, de absorção de água e de retração das unidades de alvenarias ensaiadas com o componente construtivo demonstraram desempenho satisfatório e viável para utilização em alvenaria estrutural. Uma vez que não existem parâmetros normativos específicos para o uso desta matéria-prima, foram utilizados os requisitos normativos de blocos de concreto como referência. O desempenho do novo componente de alvenaria, enquanto sistema construtivo, foi avaliado em aplicação experimental piloto, com resultados satisfatórios em relação ao processo de montagem das peças intertravadas, à viabilidade de automação da etapa de alvenaria, à relação de interface do componente construtivo com materiais de construção existentes no mercado, e ao seu desempenho térmico, estrutural e de estanqueidade. Os resultados permitem concluir que é viável a aplicação do resíduo de escória de aciaria como agregado em componentes construtivos de alvenaria estrutural.

Palavras-chave: Sistema construtivo, Alvenaria estrutural, Escória, Resíduo.

ABSTRACT

GIOCONDO, A.C.C. 2014. Use of steel slag in structural masonry construction system. 331 p. Thesis (Doctorate) – Institute of Architecture and Urbanism, IAU, São Carlos City– University of São Paulo, USP.

This thesis describes the development of a constructive component for structural masonry, using the industrial residue slag of electrical steel shops as raw material, replacing all natural aggregates. To develop such component, its physical and chemical properties, as well as its toxicity, were verified, aiming at characterizing the material and establish methods to calculate the dosage of the aggregates proportion in the mixture. In the tests to define the dosage, it was found that the cement matrix itself was contaminated, requiring decreasing its fraction to ensure the mixture was in accordance to environmental parameters. An experimental facility was installed at the laboratory, aiming at verifying the technical and economical feasibility of masonry parts manufactured with the component. It was observed lower costs compared with typically available parts. The properties of the masonry parts, such as physical, mechanical, dimensional, water absorption and retraction, were tested, with satisfactory performance results. Once there are no specific parameters to be applied to this particular raw material, it was used technical standards applied to regular concrete blocks. The performance of the new masonry component, as a constructive system, was evaluated in pilot application, with satisfactory results in terms of assembly of interlocked parts, masonry stage automation, interface with typical materials, as well as its thermal, structural and leaking properties. The overall results allow the conclusion that using slag of electrical steel shops as aggregated raw material of masonry components are viable.

Keywords: constructive system, structural masonry, slag, residue

SUMÁRIO

RESUMO.....	V
ABSTRATO.....	VI
SUMÁRIO.....	VII
ÍNDICES DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICES DE TABELAS.....	XX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	XXIV

CAPÍTULO 1:

INTRODUÇÃO	25
1.1 A RECICLAGEM DE RESÍDUOS.....	25
1.2 IMPACTOS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS.	28
1.3 OBJETIVOS.	29
1.4 JUSTIFICATIVA.	31
1.5 METODOLOGIA.....	34

CAPÍTULO 2:

RESÍDUO DE ESCÓRIA DE ACIARIA.....	39
2.1 A PRODUÇÃO MUNDIAL DE AÇO.....	39
2.2 A PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO	42
2.3 RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DO AÇO	45
2.4 RESÍDUOS DA ARCELORMITTAL – PIRACICABA – (AMP) ..	48
2.5 EXPERIENCIAS E CAMPOS DE APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA	53
2.6 ESCÓRIA DE ACIARIA DA AMP	55

2.6.1 Características da Escória da AMP	60
2.6.2 Ensaio de Lixiviação e de Solubilização da Escória da AMP	61
2.6.3 Interpretação dos resultados das análises	63
2.7 AVALIAÇÕES DA ESCÓRIA – AMP - NA EESC/USP	64

CAPÍTULO 3:

METODOLOGIA	67
3.1 METODOLOGIAS DE DOSAGEM	68
3.1.1 Método da ABCP.....	69
3.1.2 Método da Besser Company	70
3.1.3 Método IPT/EPUSP.....	72
CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	73
3.2 AGLOMERANTE	74
3.2.1 Cimento Portland.....	74
3.3.2 A Cal Hidratada	76
3.3 ADITIVOS.....	78
3.4 AGREGADOS	79
3.4.1 Características físicas dos Agregados Convencionais	79
3.4.2 Características da Escória	81
3.4.3 Granulometria da Escória.	83
3.4.4 Área superficial da Escória Utilizada	86
3.4.5 A Massa Específica e Absorção de Água da Escória	88

DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS COM ESCÓRIA 89

3.5. ENSAIOS PRELIMINARES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 91

3.6. Compactação da Mistura de Escória em Prensa Hidráulica 93

3.6.1. Ensaio de compactação 95

3.6.2. Moldagem da mistura de escória 97

3.6.3. Produção experimental do elemento construtivo..... 100

CAPÍTULO 4:

UNIDADES DE ALVENARIA COM ESCÓRIA. 105

4.1. ANÁLISES DAS PEÇAS DE ESCÓRIA QUE COMPÕE

O ELEMENTO CONSTRUTIVO 105

4.1.1. Análise Dimensional da Peça de Escória 105

4.1.2. Análise de Absorção de Água da Peça de Escória 108

4.1.3. Análise Preliminar, Resistência a Compressão da Peça de Escória 109

4.1.4. Análise das Características do composto da Peça de Escória Traço T2 110

4.1.5. Análises do Traço Definitivo T9 da Peça de Escória... . 114

4.1.6. Análise das Características do composto da Peça de Escória Traço T9 115

4.1.7. Normatização de Resíduos Estabilizados por Solidificação. 117

CAPÍTULO 5:

CARCTERIZAÇÃO DA ALVENARIA COM ESCÓRIA 121

5.1 ADAPTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS AO COMPOSTO ESCÓRIA-CIMENTO.....	121
5.2 PRODUÇÕES DAS PEÇAS DE ESCÓRIA-CIMENTO.	123
5.3 ENSAIOS DA ALVENARIA DE ESCÓRIA-CIMENTO.....	127
5.3.1 Ensaio e Análises de Prismas	127
5.3.2 Ensaio e Análises de Mini-paredes.	131
5.3.3 Ensaio e Análises de Retração por Secagem.	139

CAPÍTULO 6:

INDUSTRIALIZAÇÃO DO ELEMENTO CONSTRUTIVO 147

6.1 VARIÁVEIS DA ETAPA DE PRODUÇÃO.	147
6.1.1 Classificação do agregado siderúrgico.	149
6.1.2 Industrialização do agregado siderúrgico.	152
6.1.3 A logística da produção do elemento construtivo.	159
6.1.4 Análise de viabilidade econômica.....	163

CAPITULO 7:

O SISTEMA CONSTRUTIVO ESCORIA-CIMENTO 171

7.1 SISTEMAS CONSTRUTIVOS.....	171
7.2 PRÉ – FABRICAÇÃO.....	172
7.3 O SISTEMA CONSTRUTIVO ESCÓRIA-CIMENTO.	174
7.4 A AUTOMAÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO ESCÓRIA- CIMENTO.....	178

7.4.1 Adaptação da automação do sistema construtivo.	185
---	-----

CAPÍTULO 8:

APLICAÇÃO PILOTO.	189
-------------------------------	------------

8.1. LOCAL DO DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO PILOTO.	190
8.2. O PROJETO DA APLICAÇÃO PILOTO - CASA MODELO.	193
8.2.1. Condições Climáticas Locais.	195
8.2.2. Diretrizes de Zoneamento Bioclimático.	196
8.2.3. Índices Pluviométricos Locais.	196
8.2.4. Índices de Radiação Solar.	197
8.2.5. Projeto arquitetônico do experimento piloto.	197
8.3. APLICAÇÃO PILOTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO.	200
8.3.1. O sistema de cobertura do experimento piloto.	206
8.3.2. Materiais de acabamento aplicado ao experimento piloto.	207
8.3.3. Avaliação preliminar do experimento piloto.	211

CAPÍTULO 9:

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO.	215
--------------------------------------	------------

9.1 AVALIAÇÃO QUANTO AO DESEMPENHO Á ESTANQUEIDADE.	215
9.1.1. Execução do ensaio.	217
9.2. AVALIAÇÃO QUANTO AO DESEMPENHO TÉRMICO.	225
9.2.1. Requisito para adequação de paredes externas.	225
9.2.2. Ensaio para obter as propriedades térmicas.	227
9.2.3. Cálculos para obter as propriedades térmicas.	232
9.2.4. Avaliação do desempenho térmico por medição.	236

CAPÍTULO 10:**CONCLUSÃO..... 241**

10.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 244

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 247**ANEXOS:****ANEXO - A**

COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA ESCÓRIA DA BMP..... 255

ANEXO - BDETERMINAÇÃO DE MASSA BRUTA, LIXIVIADO E SOLUBILIZADO DA
ESCÓRIA DA BMP. 259**ANEXO – C**

ENSAIO COMPLETO DE COMPACTAÇÃO ESCÓRIA-CIMENTO-CAL..... 267

ANEXO – DENSAIO COMPLETO DE ABSORÇÃO DE AGUA DO COMPOSTO ESCÓRIA-
CIMENTO..... 269**ANEXO – E**ENSAIO COMPLETO DE COMPRESSÃO SIMPLES EM PEÇA DE ESCÓRIA-
CIMENTO..... 271**ANEXO – F**ENSAIO COMPLETO DO LIXIVIADO E SOLUBILIZADO DO COMPOSTO
ESCÓRIA-CIMENTO-CAL. 273

ANEXO – G

ENSAIO COMPLETO DO SOLUBILIZADO DOS CIMENTOS PORTLAND. 279

ANEXO – H

DETERMINAÇÃO DE MASSA BRUTA, LIXIVIADO E SOLUBILIZADO DO
COMPOSTO ECC..... 283

ANEXO – I

ANÁLISE COMPLETA DOS PARÂMETROS DE MICROTOX NO COMPOSTO
ECC..... 289

ANEXO – J

VIABILIDADE AMBIENTAL CETESB PARA FABRICAÇÃO E
COMERCIALIZAÇÃO DAS PEÇAS ESCÓRIA-CIMENTO. 293

ANEXO – K

ENSAIO DE PRISMA PEÇAS DE ESCÓRIA-CIMENTO. 295

ANEXO – L

ENSAIO DE PRISMA EM MINI-PAREDES DE COMPOSTO ESCÓRIA-
CIMENTO..... 297

ANEXO – M

MEMORIAL DESCRITIVO, CASA MODELO E PROJETO COMPLETO..... 301

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Abordagem metodológica da 1ª. etapa experimental.....	34
Figura 1.2 – Abordagem metodológica da 2ª. etapa experimental.....	35
Figura 1.3 – Abordagem metodológica da 3ª. etapa experimental.....	36
Figura 1.4 – Abordagem metodológica da 4ª. etapa experimental.....	37
Figura 1.5 – Abordagem metodológica da 5ª. etapa experimental.....	38
Figura 2.1 - Produção mundial de aço.	39
Figura 2.2 - Produção mundial de aço por país.....	40
Figura 2.3 - Produção latino-americana de aço por país.....	41
Figura 2.4 - Produção brasileira de aço.	42
Figura 2.5 - Produção de aço bruto por empresa.....	43
Figura 2.6 - Localização das principais siderúrgicas.....	44
Figura 2.7- Fluxograma ilustrado da produção de aço para bens de consumo.....	45
Figura 2.8 - Fluxograma da reciclagem de produtos obsoletos.....	46
Figura 2.9 - Distribuição de oferta pelas fontes de sucata.	47
Figura 2.10 - Representação esquemática do processamento da sucata de obsolescência na AMP.	50
Figura 2.11 - Adição de ligas fundentes na panela durante o vazamento da corrida.	51
Figura 2.12 - Reações metalúrgicas do refino.....	51
Figura 2.13 - Formação da escória sobre o aço líquido	52
Figura 2.14 - Percentagem de escória reciclada em 2004	53
Figura 2.15 - Sub-base Alemanha.....	54
Figura 2.16 – Base Alemanha	54
Figura 2.17 – Contenção em margem de rio	54
Figura 2.18 - Diques Marítimos USA	54
Figura 2.19 – Leito de filtragem de água.....	55
Figura 2.20 – Viveiro de ostra.	55
Figura 2.21 – Coleta de escória na aciaria.....	56
Figura 2.22 - Transporte da escória - Fonte AMP.	56
Figura 2.23 - Resfriamento controlado da escória – Fonte AMP.....	56

Figura 2.24 - Planta e processamento da escória de aciaria.	57
Figura 2.25 - Britagem e peneiramento da escória de aciaria.	57
Figura 2.26 - Separação Magnética (Remoção do ferro metálico).	58
Figura 2.27 - Classificação granulométrica conforme requisitos do mercado .	58
Figura 2.28 - Escória de 50mm - 150mm.	59
Figura 2.29 - Escória de 2mm - 5mm - Fonte AMP.	59
Figura 2.30 - Controle de expansão.	59
Figura 2.31 - Estocagem e cura. - Fonte AMP	59
Figura 2.32 - Secagem ao sol da escória AMP, recebida no laboratório da EESC/USP.	64
Figura 2.33 - Material retido em malha 9,5mm	65
Figura 2.34 - Material retido em malha 4,8mm.....	65
Figura 2.35 - Material retido em malha 2,4mm.....	65
Figura 2.36 - Material passante em malha 2,4mm	65
 Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia	82
Figura 4.2 - Escória in natura, antes de ser separada em faixas granulométricas.	83
Figura 4.3 - Armazenamento da escória fina, com $0,15 < \phi < 2,40\text{mm}$	83
Figura 4.4 - Armazenamento da escória fina, com $2,40 < \phi < 9,50\text{mm}$	84
Figura 4.5 - Armazenamento da escória fina, com $9,50 < \phi < 19,00\text{mm}$	84
Figura 4.6 - Granulometria da escória in natura.	85
Figura 4.7 - Curva granulométrica da escória fina, ($0,15 < \phi < 2,40\text{mm}$).	86
Figura 4.8 - Curva granulométrica da escória média, ($2,40 < \phi < 9,50\text{mm}$)	86
Figura 4.9 - Curva granulométrica da escória grossa, ($9,50 < \phi < 19,00\text{mm}$). .	87
Figura 4.10 - Comparação da granulometria da escória fina com a da areia...	87
 Figura 5.1 - Corpos de prova de T1, T2, T3 e T4	93
Figura 5.2- Teste de Resistência à Compressão	94
Figura 5.3 - Prensa hidráulica utilizada para moldagem das misturas	95
Figura 5.4 - Curva de umidade ótima, entre parâmetros. Ensaio completo de compactação encontra-se no Anexo C	97
Figura 5.5 - Destorroador 2HP, locada no LCC- EESC – USP.	98
Figura 5.6 - Peneira elétrica 1HP locada no, LCC- EESC – USP.	99

Figura 5.7 - Esteira Transportadora 1/2HP locada no, LCC- EESC – USP.....	99
Figura 5.8- Argamassadeira 1/2HP locada no, LCC- EESC – USP.	100
Figura 5.9 - Peça “quebradiça” logo após a moldagem.....	102
Figura 5.10 - Mistura traço T2 com cal.....	103
Figura 5.11- Mistura traço T2 com aditivo	103
Figura 5.12 - Alimentação da mistura pela prensa	103
Figura 5.13 - Compactação da mistura	103
Figura 5.14- Retirada da peça	104
Figura 5.15 - Peças prontas para testes	104
Figura 6.1 - Croqui definitivo da peça desenvolvida com escória.	106
Figura 6.2 - Paquímetros utilizados.....	106
Figura 6.3 - Textura escória-cimento.....	108
Figura 6.4 - Textura bloco concreto convencional.....	108
Figura 6.5 - Regularização da Superfície das peças com pasta de cimento..	109
Figura 6.6 - Teste de Resistência à Compressão com peças Superpostas. ...	109
Figura 7.1 - Fluxograma de funcionamento dos pistões na prensa hidráulica utilizada.	122
Figura 7.2 - Modificação do formato da peça na prensa hidráulica.	123
Figura 7.3 - Dosador de Cimento	124
Figura 7.4 - Dosador de Escória	124
Figura 7.5 - Dosador de água e aditivo	125
Figura 7.6 - Linha de produção experimental de peças escoria/cimento no LCC – EESC _ USP.....	125
Figura 7.7 - Abastecimento da prensa.	125
Figura 7.8 - Compactação do composto.	125
Figura 7.9 - Peças sendo retiradas manualmente.	126
Figura 7.10 - Peças prontas.	126
Figura 7.11 - Chapa utilizada para desmoldar.	126
Figura 7.12 - Peças estocadas em pallet.	126
Figura 7.13 - Ensaio módulo de deformação T9 referência.	128
Figura 7.14 e 7.15 - Preparação da peça para o ensaio.	129
Figura 7.16 - Máquina de Ensaio.	129

Figura 7.17 - Colocação dos extensômetros Trd 11.....	129
Figura 7.18 - Os extensômetros Trd 11 e as células : Trd 29 foi colocado nos dois lados da peça.	130
Figura 7.19 - Máquina Emic DL 60000 realizando o ensaio de Prisma.....	130
Figura 7.20 - Ruptura das peças.....	130
Figura 7.21- Esquema para o ensaio de determinação da resistência de pequenas paredes (fpa), com a instrumentação para determinação do módulo de deformação (Epa) e do coeficiente de Poisson (Vpa).....	131
Figura 7.22 - Miniparedes a ensaiar e seus respectivos grautes - Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar	132
Figuras 7.23 e 7.24 - Posicionamento dos extensômetros removíveis no ensaio das miniparedes.....	134
Figura 7.25 - Configuração típica dos ensaios de miniparedes.....	135
Figura 7.26 - Ensaio módulo de deformação miniparedes.....	136
Figuras 7.27 e 7.28 - Ruptura das miniparedes de escória-cimento.....	137
Figura 7.29 - Ensaio de ruptura das miniparedes resultado do ensaio de ruptura das miniparedes escória-cimento.....	138
Figura 7.30 - Aparelho analógico da marca Ploog Eng. Co e barra de invar para calibrar o aparelho.....	139
Figura 7.31 - Balança maste.....	139
Figura 7.32 - Estufa com renovação e circulação de ar.....	139
Figura 7.33 - Preparação das peças com base de medidas e gabarito para furação.....	140
Figura 7.34 - Peças no tanque de água dentro do laboratório de Sistemas Estruturais - UFSCar, sob temperatura controlada a 23°C, por 48h.	141
Figura 7.35 - Leitura da peça na saturação. Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar.....	141
Figuras 7.36 e 7.37 - Bandeja com Cloreto de Cálcio utilizada na estufa.	142
Figura 7.38 - Câmara de vácuo da marca Dosivac.....	143
Figura 7.39 - Evolução da retração dos CPs em percentual.....	145
Figura 8.1 e 8.2 - Escoria de aciaria em “bags” como é transportada até a usina transformadora.....	149

Figura 8.3 - Fluxograma de beneficiamento da escoria da usina transformadora.	150
Figura 8.4 - Peneira elétrica 2HP de arroz adaptada para classificação do agregado siderúrgico, locada no, LCC- EESC – USP.....	152
Figura 8.5 - Linha típica de produção de blocos de concreto – Fonte - Tprex equipamentos para construção civil.	153
Figura 8.6 - Linha de produção experimental das peças escoria/cimento no LCC – EESC _ USP.....	156
Figura 8.7 - “Layout” da linha de produção experimental das peças escoria/cimento no LCC – EESC _ USP.....	156
Figura 8.8 - Funcionários responsáveis pela mistura e peneiramento - LCC- EESC – USP.	157
Figura 8.9 - Funcionários responsáveis pela desforma e acomodação das peças - LCC- EESC – USP.	157
Figura 8.10 - Pallets em processo de cura no estacionamento do LCC- EESC – USP.....	158
Figura 8.11 - Peças quebradas reaproveitadas no sistema construtivo.	159
Figura 8.12 - Corte das Peças.....	159
Figura 8.13 - Outras peças produzidas na máquina de corte.....	159
Figura 8.14 - Serra de pedra utilizada pela Andrade Gutierrez, na fábrica de tijolos de solo-cimento – Nova Iguaçu – RJ.	160
Figura 8.15 - Transporte das usinas geradoras até as usinas transformadoras (pátio do LCC-USP).....	161
Figura 8.16 - Medias pallets com 280 peças (1,10 x 1,10 x 0,85m), e 1.120kg.	162
Figuras 8.17 e 8.18 - Logísticas do carregamento das peças de São Carlos a Americana – SP.	163
Figura 8.19 - Logística do descarregamento das peças em Americana – SP.	163
Figura 8.20 - Raio de 250 km de atuação da usina localizada em Piracicaba – SP.	164
Figura 9.1 - Peças que compõe o sistema construtivo.....	175
Figura 9.2 - Projeto de peças e componentes complementares que pode compor o sistema construtivo.....	176

Figura 9.3 - Projeto de peças de laje alveolar produzidas com concreto de escoria de aciaria que complementaria o sistema construtivo. .	176
Figura 9.4 - Modulação proposta para utilização do sistema construtivo escoria-cimento. Fonte – Projeto autor.....	177
Figura 9.5 - Integração geométrica espacial do sistema construtivo escoria-cimento. Fonte – Projeto autor.....	178
Figura 9.6 - Resultado da pesquisa da EY, Fonte – Jornal Folha de São Paulo 10 de setembro 2014.	179
Figura 9.7 - Robô utilizado na indústria de louças (montagem dos pallets). ..	181
Figura 9.8 - Volume de trabalho de vários membros robóticos. Fonte (Figuras 2.11, 2.15, 2.14 de COUTO, 2000).	182
Figura 9.9 - Possibilidade de ferramentas e garras para robôs. Fonte (Figuras COUTO, 2000).....	183
Figura 9.10 - Plataforma robótica desenvolvida pela Raytheon Sarcos	184
Figura 9.11 - Identificação da plataforma robótica ao projeto da edificação e as tarefas que serão realizadas.	185
Figura 9.12 - Peças e componentes posicionados em local pré-determinado, para que o robô alcance a localização no espaço circundante. Fonte – projeto autor.....	186
Figura 9.13 - Sequência de execução e caminho percorrido pela plataforma robótica.	187
Figura 9.14 - Demarcação de início e final do campo de trabalho.	187
Figura 10.1 - Localização da área de implantação do protótipo da casa modelo.....	190
Figura 10.2 - Área de abrangência do consórcio PCJ.....	191
Figura 10.3 - Caracterização da área onde foi implantado o experimento piloto, (Centro de Educação Ambiental).	192
Figuras 10.4 e 10.5 - Terreno onde foi implantado o experimento piloto Fonte foto do autor.	193
Figura 10.6 - Fluxograma do projeto piloto PCJ _ Fonte Projeto autor.	194
Figura 10.7 - Projeto pavimento térreo – Fonte- Projeto autor	198
Figura 10.8 - Projeto pavimento superior – Fonte – Projeto autor.....	198
Figura 10.9 - Corte esquemático - Fonte – Projeto autor	199
Figura 10.10 - Projeto fachada – Fonte – Projeto autor.	199

Figura 10.11 - Gabarito de madeira e abertura do alicerce - Fonte - foto do autor.....	200
Figuras 10.12 e 10.13 - Concretagem das brocas, sapatas e baldrame – Fonte - foto do autor.....	201
Figura 10.14 - Nivelamento e impermeabilização do alicerce e aterro. - Fonte - foto do autor.	201
Figura 10.15 - Distribuição das peças de acordo com projeto executivo - Fonte Foto do autor.....	202
Figura 10.16 - Tubulações elétricas e hidráulicas acompanham a alvenaria. Fonte: Fotos do autor.....	203
Figura 10.17 e 10.18 - Detalhe das tubulações elétricas e hidráulicas que acompanham a alvenaria. Fonte: Fotos do autor.....	203
Figuras 10.19 e 10.20 - Detalhe do apoio da estrutura metálica na alvenaria. - Fonte – Foto do autor.....	204
Figura 10.21 - Janelas metálicas –fonte – foto do Autor.	205
Figura 10.22 - Laje pré-fabricada - piso. – Fonte foto do Autor.....	205
Figura 10.23 - Interface entre a estrutura metálica do telhado laje pré-fabricada e aberturas externas prontas para receber as caixilharias – Fonte – foto do autor.	205
Figura 10.24 - Telhas de resíduo da indústria	206
Figura 10.25 - Placa de resíduo da indústria alimentícia - Fonte: fotos do autor.	206
Figura 10.26 - Telhas de resíduo aplicada no protótipo.	206
Figura 10.27 - Forro de placa de resíduo. Fonte: fotos do autor.....	206
Figura 10.28 - Paredes rejuntadas com argamassa AC 3 Fonte – Foto do autor.....	207
Figura 10.29 - Parede in natura.....	208
Figura 10.30 - Parede in natura sala de estar	208
Figura 10.31 - Parede com pintura sem rejunte -Fonte – fotos autor.....	208
Figura 10.32 - Parede com reboco – Fonte – Foto do autor	208
Figuras 10.33 e 10.34 - Dormitório e escritório revestido com gesso. – Fonte – Foto do autor.....	209
Figura 10.35 - WC didático, revestimentos cerâmico, madeira e textua – Fonte Foto do autor.....	210

Figura 10.36 - Projeto experimental piloto – (Casa Modelo) acabado com paredes rejuntadas e pintura a base de água. Fonte: foto do autor.....	210
Figura 10.37 - Pontos de maior solicitação na alvenaria estrutural – Fonte – projeto do autor.....	212
Figura 11.1 - Condições de exposição conforme as regiões brasileiras.	217
Figura 11.2 - Esquema de dispositivo para medida de vazão Fonte – ABNT NBR 15575-4: 2012.....	218
Figura 11.3 - Aparelhagens utilizadas para realização dos ensaios – Fonte – Foto do autor.....	218
Figura 11.4 - Câmara prismática 70x70x25cm utilizada nos ensaios Fonte – Foto do autor	219
Figura 11.5 - Câmara prismática 70x70x25cm utilizada nos ensaios Fonte – Foto do autor.....	220
Figura 11.6 - Controlador de pressão instalado ao compressor. Fonte – Foto do autor	220
Figura 11.7 - Controlador de vazão ligado a caixa d'água. Fonte – Foto do autor	221
Figura 11.8 - Parede in natura.....	222
Figura 11.9 - Ensaio aplicado à alvenaria in natura.	222
Figura 11.10 - Parede com pintura sem rejunte.	222
Figura 11.11 - Aplicação do ensaio em parede escoria-cimento com rejunte de argamassa AC 3. Fonte – Foto do autor.	224
Figura 11.12 - Parede escoria-cimento com rejunte de argamassa AC 3, após 7 H. de ensaio sem manchas.....	224
Figura 11.13 - Cavidade que substitui a coluna fracionada. Fonte – Foto do autor.	227
Figura 11.14 - Equipamentos utilizados no ensaio. – Fonte – Foto autor.	228
Figura 11.15 - Amostra do composto escoria-cimento. Fonte – Foto autor....	228
Figura 11.16 - Fluxograma ilustrativo do arranjo dos corpos de prova. Fonte – Foto do autor.....	229
Figuras 11.17 - 11.18 e 11.19 - Cavidade com placa padrão, amostra escoria-cimento e placa padrão, com termopares posicionados. Fonte – Foto do autor.....	230

Figura 11.20 - Corpos de prova, sobre o forno com temperatura de 70°C. Fonte Foto do autor.....	230
Figura 11.21 - Equipamento pronto para efetuar as leituras. Fonte Foto do autor.	231
Figura 11.22 - Resultado do ensaio da amostra composto escoria-cimento. Fonte autor.....	231
Figura 11.23 - Equipamento HOBO para aferição de temperatura.	237
Figura 11.24 - Localização dos HOBOS no experimento piloto.	238
Figura 11.25 - Resultados de temperatura externa.	239
Figura 11.26 - Resultado da temperatura na sala de estar.	239
Figura 11.27- Resultado da temperatura no interior do dormitório.	240

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção mundial de aço por país.....	41
Tabela 2.2 - Produção latino-americana de aço por país.....	42
Tabela 2.3 - Produção brasileira de aço.....	43
Tabela 2.4 - Produção de aço bruto por empresa.....	43
Tabela 2.5 - Quantidade de resíduos gerados anualmente pela empresa ArcelorMittal	49
Tabela 2.6 - Composições das Escórias de Alto Forno e de Aciaria (Análises Típicas).	52
Tabela 2.7 - Composição centesimal da escória da AMP.	60
Tabela 2.8 - Determinação sobre a massa bruta da escória da BMP.	61
Tabela 2.9 - Determinação sobre o lixiviado obtido da escória da AMP	62
Tabela 2.10 - Determinação sobre o solubilizado obtido da escória da AMP .	62
Tabela 2.11 - Caracterização das granulometrias em amostra-padrão.....	66
Tabela 3.1 - Porcentagens retidas acumuladas desejáveis na produção de blocos de concreto.	71
Tabela 3.2 - Relação cimento/agregado sugeridos para a produção de blocos de concreto na máquina Montana MBX 975.	71
Tabela 3.3 - Materiais proporcionados em massa.....	72
Tabela 4.1 - Tipo e composição de cimento Portland.	76
Tabela 4.2 - Produção nacional de cimento Portland.....	77
Tabela 4.3 - Propriedades físicas e químicas do aglomerante empregado.....	77
Tabela 4.4 - Propriedades da cal	78
Tabela 4.5 - Classificação das cais de construção de acordo com a normalização européia.	79
Tabela 4.6 - Abertura das peneiras (NBR 7217/87).	81
Tabela 4.7 - Quantidade retida acumulada de cada agregado convencional..	81
Tabela 4.8 - Quantidade retida acumulada de cada tipo de escoria.	85
Tabela 4.9 - Valores relativos de área superficial e índices de superfície de Murdoch (NEVILLE, 1982).	88

Tabela 4.10 - Área superficial da escoria fina, índice de Murdock.	89
Tabela 4.11 - Comparação entre as áreas superficiais das frações granulométricas da escória com os agregados convencionais, segundo o índice de Murdock	89
Tabela 4.12 - Massa específica das frações granulométricas da escoria fina e média.	90
Tabela 4.13 - Massa específica real da areia e brita nº. 0.....	90
Tabela 4.14 - Massa específica e absorção de água da escoria fina e média.	90
 Tabela 5.1 - Relação cimento/agregado sugeridos para a produção de blocos de concreto na máquina Montana MBX 975.	92
Tabela 5.2 - Composição dos traços e suas proporções.	92
Tabela 5.3 - Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Simples em Corpo de Prova Cilíndrico (5X10cm) aos 10 dias.	94
Tabela_5.4 - Resumo do traço pré-estabelecido no início do capítulo.....	101
 Tabela 6.1 - Análise dimensional das amostras do traço T9.....	107
Tabela 6.2 - Ensaio de Absorção de Água.....	108
Tabela 6.3 - Resultados dos Ensaios a Compressão com peça de escória traço T2.	110
Tabela 6.4 - Determinação sobre o lixiviado obtido do composto (CEA). Ensaio efetuado de acordo com a 20ª edição do STANDARD METHODS.....	111
Tabela 6.5 - Determinação sobre o solubilizado obtido do composto (CEA). Ensaio efetuado de acordo com a 20ª edição do STANDARD METHODS	112
Tabela 6.6 - Determinação sobre o solubilizado obtido nas amostras de cimentos Portland existentes no mercado brasileiro.	113
Tabela 6.7 - Resultados dos Ensaios comparativos de Resistência à Compressão dos traços T2 e T9, para as peças de escoria.	114
Tabela 6.8 - Determinação sobre a massa bruta do traço T9 Cimento - escória- aditivo. NBR 10004: 2004 – Massa Bruta	115
Tabela 6.9 - Resultado Analítico, Teste de Toxidade <i>Aguda-Vibrio fischeri</i> do Traço T9 (cimento/escória/aditivo) ECC - NT CETESB L5.227	116

Tabela 6.10 - Concentração Máxima de Poluentes no Lixiviado (CMP) , comparativo com o Resíduo da Escória e o composto T9 Cimento/Escoria.....	118
Tabela 6.11 - Concentração Máxima de Poluentes no Lixiviado Neutro (CMP) , comparativo com o Resíduo da Escoria e o composto T9 Cimento/Escoria.....	119
Tabela 6.12 - PH conforme procedimento constante Anexo B (da Normativa)	119
 Tabela 7.1 - Dados técnicos da prensa hidráulica utilizados na moldagem...	121
Tabela 7.2 - Ensaio Traço T9 referência - Resistência a compressão.....	128
Tabela 7.3 - Resultados de módulo de deformação dos prismas Traço T9.12.	130
Tabela 7.4 - Composição experimental do traço utilizado no grauteamento das miniparedes.....	133
Tabela 7.5 - Resultados das características do graute utilizado nas miniparedes.....	133
Tabela 7.6 - Resultados dos ensaios de compressão das miniparedes.....	135
Tabela 7.7 - Fatores de eficiência, razão entre modulo e resistência e relação entre o modulo e a deformação.	137
Tabela 7.8 - Valores de retração por secagem obtidos para composto escoria- cimento traço T9.	144
 Tabela 8.1 - Composição dos equipamentos da linha de classificação do agregado siderúrgico.....	151
Tabela 8.2 - Composição do custo dos equipamentos envolvidos na linha de classificação do agregado siderúrgico.	151
Tabela 8.3 - Equipamentos da linha de produção figura 8.5, composição de custo unitário e total.....	154
Tabela 8.4 - Relação de pallets / capacidade dos caminhões.....	162
Tabela 8.5 - Custo de implantação da usina de sistema construtivo.....	165
Tabela 8.6 - Comparativo de custos dos insumos, Bloco concreto, solo-cimento e escória-cimento.	167
Tabela 8.7 - Custo do investimento para produção experimental no	

LCC-USP	169
Tabela 8.8 - Custo do investimento para produção experimental no LCC-USP.	170
Tabela 11.1 - Condições de ensaio de estanqueidade de sistemas de vedações verticais externas.	216
Tabela 11.2 - Estanqueidade a água de vedações verticais externas (fachadas) e esquadrias.....	216
Tabela 11.3 - Níveis de desempenho para estanqueidade à água de vedações verticais externas (fachadas) e esquadrias	223
Tabela 11.4 - Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas.	226
Tabela 11.5 - Valores máximos admissíveis para a capacidade térmica (CT) das paredes externas	226
Tabela 11.6 - Resistência térmica da câmara de ar não ventilada, com largura muito maior que a espessura.	233
Tabela 11.7- Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiação a temperaturas comuns (ondas longas).	235
Tabela 11.8 - Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico. .	236
Tabela 11.9 - Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.	237

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AF	Areia de Fundição
AMP	ArcelorMittal Piracicaba
ALACERO	Asociación Latinoamericana Del Acero
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEA	Cimento, Escória e Aditivo
CMP	Concentração Máxima de Poluentes
EAF	Electric Arq Furnace
EUROSLAG	The European Association Representing Metallurgical Slag Producers and Processors
FOB	Free on Board
FEA	Forno Elétrico a Arco
IABR	Instituto Aço Brasil
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
ISO	International Organization for Standardization
INESFA	Instituto Nacional das Empresas de Preparação de Sucata de Ferro e Aço
Mt	Milhões de toneladas
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
SICETEL	Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos
SVVIE	Sistemas de vedação verticais internas e externas
SVVE	Sistemas de vedação verticais externas
UNCTAD	United Nations Conference on Trade And Development
VMP	Valores Máximos Permitidos
WSA	World Steel Association

INTRODUÇÃO

1.1. A RECICLAGEM DE RESÍDUOS.

O setor siderúrgico lida diariamente com quantidades imensas de matérias-primas e energia, o seu impacto ambiental sempre foi importante. Nas usinas, os esforços para reduzir emissões e efluentes tendem a passar da mera captação e tratamento à adoção de novas tecnologias de produção, menos poluentes e mais eficientes em termos energéticos. O trabalho para preservar o meio ambiente se faz e continuará a se realizar de quatro maneiras (PEREIRA, 1994): obedecendo à legislação ambiental; implementando medidas de conservação de energia; reciclando e conservando os recursos naturais; buscando novas tecnologias menos poluidoras.

A reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos. Os materiais alternativos geralmente são de menor custo e, as vezes, possuem características de resistência e durabilidade melhores que os materiais convencionais.

Outro fator importante que faz com que as pesquisas na área de reciclagem de resíduos cresçam é o fato de muitos resíduos agrícolas, industriais ou urbanos, por seus grandes volumes gerados, nem sempre são armazenados em locais adequados, como também há uma ineficiência de gerenciamento do próprio resíduo, estes problemas de armazenamento faz com que certos produtos acabem por poluírem o meio ambiente.

No modelo atual de produção, milhares de toneladas de resíduos industriais são produzidos anualmente. Considerando este elevado volume de resíduo gerado, pode-se perceber que seu gerenciamento se torna oneroso e

demasiadamente complexo. A escassez de espaço físico para 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 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. Em ambos os casos citados, existe o custo para gerenciamento dos resíduos, para se evitar que ocorra qualquer tipo de contaminação ambiental (ÂNGULO,2000; JOHN,2000; MASUERO et al, 1997).

Apesar do gerenciamento dos resíduos representarem o maior problema, devido aos altos custos a ele incorporados, há a 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).

A redução dos custos, tanto de deposição quanto de tratamento dos resíduos, pode ser obtida de duas formas complementares: diminuição na produção de resíduos e reciclagem ou reutilização desses materiais. A redução no volume produzido apresenta limitações técnicas difíceis de serem ultrapassadas. Já a reciclagem ou 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 tente fechar seu ciclo produtivo de tal forma que minimize a saída de resíduos e o ingresso de matéria-prima (ÂNGULO,2000; JOHN,1997).

Os padrões de identificação e de descarte de resíduos industriais variam sensivelmente entre os países. Praticamente todas as nações industrializadas têm revisto e tornado mais restritivas suas legislações ambientais, em especial no que concerne à produção, ao transporte, ao tratamento e à deposição final dos resíduos industriais.

Da legislação ambiental surge a série ISO 14000 (ABNT,1994), que é o conjunto de normas em elaboração pela ISSO - International Organization for

Standardization, que visa estabelecer diretrizes para a implementação de Sistemas de Gestão Ambiental, nas diversas atividades econômicas que possam impactar o meio ambiente, e para a avaliação e certificação destes sistemas, com metodologias uniformes e aceitas internacionalmente. Também tem como objetivo a preparação de critérios para a avaliação da qualidade e eficácia das relações entre empresas e o meio ambiente.

Nos processos pirometalúrgicos, além da fase líquida constituída pelo banho metálico, está quase sempre presente uma fase líquida de natureza não metálica, denominada escória (LÚCIO, 1981). Em alguns tipos de indústria, como as siderúrgicas, os resíduos são gerados em grandes quantidades, sendo inerentes ao processo produtivo. De acordo com POLISSENI (2005) e com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2006), em 2005 o setor siderúrgico no mundo gerou cerca de 359 milhões de toneladas de escórias (alto-forno, aciaria LD e elétrica) e cerca de 915 milhões de toneladas de outros materiais não incorporados ao aço, totalizando cerca de 1.274 milhões de toneladas de resíduos. No Brasil, de acordo com dados do MME (2007), em 2006 foram produzidos cerca de 7,5 milhões de toneladas de aço em fornos de arco elétrico. Baseado nos dados de POLISSENI (2005), estima-se que em 2006 foram geradas cerca de 2,2 milhões toneladas de resíduos e, desse montante, aproximadamente 1 milhão de toneladas de escória de aciaria elétrica.

Dentro deste contexto, a Construção Civil é, dentre os setores industriais, um dos mais apropriados para o aproveitamento de resíduos, uma vez que ela chega a consumir até 75% de recursos naturais (ÂNGULO, 2000). Isto se deve a uma série de fatores, tais como o elevado número de insumos consumidos, ao déficit habitacional associado aos altos custos dos insumos básicos para o desenvolvimento de projetos habitacionais. Isto torna indispensável o desenvolvimento de novos materiais e/de tecnologias alternativas. Alguns estudos neste sentido já foram realizados, como se pode citar o desenvolvimento de cimentos de escória de alto-forno sem clínquer. Verifica-se que este produto alternativo dispensa a calcinação da matéria-prima, que para o caso do cimento convencional é responsável por cerca de 40% a 60% dos custos de produção, além do excessivo consumo de energia (JOHN et al, 1995).

Pesquisas recentes estudam a importância da reciclagem da escória, como forma de resolver o problema de armazenagem ou “bota-fora”. Entretanto,

há alguns inconvenientes no uso deste produto; por exemplo, parte da cal que participa no processo de produção do aço, pode permanecer como matéria-prima não reagida presente na escória. Como a mesma reage, em presença de umidade, ocorre a formação de compostos expansivos, limitando-se o seu uso.

Como pode ser observado, o estudo da reutilização e da reciclagem de resíduos tornou-se prioritário quanto ao aspecto ambiental. Além disso, o aproveitamento de resíduos pode apresentar diversos benefícios técnicos, econômicos, energéticos e, é claro, ambientais, como a redução do volume de extração 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. IMPACTOS DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS

A reciclagem de resíduos, assim como qualquer 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 do que o próprio resíduo o era antes de ser reciclado. Dessa forma, o processo de reciclagem acarreta riscos ambientais que precisam ser adequadamente gerenciados.

A quantidade de materiais e energia necessários ao processo de reciclagem pode representar um grande impacto para o meio ambiente. Todo processo de reciclagem necessita de energia para transformar o produto ou tratá-lo de forma a torná-lo apropriado a ingressar novamente na cadeia produtiva. Tal energia dependerá da utilização proposta para o resíduo, e estará diretamente relacionada aos processos de transformações utilizados. Além disso, muitas vezes, apenas a energia não é suficiente para a transformação do resíduo. São necessárias também matérias-primas para modificá-lo física e quimicamente.

Como qualquer outra atividade, a reciclagem também pode gerar resíduos, cuja quantidade e características dependerão do tipo de processo escolhido. Esses novos resíduos nem sempre são tão ou mais simples que aqueles que foram reciclados. É possível que eles se tornem ainda mais

agressivos ao homem e ao meio ambiente do que o resíduo que está sendo reciclado. Dependendo de sua periculosidade e complexidade, estes rejeitos podem causar novos problemas, como a impossibilidade de serem reciclados, a falta de tecnologia para o seu tratamento, a falta de locais para dispô-los e todo o custo que isto ocasionaria. É preciso também considerar os resíduos gerados pelos materiais reciclados no final de sua vida útil e na possibilidade de serem novamente reciclados – fechando assim o ciclo.

Um parâmetro que geralmente é desprezado na avaliação de produtos reciclados é o risco à saúde dos usuários do novo material, e dos próprios trabalhadores da indústria recicladora, devido à lixiviação de frações solúveis ou até mesmo pela evaporação de frações voláteis. Os resíduos muitas vezes são constituídos por elementos perigosos como metais pesados (Cd, Pb), e compostos orgânicos voláteis. Estes resíduos, mesmo quando inertes nos materiais – após a reciclagem –, podem apresentar riscos, pois nem sempre os processos de reciclagem garantem a imobilização destes componentes.

Dessa forma, é preciso que a escolha da reciclagem de um resíduo seja criteriosa e pondere todas as alternativas possíveis com relação ao consumo de energia e matéria-prima. (ÂNGULO, ZORDAN, JOHN, et al, 2001).

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo demonstrar os benefícios e os impactos que a reciclagem do resíduo “escória de aciaria de alto-forno” pode gerar, abordar a possibilidade da utilização deste no setor da construção civil, como agregado na composição das propriedades físicas e mecânicas de componentes de alvenaria estrutural, que irá compor um sistema construtivo. Visa também indicar diretrizes para o desenvolvimento de uma metodologia que direcione este processo:

- Definir a viabilidade técnica e ambiental da utilização da escória de aciaria elétrica como agregado na confecção de unidades de componentes de alvenaria. O resíduo escória de aciaria de forno elétrico a arco (FEA)

utilizado nesta pesquisa é proveniente da empresa ArcelorMittal – localizada em Piracicaba – SP.

- Caracterização das propriedades físicas e químicas da escória, incorporada como agregado na composição do elemento construtivo, aferindo-se o potencial do material para aplicação em alvenarias estruturais, verificando o cumprimento incondicional das normas técnicas pertinentes e ambientais.
- Estudo de desempenho de prismas de três blocos e miniparedes constituídas por unidades com agregados de escória de aciaria.
- Estudo de desempenho do componente construtivo caracterizando seu enquadramento no zoneamento bioclimático brasileiro de acordo com a (NBR 15.220).
- Avaliação econômica do elemento construtivo elaborado com escória de aciaria como agregado na composição das peças, considerando as diversas variáveis intervenientes, como o beneficiamento do resíduo na própria unidade de produção e a identificação de usinas siderúrgicas, geradoras do resíduo, próximas aos grandes centros consumidores.
- Analisar a interface do elemento construtivo proposto, com outros produtos existentes no mercado.
- Propor um sistema de industrialização do elemento construtivo, desenvolver equipamentos específicos para o beneficiamento, desenvolver estudo logístico de transporte do material, até a execução do edifício.
- Elaborar um projeto de aplicação piloto para avaliar o comportamento do sistema construtivo, seu processo de montagem, organização do canteiro de obras e geração de resíduos existentes na aplicação piloto.
- Análise pós-ocupacional do comportamento estrutural e interfaces com os materiais empregados no sistema construtivo.
- Análise de desempenho térmico da edificação piloto.
- Regularizar o componente construtivo de resíduo junto a órgãos ambiental, viabilizando sua comercialização e junto ao mercado consumidor.

1.4. JUSTIFICATIVA

Atualmente, ressentem-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 reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo os custos. Os materiais alternativos geralmente são mais baratos e, muitas vezes, possuem características de resistência e durabilidade melhores que os materiais convencionais.

O setor siderúrgico é um grande reciclador. Boa parte do aço destinado ao reforço de concreto armado produzido no país, é proveniente do processo de arco elétrico, que utiliza como matéria-prima quase que exclusivamente a sucata, dentre eles a empresa ArcelorMittal. A reciclagem desta sucata permitiu economizar, em 1997, cerca de 6 milhões de toneladas de minério de ferro, evitou a geração de cerca de 2,3 milhões de toneladas de resíduos e de cerca de 11 milhões de toneladas de CO₂.¹

Durante este processo de reciclagem da sucata em forno de arco elétrico, ocorre o surgimento de vários resíduos, entre eles a escória de aciaria, que representa o maior volume residual no processo siderúrgico. A cada tonelada de aço produzido, gera-se de 70 a 170 kg de escória. Podem ser produzidos dois tipos de escória: a de alto forno é gerada durante o 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

1- Estimativa da liberação de CO₂, considerando que a produção de 1 tonelada de ferro gusa libera 2,2 toneladas de CO₂ (MARCIANO & KHIARA, 1997).

produção de ferro gusa e de aço foi de, aproximadamente, 33,8 e 31,6 milhões de toneladas, respectivamente.

Para o aproveitamento deste resíduo, a escória, 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 agregado de concreto, em subleito rodoviário ou lastro de ferrovias (ALBUQUERQUE, 2004).

Há uma extensa bibliografia sobre escória de aciaria, inclusive sobre seu uso na construção civil. Grande parte dos trabalhos pesquisados, que fazem a reutilização deste resíduo, o tratam apenas como um agregado que irá compor com vários outros agregados o desenvolvimento de uma etapa de um produto. Como exemplo, a incorporação de escória de aciaria em base e sub-base de pavimentação, incorporação em concreto como um dos elementos na composição dos agregados, incorporação em blocos de concreto como um dos elementos na composição dos agregados, todos com uma abordagem voltada ao desempenho mecânico, à estabilidade e à viabilidade do novo material.

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 certificar-se 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 alguma alteração físico-química durante o processo de reciclagem (ÂNGULO et al, 2001; CAVALCANTE e CHERIAF, 1997; FLESCHE, 2004).

Outra razão para o desenvolvimento da presente tese deve-se ao fato de que, em alguns trabalhos, apesar do relativo sucesso na produção de blocos com escória de aciaria para substituição parcial de agregados naturais por reciclados, inúmeras propriedades físicas e mecânicas, tais como a absorção de água e resistência à compressão, não atenderam aos requisitos normativos. Diante disso, este trabalho pretende produzir unidades com substituição total de agregados naturais por reciclados, que atendam irrestritamente às especificações normativas e recomendações existentes na literatura. Até o presente momento, nenhum trabalho foi conclusivo no que diz respeito à utilização de escória de aciaria para a produção de unidades de alvenaria. Na grande maioria desses estudos não foram contemplados todos os ensaios

necessários para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas das unidades, bem como o desempenho de prismas e miniparedes, fundamentais para o comportamento da alvenaria.

Após a análise de viabilidade técnica, avalie a viabilidade econômica da produção do elemento construtivo com escória de aciaria, considerando diferentes alternativas, como inserir uma linha de produção de blocos diretamente na planta das siderúrgicas geradoras do resíduo, ou transportar o resíduo até uma linha de produção em locais próximos aos grandes centros consumidores.

Outro ponto importante que fundamenta este trabalho refere-se à racionalização da construção promovida pela alvenaria estrutural. Além de ser uma tecnologia que reduz o impacto ambiental, também promove uma redução no custo final da edificação, através da eliminação de formas, cimbramentos e redução do consumo de armaduras, possibilitando sua aplicação em habitações populares, reurbanização de favelas e sistemas de mutirão.

Finalmente, diante das justificativas apresentadas, torna-se necessária a quantificação de todos os intervenientes presentes na produção do elemento construtivo de alvenaria estrutural com o emprego de escória de aciaria, estabelecendo inúmeros ensaios que contemplem todas as propriedades físicas e mecânicas das unidades e dos elementos produzidos. Então, deste modo, produziremos subsídios para promover um consenso na comunidade científica, no que diz respeito ao emprego de escória de aciaria como agregado na produção de elementos construtivos para unidades de alvenaria estrutural.

1.5. METODOLOGIA

O processo de pesquisa e desenvolvimento de um novo material ou produto a partir de um resíduo, que venha a se estabelecer como uma alternativa de mercado ambientalmente segura, é uma tarefa complexa, envolvendo conhecimentos multidisciplinares. Assim, a abordagem metodológica do trabalho é dividida em cinco etapas.

A primeira etapa consiste na identificação e qualificação do resíduo, análise das propriedades físicas da escória de aciaria da ArcelorMittal.

Figura 1.1

Figura 1.1 – Abordagem metodológica da primeira etapa experimental.

A segunda etapa consiste na análise das propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova cilíndricos, utilizando agregados de escória de aciaria selecionados na 1ª. etapa. Figura 1.2

Figura 1.2 – Abordagem metodológica da segunda etapa experimental.

A terceira etapa consiste na análise das propriedades físicas e mecânicas da unidade de alvenaria, utilizando os traços definidos na 2ª. etapa. Nesta etapa também é realizado o estudo de viabilidade econômica. Figura 1.3

Figura 1.3 – Abordagem metodológica da terceira etapa experimental.

A quarta etapa consiste na análise das propriedades mecânicas de elementos representativos (prismas e miniparedes), produzidas com as unidades da 3ª. etapa e a avaliação da retração por secagem dos elementos construtivos. Figura 1.4

Figura 1.4 – Abordagem metodológica da 4ª. etapa experimental.

A quinta etapa consiste na aplicação experimental piloto, avaliação do comportamento do elemento construtivo, relação da interface com materiais de construção existentes no mercado e desempenho térmico e estrutural.

Figura1.5

Figura 1.5 – Abordagem metodológica da 5ª. etapa experimental.

RESÍDUO DE ESCÓRIA DE ACIARIA

2.1 A PRODUÇÃO MUNDIAL DE AÇO

A sociedade moderna encontra-se alicerçada no uso do ferro e do aço como matéria-prima na produção de bens de consumo, que se tornam obsoletos, transformam-se em sucata, e alimentam novamente as aciarias na produção de ferro e aço, função principalmente da expressiva economia energética no processo produtivo. Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos (SICETEL), há uma crescente produção de aço no mundo, 1.547 milhões de toneladas (Mt) em 2012. Os dados da figura 2.1 indicam que a produção mundial de aço cresceu 2,0% em 2012 em relação a 2011 e, no período de 2007 a 2012, o crescimento foi de 15%. Segundo informações da World Steel Association – (WSA), existe hoje no mundo um excedente de capacidade de produção de aço superior a 580 milhões de toneladas, e este excedente deverá aumentar nos próximos três anos.

Figura 2.1 - Produção mundial de aço. Fonte: WSA/ ALACERO/ Aço Brasil

A contribuição de todos os países na produção mundial de aço pode ser observada na figura 2.2 e tabela 2.1. Entre as quinze maiores siderúrgicas do mundo, onze são asiáticas e sete são chinesas, sem contar a ArcelorMittal, do grupo indiano, que é a maior produtora mundial e tem fábricas em todo o mundo, inclusive no sudeste asiático. A ArcelorMittal – Brasil possui várias unidades em território nacional. A unidade de Piracicaba SP produz aço para construção civil e é fornecedora do resíduo de escória de aciaria utilizado no desenvolvimento desta pesquisa. A siderurgia ocidental, acostumada a atuar em ambientes de economia de mercado em sistemas capitalistas, tem o enorme desafio de encontrar uma forma de ser competitiva, concorrendo com um subsídio de forte participação do Estado. Essa concorrência acontece entre empresas ocidentais, onde a alocação de capital é feita com base na atratividade do capital de cada empresa isoladamente, com empresas de países com forte planejamento centralizado, onde o resultado da cadeia é mais importante do que o de uma empresa ou de um elo da cadeia produtiva. Talvez a maior ameaça para a siderurgia ocidental não esteja nas exportações diretas de aço da China, mas nas exportações indiretas de aço através de produtos da cadeia metal-mecânica provenientes do sudeste asiático.

Figura 2.2 - Produção mundial de aço por país. Fonte: WSA/ ALACERO/ Aço Brasil

Tabela 2.1 - Produção mundial de aço por país

Países	2007	2008	2009	2010	2011	2012
China	490	512	577	639	702	717
Japão	120	119	88	110	108	107
Estados Unidos	98	91	58	81	86	89
Rússia	72	69	60	67	69	70
Índia	54	58	64	69	78	78
Coreia do Sul	52	54	49	59	69	69
Alemanha	49	46	33	44	44	43
Ucrânia	43	37	30	33	35	33
Turquia	26	27	25	29	34	36
Brasil	34	34	27	33	35	35

Fonte : WSA/ALACERO/Aço Brasil

Diante da alta produtividade de aço no mundo, pode-se projetar a geração de escória, que corresponde entre 12% a 15% da produção de aço, sendo assim, em 2012 se produziu aproximadamente 216,58 Mt e escória. Se estocada ocuparia uma área anual de 5.414 hectares por 2,5 metros de altura.

Na América Latina, observamos na figura 2.3 e tabela 2.2 que a produção de aço em 2012 caiu 3% em relação ao ano anterior. Nos últimos anos, a produção de aço na região se manteve estagnada em torno de 60 a 70 milhões de toneladas/ano. O Brasil é disparado o maior produtor da região, com mais de 50% da produção, representando quase o dobro do segundo produtor que é o México. O Grupo Gerdau, brasileiro, é o décimo quarto produtor mundial de aço.

Figura 2.3 - Produção latino-americana de aço por país. Fonte WSA/ ALACERO/ Aço Brasil

Tabela 2.2 - Produção latino-americana de aço por país.

Unid. Kt

Países	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Brasil	33.782	33.716	26.506	32.948	35.220	34.524
México	17.563	17.230	13.957	16.710	18.110	18.095
Argentina	5.478	5.627	4.050	5.138	5.611	4.995
Venezuela	4.224	4.224	3.808	2.207	2.980	2.359
Chile	1.678	1.549	1.308	1.011	1.615	1.671
Colômbia	1.245	1.053	1.052	1.180	1.287	1.302
Peru	857	1.002	718	876	877	981
Trinidad e Tobago	695	489	417	572	603	557
América Central	422	313	275	338	386	406
Cuba	269	279	267	278	282	277
Paraguai	109	83	54	59	30	44
Equador	87	128	259	357	463	425
Uruguai	71	86	56	65	80	78
Total	67.261	65.779	52.727	61.739	67.544	65.714

Fonte : ALACERO/Aço Brasil

2.2. A PRODUÇÃO BRASILEIRA DE AÇO

A produção brasileira em 2012 caiu 2% em relação a 2011, conforme a tabela 2.3, Mesmo assim, o país se manteve como o nono produtor mundial. Entre 2004 e 2012, a produção brasileira ficou estagnada entre 33 e 35 milhões de toneladas/ano e a participação do Brasil na produção mundial de aço bruto caiu de 3% para 2,2%. No mesmo período, houve uma grande transferência de margem da siderurgia para o setor de mineração, o que levou as siderúrgicas a priorizarem os investimentos na verticalização (produção própria de minério de ferro), em detrimento dos investimentos em aumento de capacidade. Como podemos observar na figura 2.4 o estado de Minas Gerais continua sendo o maior produtor brasileiro de aço.

Figura 2.4 - Produção brasileira de aço. Fonte - Instituto Aço Brasil (IABR)

Tabela 2.3 - Produção brasileira de aço.

Unid. Kt

Estados	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MG	11.914	11.990	8.705	11.634	11.704	11.780
RJ	6.890	6.619	5.837	7.221	9.980	10.261
SP	6.712	6.302	4.730	5.765	5.586	5.607
ES	6.219	6.690	5.638	6.335	5.858	4.809
RS	815	806	604	803	812	776
Outros Estados	1.232	1.309	992	1.190	1.280	1.291
Total	33.782	33.716	26.506	32.948	35.220	34.524

Fonte: IABR

Entre as principais empresas no setor siderúrgico nacional, destacam-se a GERDAU, Usiminas, ArcelorMittal, CSN, que respondem pela maior produção do mercado nacional conforme figura 2.5 e tabela 2.4.

Figura 2.5 - Produção de aço bruto por empresa. Fonte - Instituto Aço Brasil (IABR)

Tabela 2.4 - Produção de aço bruto por empresa

Empresa	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Capacidade(1)
AM Longos	3.739	3.502	3.171	3.394	3.538	3.423	3.970
Aperam	797	770	607	771	739	728	868
AM Tubarão	5.692	6.177	5.334	5.956	5.405	4.390	7.740
CSA				478	3.147	3.510	5.200
CSN	5.323	4.985	4.375	4.902	4.847	4.874	5.750
GERDAU	8.111	8.711	6.105	8.177	8.777	8.181	11.400
Votorantim	624	712	617	1.041	1.145	1.086	1.790
Sinobras		42	181	239	243	319	300
Usiminas	8.675	8.022	5.637	7.298	6.698	7.157	9.457
V&M.	686	655	387	573	537	511	700
VSB					39	192	500
Villares Metals	135	140	92	119	137	121	165
Total	33.782	33.712	26.506	32.948	35.220	34.524	47.840

Fonte: Aço Brasil

(1) Estimado pelo SICETEL

As principais empresas siderúrgicas do Brasil estão distribuídas no território nacional, conforme demonstrado na figura 2.6. Esta localização nos permite observar onde obter a matéria-prima (resíduo de escória de aciaria) para o desenvolvimento desta pesquisa. Podemos notar que a fonte geradora do resíduo se encontra próxima aos grandes centros urbanos, como Porto Alegre, Curitiba, São Paulo, Rio de Janeiro, Vitória e Belo Horizonte. Estas cidades, como a maioria dos grandes centros brasileiros, enfrentam problemas comuns a todas elas, como a falta de habitações populares, áreas de ocupação irregulares, desenvolvimento de favelas, situações as quais este projeto de pesquisa vem atender. Diante desta localização estratégica, a potencial aplicação dos resultados desta pesquisa será consumida no próprio local de obtenção da matéria-prima (resíduo de escória de aciaria), evitando despesas com transportes de longos trechos, viabilizando sua logística e redução do preço final ao consumidor.

Figura 2.6 - Localização das principais siderúrgicas. Fonte – MG/ES – Sistema Infraestrutural – Arte/Cidade – PUC/SP e UFES

2.3. RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DO AÇO

A faixa de geração de resíduos sólidos na siderurgia é de 400 kg a 700 kg por tonelada de aço produzido, variação está em função da rota tecnológica de produção. Estes índices abrangem os resíduos produzidos diretamente nos processos, como as escórias, as carepas e outros provenientes dos sistemas de controle de poluição hídrica ou atmosférica, como as lamas de alto forno e aciaria e os pós-coletados nos equipamentos de despoeiramento, como filtros de manga e precipitadores eletrostáticos (ArceloMittal Piracicaba SP). A figura 2.7 demonstra um fluxograma da produção do aço para bens de consumo. Neste processo a etapa com maior geração de resíduos se encontra nos fornos, no processo pirometalúrgico, onde são gerados as lamas, o pó de aciaria e a escória de aciaria.

Figura 2.7 - Fluxograma ilustrado da produção de aço para bens de consumo. Fonte – GERDAU

A redução dos custos, tanto de deposição quanto de tratamento dos resíduos, pode ser obtida de duas formas complementares: a redução no volume da produção de resíduos gerados ou na reutilização destes, atentos a sua periculosidade. A redução no volume produzido apresenta limitações técnicas difíceis de serem ultrapassadas. Já a reutilização apresenta menor dificuldade,

além de 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 (ÂNGULO, 2000; JOHN,1997).

A indústria siderúrgica mundial e a brasileira encontram-se alicerçadas no uso da sucata como matéria-prima na produção de ferro e aço, função, principalmente, da expressiva economia energética no processo produtivo. A fração significativa dessa sucata é proveniente da reciclagem de bens de consumo obsoletos. Figura 2.8.

Figura 2.8 - Fluxograma da reciclagem de produtos obsoletos. Fonte Instituto Aço Brasil (IABR)

A sucata obtida pela eliminação de rejeitos industriais e pela obsolescência de bens de consumo e de capital pode ser gerada internamente pela usina siderúrgica ou ser adquirida no mercado. Na figura 2.9 pode-se observar a distribuição da oferta de sucata pelas fontes geradoras. Nos dias de hoje a sucata é o principal elemento metálico da carga de fornos elétricos a arco (EAF- Electric Arc Furnace). Estes fornos vêm progressivamente expandindo sua atuação e subtraindo os mercados de antigos processos siderúrgicos em todo o mundo. Já respondem atualmente por 33% da produção mundial de aço, e esse

avanço deve continuar a uma alta taxa média de 3,9% ao ano. Para o ano de 2010, a sucata de obsolescência representou algo em torno de 60% da oferta mundial, o que, somado à sucata de geração industrial, resulta em 84% da oferta mundial de sucata (ANDRADE et al., 2000).

Figura 2.9 - Distribuição de oferta pelas fontes de sucata. Fonte UNCTAD, BNDES.

No Brasil, o setor de reciclagem de materiais ferrosos, estruturado na década de 1970, atua com equipamentos para preparo e beneficiamento da sucata de obsolescência. O setor é composto por cerca de 2.500 empresas espalhadas por todo o país, com capacidade para processar até 420 mil toneladas de sucata por mês (SIMEÃO, 2003). De acordo com o Instituto Nacional das Empresas de Preparação de Sucata de Ferro e Aço (INESFA), o Brasil recicla nove milhões de toneladas de ferro e aço anualmente em todo O território nacional, com aproximadamente 270.000 postos de trabalho, somadas as atividades de coleta, o setor é composto por cerca de 3.000 empresas, de pequeno e médio porte, que processam a distribuição do material, tendo essas atividades importantes reflexos ambientais (SINDINESFA, 2004).

O cenário da siderurgia brasileira, pela tradicional preponderância da rota tecnológica integrada, não fomentou condições para o desenvolvimento de um forte mercado sucateiro independente. Atualmente, com uma produção total de 35Mt de aço bruto, dos quais apenas 7,7Mt são por meio de fornos elétricos, o Brasil consome 7,3 Mt de sucata, representando 2,2% do total mundial. Trata-se

do 14º maior consumo mundial de sucata ferrosa. Praticamente toda sucata consumida no país é também proveniente do próprio território nacional. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), cerca de 25% da produção brasileira de aço no ano 2000 foi à base de sucata, na sua maior parte adquirida no mercado (SIMEÃO, 2003).

2.4 RESÍDUOS DA ARCELORMITTAL – PIRACICABA – (AMP)

Para o desenvolvimento desta pesquisa, contou-se com a colaboração da empresa ArcelorMittal S.A., um conglomerado industrial multinacional de empresas de aço com sede na Avenue de la Liberté, em Luxemburgo. Foi formada em 2006, a partir da fusão da Mittal Steel Company e da Arcelor. Seu fundador e presidente, Lakshmi Mittal, criou a companhia em 2006.

A unidade da empresa colaboradora desta pesquisa está localizada na cidade de Piracicaba – SP. A planta siderúrgica da ArcelorMittal Piracicaba (AMP), tem capacidade para a produção de 1 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.

Embora a eficiência da reciclagem da sucata de obsolência seja relativamente alta, há sobra de material residual, como a escória, a carepa e outros, cuja disposição final em aterros demanda cuidados especiais (aterros exclusivos) e elevado capital, devido aos volumes diariamente gerados.

Tabela 2.5 - Quantidade de resíduos gerados anualmente pela ArcelorMittal.

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

Fonte: ArcelorMittal de Piracicaba - * Outros resíduos advindos do processo de reciclagem do aço.

A quantidade de resíduos gerada em uma planta siderúrgica depende diretamente da qualidade do material que é processado e do processo empregado. Portanto, a escória gerada pela ArcelorMittal consiste no rejeito da sucata de ferro e aço utilizada, conforme a tabela 2.5. O processo de beneficiamento da sucata de obsolência é composto por duas etapas: (i) inicialmente, a sucata é triturada em máquina de Shredder, visando ao aumento de sua densidade aparente e melhoria de condições para a eliminação de impurezas agregadas; e (ii), em seguida, os componentes de interesse (metais ferrosos), são separados por atração magnética, com o auxílio de um separador magnético, conforme a figura 2.10. Durante este processo de beneficiamento da sucata de obsolência, o material residual gerado é denominado Terra de Shredder.

Figura 2.10 - Representação esquemática do processamento da sucata de obsolência na AMP.
Fonte: ArcelorMittal de Piracicaba.

O beneficiamento da sucata de obsolência e posterior separação por atração magnética têm eficiência média de 75%, isto é, para cada 100 toneladas de sucata de obsolência, são geradas 75 toneladas de sucata para ser utilizada

nos fornos elétricos. A etapa de preparação de matéria-prima é fundamental, pois, quanto mais limpa for a sucata ferrosa carregada no forno elétrico (isto é, quanto mais isenta de impurezas, como terra, plástico, borrachas, espumas e mesmo metais não-ferrosos), menor será a geração de escória e de pó de aciaria.

Após o beneficiamento da sucata ferrosa, o material é encaminhado ao forno elétrico de fusão, revestido de refratário à base de óxido de magnésio (MgO). A sucata, misturada com 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. Figura 2.11.

Figura 2.11 - Adição de ligas fundentes na panela durante o vazamento da corrida. Fonte AMP

Os resultados deste processo são resíduos com propriedades completamente diferentes daqueles já conhecidos e estudados, como da escória.

Figura 2.12 - Reações metalúrgicas do refino. Fonte AMP.

Durante as reações metalúrgicas (figura 2.12), há o surgimento da escória de aciaria (figura 2.13), um resíduo 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).

Figura 2.13 - Formação da escória sobre o aço líquido. Fonte AMP

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 a obtenção de ferro-gusa. A escória de aciaria é obtida na produção do aço (MASUERO et al, 2001).

Tabela 2.6 – Composições das Escórias de Alto-Forno e de Aciaria (Análises Típicas)

	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	FeO	MnO	S
Alto-Forno	40%	10%	35%	7%	1%	1%	1.0%
Aciaria	40%	5%	10%	5%	25%	4%	0.1%

Fonte: AMP

O maior fator limitante de utilização da escória de aciaria é sua expansibilidade, sendo recomendável um prévio estudo de seu comportamento. A causa da expansão ocorre principalmente devido à presença de óxidos de cálcio (CaO) livre, e óxidos de magnésio (MgO) reativo. Quando hidratados, ocorre aumento de volume, ou seja, a expansão da escória. A cal livre é responsável pela expansão em curto prazo, quando é transformada, em presença de umidade, em cal extinta. Já o óxido de magnésio é responsável pela expansão em longo prazo, devido a 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 estar combinado, também denominado periclase (ALBUQUERQUE, 2004; MASUERO et al, 2001).

2.5. EXPERIÊNCIAS E CAMPOS DE APLICAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Como a escória de aciaria é o resíduo de maior volume gerado nas siderúrgicas, a reutilização da escória tornou-se prioritária quanto ao aspecto ambiental. Além dos benefícios econômicos e energéticos que novas tecnologias de aproveitamento da escória de aciaria vêm proporcionando, países desenvolvidos e grandes produtores de aço reutilizam a escória de aciaria em diversos segmentos, consumindo entre 70% e 80% da escória produzida.

Reutilização da Escória de Aciaria – União Européia

Figura 2.14 - 72% da escória reciclada em 2004. Fonte: Euroslag.

Conforme podemos observar na figura 2.14, a União Europeia reutiliza 45% da escória de aciaria no setor de estradas de rodagem, isto acontece devido ao desenvolvimento tecnológico que se tem sobre o material e também a normatização com relação ao uso (figuras 2.15 e 2.16).

Figura 2.15. Sub-Base (Alemanha). Fonte AMP

Figura 2.16. Base (Alemanha). Fonte AMP

Cerca de 17% da escória de aciaria é estocada, e 14% reciclada internamente dentro das próprias aciarias. Outro fator que nos chama a atenção é que apenas 1% da escória é utilizada na produção de cimento, ao contrário do Brasil e Japão, que utilizam este material em larga escala na fabricação deste

produto. A engenharia naval da União Européia e Norte- Americana utiliza este material para construção de diques e contenção de encostas de rios, apesar de percentualmente representar muito pouco, cerca de 3%. Como podemos observar (figura 17), a escória é utilizada na Alemanha para contenção de margens de rios. Outra obra que podemos observar (figura 18), como exemplo de engenharia naval, é este dique marítimo nos EUA.

Figura 2.17. Contenção em margem de rios (Alemanha)

Fonte AMP

Figura 2.18. Diques marítimos (USA).

Fonte AMP

Algumas outras curiosidades da reutilização da escória, também nos EUA, é o sistema de filtragem de água em estação de tratamento (figura 2.19) e a formação de viveiros de ostras em pedras de escória (figura 2.20).

Figura 2.19 – Leito de Filtragem de Água (USA).

Fonte AMP

Figura 2.20 – Viveiro de Ostras (USA).

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas para reutilizar a escória na agricultura, principalmente para neutralizar a acidez dos solos, como já é prática em alguns países como EUA, Japão, China, Coréia, Canadá, entre outros. A escória de aciaria possui um potencial muito grande para sua utilização em diversas áreas, como podemos observar, havendo por parte das aciarias uma campanha para utilização deste material em larga escala, respeitando as

normas e parâmetros ambientais. 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.

2.6 A ESCÓRIA DE ACIARIA DA AMP

Após o processo de fundição, o pote de escória é retirado da usina por um veículo denominado pot-carrier, como podemos observar na figura 2.21, que leva este material ainda em estado líquido para depositá-la em local aberto, (figura 2.22), ocasionando o processo de resfriamento.

Figura 2.21 - Coleta da escória na aciaria. Fonte AMP.

Figura 2.22 - Transporte da escória. Fonte AMP.

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”. Figura 2.23

Figura 2.23 - Resfriamento controlado da escória. – Fonte AMP

No Brasil, estima-se que a geração de escória, em 2005, tenha totalizado cerca de 10 milhões de toneladas, sendo 3,5 milhões de escória de aciaria, o que representa 35% do total de escórias geradas. A produção anual de escória é em geral estimada em função das produções de aço e dos índices médios de geração. A escória de aciaria, antes de ser utilizada, sofre um processo de beneficiamento, para que o material esteja em condições de ser comercializado. Após a coleta da escória na aciaria, transporte (figura 2.22) e resfriamento controlado (figura 2.23), a escória é encaminhada à planta de processamento (figura 2.24).

Figura 2.24 - Planta e processamento da escória de aciaria. Fonte AMP

A planta de processamento da escória é composta por várias etapas - na primeira etapa, a escória passa por um britador acoplado a uma peneira elétrica, que tritura o material e o seleciona para a etapa seguinte (figura 2.25).

Figura 2.25 . Britagem e peneiramento da escória de aciaria. Fonte - AMP

Na etapa seguinte, a escória, já triturada e selecionada, passa por uma esteira imantada, que retira o que restou de ferro no material. Este ferro retirado da escória retorna aos fornos para novamente ser fundido e fazer parte da produção do aço (figura 2.26).

Figura 2.26 - Separação Magnética (Remoção do ferro metálico). Fonte - AMP

Após a retirada de grande parte dos componentes metálicos da escória, a etapa seguinte consiste na classificação granulométrica do material que será definido de acordo com os requisitos de mercado (figura 2.27). A granulometria de maior consumo é a que ocorre entre 50mm a 150mm (figura 2.28), que é a mais utilizada como base e sub-base para pavimentação de estradas de rodagem e vias públicas. Ass granulometrias menores entre 2mm a 5mm, (figura

2.29), são utilizadas, na maioria das vezes, pela indústria de cimento e também na agricultura, como corretivo de solo.

Figura 2.27 . Classificação granulométrica conforme requisitos do mercado. Fonte AMP

Figura 2.28 - Escória de 50 mm – 150 mm

Fonte AMP

Figura 2.29 - Escória de 2 mm – 5 mm.

Fonte AMP

Terminado o processo de beneficiamento, a escória passa por um controle de qualidade, com o objetivo de monitorar seu processo de expansão, (figura 2.30), pois, só após estabilizado, o material pode ser utilizado em diversas áreas.

Figura 2.30. Controle de expansão. Fonte AMP

Figura 2.31. Estocagem e cura. Fonte AMP

As escórias são comercializadas no exterior na faixa de US\$ 3,00 a US\$ 4,00/t FOB² usina. No Brasil, o material pode ser vendido na faixa que varia de R\$ 5,00 a R\$ 12,00/t FOB usina, o que inclui o custo de processamento, ou seja, a separação magnética do metal, a classificação granulométrica por peneiramento e a cura, com respectivos testes de expansibilidade. Hoje, no Brasil, os grandes consumidores são as prefeituras locais, que utilizam a escória na execução de pavimentação de vias públicas nas camadas de infraestrutura (aterro, sub-base e base), e até como revestimento betuminoso, isto é, em todas as camadas dos pavimentos, respeitando as normas e os órgãos fiscalizadores de seus estados (ARAÚJO, 2006). No estado de São Paulo existem restrições de comercialização deste produto, devido à falta de normatização da escória de aciaria no Brasil.

2.6.1 Características da Escória da AMP

A análise da composição da escória utilizada para os experimentos foi realizada por solicitação da AMP, junto ao laboratório Bioagri Ambiental Ltda., sediado em Piracicaba SP. As amostras foram coletadas segundo a NBR 10005, e são apresentadas resumidamente a seguir, na tabela 2.6.³

² O termo FOB é uma característica frequente de contratos para a venda de bens, especialmente quando as mercadorias devem ser entregues a um destino estrangeiro.

³ O laudo completo da análise da composição da escória e a determinação da massa bruta da AMP encontra-se no Anexo A

Tabela 2.7 – Composição centesimal da escória da AMP.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados
Resultados expressos sobre as Amostras Base Úmida			
Cinzas	% (p/p)	0,05	94,02
Umidade	% (p/p)	0,05	0,69
Fósforo	mg/kg	0,5	257
Nitratos	mg/kg	0,5	1,3
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)	0,05	7,6
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
Potássio (K ₂ O)	mg/kg	0,5	522
Sílica + Insolúveis	% (p/p)	0,05	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.

Tabela 2.8 Determinação sobre a massa bruta da escória da AMP.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP
Unidade	%(p/p)	0,1	0,66	
Inflamabilidade				
Ponto de Fugor	°C		>100	60 ^d
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.

2.6.2. Ensaio de Lixiviação e de Solubilização da Escória da AMP

Os ensaios de lixiviação e de solubilização da escória foram realizados, por solicitação da AMP, no laboratório Bioagri Ambiental Ltda., de Piracicaba SP, e são apresentados nas tabelas 2.8 e 2.9, respectivamente. Além desses ensaios, também foram elaboradas avaliações de umidade, inflamabilidade, corrosividade e reatividade. Todas as análises foram realizadas com base nas normas NBR 10004, e o laudo completo encontra-se no Anexo B.

Tabela 2.9 Determinação sobre o lixiviado obtido da escória da AMP.

Parâmetros	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
Bário	mg/L	0,1	0,12	70
Cádmio	mg/L	0,05	<0,05	0,5
Chumbo	mg/L	0,05	<0,05	1
Cromo Total	mg/L	0,05	<0,05	5
Fluoreto	mg/L	1	<1,0	150
Mercúrio	mg/L	0,05	<0,05	0,1
Prata	mg/L	0,05	<0,05	5
Selênio	mg/L	0,05	<0,05	1

LQ: Limite de Quantificação; VMP: Valor Máximo Permitido - Fonte – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Tabela 2.10 – Determinação sobre o solubilizado obtido da escória da AMP.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultado	VMP
pH final				
Inorgânicos				
Alumínio	mg/L	0,05	0,05	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	<0,01	0,01
Bário	mg/L	0,1	0,02	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	<1,0	250
Cobre	mg/L	0,05	<0,05	2
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
Mercúrio	mg/L	0,001	<0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	<0,1	10
Prata	mg/L	0,05	<0,05	0,05
Selênio	mg/L	0,01	<0,01	0,01
Sódio	mg/L	0,1	1,3	200
Sulfato (como SO ₄)	mg/L	1	6,26	250
Surfactantes	mg/L	0,1	<0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,05	<0,05	5

LQ: Limite de Quantificação; VMP: Valor Máximo Permitido Fonte Laboratório Bioagri Ambiental Ltda. Nota - boletim completo de determinação de Massa Bruta, Lixiviado e Solubilizado da escória da AMP encontra-se no Anexo B.

2.6.3. Interpretação dos resultados das análises

Lixiviado: os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos permitidos. Segundo a NBR 10004, é o lixiviado que determina se o resíduo é perigoso.

Portanto, o resíduo (escória) analisado é considerado **NÃO PERIGOSO**.

Solubilizado: os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos permitidos. Segundo a NBR 10004, a escória da AMP deve ser considerada **Classe II – B**.

Existem, porém, variações de resultados, considerando o lote de escória a que foi submetida a análise. No entanto, em qualquer lote de escória da AMP analisado, o resultado dos parâmetros do Lixiviado nunca ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma 10004. Portanto, é considerado um resíduo **NÃO PERIGOSO**. Todavia, os parâmetros analisados no Solubilizado sofrem pequenas variações, em alguns lotes ultrapassam os limites da norma 10004, obtendo outra classificação, **Classe II A**.

Devido a estas variações, a AMP mantém um monitoramento constante dos óxidos presentes na escória. Não há sazonalidade na produção da escória da AMP, a empresa opera seus fornos interruptamente e mantém um alto nível de escória em seu estoque, causado pelas dificuldades normativas e ambientais impostas pela CETESB.

2.7. AVALIAÇÕES DA ESCÓRIA - AMP - NA EESC/USP

A caracterização da escória de aciaria da AMP foi feita no item 2.4. Neste item, abordaremos as características físicas e o processo de preparação da escória para incorporá-la no composto do elemento construtivo.

O procedimento de avaliação da escória de aciaria da AMP consiste primeiramente na secagem da amostra ao ar livre, até que a umidade permaneça próxima a zero, conforme a figura 2.32.

Figura 2.32 - Secagem ao sol da escória AMP, recebida no laboratório da EESC/USP.

Fonte – Arquivo pessoal do Autor.

Após a secagem, a escória é peneirada para se obter a granulometria desejada. Por se tratar de um material ainda não normatizado, o método de separação mecânica utilizado para a determinação da granulometria da escória foi realizado com base na NBR 7217/87 “Agregados – Determinação da composição Granulométrica”. Utilizaram-se as peneiras descritas na norma, de série intermediária, além de um peneirador mecânico. Para isso, o material foi peneirado em partes de 10 kg, pelo tempo de 10 min, em peneirador mecânico existente no laboratório.

Aberturas das peneiras intermediárias (NBR 7217/87):

- Malha de 9,5mm
- Malha de 4,8mm
- Malha de 2,4mm
- Bandeja onde fica o material de fundo ou pó.

Figura 2.33 : Material retido em malha 9,5mm
4,8mm Fonte – Arquivo pessoal do autor

Figura 2.34: Material retido em malha
Fonte – Arquivo pessoal do autor

Figura 2.35: Material retido em malha 2,4mm
2,4mm Fonte – Arquivo pessoal do autor

Figura 2.36: Material passante em malha
Fonte – Arquivo pessoal do autor

Em amostra de 33 kg de escória, caracterizada como em estado “bruto”, ou seja, da maneira como chega da indústria AMP, obteve-se a seguinte caracterização de granulometrias retidas nas diversas malhas:

Tabela 2.11 Caracterização das Granulometrias em amostra-padrão:

AMOSTRA BRUTA = 33kg		
Malhas	Quantidade (g)	Porcentagem
Retido		
9,5mm	8.350	25%
4,8mm	6.550	20%
2,4mm	3.150	10%
Passante		
2,4mm e fundo	14.700	45%

Após a caracterização das granulometrias, foi analisado em testes de agregado que a granulometria ideal para a correta moldagem do elemento construtivo em máquina hidráulica, bem como a otimização de suas capacidades mecânicas, seria aquela que passasse em malha de 2,4 mm, inclusive o “fundo” ou (filer). Como pode ser observado na tabela 2.10, cerca de 45% de todo o material em “estado bruto” foi utilizado para moldagem, o restante do material, ou seja, todo aquele retido em malhas maiores que 2,4 mm, foi descartado.

METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos referentes à produção do componente construtivo. Pela falta de literatura referente à incorporação de escória de aciaria na produção de componentes construtivos, utilizamos como referência a metodologia de dosagem de blocos de concreto com agregados naturais. O objetivo principal deste capítulo é fornecer subsídios para a compreensão da metodologia adotada e discussão dos resultados obtidos.

De acordo com FRASSON JÚNIOR (2000), as metodologias de dosagem existentes são bastante deficientes, e dependem fundamentalmente de testes em fábricas. Os concretos de consistência seca, empregados na produção de blocos, possuem características de um concreto levemente umedecido, sendo necessária a utilização de máquinas que conferem compacidade à mistura para a retirada do ar aprisionado. Embora, na produção de blocos de concreto, a utilização das vibro-prensas esteja diretamente relacionada com o alcance da resistência e da qualidade desejada, em nossa pesquisa, faremos uso de uma prensa hidráulica utilizada para fabricação de blocos de solo-cimento que não tem o dispositivo vibratório. O motivo da utilização deste equipamento é devido à composição do sistema construtivo proposto no trabalho, no qual as peças do elemento de alvenaria são montadas sem a utilização de argamassa em seu assentamento.

Usualmente, para a fabricação de blocos, são utilizados cimento Portland de alta resistência inicial, agregado miúdo (areia natural/artificial e/ou pó de pedra), agregado graúdo (pedrisco), e aditivo plastificante. A utilização de cimento de alta resistência inicial é recomendada, pois acelera a desmoldagem do material. A NBR 6136 limita a zona de graduação zero para os agregados graúdos na produção dos blocos, uma vez que o agregado não pode possuir grãos com diâmetro superior a metade da espessura da menor parede do bloco.

MEDEIROS (1993) recomenda a utilização de areia de rio, pois se apresenta lavada desde a origem; por outro lado, condena o emprego de resíduos de britagem, denominado pó-de-pedra. De acordo com o pesquisador, geralmente tais materiais apresentam grande quantidade de finos, com presença de grãos angulosos de textura áspera; esses agregados geram uma mistura de baixa plasticidade, e exigem uma maior quantidade de água de amassamento. FRASSON JUNIOR (2000), relata que o pó-de-pedra é um material que deve ser avaliado cuidadosamente, devido à variação do módulo de finura e à fração passante na peneira 0,30 mm. O emprego do pó-de-pedra ou areia fina em maiores porcentagens é recomendado para traços com baixo consumo de cimento; nesse caso, os finos presentes nesses materiais melhoram a coesão e a textura superficial do bloco.

Nesta pesquisa foi utilizado a granulometria $\leq 2,4\text{mm}$ de escória de aciaria, na tentativa de baixar o consumo de cimento e melhorar a coesão e a textura superficial do elemento construtivo.

3.1. METODOLOGIAS DE DOSAGEM

De acordo com MEDEIROS (1993), os blocos de concreto devem cumprir os seguintes requisitos:

- Coesão no estado fresco,
- Máxima compacidade,
- Resistência mecânica compatível,
- Textura superficial,

A composição ideal entre os agregados é um dos primeiros passos para as dosagens dos concretos secos. Esse procedimento baseia-se na formulação de uma mistura com um mínimo de vazios possíveis, visando alcançar as maiores massas unitárias. A busca por um menor volume de vazios visa encontrar uma proporção entre agregados que resulte em uma mistura mais compacta, por ter relação direta com a resistência à compressão; além disso, quanto menor a umidade da mistura, para cada teor de cimento, maiores serão

as resistências alcançadas; entretanto, caso esta quantidade seja excessiva, poderão ocorrer problemas na desforma (FRASSON JÚNIOR 2000).

Existem vários métodos de dosagem para produção de blocos de concreto, todos utilizam máquinas vibro-prensas, que não é o nosso caso, mas empregamos o sistema de proporcionalidade entre os agregados, aplicado nos métodos pesquisados, para adaptar nosso traço à prensa hidráulica utilizada nesta pesquisa. Entre os métodos pesquisados, utilizamos como diretrizes os seguintes:

3.1.1 Método da ABCP

O método sugerido pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP e desenvolvido por FERREIRA (1990), baseia-se na determinação de proporções entre areia e pedrisco, que resultam na máxima compacidade da mistura e, conseqüentemente, na maior resistência. O método consiste na comparação de massas que cabem em um recipiente padronizado e de volume conhecido. O procedimento é descrito nos itens subsequentes:

A – Secagem dos agregados – Areia e Pedrisco

B – Os agregados são previamente misturados e colocados em um recipiente com quadrado (colarinho) metálico já adaptado (40 cm x 40 cm), e de volume conhecido. Procede-se o adensamento, retira-se o quadro, rasa-se e pesa-se. A composição de maior massa será a ideal indicando a máxima compacidade possível.

C – Caso haja mais de dois agregados, determina-se a composição com os dois mais graúdos e depois a composição desses agregados com o miúdo.

De acordo com FRASSON JÚNIOR, o método ABCP não leva em consideração a granulometria nem as características particulares do agregado, o que resulta, muitas vezes, no alcance de misturas compactas, mas pouco coesivas. Outra deficiência apontada se refere a não inclusão do cimento nos estudos de composição, uma vez que esse material fino é extremamente importante na redução de vazios e, principalmente, na coesão da mistura. A metodologia, segundo FRASSON JUNIOR (2000), também é falha quando se utiliza um terceiro agregado para suprir as necessidades de fino na mistura. Em traços já dosados, quando se utilizou areia fina nas misturas, foram obtidos

resultados que conduziram a um consumo excessivo desse agregado para o menor volume de vazios, com consequente redução mecânica dos blocos (alta superfície específica do material, demandando quantidades elevadas de água e pasta de cimento).

3.1.2 Método da Besser Company.

O método adotado pela Besser Company, fabricante americana de máquinas vibro-prensa, baseia-se no ajuste de traço pela granulometria final das misturas, mais especificamente seu módulo de finura. Esse método, que foi utilizado pela empresa Encol, inicia-se com uma proporção preestabelecida: 40% de pedrisco e 60% de areia média, em massa, variando-se esta porcentagem de acordo com a análise granulométrica dos materiais. Caso haja deficiência na granulometria (falta de finos), pode-se usar um terceiro material, como, por exemplo, uma areia fina, na tentativa de ajustar o módulo de finura final da mistura, que deve ficar entre 3,60 e 3,75. As expressões utilizadas são as seguintes:

$$X = 100. \left(\frac{A-B}{A-C} \right) \quad \text{e} \quad Y = 100 - X$$

Onde:

X = porcentagem de agregado miúdo.

Y = porcentagem de agregado graúdo.

A = M.F. do agregado graúdo.

B = M.F. do agregado combinado (graúdo e miúdo)

C = M.F. do agregado miúdo.

Para se obter uma granulometria adequada para os blocos de concreto seria desejável que a mistura possuísse uma granulometria conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Porcentagens retidas acumuladas desejáveis na produção de blocos de concreto.

Peneiras (mm)	Grupo	Categoria	% Retida acumulada
4,8	1	Grosso	40% do material
2,4			
1,2			
0,6	2	Médio	45% do material
0,3			
0,15	3	Fino	15% do material
Fundo			

Fonte : (Frasson Junior, 2000)

Segundo FRASSON JUNIOR (2000), há necessidade de agregados com a granulometria desejada para utilização deste método. Caso não haja disponibilidade destes agregados, faz-se necessário uma adequação com um terceiro tipo de material, para que se enquadre nas faixas granulométricas. Dentre as desvantagens desse método, pode ser citada a não consideração do cimento como material fino que melhora a compacidade da mistura.

A partir da análise das proporções mais adequadas de agregados, deve-se executar a produção de traços-pilotos a fim de testar a resistência dos blocos. O manual Poli-Encol (1991) cita traços e ajustes, utilizando-se a máquina Montana MBX 975 para alcançar as resistências desejadas durante os testes. Segundo esse manual, a mistura deve possuir de 6,0% a 7,5% de umidade, dependendo do uso de aditivos. A relação cimento/agregado depende da resistência à compressão pretendida para os blocos. O manual recomenda as seguintes relações, considerando-se um coeficiente de variação igual a 15%, Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Relação cimento/agregado sugeridos para a produção de blocos de concreto na máquina Montana MBX 975.

	Resistencia à compressão (MPa)			
	4,5	6,0	8,0	9,0
Relação cimento: agregado (em massa)	1:9 a 1:12	1:8 a 1:10	1:7 a 1:9	1:6 a 1:9

Fonte (Manual Poli-Encol, 1991)

3.1.3 Método IPT/EPUSP

Segundo TANGO (1994), para cada traço de concreto, a compacidade da mistura fresca é função do equipamento, do procedimento de moldagem e do teor de água/materiais secos. Para cada traço de concreto há um teor ótimo de água/materiais secos ($H_{ót}$) que corresponde à massa unitária máxima.

O método proposto baseia-se nas seguintes pesquisas:

1. Ajuste dos agregados – recomenda-se utilizar agregados com D_{max} inferior a metade da menor espessura de parede dos blocos. Para a definição das proporções entre agregados graúdos e miúdos deve-se escolher aquela que proporcione a maior massa unitária.
2. Estabelecimento da resistência média visada ou resistência de dosagem – que será em função da resistência característica requerida e do desvio padrão da produção.

$$f_{bd,j} = f_{bk,j} + k_{NT} \cdot S$$

Onde:

$f_{bd,j}$: resistência média visada ou resistência de dosagem.

$f_{bk,j}$: resistência característica requerida.

$k_{NT} \cdot S$: desvio padrão da produção.

Na Tabela 3.3, são fornecidos os valores do produto $k_{NT} \cdot S$: em função do controle da produção e da resistência requerida para os blocos.

Tabela 3.3 - Materiais proporcionados em massa.

Conceito de controle	($k_{nt} \cdot S$) (Mpa), para $f_{bk,j}$					
	> 10 MPa	9 MPa	8 MPa	7 MPa	6 MPa	4,5 MPa
Rigorouso	3,5	3,2	2,8	2,4	2,1	1,6
Razoavel	4,5	4,2	3,8	3,4	3,1	2,6

. Demais materiais, com exceção do cimento, proporcionados em volume.
Fonte : Tango,1994)

3. Estimativas dos teores agregado/cimento (m) – definição de pelo menos três traços de concreto, denominados de “rico”, “médio” e “pobre”. O objetivo é que a resistência média visada, na idade de interesse, esteja dentro do campo da variação das resistências obtidas com os traços avaliados.
4. Determinação da proporção de argamassa e da umidade ótima do traço médio – produzir blocos de concreto variando-se o teor da argamassa e escolher por aquela que apresentar, no estado fresco, as seguintes características: bom aspecto superficial dos blocos, massa unitária mais elevada e trabalhabilidade. A quantidade de água deve ser a maior possível, suficiente para que os blocos não esboroem. Normalmente, segundo Tango (1994), a umidade ótima é a que permite moldar uma pelota de concreto nas palmas das mãos, sem que esta se esboroe (falta de água) ou suje exclusivamente as mãos (excesso de água).
5. Produção das misturas experimentais. Conforme visto nas metodologias de dosagem para produção de blocos de concreto, as dosagens de concreto de consistência seca apresentam inúmeras particularidades e diferenças em relação ao concreto plástico. A composição adequada dos agregados na mistura, o tipo de cura utilizado e a escolha do equipamento de vibro-prensagem são fundamentais para que sejam garantidas a textura (aparência visual), a coesão e a resistência especificada.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios de caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Construção Civil (LCC) do Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU) – USP. Toda a escória necessária para realização desta pesquisa foi obtida por intermédio da ArcelorMittal – Piracicaba (AMP), empresa que tem capacidade para a produção de 1 milhão de toneladas por ano de aço, é especializada na produção de vergalhões e arames para a construção civil. A caracterização dos agregados visa substanciar as próximas etapas do estudo, que são a produção de corpos de prova e elementos construtivos com esses agregados.

3.2 AGLOMERANTE

3.2.1 Cimento Portland

O cimento é tecnicamente definido como um aglomerante hidráulico, obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou o tempo inicial de “pega”) e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. O clínquer é o resultado da mistura de calcário, argila e, em menor proporção, minério de ferro, submetida a um processo chamado clínquerização. No Brasil, são produzidos cinco tipos de cimento Portland, além do cimento branco, que possuem a seguinte nomenclatura:

- CP I – Cimento Portland comum;
- CP I - S – Cimento Portland comum com adição;
- CP II - E – Cimento Portland composto com escória de alto forno;
- CP II - F – Cimento Portland composto com filer (calcário);
- CP II - Z – Cimento Portland composto com pozolana;
- CP III – Cimento Portland de alto forno;
- CP IV – Cimento Portland pozolânico;
- CP V – ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial.

Existem outros tipos de cimento, como os cimentos Portland resistentes aos sulfatos; no caso, a nomenclatura acima exposta é acrescida da sigla RS, para identificação na embalagem do produto.

Tabela 4.1 – Tipo e Composição de cimento Portland.

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	CLASSE DE RESISTÊNCIA (MPa)	COMPOSIÇÃO (%)				
		Clinker + gesso	Escória alto forno	Pozolana	Materiais Carbonáticos S	Norma Brasileira
○ CP I	25;32	100	-	-	-	NBR 5732
○ CP I - S	40	95 - 99	1. - 5.	1. - 5.	1. - 5.	
○ CP II - E	32	56 - 94	6. - 34	-	0 - 10	NBR 11578
○ CP II - F	32 - 40	90 - 94	-	-	6. - 10	
○ CP II - Z	32	76 - 94	-	6. - 34	0 - 10	
○ CP III	25 - 32 - 40	25 - 65	35 - 70	-	0 - 5	NBR 5735
○ CP IV	25 - 32	45 - 85	-	15 - 50	0 - 5	NBR 5736
CP V – ARI		95 - 100	-	-	0 - 5	NBR 5733

Fonte – Itambé – Cimento e Concreto apud BUGALHO (2000)

Tabela 4.2 – Produção Nacional de cimento Portland.

TIPO DE CIMENTO	QUANTIDADE PRODUZIDA (t)	PARTICIPAÇÃO (%)
CP I	1.111.649	3,21
CP II	26.674.053	77,1
CP III	3.479.331	10,06
CP IV	2.463.879	7,12
CP V	836.657	2,42
Branco	31.481	0,09

Fonte – Sindicato nacional das Indústrias de cimento – SNIC, 1996 apud BUGALHO (2000)

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o CP V ARI PLUS, usualmente utilizado para produção de elementos pré-fabricados que exigem elevada resistência em baixas idades. O relatório técnico contendo as análises químicas e físicas deste cimento estão representadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Propriedades físicas e químicas do aglomerante empregado.

	Propriedades físicas								Propriedades químicas				
	pen. 325 (%) NBR 9202	Blaine (cm ² /g) NBR 7224	Tempo de pega (min) NBR 11581		Resistência à compressão (MPa) NBR 7215			CO ₂ (%)	Perda ao fogo 500°C (%)	Perda			
										ao fogo 1000° C (%)	Res. Inso- lúvel (%)	SO ₃ (%)	
			Início	Final	1 dia	3 dias	7 dias						28 dias
Média	1,2	4716	149	202	28,0	43,0	46,9	55,1	1,15	0,65	3,11	0,29	2,68
Mín	0,8	4563	120	185	26,0	40,7	44,6	53,2	0,67	0,39	2,54	0,20	2,57
Máx	1,6	4936	176	225	29,2	45,6	51,6	67,8	1,66	0,89	3,78	0,39	2,80
D.Pad	0,2	60	11	12	0,84	1,22	1,62	1,54	0,36	0,19	0,30	0,05	0,07
C.V. (%)	17	2	8	6	3	3	3	3	31,2	28,9	12,2	20,4	2,7

Fonte: (Diniz Filho, 2005)

3.2.2 A Cal Hidratada

A cal foi introduzida na fabricação do elemento construtivo de escória, na tentativa de proporcionar maior absorção de água e mais plasticidade ao composto da mistura.

A maioria da cal produzida no Brasil resulta da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos de idades geológicas diferentes; geralmente muito antiga (pré-cambriana) e possui pureza variável. As cales provenientes de calcários sedimentares e de concheiros naturais recentes participam de maneira subordinada na produção.

Tabela 4.4 – Propriedades da cal.

Propriedades gerais	
Nome	Óxido de cálcio
Fórmula química	CaO
Cor e aparência	Sólido branco
Propriedades físicas	
Massa molecular	56,1 u
Ponto de fusão	2845 K (2572) °C
Ponto de ebulição	2850 K (3123 °C)
Densidade	3,35 (solução) (25 °C e 1 atm)
Solubilidade	reage em água
Viscosidade	26,7 cP a 20 °C
Propriedades termoquímicas	
$\Delta_f H^0$	43,93 kJ/mol

Fonte "<http://pt.wikipedia.org/wiki/Cal>"

Quando foi publicada a norma europeia EN 459 Building Lime Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, da qual se transcreve o quadro e notas, em *itálico*, da Figura 4.5, relativamente à composição química.

Tabela 4.5 – Classificação das cals de construção de acordo com a normalização europeia.

		Valores expressos em % de massa					
		Tipo	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal livre
Cais de construção	cal aérea L	cal cálcica CL	cal viva				
		cal cálcica CL	cal hidratada				
		cal dolomítica DL	cal viva				
	cal hidráulica HL	cal cálcica CL	cal hidratada				
		cal cálcica CL	cal hidratada				
		cal dolomítica DL	cal viva				
		cal dolomítica DL	cal hidratada				

Tipo	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal livre
CL 90	≥ 90	≤ 5 ²⁾	≤ 4	≤ 2	-
CL 80	≥ 80	≤ 5 ²⁾	≤ 7	≤ 2	-
CL 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	-
DL 85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	-
DL 80	≥ 80	≥ 5	≤ 7	≤ 2	-
HL 2	-	-	-	≤ 3 ²⁾	≥ 8
HL 3,5	-	-	-	≤ 3 ²⁾	≥ 6
HL 5	-	-	-	≤ 3 ²⁾	≥ 3
NHL 2	-	-	-	≤ 3 ¹⁾	≥ 15
NHL 3,5	-	-	-	≤ 3 ¹⁾	≥ 9
NHL 5	-	-	-	≤ 3 ¹⁾	≥ 3

Fonte: Materiais de Construção 2 – 1ª Parte - Documento Provisório-2002 - Joana de Sousa Coutinho

Nota: Os valores aplicam-se a todos os tipos de cal. Para cal viva, estes valores correspondem aos da condição “como entregue”; para todos os outros tipos de cal (cal hidratada, pasta de cal e cais hidráulicas) os valores baseiam-se no produto isento não só da água livre como também de água combinada.

3.3 ADITIVOS

O aditivo utilizado para produção dos traços do componente construtivo foi um aditivo plastificante – Rheomix 610 da MBT (Master Builder Technologies). Trata-se de um aditivo com base química saponácea, cor laranja claro e densidade de $1,03 \pm 0,02$ g/cm³. Esse produto é recomendado para fabricação de blocos e concretos de consistência seca, pois reduz a água de amassamento, melhora a resistência mecânica e a textura dos blocos.

Durante o processo de confecção dos corpos de prova cilíndricos o aditivo Rheomix não demonstrou eficiência à resistência final, fator que não justifica seu uso. Estes elementos da composição do traço foram substituídos pelo aditivo Vedalit (Otto Baumgart), Aditivo plastificante concentrado à base de resinas naturais, cor escura, isenta de cloretos e densidade 1,03g/cm³. Este

produto é recomendado para argamassas de assentamento e rebocos, proporciona ótima trabalhabilidade, apesar de ser indicado para argamassas e rebocos. Agrega uma série de vantagens às argamassas: maior aderência, coesão, ausência de fissuras e menor exsudação.

3.4 AGREGADOS

3.4.1. 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 traço do elemento construtivo, lembrando que houve a substituição total, ou seja, do agregado miúdo (areia).

A substituição dos agregados convencionais pela escória, no traço do elemento construtivo, foi feita em volume, utilizando, para isso, a massa específica real (γ). O objetivo é que a escória ocupe o mesmo espaço 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.

A determinação da granulometria dos agregados foi feita conforme a NBR 7217/87 – “Agregados – Determinação da Composição Granulométrica”. Utilizaram-se as peneiras descritas na norma, de série normal e de série intermediária (Tabela 4.6), além de um peneirador mecânico. As amostras de cada agregado foram peneiradas e separadas.

Tabela 4.6. Abertura das peneiras.

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

Fonte - (NBR 7217/87).

Tabela 4.7. Quantidade retida acumulada de cada agregado convencional.

Abertura da peneira em (mm)	Areia %	Brita no. 0 %	Brita no. 1 %
25,00	-----	-----	0,00
19,00	-----	-----	0,60
12,50	-----	-----	36,00
9,50	0,00	0,00	85,60
6,30	0,20	2,20	96,00
4,80	0,30	49,50	97,10
2,40	1,70	96,10	98,30
1,20	7,00	98,00	99,10
0,60	34,90	98,80	99,50
0,30	75,60	99,30	99,70
0,15	98,80	99,50	99,80
Fundo	100,00	100,00	100,00

Fonte - autor

As amostras de cada agregado foram peneiradas e separadas, apenas o agregado miúdo, areia, servirá como parâmetro do material a ser substituído pela escória, gerando-se sua respectiva curva granulométrica, conforme apresentado nas Figuras 4.5. Os outros agregados, brita nº 0 e brita nº. 1, apenas servirão como comparativo da granulometria da escória em estado bruto.

Figura 4.1 - Curva granulométrica da areia ($D_{max} = 2,40\text{mm}$). Fonte - Autor

3.4.2. Características da Escória

O agregado utilizado na presente pesquisa é exclusivamente a escória de aciaria da ArcelorMittal (AMP), em diferentes granulometrias, que vem substituir os agregados convencionais. O resíduo foi recebido em estado bruto e caracterizado no laboratório LCC da EESC – USP.

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, equivalente à areia natural.
- Escória Média: fração de escória que passa pela peneira 9,50 mm e fica retida na peneira 2,40 mm, equivalente à brita nº 0.

- Escória Grossa: fração de escória que passa pela peneira 19,00 mm e fica retida na peneira 9,50 mm, equivalente à brita nº1.

A separação de toda a escória usada na pesquisa foi feita no peneirador mecânico, em porções de 10 kg, agitadas por 10 minutos, conforme descrito no capítulo dois, item 2.7 do presente trabalho. As Figuras 4.2 até 4.5 mostram a escória em granulometrias pré-selecionadas.

Figura 4.2 - Escória *in natura*, antes de ser separada em faixas granulométricas.

Fonte - Autor

Figura 4.3 - Armazenamento da escória fina, com $0,15 < \phi < 2,40$ mm. Fonte – Autor

Figura 4.4. Armazenamento da escória fina, com $2,40 < \phi < 9,50$ mm. Fonte - Autor

Figura 4.5. Armazenamento da escória fina, com $9,50 < \phi < 19,00$ mm. Fonte - Autor

3.4.3. Granulometria da Escória

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 4.8 e nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8. Quantidade retida acumulada de cada tipo de escória.

Abertura da peneira em mm	Escória <i>in Natura</i> %	Escória Fina %	Escória Média %	Escória 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			

Fonte - Autor

Figura 4.6 - Granulometria da escória *in natura*. Fonte – Autor

Figura 4.7 - Curva granulométrica da escória fina, ($0,15 < \phi < 2,40$ mm). Fonte - Autor

Figura 4.8 - Curva granulométrica da escória média, ($2,40 < \phi < 9,50\text{mm}$). Fonte – Autor

Figura 4.9 - Curva granulométrica da escória grossa, ($9,50 < \phi < 19,00\text{ mm}$). Fonte - Autor

Para atingir as características desejadas, para utilização em prensa hidráulica, utilizamos apenas escória de granulometria entre $0,15 < \phi < 2,40$ mm, caracterizada como fina em nosso ensaio, conforme Figura 4.7. As características granulométricas do resíduo de escória fina, comparadas à granulometria da areia, apresentam-se na Fig 4.10.

Figura 4.10 - Comparação da granulometria da escória fina com a da areia.
Fonte - Autor

3.4.4. Área superficial da Escória Utilizada

Além da determinação da curva granulométrica, é importante conhecer a área superficial total da escória para efetuar-se uma substituição mais adequada.

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 4.9. 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 4.9. Valores relativos de área superficial e índices de superfície de Murdock.

Fração (mm)	Área Superficial Relativa	Índice de Superfície de Murdock
76,20 - 38,10	1/2	1/2
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

Fonte(NEVILLE, 1982).

Utilizando os índices de superfícies de Murdock, descritos na Tabela 4.9, determinaram-se as áreas superficiais de cada fração granulométrica da escória, que estão apresentadas nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 - Área superficial da escória fina, segundo o índice de Murdock.

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

Fonte (NEVILLE, 1982).

Tabela 4.11 - Comparação entre as áreas superficiais das frações granulométricas da escória com os agregados convencionais, segundo o índice de Murdock.

Agregados Convencionais		Fração da 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

Fonte (NEVILLE, 1982).

3.4.5. A Massa Específica e Absorção de Água da Escória

A massa específica real foi o parâmetro utilizado para se efetuar a substituição total dos agregados convencionais pela escória. Foi determinada, individualmente, para cada uma das frações granulométricas da escória, massa específica para as frações fina e média, com base na NBR 9776/87 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13. Massa específica das frações granulométricas da escória fina e média.

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

Fonte - Autor.

Tabela 4.14. Massa específica real da areia e brita nº 0.

Agregado	Massa Específica (g/cm ³)
Areia	2,67
Brita nº 0	2,79

Fonte - Autor.

Como podemos observar nas tabelas 4.13 e 4.14, a massa específica da escória é maior que a massa específica dos agregados convencionais (Areia e Brita nº 0).

Os ensaios de absorção de água e área líquida foram realizados conforme prescrições da NBR 12118. Os resultados estão apresentados na tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Massa específica e absorção de água da escória fina e média

Fração de Escória	Massa Específica Seca (g/cm ³)	Massa Específica Saturada (g/cm ³)	Absorção (%)
Escória Fina	3,16	3,2	1,5

Fonte - Autor.

De acordo com a tabela 4.15, podemos concluir que a absorção de água da escória é baixa, em relação a Areia e Brita.

DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS COM ESCÓRIA

Para o desenvolvimento experimental utilizou-se três métodos de dosagem com adaptações em relação ao material utilizado como agregado (escoria de aciaria) e ao equipamento de moldagem das peças do elemento construtivo (prensa hidráulica de solo-cimento). Embora exista uma recomendação de dosagem pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), para fabricação de tijolos prensados, que se inicia em 10% em relação à massa do solo, as características da mistura do elemento construtivo, proposto neste trabalho, está mais para concretos secos para produção de blocos. Em função destas características, os métodos utilizados foram:

- O método da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, desenvolvido por FERREIRA (1990), é baseado na determinação de proporções entre areia e pedrisco, que resultam na máxima compactidade da mistura e, consequentemente, na maior resistência.

- Também, no método Besser Company, que tem como base a análise das proporções mais adequadas de agregados, deve-se executar a produção de traços-pilotos, a fim de testar a resistência dos blocos.
- E no método IPT/EPUSP, segundo Tango (1994), para cada traço de concreto, a compacidade da mistura fresca é função do equipamento, do procedimento de moldagem e do teor de água/materiais secos. Para cada traço de concreto há um teor ótimo de água/materiais secos ($H_{ót}$), que corresponde à massa unitária máxima.

Os traços iniciais foram produzidos tendo como ponto de partida os traços sugeridos no método Besser Company, que estabelece uma relação cimento/agregado (em massa), conforme tabela 5.1 da página 91.

Tabela 5.1 - Relação cimento/agregado sugerida para a produção de blocos de concreto na máquina Montana MBX 975.

	Resistencia à compressão (Mpa)			
	4,5	6,0	8,0	9,0
Relação cimento: agregado (em massa)	1:9 a 1:12	1:8 a 1:10	1:7 a 1:9	1:6 a 1:9

Fonte: (Manual Poli-Encol, 1991)

Os traços iniciais adotados são os 1:7 a 1:9 na tentativa de conseguir a resistência à compressão de 8,0 (Mpa), observando de forma empírica a plasticidade e a viabilidade de compactação na prensa hidráulica. Porém, a escória de aciaria se mostrou um material que não retém água (hidrofugante) e como 70 a 90% da mistura é composta por escória de aciaria, como agregado, foi necessário introduzir a cal na composição do traço, na tentativa de retenção de água na mistura.

Após vários experimentos, cinco traços foram escolhidos para moldagem dos corpos de prova cilíndricos e posterior análise de resistência à compressão simples, estes, são na proporção 1:7 na relação cimento/escória, conforme tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Composição dos traços e suas proporções.

COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS					
TRAÇO	Cimento CP V-ARI PLUS	Escória	Cal	Água	Aditivo (%)
T 1:	100 g 1	700 g 7	100 g 1	179,5 g 20%	0,35%
T 2:	100 g 1	700 g 7	200 g 2	150 g 15%	-
T 3:	100 g 1	700 g 7	- -	119.30 g 15%	0,35%
T 4:	100 g 1	700 g 7	100 g 1	150 g 17%	0,35%
T 5:	100 g 1	700 g 7	- -	130 16,25%	-

Fonte - Ensaios realizados no laboratório LCC da EESC – USP.

Conforme Tabela 5.2, nota-se que para todos os traços a relação escória/cimento foi mantida a mesma, variando apenas a composição de cal e água no traço, assim como a adição ou não do aditivo, que esteve sempre em 0,35%.

3.5. ENSAIOS PRELIMINARES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A metodologia adotada visa correlacionar as propriedades dos elementos construtivos com corpos de prova cilíndricos de características praticamente similares; julgou-se fundamental o desenvolvimento de formas cilíndricas 5x10 cm que possibilitassem uma moldagem rápida e, principalmente, uma desforma precisa e rápida, sem comprometer a integridade do corpo de prova.

Todas as misturas foram realizadas em argamassadeira mecânica. A ordem de colocação do material foi a seguinte: 1º. Mistura e homogeneização do agregado miúdo de escória de aciaria; 2º. Adição do cimento e homogeneização da mistura; 3º. Adição de metade da quantidade de água prevista, conjuntamente com o aditivo; 4º. Adição do restante da água e homogeneização final da mistura.

Figura 5.1 - Corpos de prova de T1, T2, T3 e T4. Fonte foto autor.

Na primeira etapa, após a moldagem, todos os corpos de prova foram pesados e os exemplares foram colocados na cura úmida por sete dias. Após o período de sete dias, os exemplares foram mantidos no ambiente do laboratório até a data de ensaio figura 5.1.

Figura 5.2 - Teste de Resistência à Compressão. Fonte foto autor.

Tabela 5.3 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão Simples em Corpo de Prova Cilíndrico (5X10cm) aos 10 dias:

Tempo de Cura - 10 Dias			
TRAÇO	Carga aplicada (TF)	Tensão Ruptura (MPa)	Média das Tensões (MPa)
T 1:	0,80	4,10	4,10
	0,80	4,10	
T 2:	1,52	7,70	7,20
	1,34	6,80	
T 3:	1,12	5,70	5,30
	0,96	4,90	
T 4:	1,08	5,50	5,70
	1,10	6,00	
T 5:	1,52	7,70	7,50
	1,46	7,40	

Ensaio realizado no laboratório LCC da EESC – USP.

Comparando-se os traços que apresentaram melhor desempenho mecânico (T2 e T5) tabela 5.3, foi constatado que a cal, assim como o aditivo, não influenciou na resistência mecânica, por outro lado, sua aplicação poderá contribuir favoravelmente na moldagem do elemento construtivo.

3.6. COMPACTAÇÃO DA MISTURA DE ESCÓRIA EM PRENSA HIDRÁULICA.

As amostragens da compactação da mistura definida como T2, na tabela 5.3, foram produzidas em uma prensa hidráulica de fabricação artesanal, desenvolvida pelo engenheiro Márcio Coelho, em conjunto com o autor, para produção de tijolos de solo cimento, figura 5.3.

Figura 5.3 - Prensa hidráulica utilizada para moldagem das misturas.
Fonte – Foto autor.

Embora citado, no início deste capítulo, que a composição da mistura do elemento construtivo proposto neste trabalho está mais para concretos secos para produção de blocos do que para tijolos de solo-cimento, nesta etapa experimental, adotamos como parâmetros os princípios utilizados para compactação do solo, apesar da composição da mistura não conter solo. Estes parâmetros apenas serviram para definição da quantidade ideal de água, para compactação da mistura.

Segundo a NBR 7128/86, Ensaio Normal de Compactação, proposto por R. Proctor (1933), em seus estudos enunciou um dos mais importantes princípios da mecânica dos solos, ou seja, que a densidade de um solo compactado é função do teor de umidade no momento de sua compactação. Proctor percebeu que para uma energia de compactação constante, ao se adicionar água ao solo, sua densidade aparente aumentava até um determinado ponto chamado umidade ótima. Ao acrescentar teores de umidade acima do ótimo, a densidade tornava a se reduzir, pois o excesso de água absorve parte da energia de compactação e redistribui ao sistema, afastando as partículas sólidas.

Na verdade, o teor ótimo promove uma lubrificação das partículas, facilitando, quando se imprime uma energia de compactação, o preenchimento de todos os vazios possíveis.

Entende-se, portanto, que solos com maior quantidade de finos, quando compactados, demandam maiores teores de água para atingir a umidade ótima, devido à maior área superficial do solo.

Rocha (1996), Silva, M. (2001) e Lins (1994) afirmam que essa nova configuração do solo, após a compactação, afeta significativamente as características mecânicas e, conseqüentemente, a porosidade e a permeabilidade do material.

Há diversas outras propriedades dos solos, porém, para o entendimento deste trabalho, foram concentrados apenas os principais pontos: distribuição granulométrica e compactação.

3.6.1. Ensaio de compactação

O Ensaio de Umidade Ótima de Compactação tem como base o traço T2 (tabela 5.3). Iniciou-se com uma umidade de 10%, seguindo incrementos até chegar a 22,5%. O ensaio de compactação (Proctor normal NBR 7182) e o ensaio (Solo-cimento, Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos, métodos de ensaio NBR12023), serviram como base para determinar a curva de compactação e a massa específica da mistura escória-cimento-cal, em função da umidade do composto. Tal curva serve para indicar o teor de umidade ótima para a compactação da mistura, quando submetida a uma energia constante.

Adiciona-se água à mistura, num teor reconhecidamente menor que a umidade ótima e, após realizar-se a homogeneização do material, procede-se ao ensaio de compactação através da moldagem de corpos de prova cilíndricos, de acordo com materiais e métodos da NBR 12024. Neste caso, o teor de umidade inicial foi de 10% em relação à massa da mistura seca; os demais teores usados para a continuidade do ensaio foram 15%, 17,5%, 20%, até chegar a 22,5%, totalizando a determinação para o traço T2 em estudo.

Figura 5.4 - Curva de umidade ótima, ensaios realizados no laboratório de solos da EESC – USP. Ensaio completo de compactação encontra-se no Anexo C.

Os resultados obtidos para o traço-base: T2 (1:7:2) – Cimento ARI: 500 g , Escória: 3500 g, Cal: 1000 g – são:

- Massa Total Material Seco = 5000 g
- Umidade inicial = 10% (500 g água)
- Umidade final = 22,5% (1125 g água)

Através deste ensaio, foi verificado que a melhor umidade para trabalhar com este tipo de material ficou entre 17,5% e 19%. Tendo como base este resultado, ainda se fez necessária a realização de novos testes práticos de moldagem, a fim de verificar qual a umidade ideal para a desforma. O que se encontrou foi uma relação água/cimento de 1,85 para o traço T2 (1:7:2), que possui 7 kg de escória para cada 1 kg de cimento.

3.6.2. Moldagem da mistura de escória.

Para moldar as peças experimentais com a mistura, definidas em T2, utilizamos os equipamentos a seguir:

- **Prensa hidráulica** para produção de blocos, nas dimensões 12,5 cm x 25 cm x 8 cm (largura x comprimento x espessura). Apesar das dimensões não normatizadas, as peças produzidas por esta máquina permitem a amarração direta entre os componentes, para execução de alvenarias. A prensa tem massa aproximadamente de 450 kg, capacidade de produção de aproximadamente 480 peças/hora, figura 5.3_.
- **Destorroador:** destinado a destorroar a mistura de solo-cimento, proporcionando melhor homogeneização da umidade. Motor de 2HP e lâminas de trituração, massa aproximada 150 kg, Figura 5.5.

Figura 5.5: Destorroador 2HP, locada no LCC- EESC – USP Fonte Foto autor.

- **Peneira elétrica:** com malhas de 4,8 mm e 2,4 mm, respectivamente, motor de 1HP, com massa aproximada de 180 kg, Figura 5.6.

Figura 5.6 - Peneira elétrica 1HP, locada no LCC- EESC – USP.

- **Esteira transportadora:** com correia de 3 m, elevando o material a 2,10 m, motor de 1/2HP e massa aproximada de 80 kg, Figura 5.7.

Figura 5.7: Esteira Transportadora 1/2HP, locada no LCC- EESC – USP.

- **Misturador:** argamassadeira destinada a homogeneizar mistura de agregado, motor de 1/2HP e massa aproximada de 90 kg, Figura 5.8.

Figura 5.8 - Argamassadeira 1/2HP, locada no LCC- EESC – USP.

Estes equipamentos compõem uma linha de produção que será adaptada à produção dos elementos construtivos, desenvolvidos com escória de aciaria. A princípio, a moldagem das peças terá o mesmo formato da produzida originalmente na prensa de solo-cimento. A proposta é criar uma peça com as mesmas dimensões preestabelecidas pela máquina, mas cujo formato proporcione a execução de um sistema construtivo de alvenaria que não utilize argamassa para o assentamento das peças.

A utilização desse tipo de equipamento dialoga com um dos principais objetivos deste trabalho, que é proporcionar, por meio de técnicas simples e soluções viáveis, o desenvolvimento de um sistema construtivo, em que estejam inseridas, nos materiais utilizados, técnicas construtivas, como prumo, nível e esquadro. Este sistema construtivo possibilita viabilizar sua utilização em programas habitacionais de autogestão, autoconstrução, urbanização de favelas e construções emergenciais.

3.6.3. Produção experimental do componente construtivo.

Procedimento de produção dos elementos construtivos: primeiramente a escória é seca ao ar livre até que a umidade permaneça próxima a zero. Após a secagem, a escória é peneirada para se obter a granulometria desejada, é necessária a pesagem dos materiais, para compor o traço T2 preestabelecido na tabela 5.3, nas devidas proporções, conforme resumido na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Resumo do traço preestabelecido no início do capítulo, tabela 5.3.

COMPOSIÇÃO DA MISTURA					
T2					
TRAÇO	Cimento CP V-ARI PLUS	Escória	Cal	Água	Aditivo (%)
T 2:	100g	700g	200g	150g	
	1	7	2	15%	

Ensaios realizados no laboratório LCC da EESC – USP.

Os materiais são misturados na argamassadeira, respeitando a hierarquia volumétrica na seguinte ordem: primeiramente a escória, que compõe o maior volume, em seguida adiciona-se a cal e, logo após, o cimento, até a completa homogeneização, só então se adiciona água à mistura, em três etapas, para não empelotar a cal, até a homogeneização dos materiais. A mistura estará pronta para ser utilizada na prensa hidráulica, para moldar as peças. Devido ao tempo de pega do cimento, a mistura deverá ser utilizada no prazo máximo de uma hora após a adição da água.

A primeira constatação feita nos ensaios acessórios de moldagem das peças, observamos que, o teor de umidade da mistura, deveria ficar abaixo da estipulada no ensaio de Proctor. Esta medida foi necessária para obtenção de uma boa plasticidade para que durante o desmolde das peças, não ocorra fissuras ou quebras. As tentativas de moldagem das peças com a umidade fixada entre 17,5% e 19%, conforme resultado obtido no ensaio de Proctor, não permitia a manipulação das peças, durante a retirada do compartimento de compactação da prensa hidráulica. Para ser possível a manipulação das peças compactadas na prensa hidráulica, a umidade da mistura baixou para 15%. Uma vez que este tipo de equipamento trabalha com a mistura “bastante seca”.

Durante o processo experimental de moldagem observamos que a cal não se incorporava totalmente à mistura, embora o traço utilizado em corpos de prova cilíndricos demonstrasse satisfatório em compactação e resistência final. O mesmo não ocorreu ao homogeneizar a mistura na argamassadeira. Notamos que a cal se incorpora bem à mistura seca, mas ao adicionar água ocorre uma reação entre a cal e a escória que não mais ficam homogêneas, deixando evidente esta reação na mistura compactada e ocasionando a quebra das peças no manuseio após a moldagem, figura 5.9.

Figura 5.9 - Peça “quebradiça” logo após a moldagem, testes iniciais para avaliação do processo de moldagem. - Fonte – Foto do autor

A cal utilizada na mistura, para retenção de água no processo de cura do cimento, ocasionou problemas na moldagem nas peças. Isto ocorreu devido à reação de hidratação da cal – o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), ao dissipar calor na mistura com cimento e escória, impediu sua total incorporação. Utilizamos, em substituição à cal, o aditivo Vedalit (Otto Baumgart), aditivo plastificante concentrado à base de resinas naturais, cor escura, isenta de cloretos e densidade $1,03\text{g/cm}^3$. Este produto é recomendado como substituto à cal em argamassas de assentamento e rebocos.

Inicialmente, a substituição da cal foi gradativa em ensaios empíricos, até a substituição total pelo aditivo. No traço T2, a proporção ocupada pela cal

foi substituída pela proporção recomendada pelo fabricante do aditivo, em que 1 litro de Vedalit equivale a 20 sacos de cal ou 100 ml por saco de cimento. Esta substituição também traz reflexos econômicos significativos na composição do custo final do traço em uma futura industrialização do produto.

Figura 5.10: Mistura traço T2 com cal.
Fonte – Autor.

Figura 5.11: Mistura traço T2 com aditivo.

Ao estabelecer a umidade adequada de compactação 15% e a homogeneidade da mistura, com o aditivo, foi possível desmoldar as peças sem ocorrer quebras. A prensa hidráulica utilizada possui um dispositivo de resistência elétrica que aquece o compartimento de compactação, facilitando a retirada das peças em uma produção em série. Em testes práticos realizados, para o traço T2, ficou estabelecida uma temperatura de 60°C como sendo ideal para operar a mistura de cimento/escória/aditivo proposta neste trabalho. Nas figuras 5.12 a 5.13, podemos observar o processo de moldagem das peças.

Figura 5.12: Alimentação da mistura pela prensa.

Figura 5.13: Compactação da mistura.

Figura 5.14: Retirada da peça.

Figura 5.15: Peças prontas para testes.

Com relação à propriedade de resistência à compressão, pode-se afirmar que a substituição do cal pelo aditivo no traço T2 não alterou as propriedades físicas dos corpos de prova, por tanto este traço será utilizado para dar prosseguimento aos experimentos da peça em unidades de alvenaria.

Diante dos resultados recomenda-se a não utilizar o cal em compostos com escória, como também limitar o uso de cimento.

UNIDADES DE ALVENARIA ESCÓRIA-CIMENTO.

Neste capítulo, inicialmente, são descritos os ensaios realizados para os elementos construtivos, produzidos com escória, sendo adotado como referência o último traço T2 (cimento: escória: cal) do capítulo anterior. Posteriormente, são expostos os principais detalhes referentes à produção dos elementos construtivos, os resultados obtidos e as análises pertinentes. Na comparação dos resultados foi utilizado o teste estatístico de análise de variância.

4.1. ANÁLISES DA PEÇA DE ESCORIA-CIMENTO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO.

4.1.1. Análise Dimensional da Peça de Escória-Cimento

Para avaliação das dimensões reais da peça de escória, foi utilizado como parâmetros normas de bloco de concreto, como a NBR 6136 (2014), com algumas adaptações, devido às dimensões da peça de escória não serem normatizadas, 125 mm x 80 mm x 250 mm (largura, altura, comprimento), Figura 6.1. As dimensões são diferentes das especificadas na norma de bloco de concreto, que estabelece, como medidas das peças, M-20 – 190 mm x 190 mm x 390 e M-15 – 140 mm x 190 mm x 390 mm, com a tolerância de variação de medidas entre ± 2 mm para largura e ± 3 mm na altura e comprimento. Utilizamos a norma para estabelecer a mesma tolerância como referência na produção das peças e também a NBR 05712, que estabelece dimensões e coordenadas para execução de alvenarias modulares, isto é, alvenarias com dimensões múltiplas do módulo ($M = 10$ cm). As tolerâncias admitidas para cada uma das medidas de projeto do bloco vazado modular de concreto são de +2 mm e -5 mm, e junta de projeto entre componentes de 1 cm. A peça desenvolvida neste trabalho deverá ser utilizada em alvenarias com dimensões

e coordenadas múltiplas do modulo ($M = 12,5\text{cm}$). As tolerâncias admitidas para cada uma das medidas de projeto permanecem as mesmas da norma, porém as peças trabalharão com junta seca.

Figura 6.1 - Croqui definitivo da peça desenvolvida com escória. Fonte – Foto autor.

Para verificação das dimensões reais das peças definitivas – Traço T9 – foram utilizados um paquímetro analógico da marca Mitutoyo, com graduação de 1 mm, e um paquímetro digital da marca Starrett, com precisão de 0,01 mm para leitura das dimensões das paredes longitudinais e transversais da peça, Figura 6.2.

Figura 6.2 - Paquímetros utilizados. Fonte – Foto autor

Tabela 6.1. Análise dimensional das amostras do traço T9.

Corpo de Prova	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Paredes transv. e long. (mm)
CP 1	250,00	130,48	77,25	74,43	38,92
CP 2	249,00	130,52	80,84	80,72	38,63
CP 3	249,80	130,48	83,70	82,79	39,45
CP 4	248,00	131,16	78,26	78,60	38,92
CP 5	249,00	131,27	80,93	81,20	39,57
CP 6	249,00	130,62	79,56	79,10	38,54
Variação	2,00	0,79	6,45	8,36	1,03

Ensaio realizado no Laboratório Sistemas Estruturais UFSCar.

Analizando os resultados da tabela 6.1, as dimensões da peça escóricimento T9 satisfazem os requisitos da NBR 6136, para bloco de concreto vazado (± 2 mm para largura e ± 3 mm para o comprimento) assim como para as espessuras das paredes transversais e longitudinais, porém, nas dimensões da altura os valores superam o estabelecido pela norma, (± 3 mm), nas quais obtivemos medidas diferentes para a altura (Altura 1 / Altura 2), provocando o aspecto de “cunha” na peça e prejudicando o resultado para a alvenaria proposta. Estas diferenças dimensionais na altura normalmente são tiradas da argamassa de assentamento, no processo de execução da alvenaria, o que não é o nosso caso. Possivelmente, as causas da diferença dimensional sejam a baixa qualidade de precisão da prensa de compactação utilizada, o maior tempo de alimentação e a elevada umidade utilizada na produção das peças das amostras analisadas; segundo FRASSON JUNIOR (2000), caso a umidade seja elevada, as peças podem apresentar variações nas dimensões e formato.

A questão dimensional é de fundamental importância na composição das peças do elemento construtivo neste trabalho. A peça será utilizada em alvenarias modulares, sem a utilização de argamassa para seu assentamento, o que faz da precisão das medidas um requisito fundamental para viabilidade do projeto.

Figura 6.3 - Textura escória-cimento.

Figura 6.4 -Textura bloco concreto convencional

Na figura 6.3, notamos que a textura da peças escória-cimento apresenta maior homogeneidade em relação ao bloco de concreto convencional, possivelmente pela maior quantidade de finos em sua composição.

4.1.2. Análise de Absorção de Água da Peça de Escória

O ensaio de absorção de água da peça definitiva, traço T9, foi realizado conforme as prescrições da NBR 12118 (1992). Segundo a NBR 6136 (1994) especifica, para os blocos de concreto com função estrutural, a absorção de água deve ser menor ou igual a 10%. Foram utilizadas três peças para avaliação dessas propriedades e os resultados obtidos estão na tabela 6.2, abaixo. O ensaio completo de absorção de água encontra-se no Anexo D.

Tabela 6.2 - Ensaio de Absorção de Água

Amostra No.	Massa Saturada (g)	Massa seca (g)	Absorção Individual %	Absorção média Média %
1A	4815,50	4525,30	6,41	6,28
1B	4195,20	3935,80	6,59	
1C	4785,70	4520,50	5,85	

Ensaios realizados no LCC da EESC – USP.

Apesar da peça de escória ter dimensões e composições diferentes do bloco de concreto, o resultado médio obtido no ensaio de absorção d'água, 6,28%, está dentro do estabelecido pela norma, que deve ser menor ou igual a 10%.

4.1.3. Análise Preliminar, Resistência à Compressão da Peça de Escória

As análises anteriores – dimensão e absorção d'água – foram realizadas na peça definitiva, porém a análise de resistência à compressão inicialmente foi feita na peça de traço T2, definido nos capítulos anteriores. Como veremos a seguir, este traço teve alterações nas proporções devido às análises de lixiviação e solubilização do composto (cimento/escória/ aditivo), adotando então o traço T9 como definitivo para as peças de escória que compõem o sistema construtivo.

A análise de resistência à compressão da peça de escória, traço T2, foi determinada seguindo os preceitos da NBR 7184 (1992), utilizando-se amostras de 10 unidades. A regularização da superfície da peça foi feita com pasta de cimento, figura 6.5. As peças foram ensaiadas com umidade natural e não secas ao ar, como prescreve a NBR 7184 (1992), figura 6.6. Resultados obtidos na tabela 6.3.

Figura 6.5 - Regularização da Superfície das peças com pasta de cimento.

Figura 6.6 - Teste de Resistência à compressão com peças Superpostos.

Tabela 6.3 - Resultados dos Ensaios à Compressão com peça de escória traço T2.

Cp	Dimensões			Bloco	Área de	Idade	Carga de		Tensão de
	Médias (mm)			2 F	Trabalho		Ruptura		Ruptura
no.	L	A	C	Tipo	(mm²)	Dias	Tf	Kn	(Mpa)
1	125	80	250	Escória	31.250	28	14,36	141	4,5
2	125	80	250	"	31.250	28	12,76	125	4
3	125	80	250	"	31.250	28	11,28	111	3,5
4	125	80	250	"	31.250	28	11,98	117	3,8
5	125	80	250	"	31.250	28	11,82	145	4,7
6	125	80	250	"	31.250	28	13,3	130	4,2
7	125	80	250	"	31.250	28	13,46	132	4,2
8	125	80	250	"	31.250	28	13,52	133	4,2
9	125	80	250	"	31.250	28	14,46	142	4,5
10	125	80	250	"	31.250	28	13,12	129	4,1

Ensaio realizado no LCC da EESC – USP. O ensaio completo a compressão com peças de escória encontra-se no Anexo E.

4.1.4. Análise das Características do Composto da Peça de Escória Traço T2

O traço T2 (cimento / escória / aditivo), até então utilizado, tem em sua composição, como agregado, escória de aciaria da AMP – um resíduo industrial resultante de ensaios de lixiviação e de solubilização realizados nas amostras coletadas –, (Tabelas 2.8 e 2.9). Os resultados deste resíduo o consideraram como “Não Perigoso” e, segundo a NBR 10004, a amostra da escória da AMP analisada deve ser classificada como Classe II – B.

Na introdução deste trabalho, vimos que resíduos, mesmo quando inertes nos materiais – após a reciclagem – podem apresentar riscos, pois nem sempre os processos de reciclagem garantem a imobilização destes componentes. Como qualquer outra atividade, a reciclagem também pode gerar resíduos, cuja quantidade e características também vão depender do tipo de reciclagem escolhida. Esses novos resíduos nem sempre são tão ou mais simples que aqueles que foram reciclados. É possível que eles se tornem ainda

mais agressivos ao homem e ao meio ambiente do que o resíduo que está sendo reciclado (ANGULO, ZORDAN, JOHN, et al, 2001).

Considerando estas observações, feitas pelos autores pesquisados, analisamos a lixiviação e a solubilização do composto T2 contendo: cimento, escória e aditivo (CEA). Os ensaios foram feitos por solicitação do pesquisador ao laboratório de Saneamento, Departamento de Hidráulica e Saneamento EESC-USP, de São Carlos-SP, que são apresentados nas tabelas 6.4 e 6.5, respectivamente. Todas as análises foram feitas com base nas normas NBR 10004, NBR 10005, NBR 10006, NBR 10007 da ABNT, e o boletim completo encontra-se no Anexo F.

Tabela 6.4 - Determinação sobre o lixiviado obtido do composto (CEA). Ensaio efetuado de acordo com a 20ª edição do STANDARD METHODS.

PARÂMETROS		AMOSTRAS		
		1	2	VMP
ph inicial		9,75	9,48	x
ph final		4,9	5,03	x
VOLUME DE ACÉTICO 0,5 N ADICIONADO	(mL)	18	15	x
TEMPO DE LIXIVIAÇÃO	(Horas)	24	24	x
CHUMBO	(mg Pb/L)	< 0,02	< 0,02	1
CÁDMIO	(mg Cd/L)	< 0,0006	< 0,0006	0,5
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	< 0,005	< 0,005	5
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	5
FLUORETOS	(mg F/L)	0,67	0,53	150

O ensaio completo do Lixiviado e Solubilizado do composto (CEA) encontra-se no Anexo D.

Lixiviado: Conforme dados da tabela 6.4, observamos que os parâmetros não ultrapassaram os valores máximos permitidos (VMP). Portanto, segundo a NBR 10005, como é o lixiviado que determina a toxidade do resíduo, o composto do traço T2 (CEA) é considerado: NÃO PERIGOSO.

Ao examinar a análise de solubilizados, notamos que há presença de elementos que ultrapassam os valores mínimos permitidos pela norma e, até então, não estavam presentes ao resíduo escória quando feita a análise inicial (Tabela 2.9).

Tabela 6.5 - Determinação sobre o solubilizado obtido do composto (CEA). Ensaio efetuado de acordo com a 20ª edição do STANDARD METHODS.

PARÂMETROS		AMOSTRAS			
		1	2	3	VMP
ph inicial		9,8	9,65	9,73	x
ph final		10,43	10,41	10,53	x
ZINCO	(mg Zn/L)	< 0,002	< 0,002	< 0,002	5
CHUMBO	(mg Pb/L)	0,09	0,12	0,13	0,05
CÁDMIO	(mg Cd/L)	0,01	0,01	0,03	0,005
FERRO TOTAL	(mg Fé/L)	0,54	< 0,005	<0,005	0,3
MANGANÊS	(mg Mn/L)	0,02	0,01	0,01	0,1
COBRE	(mg Cu/L)	< 0,003	0,01	<0,003	1
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	< 0,005	< 0,005	<0,005	0,05
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	<0,001	0,05
ALUMÍNIO	(mg Al/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,2
SÓDIO	(mg Na/L)	12,3	11,7	19,5	200
FLUORETOS	(mg F/L)	1,7	1,35	1,73	1,5
NITRATOS	(mg N/L)	4,1	5,43	10,17	10
CLORETOS	(mg Cr/L)	63	90	180	250
DUREZA TOTAL	(mg CaCo/L)	136	142	128	500
SULFATOS	(mg SO ₄ /L)	16	14	28	400
CIANETOS	(mg CN/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1
FENÓIS	(mg C ₄ H ₂ OH)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001

O ensaio completo do Lixiviado e Solubilizado do composto (CEA) encontra-se no Anexo F.

Solubilizados: Conforme dados da tabela 6.5, observamos que os parâmetros chumbo, cádmio e fluoretos ultrapassaram o limite máximo permitido.

Na tentativa de neutralizar o composto, a primeira medida foi aumentar a dosagem de cimento para que os elementos não ultrapassassem os parâmetros estabelecidos na norma NBR 10006. Nota-se que, com o aumento da dosagem de cimento nas amostras, aumenta no composto os índices dos elementos que ultrapassam os valores mínimos permitidos pela norma. A partir dos dados obtidos com as amostras produzidas, resolvemos fazer um ensaio de solubilização segundo a NBR-10006, com amostras de cimentos mais consumidos no mercado da construção civil e comparar os resultados com a amostra da escória utilizada no ensaio. Os resultados obtidos se encontram na tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Determinação sobre o solubilizado obtido nas amostras de cimentos Portland existentes no mercado brasileiro.

PARÂMETROS		AMOSTRAS				
		CP V	CPII-E32	CPIII-32RS	ESCÓRIA	VMP
ph inicial		12,58	12,45	12,48	12,46	x
ph final		12,67	12,78	12,54	12,34	x
ZINCO	(mg Zn/L)	0,22	0,2	0,01	0,08	5
CHUMBO	(mg Pb/L)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,05
CADMIO	(mg Cd/L)	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	0,005
FERRO TOTAL	(mg Fé/L)	0,15	0,18	0,09	0,15	0,3
MANGANÊS	(mg Mn/L)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,1
COBRE	(mg Cu/L)	0,01	< 0,003	0,01	0,02	1
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	0,29	0,28	0,08	0,04	0,05
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05
ALUMÍNIO	(mg Al/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,52	0,2
SÓDIO	(mg Na/L)	603,3	235,3	293,8	28	200
FLUORETOS	(mg F/L)	1,2	1,83	1,8	2,6	1,5
NITRATOS	(mg N/L)	0,46	0,51	13,2	15,48	10
CLORETOS	(mg Cr/L)	700	300	2300	2900	250
DUREZA TOTAL	(mg CaCo/L)	1358	1455	2328	1698	500
SULFATOS	(mg SO ₄ /L)	< 1	< 1	1800	< 1	400
CIANETOS	(mg CN/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1
FENÓIS	(mg C ₄ H ₂ OH)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,06	0,001

O ensaio completo do solubilizado dos cimentos Portland encontra-se no Anexo G.

Conforme os dados obtidos na tabela 6.6, observamos que as amostras dos cimentos analisados possuem vários parâmetros que ultrapassaram o limite máximo permitido pela norma NBR-10006, principalmente o CPIII-32RS, que, comparado com a escória da AMP, possui mais elementos que ultrapassam os valores mínimos permitidos pela norma.

Através desta análise podemos concluir que o cimento CP V ARI, utilizado na composição do traço T2, está contaminando o composto (CEA). Submetido à análise de solubilização, seus parâmetros ultrapassam os valores mínimos permitidos (VMP) pelas normas NBR 10004;10005;10006:2004 da ABNT.

4.1.5. Análises do Traço Definitivo T9 da Peça de Escória

Constatamos que quanto maior a dosagem de cimento no composto maior serão os parâmetros que ultrapassam os valores máximos permitidos (VMP) no ensaio de solubilização. Com base nesse resultado, iniciamos novos testes com compostos mais “pobres”, reduzindo a porcentagem de cimento no traço, sem reduzir a resistência da peça, para que o composto se enquadrasse dentro dos parâmetros das normas NBR 10004;10005;10006:2004 da ABNT e dos objetivos pretendidos pela pesquisa.

O objetivo primordial do estabelecimento de um novo traço é a produção de peças cimento/escória com resistências características às do bloco estrutural de 4,5MPa, e com valores de absorção de água inferiores a 10%. Após inúmeros experimentos com compostos mais “pobres” de cimento, chegamos a um traço que mais se aproxima das características desejadas, T9 (1:9: A), composto por: uma porção de cimento CP V ARI PLUS, nove porções de escória BMP e aditivo na mesma proporção do traço T2. Submetemos este novo traço aos ensaios de resistência à compressão nas peças nas seguintes idades: 7, 14 e 28 dias após a moldagem, fizemos um comparativo com os dados obtidos no traço T2 (1:7: A). Tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Resultados dos Ensaio comparativos de resistência à compressão dos traços T2 e T9, para as peças de escória.

	IDADE	Dimensões Médias		Área de Trabalho	Carga de Ruptura		Tensão de Ruptura	
TRAÇO	dias	(mm)			(Tf)	(KN)	Ruptura	
		L	C				(mm²)	(MPa)
T2 (1:7:A)	7	122	253	30.866	11,28	111	3,5	3,65
		125	252	31.500	11,98	117	3,8	
	14	127	252	32.004	12,76	125	4	4,1
		122	252	30.744	13,3	130	4,2	
	28	125	253	31.625	14,36	141	4,5	4,6
		124	253	31.372	11,82	145	4,7	
T9 (1:9:A)	7	126	254	32.004	13,26	130	4,14	4,27
		124	255	31.620	13,9	136	4,39	
	14	125	254	31.750	18,8	177	5,6	5,03
		125	253	31.625	14,52	142	4,5	
	28	125	252	31.500	16,16	158	5,13	5,05
		125	252	31.500	15,54	152	4,93	

Ensaio realizado no laboratório LCC da EESC – USP.

Verifica-se na tabela 6.7 que o traço com menor consumo de cimento apresentou maior resistência à compressão. Isto se deve à diminuição da relação água/cimento do traço T9 (1:9: A) em relação ao do traço T2 (1:7:A), que foi necessária para permitir que o traço mais “pobre” apresentasse melhor compacidade sob prensagem nessas condições. Outro fator observado é que todos os resultados apresentam um coeficiente de variação aceitável inferior a 15%.

4.1.6. Análise das Características do composto da Peça de Escória-cimento Traço T9

Após definido o traço T9, que atende às características técnicas desejadas para a peça de escória que irá compor o sistema construtivo, analisamos a massa bruta (Tabela 6.8) e novamente o lixiviado e solubilizado do novo composto, para verificar se atende às normas ambientais.

Tabela 6.8: Determinação sobre a massa bruta do traço T9 Cimento - escória-aditivo. NBR 10004: 2004 – Massa Bruta. O ensaio completo encontra-se no Anexo H.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP
Porcentagem de Sólidos	%(p/p)	0,05	90,1	
Inflamabilidade				
Ponto de Fugor	°C		>60	60 (a,d)
Corrosividade				
pH (suspensão 1:1)		0-14	12,2	2,0-12,5 (b)
Reatividade			não reativo	não reativo
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,2	<0,2	250 (c)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1	<1	500 (c)

LQ: Limite de Quantificação; **VMP:** Valor Máximo Permitido
Realização do ensaio – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Analisando, na tabela acima, a Massa Bruta do composto do traço T9, e comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004: 2004, podemos afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos.

As análises completas do lixiviado e solubilizado para o novo composto T9 encontra-se no anexo F. Os resultados das análises são:

Lixiviado: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004: 2004, podemos afirmar que os parâmetros satisfazem os limites permitidos. Portanto, segundo a NBR 10005, como é o lixiviado que determina a toxicidade do resíduo, composto pelo traço T9, é considerado: NÃO PERIGOSO.

Solubilizado: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004: 2004, podemos afirmar que os parâmetros Alumínio, Bário, Índices e Fenóis ultrapassam os limites máximos permitidos. Em função dos resultados obtidos, a amostra deve ser classificada como: Classe II A – Não Inerte.

Em função dos resultados obtidos no Solubilizado, analisamos a toxicidade do composto através do ensaio de Toxicidade Aguda com *Vibrio Fischeri*: Resultados Analíticos, realizados segundo a Norma Técnica CETESB L5.227, em concentração máxima da amostra testada de 81,9%, tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Resultado Analítico, Teste de Toxicidade Aguda- *Vibrio fischeri* do Traço T9 (cimento/escória/aditivo) ECC - NT CETESB L5.227.

	Resultado	Unidade	Data do ensaio	Hora do ensaio
CE20, 15min (pH) corrigido	N.T.(---)	%	22/06/06	10:05
CE50, 15 min Controle Positivo	3,49(2,30-5,29)	mg/L	-	-

A análise completa dos Parâmetros de Microtox encontra-se no Anexo I.

Realização do ensaio – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Conclusões: O solubilizado da amostra analisada não apresentou efeito tóxico agudo diante da cultura de *Vibrio fischeri*. A amostra deve ser classificada como: Não-Tóxica.

4.1.7. Normatização de Resíduos Estabilizados por Solidificação

A viabilidade da comercialização do elemento construtivo, proposto nesta pesquisa, pode ser inviabilizada pela ausência de normatização de Resíduos Estabilizados por Solidificação. No Brasil, não existem normas de avaliação, com critérios e parâmetros, necessitando-se de regulamentação e normatização da tecnologia de Estabilização por solidificação (E/S). A implementação de diretrizes para regular e normatizar esta tecnologia deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

As principais normas existentes para avaliar resíduo estabilizado por solidificação são as normas canadenses, desenvolvidas pelo WTC, em Ontário, e pelo Environment Canadá (EC), e a francesa, desenvolvida pelo grupo POLDEN do INSA de LYON. Um resíduo não é, por princípio, algo nocivo. Muitos resíduos podem ser transformados em subprodutos ou em matérias-primas para outras linhas de produção, como é o caso desta pesquisa.

Todo produto desenvolvido a partir da reutilização de um resíduo industrial, no Brasil, deverá obter uma licença dos órgãos fiscalizadores de meio ambiente para produção, no caso do elemento construtivo com resíduo de escória, proposto neste trabalho, para sua produção em escala comercial e entrada no mercado, esta licença ambiental deverá ser solicitada à CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

Para viabilizar esta pesquisa e licenciar a comercialização e produção do elemento construtivo com resíduo de escória junto aos órgãos fiscalizadores de meio ambiente (CETESB), utilizaremos como comparativo os nossos resultados obtidos com as exigências técnicas estabelecidas na normativa nº 152/2007/C/E, de 8 de agosto de 2007, que dispõe sobre o procedimento para gerenciamento de areia de fundição (AF), como comparativo ao produto desenvolvido nesta pesquisa.

A normativa nº 152/2007/C/E, no item 3.5 – Procedimentos para avaliação de proposta de reutilização do resíduo Areia de Fundação (AF) – deverá obedecer aos seguintes critérios:

- A – O resíduo (AF) deverá ser classificado como classe II - A ou II - B, de acordo com a norma NBR 10004/2004. O caso da escória da AMP e do composto escória-cimento se enquadram neste item.
- B – O resíduo (AF) deverá apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado, obtido conforme a norma NBR 10005/2004, menores ou iguais às concentrações constantes da tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Concentração Máxima de Poluentes no Lixiviado (CMP), comparativo com o Resíduo da Escória e o composto T9 Cimento/Escória.

Parâmetros	Unidade	Escória	Composto T9	CMP
Arsênio	mg/L	<0,01	<0,01	0,5
Bário	mg/L	0,02	1,6	10
Cádmio	mg/L	<0,005	<0,001	0,1
Cromo Total	mg/L	<0,05	<0,041	0,5
Chumbo	mg/L	<0,01	<0,01	0,5
Mercúrio	mg/L	<0,001	<0,0001	0,02
Selênio	mg/L	<0,01	<0,008	0,1

NBR 10005: 2004 – lixiviado - Fonte – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Lixiviado: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela normativa Nº 152/2007/C/E, podemos afirmar que os parâmetros da escória e do composto T9 Cimento/Escória, satisfazem os limites permitidos.

- C – O resíduo (AF) deverá apresentar concentrações de poluentes no extrato lixiviado neutro, obtido conforme metodologia descrita no anexo B (da normativa), menores ou iguais às concentrações máximas constantes da tabela 6.10.

Tabela 6.11 - Concentração Máxima de Poluentes no Lixiviado Neutro (CMP), comparativo com o Resíduo da Escória e o composto T9 Cimento/Escória.

Parâmetros	Unidade	Escória	Composto T9	CMP
Cloreto	mg/L	<1,0	< 10	2500
Cobre	mg/L	<0,05	<0,005	2,5
Cianeto	mg/L	<0,05	<0,025	2
Fluoreto	mg/L	0,37	<1	14
Ferro	mg/L	0,15	<0,01	15
Manganês	mg/L	<0,05	<0,01	0,5
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,05	3
Sódio	mg/L	1,3	26,3	2500
Sulfato (como SO ₄)	mg/L	6,26	<10	2500
Sólidos dissolvidos Totais	%p/p	99,1	90,1	5000
Zinco	mg/L	<0,05	< 0,01	25

NBR 10005: 2004 – lixiviado Neutro - Fonte – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

Lixiviado Neutro: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela normativa N° 152/2007/C/E, podemos afirmar que os parâmetros da escória e do composto T9 Cimento/Escória satisfazem os limites permitidos.

- D – O resíduo (AF) deverá apresentar pH na faixa entre 5,0 e 10,0, determinado conforme procedimento do Anexo B (da normativa).

Tabela 6.12 - pH conforme procedimento constante no Anexo B (da Normativa).

Parâmetros	Unidade	Escória	Composto T9	VP
pH final	-	7,4	8,65	5,0 - 10,0

NBR 10005: 2004 – Valores Permitidos (VP) - Fonte – Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

pH Final: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela normativa N° 152/2007/C/E, podemos afirmar que os parâmetros da escória e do composto T9 Cimento/Escória satisfazem os limites permitidos.

Toxidade Aguda com *Vibrio Fischeri*: Resultados Analíticos realizados segundo a norma técnica CETESB L5.227, em concentração máxima da amostra testada de 81,9%. Conforme Tabela 26.9 as conclusões do solubilizado da amostra do composto de bloco escória-cimento ECC analisada não apresentaram efeito tóxico agudo diante da cultura de *Vibrio fischeri*. A amostra deve ser classificada como: Não-tóxica.

Analisando os comparativos dos resultados da escória e do composto T9 Cimento/Escória, podemos concluir que a reutilização da escória para fabricação de blocos, objeto desta pesquisa, enquadra-se dentro das exigências técnicas da normativa 152/2007/C/E de 01/08/2007 – CETESB, com relação aos procedimentos para avaliação de proposta de reutilização do resíduo (AF).

Através do relatório, elaborado pelo autor desta pesquisa, baseado nos resultados obtidos nos ensaios constantes neste trabalho, através da empresa ArcelorMittal – Piracicaba, esta tese contribuiu para o início da certificação do uso da escória de aciaria elétrica em matrizes de compostos de alvenaria estrutural. CETESB – (Proc. Nº. 21/01399/08), a viabilidade ambiental para a escória de aciaria ser utilizada em artefatos de concreto (ANEXO J), abre um importante precedente para utilização deste resíduo em outras pesquisas e outras aplicações, e torna viável a produção e comercialização do elemento construtivo com escória de aciaria, produto final desta pesquisa.

CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA COM RESÍDUO.

5.1. ADAPTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS AO COMPOSTO ESCÓRIA-CIMENTO.

Nesta etapa, utilizaremos a dosagem definitiva do traço T9 1:9:A (cimento/escória/aditivo), para estudo da caracterização do comportamento da alvenaria estrutural. As peças foram moldadas em prensa hidráulica, (figura 5.3, capítulo cinco), com as seguintes características, conforme Tabela 71.

Tabela 7.1. Dados técnicos da prensa hidráulica, utilizados na moldagem.

Características	Dados Técnicos
Moldagem	Área útil da moldagem: 125 x 250 mm
	Altura de moldagem: 300 mm
Pallets em aço	Comprimento: 400 mm
	Largura: 400 mm
	Espessura: 3 mm
Potência instalada	Sistema hidráulico: 10CV
Dimensões	Comprimento: 700 mm
	Largura: 1000 mm
	Altura: 2000 mm
Peso	800 Kg

Fonte: autor, laboratório LCC EESC – USP.

Todos os equipamentos envolvidos no processo de produção da peça escória-cimento sofreram adaptações, porém a prensa foi o equipamento que ocasionou maior dificuldade para ser adaptada. Este equipamento, a princípio, era utilizado para fabricação de tijolos de solo-cimento (125 mm x 250 mm). O composto do solo-cimento tem características completamente diferentes do composto escória-cimento, sua densidade exige menos força de compactação, por tanto, a primeira alteração no equipamento foi a mudança do pistão principal, responsável pela compactação.

A prensa que utilizamos tem três operações automáticas que são exercidas pelos pistões hidráulicos. A primeira etapa do processo é a alimentação, feita pelo pistão alimentador, que empurra o composto contido em uma gaveta localizada logo abaixo do silo de armazenamento do composto. Este pistão leva o composto até a câmara de moldagem, que fica logo abaixo da prensa principal, esta, compacta o composto conforme estampa contida no molde. O pistão responsável por esta etapa foi substituído por outro de maior potência 7t. Depois de compactado, o composto é extraído por um terceiro pistão, que confere o desmolde da peça, conforme figura 7.1. (funcionamento dos pistões).

Figura 7.1. Fluxograma de funcionamento dos pistões na prensa hidráulica utilizada.

Outra modificação realizada na prensa hidráulica foi o formato da peça. Como o objetivo desta pesquisa é desenvolver um sistema construtivo, intertravado com composto escória-cimento, o formato da peça foi modificado para proporcionar maior facilidade na montagem das peças. O novo formato não necessita de argamassa de assentamento para execução de alvenaria estrutural (figura 7.2). Outra modificação no equipamento foi a do software de funcionamento da prensa, relacionando o tempo de cada etapa da automação com os sensores de final de curso dos pistões.

Figura 7.2. Modificação do formato da peça na prensa hidráulica.

Acima, em primeiro plano, temos o formato original da prensa. As primeiras peças de escória/cimento moldadas neste equipamento, para ensaios preliminares, foram feitas ainda utilizando a estampa original da prensa, o formato do tijolo de solo-cimento. Em segundo plano, temos o formato definitivo da peça (125 mm x 250 mm x 80 mm), traço T9, que será adotado como elemento construtivo na composição de alvenaria estrutural.

5.2. PRODUÇÃO DAS PEÇAS DE ESCÓRIA-CIMENTO.

Definidas as adaptações nos equipamentos, continuamos o desenvolvimento da pesquisa com a produção das peças – todos os insumos utilizados foram dosados em volume. Durante os ensaios, os materiais foram pesados para definição do traço. Para dar mais rapidez ao processo de fabricação, o peso dos materiais foi transformado em volumes e medidas. O

traço T9, produzido na argamassadeira de eixo horizontal, disponível no laboratório LCC – EESC – USP, tem capacidade nominal máxima de 50 kg de material. Foi utilizada a seguinte proporção: 40 kg de escória, 4 kg de cimento, água e aditivo. Utilizamos, como padrão das medidas do traço T9, recipientes plásticos com graduação para cada tipo de material utilizado, Figuras 7.3 a 7.5.

Figuras 7.3. Dosador de cimento 7.4 Dosador de escória. 7.5 Dosador de água e aditivo.

De acordo com Medeiros (1993), para produção de blocos de concreto estruturais, com qualidade adequada, devem-se proporcionar os materiais em massa; no caso da dosagem volumétrica, devem ser corrigidas também as variações de volume, provenientes do fenômeno de inchamento dos agregados miúdos.

A água é o principal elemento na produção da peça de escória-cimento, ela define a compactação ideal da mistura. Nos testes realizados, ficou definida como umidade ótima a relação água-cimento de 1,85. Porém, antes do início da produção, a umidade existente no material, principalmente no agregado escória de maior volume na mistura, deverá ser observada. Normalmente armazenado ao tempo, a umidade deste material poderá variar com as condições climáticas. De acordo com Frasson Junior (2000), na produção de blocos, umidades excessivas dificultam a desforma e provocam muitas fissuras nas unidades ao serem transportadas para cura e estocagem, como também podem interferir de maneira significativa na massa dos blocos e, consequentemente, na sua resistência.

A volumetria dos insumos que compõe o traço T9 obedeceu à seguinte ordem de homogeneização: 1º – dosagem do agregado, composto por escória de aciaria; 2º. – introdução do cimento; 3º. – acréscimo da água e aditivo; 4º. mistura final por cerca de três minutos. Com o composto homogeneizado, inicia-se o processamento de moldagem das peças nos equipamentos que compõem a linha experimental de produção, Figura 7.4.

Figura 7.6. Linha de produção experimental de peças escória/cimento no LCC – EESS _ USP.

A planta da linha experimental de produção foi montada junto ao Laboratório de Construção Civil (LCC) – EESC – USP, na seguinte ordem dos equipamentos: **1** misturador de eixo vertical, **2** destorroador, **3** peneira, **4** esteira transportadora e **5** prensa (figura 7.4). Esta linha de produção tem capacidade para 280 blocos/hora. O abastecimento e a compactação do bloco são feitos automaticamente pelo software do equipamento, que completa seu ciclo de moldagem de 2 peças a cada 30 segundos de compactação. O ciclo automático do equipamento é interrompido após a moldagem, para que as peças produzidas sejam retiradas do equipamento manualmente. Nas figura 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, podemos observar a moldagem das peças, traço T9, pela prensa.

Figura 7.7. Abastecimento da prensa.

Figura 7.8. Compactação do composto.

Figura 7.9. Peças sendo retiradas manualmente.

Figura 7.10. Peças prontas.

A movimentação das peças prontas só foi possível após a colocação de chapas metálicas de 40 mm x 40 mm x 3 mm na saída da prensa, para receber as peças desmoldadas (figura 7.9).

Figura 7.11. Chapa utilizada para desmoldar.

Figura 7.12. Peças estocadas em palet.

A moldagem das peças foi realizada através de ajuste dos tempos de alimentação e compactação da prensa hidráulica. A definição destes tempos está relacionada à umidade da mistura, assim, caso a primeira moldagem não seja produzida corretamente – coesão insuficiente, quebra dos cantos e altura maior que a especificada – o operador interrompe a moldagem das peças e ajusta novos tempos de produção no painel da máquina.

As peças prontas são depositadas em palet, datadas de acordo com sua ordem de produção, umedecidas durante os sete primeiros dias – completando seu processo de cura – e armazenadas no pátio do laboratório. Em uma produção industrial, as peças deverão ser conduzidas até a câmara de cura. A

cura térmica é a mais recomendada, o principal objetivo é fazer com que a umidade seja reforçada a penetrar no interior da peça, garantindo a hidratação do cimento.

5.3 ENSAIOS DA ALVENARIA DE ESCÓRIA-CIMENTO

Após a análise do comportamento das peças de escória-cimento, analisaremos o comportamento básico da alvenaria produzida com este elemento construtivo. Preliminarmente, são descritos os ensaios de prismas e de miniparedes, instrumentações adotadas e procedimentos de execução.

5.3.1 Ensaio e Análises de Prismas

Nos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação, optou-se por utilizar o prisma de três blocos, devido a sua altura e espessura ser superior a quatro. Drysdale e Hamid (1979, apud Barbosa, 2004)⁴ e La Rovere e Rodrigues (1997) citam que prismas de dois blocos não são representativos em um ensaio uniaxial, devendo-se utilizar, no mínimo, prismas de três blocos para obtenção das propriedades de alvenaria à compressão. Segundo Capuzzo Neto (2004), para prismas de três blocos, a influência da restrição das placas de ensaio na resistência pode ser desprezada.

Conforme já relatado, para produção dos prismas foi utilizado o traço avaliado T9, tabela 7.2, figura 7.13, foram produzidos três prismas. O estudo desses prismas objetivou esclarecer se a incorporação de agregado de escória de aciaria na produção de peças para alvenaria tem a resistência à compressão e módulo de deformação compatíveis com o bloco estrutural de concreto, produzido com agregados naturais.

⁴ DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A. (1979). Behavior of concret block masonry under axial compression. ACI Journal, v.76, n.6, p.707-721, june.

Tabela 7.2. Ensaio Traço T9 Referência - Resistência à compressão

Corpo de Prova	Área medida	Carga máxima de ruptura	Resistência à compressão	Identificação
	(mm ²)	(N)	(MPa)	
CP1 - T9	31250,00	221060,84	7,07	
Número	1	1	1	0
Média	31250	221100	7,074	*
Mediana	31250	221100	7,074	*
Desv.Padrão	* * * *	* * * *	* * * *	*
Coef.Var.(%)	* * * *	* * * *	* * * *	*
Mínimo	31250	221100	7,074	*
Máximo	31250	221100	7,074	*

Ensaio realizado no Laboratório Sistemas Estruturais UFSCar. O ensaio completo encontra-se no Anexo K.

Tensão (MPa)

Figura 7.13. Ensaio módulo de deformação T9 referência – Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) UFSCar.

As propriedades avaliadas para os prismas foram: resistência à compressão e módulo de deformação. O módulo de deformação foi calculado de acordo com as prescrições do ACI 530-92 (1995); segundo essa norma, o módulo é dado pela inclinação da reta secante no diagrama tensão versus deformação, entre 5% e 33% da tensão de ruptura.

A máquina utilizada para o ensaio é a Emic DL 60000. A instrumentação consistiu de dois extensômetros Trd 11, removíveis, célula: Trd 29, e resolução de 0,001 mm; esses extensômetros foram posicionados exatamente na região central da cavidade da unidade, sendo determinados os deslocamentos relativos entre o primeiro e o último bloco, Figuras 7.17 e 7.18. A velocidade de imposição de deslocamento foi de 0,05 Kg/mm², sendo as leituras e o armazenamento de dados realizados pelo sistema de aquisição de dados Tesc, versão 3.04.

As figuras a seguir ilustram o procedimento do ensaio de prisma, realizado no laboratório de Sistemas Estruturais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

Figura 7.14 e 7.15. Preparação da peça para o ensaio.

Nas figuras 7.14 e 7.15 a peça é preparada para ir para o ensaio de prisma. Foi necessário retirar o sistema de encaixe para não interferir nos resultados.

Figura 7.16. Máquina de Ensaio
Emic PC 200

Figura 7.17. Colocação dos extensômetros Trd 11,
Com as células : Trd 29

Figura 7.18. Extensômetro laterais

Figura 7.18 Os extensômetros Trd 11 e as células : Trd 29 foram colocadas dos dois lados da peça, Figura 7.19, Máquina Emic DL 60000 realizando o ensaio e Figura 7.20, ruptura das peças.

Analisando os resultados da tabela 7.3, observa-se que os prismas compostos de escória-cimento apresentaram uma redução média de 12% na resistência à compressão, comparativamente aos prismas de referência T9.

Tabela 7.3. Resultados de módulo de deformação dos prismas Traço T9.

Corpo de Prova	Largura (mm)	Comp. (mm)	Área (mm ²)	Força (N)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP1	125,00	250,00	31250,00	200317,00	6,40	4048,18
CP2	125,00	250,00	31250,00	180365,00	5,80	3346,72
CP3	125,00	250,00	31250,00	202954,00	6,50	4026,06
Número CPs	3	3	3	3	3	3
Média	125,00	250,00	31250,00	194500	6,225	3807
Mediana	125,00	250,00	31250,00	200300	6,41	4026
Desv.Padrão	0,00	0,00	0,00	12350	0,3952	398,8
Coef.Var.(%)	0,00	0,00	0,00	6,349	6,349	10,47
Mínimo	125,00	250,00	31250,00	180400	5,772	3347
Máximo	125,00	250,00	31250,00	203000	6,495	4048

Ensaio realizado no Laboratório de Sistemas Estruturais UFSCar.

Na resistência à compressão das unidades, a redução foi superior a 11,93%. Com relação ao fator de eficiência ($f_{\text{prisma}}/f_{\text{bloco}}$), está ligada ao tipo de bloco em estudo, o valor médio obtido foi igual a 0,88. FREITAS (2006) obteve, para prismas de três blocos de concreto ($f_{\text{bloco}} = 9,08$ MPa), assentados com argamassa média ($f_{\text{arg}} = 6,02$ MPa) e fraca ($f_{\text{arg}} = 4,70$ MPa), fatores de eficiência iguais a 0,74 e 0,74, respectivamente. JUSTE (2001) obteve prismas de três blocos de concreto ($f_{\text{bloco}} = 10,80$ MPa), assentados com argamassa média, valores de eficiência próximos a 0,70. RAMALHO E CORRÊA (2003) citam que, para blocos vazados de concreto, a eficiência varia de 0,5 a 0,9, considerando-se argamassas usuais. Os dados obtidos pelo componente construtivo são apenas comparativos pois o mesmo não utiliza argamassas usuais, são utilizados intertravados. Há que se desenvolver processos de dimensionamento para blocos sem argamassa de rejunte.

Através dos ensaios realizados, a incorporação de agregado de escória de aciaria, na produção de peças para alvenaria, tem a resistência à compressão e módulo de deformação compatíveis com o bloco estrutural de concreto, produzido com agregados naturais.

5.3.2 Ensaio e Análises de Miniparedes

Nos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação, optou-se por miniparedes de oito fiadas (62x70) cm, por determinação da (ABNT/CB-02 1º. PROJETO 02:123.04-015-2 NOV 2011), que recomenda que o corpo de prova tenha, no mínimo, um comprimento (C) equivalente a 2 blocos, e altura (H) equivalente a 5 vezes a espessura do bloco, e não inferior a 70 cm.

Figura 7.21. Esquema para o ensaio de determinação da resistência de pequenas paredes (f_{pa}), com a instrumentação para determinação do módulo de deformação (E_{pa}) e do coeficiente de Poisson (V_{pa}). Fonte - (ABNT/CB-02 1º. PROJETO 02:123.04-015-2 NOV 2010).

De acordo com CAPUZZO NETO (2004), o termo miniparede serve para designar corpos de prova de parede. Casali (2003) cita que os ensaios de miniparedes e prisma são os mais utilizados no meio técnico, pois podem ser facilmente executados em qualquer laboratório que possua uma prensa de média capacidade.

As propriedades avaliadas para as miniparedes foram as mesmas avaliadas para os prismas: resistência à compressão e módulo de deformação. O módulo de deformação foi calculado de acordo com as prescrições do ACI 530-92 (1995); segundo essa norma, o módulo é dado pela inclinação da reta secante no diagrama tensão versus deformação, entre 5% e 33% da tensão de ruptura.

Figura 7.22. Miniparedes a ensaiar e seus respectivos grautes - Laboratório de Sistemas Estruturais - UFSCar.

Segundo recomendações da norma supracitada, “o grauteamento deve ser realizado 16 h do término do assentamento dos blocos. O graute deve ser adensado com soquete metálico ou com vibrador apropriado”. Como nossa alvenaria não utiliza argamassa no assentamento das peças, o grauteamento foi realizado logo após o término da execução da alvenaria, com a retirada de seis amostras para ensaio.

Tabela 7.4. Composição experimental do traço utilizado no grauteamento das miniparedes.

Traço experimental em volume G1 - 1:0,1:2,0:2,0							
Material	Massa específica aparente (Kg/m ³)	Traço volume	Traço Peso	Quantidade massa (Kg)	a/c	Resistência esperada (MPa)	Consistência (20,32 a 27,94 cm)
Cimento CP II Z 32	0,00	1,000	0,000	12,00	0,78	15	22,5-24,5
Cal Hidratada	640	0,100	0,057	0,68			
Areia	0,00	2,000	0,000	0,00			
Brita	0,00	2,000	0,000	0,00			
Água	1000			9,36			
Aditivo	1300,00	0,015	0,017	0,21			

Na tabela 7.5, encontram-se os resultados das características do graute utilizado nas miniparedes.

Corpo de Prova	Área	Força Máxima	Resistência à Compressão
	(mm ²)	(kgf)	(Mpa)
CP 1	7853,98	23366,62	29,18
CP 2	7853,98	24244,99	30,27
CP 3	7853,98	22577,87	28,19
CP 4	7853,98	22524,09	28,12
CP 5	7853,98	24343,59	30,40
CP 6	7853,98	23097,72	28,84
Número de CPs	6	6	6
Média	7854,98	23360	29,17
Mediana	7854,98	23230	29,01
Desv. Padrão	0	791,2	0,9879
Coef. Var. (%)	0	3,387	3,387
Mínimo	7854,98	22520	28,12
Maximo	7854,98	24340	30,4

A instrumentação consistiu de seis extensômetros removíveis de base de medidas igual a 20 mm e resolução de 0,001 mm; esses extensômetros foram posicionados nas regiões centrais das cavidades das unidades, sendo determinados os deslocamentos relativos, conforme figuras 7.21 (esquema de ensaio). A velocidade de deslocamento foi de $0,05\text{kg/mm}^2$, sendo as leituras e o armazenamento de dados realizados pelo sistema de aquisição de dados Tesc versão 3.04.

Figuras 7.23 e 7.24. Posicionamento dos extensômetros removíveis no ensaio das miniparedes
_ Laboratório Sistemas Estruturais - UFSCar.

As cantoneiras dos extensômetros foram fixadas com cola à base de epóxi. Na parte superior da miniparede foi disposta uma viga metálica perfil “I” de 1,20 m de extensão, enrijecida com quatro nervuras ao longo de seu comprimento, detalhe (figura 7.25), para distribuir uniformemente seu carregamento. Além do capeamento das faces superiores e inferiores, foram dispostas duas peças de neoprene de 1 cm no topo, com a finalidade de evitar possíveis concentrações de tensões. A configuração típica dos ensaios de miniparedes é mostrada na Figura 7.25. As miniparedes foram ensaiadas entre o 35º. e o 43º. dias, juntamente com os CPs dos grautes.

Figuras7.25. Configuração típica dos ensaios de miniparedes. Laboratório Sistemas Estruturais - UFSCar.

Os valores de resistência à compressão e módulo de deformação das miniparedes são apresentados na tabela 7.6 a seguir:

Tabela 7.6 Resultados dos ensaios de compressão das miniparedes

Corpo de Prova	Largura (mm)	Comp. (mm)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Força (tf)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP1	125,00	620,00	700,00	77500,00	39,00	5,00	6658,40
CP2	125,00	620,00	700,00	77500,00	25,00	3,20	6555,90
CP3	125,00	620,00	700,00	77500,00	21,00	2,70	6825,80
Número CPs	3	3	3	3	3	3	3
Média	125,00	620,00	700,00	77500,00	28,48	3,604	6680,00
Mediana	125,00	620,00	700,00	77500,00	24,94	3,157	*
Desv.Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	9,53	1,206	-1
Coef.Var.(%)	0,00	0,00	0,00	0,00	33,46	33,46	-1
Mínimo	125,00	620,00	700,00	77500,00	21,22	2,686	*
Máximo	125,00	620,00	700,00	77500,00	39,28	4,970	*

Laboratório de Sistemas Estruturais - UFSCar. O resultado completo encontra-se no Anexo L

Observando a tabela 7.6, as miniparedes produzidas com o composto escória-cimento traço T9 obtiveram resistência média de 3,60 Mpa. Freitas (2006), em ensaiando de miniparedes com 0,80m x 0,80m, utilizando blocos de concreto de 4,5 Mpa ($f_{cm}=9,08$ MPa), produzidos pelo fabricante (Tatu

Pré-Moldados), obteve valores médios de resistência à compressão de 5,91 MPa a 2,92 MPa para argamassa média ($f_{arg} = 5,80$ Mpa) fraca ($f_{arg} = 4,73$ MPa), respectivamente. Juste (2001), avaliando miniparede de 0,80m x 0,80m, utilizando blocos de concreto de 10,80 Mpa, produzidos também pelo fabricante (Tatu Pré-Moldados), obteve valores médios de resistência à compressão de 4,12 MPa e 4,97 MPa para argamassa média ($f_{arg} = 10,24$ Mpa) fraca ($f_{arg} = 5,05$ MPa), respectivamente.

Média do Módulo

Figura 7.26. Ensaio módulo de deformação miniparedes - Laboratório Sistemas Estruturais UFSCar.

Com relação ao módulo de deformação, o valor médio obtido para as miniparedes foi de 6.680 MPa. Juste (2001) obteve valores de módulo de deformação entre 6.393 MPa e 6.440 MPa, para miniparedes de (0,80m x 0,80m), que apresentaram resistência à compressão de 4,97 MPa ($f_{arg} = 10,24$ Mpa) e 4,13 MPa ($f_{arg} = 5,05$ MPa), respectivamente.

Tabela 7.7. Fatores de eficiência, razão entre módulo e resistência e relação entre o módulo e a deformação.

FATORES DE EFICIÊNCIA				
	$f_{\text{miniparedes}}/f_{\text{prisma}}$	$f_{\text{miniparedes}}/f_{\text{bloco}}$	$E_{\text{miniparedes}}/f_{\text{miniparedes}}$	$E_{\text{miniparedes}}/E_{\text{prisma}}$
Composto T9 Escória-cimento	0,58	0,50	1072	1,754
Valores Utilizados para o cálculo: $f_{\text{bloco}} = 7,074$, $f_{\text{prisma}} = 6,23$, $f_{\text{miniparede}} = 3,60$, $E_{\text{miniparede}} = 6680$, $E_{\text{prisma}} = 3806,98$				

Pela tabela 7.7, nota-se que os fatores de eficiência foram 0,58 ($f_{\text{miniparedes}}/f_{\text{prisma}}$) e 0,50 ($f_{\text{miniparedes}}/f_{\text{bloco}}$). A razão entre o módulo de deformação e a resistência à compressão das miniparedes foi de 1072. Como parâmetro aos resultados obtidos, JUSTE (2001) obteve valores próximos a 1425 para essa relação. FREITAS (2006) obteve fatores de eficiência (miniparede/prisma de três blocos) de 0,87 ($f_{\text{arg}} = 5,80$ Mpa) e 0,46 ($f_{\text{arg}} = 4,73$ MPa), e fatores de eficiência (miniparede/bloco) de 0,65 ($f_{\text{arg}} = 5,80$ Mpa) e 0,32 ($f_{\text{arg}} = 4,73$ MPa), para blocos de resistência média de 9,08MPa.

Figuras 7.27 e 7.28. Ruptura das miniparedes de escória-cimento - Laboratório Sistemas Estruturais UFSCar.

Conforme observado nas figuras 7.27 e 7.28, a ruptura das miniparedes do composto escória-cimento foi caracterizada pela propagação de fissuras verticais. Além destas, foram observadas fissuras verticais ao longo dos septos transversais das miniparedes.

Figura 7.29. Resultado do ensaio de ruptura das miniparedes de escória-cimento - Laboratório Sistemas Estruturais UFSCar.

Na Figura 7.29, demonstramos o gráfico de carregamento de força durante o ensaio das miniparedes; nota-se que por duas vezes a parede é solicitada com carga preestabelecida em ensaios anteriores, só então começa a caracterização da parede. Pelo fato de não haver argamassa no assentamento das peças, a parede se torna muito rígida. Em alguns ensaios, apesar do capeamento das paredes e utilização de neoprene, ocorreu ruptura prematura de exemplares devido a concentrações de tensões, possivelmente pela diferença dimensional nas alturas das peças, como nota-se no capítulo 6.

Após análise dos ensaios de prisma do bloco e das miniparedes, do composto escória-cimento, pode-se dizer que os valores obtidos para os resultados não diferem significativamente dos valores obtidos para os elementos feitos com agregados naturais, justificando, portanto, a viabilidade técnica do elemento construtivo.

5.3.3 Ensaio e Análises de Retração por Secagem

O ensaio de retração por secagem constituiu na determinação das variações dimensionais dos corpos de prova devido ao processo de secagem, que ocorreu a partir de uma condição saturada até que fosse atingindo o equilíbrio variacional tanto no comprimento quanto na massa dos CPs, sob condições de temperatura e umidade controladas. Para as leituras dimensionais, foram utilizados o aparelho analógico da marca Ploog Eng. Co. (precisão de 0,001) e a barra de aço de invar, de comprimento igual a 300,00 mm, figura 7.30. Para as leituras de massa, foi empregada a balança maste, com precisão de 0,1g e capacidade de 20 kg figura 7.31. Para elevar a temperatura das peças, utilizamos a estufa com renovação e circulação de ar da marca Solab, com capacidade para 0,70m³ e temperatura máxima de 100°C, e para trazer a temperatura das peças a 23°C, foi utilizado uma câmara drybox de vácuo da marca Dosivac.

Figura 7.30. Aparelho analógico da marca Ploog Eng. Co e barra de invar para calibrar o aparelho.

Figuras 7.31. Balança maste.

Figuras 7.32. Estufa com renovação e circulação de ar.

A retração por secagem foi avaliada para o traço T9, definido como padrão para execução das peças. A realização do ensaio baseou-se nos procedimento da NBR 12118(2013), com algumas adaptações. A norma prescreve que o número mínimo de corpos de prova por condição é de três blocos inteiros, deve ter pelo menos 100 mm de altura e, preferencialmente, o comprimento igual ao da parede do bloco, tolerando-se um comprimento mínimo igual a 250 mm.

Com relação à preparação dos corpos de prova, inicialmente foram escolhidas aleatoriamente três peças. De acordo com a NBR 12118 (2013), os corpos de prova devem ser blocos inteiros, livres de fissuras visíveis ou outros defeitos estruturais e representativos do lote. Na presente pesquisa, avaliamos peças inteiras com médias dimensionais de 80 mm de altura, e comprimento de 250 mm.

Posteriormente, nos corpos de prova, foram colocados os apoios das bases de medidas em cavidades sobre os eixos das duas faces longitudinais externas da peça, sendo fixadas com cola à base de epox. A profundidade das cavidades deve ser tal que o apoio da base de medida se destaque aproximadamente 2,5 mm da superfície da face. Figura 7.33.

Figuras 7.33. Preparação das peças com base de medidas e gabarito para furação.

Após a fixação das peças de apoio, os corpos de prova foram dispostos em um tanque com água à temperatura $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$, por 48h, Figura 7.34_.

Figuras 7.34. Peças no tanque de água dentro do laboratório de Sistemas Estruturais - UFSCar, sob temperatura controlada a 23°C , por 48h.

Após 48h, o instrumento de medidas foi ajustado utilizando-se a barra de aço invar e, em seguida, obteve-se a leitura inicial na saturação, com o corpo de prova posicionado no tanque de água, de modo que a linha da base de medida estivesse próxima ao nível da superfície, para evitar erro devido ao resfriamento por evaporação figura 7.35.

Figuras 7.35. Leitura da peça na saturação. Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar.

Em seguida, posiciona-se o corpo de prova molhado no comparador, devendo ser adotada a mesma face de referência para todas as leituras. Logo após, obteve-se a massa saturada com a superfície seca. No término deste procedimento, os corpos de prova foram colocados na estufa durante um período de 48h, em temperatura de $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(17 \pm 3)\%$, para tanto deve-se usar CaCl_2 (cloreto de cálcio) em flocos, nas bandejas, o suficiente para que estejam garantidamente saturadas com cristais do sal aflorado à superfície, para assegurar a uniformidade de secagem e manter a umidade sob controle Figuras 7.36 e 7.37.

Figuras 7.36 e 7.37. Bandeja com Cloreto de Cálcio, utilizada na estufa - Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar.

Posteriormente ao período de 48h, os corpos de prova foram retirados da estufa e colocados na câmara climatizada, para o resfriamento até a temperatura de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Para garantir o resfriamento em ambiente climatizado, utilizamos uma câmara de vácuo da marca Dosivac, figura 7.38. Após o resfriamento, repetem-se as leituras de comprimento e determinação de massa. Este procedimento de aquecimento e resfriamento deve-se repetir até que seja atingida uma condição de equilíbrio, isto é, a variação média do comprimento atinja 0,002% ou menos, e a perda de massa em 48h de secagem seja de 0,2%, ou menor, quando comparada a última determinação, em um período de 6 dias ou mais.

Figuras 7.38. Câmara de vácuo da marca Dosivac- Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar.

Os ensaios de retração por secagem foram realizados para corpos de prova com idade superior a 90 dias. Conforme Barbosa (2005), para execução de alvenaria, deve-se respeitar um período mínimo de 7 dias para blocos de resistência até 8,0 MPa e 14 dias para blocos de resistência superiores a 8,0 MPa, sendo que, em ambas as situações, foram consideradas unidades produzidas com rigoroso controle e submetidas à cura térmica. Medeiros (1993) cita que a retração por secagem para blocos de concreto é geralmente muito elevada nas primeiras idades, por isso o pesquisador recomenda que deva ser respeitado um limite mínimo de três dias para unidade curada a vapor e 14 dias para blocos submetidos à cura ambiente. A NBR 8798 (1985) cita que esse período mínimo deve ser respeitado para que seja minimizada a retração hidráulica e irreversível.

Os resultados de retração por secagem do composto escória-cimento traço T9 são apresentados na tabela 7.8.

Tabela 7.8. Valores de retração por secagem, obtidos para composto escória-cimento traço T9.

CP 1	Variação 1 (mm)	Variação 2 (mm)	Massa (kg)	Temp. (oC)	Tempo Dias
	0,726	0,751	4,885	23,5	1
	0,720	0,748	4,785	23,4	4
	0,720	0,747	4,685	23,7	7
	0,718	0,704	4,564	23,2	10
	0,684	0,680	4,487	23,8	13
	0,683	0,680	4,391	23,4	16
	0,682	0,679	4,275	23,9	19
	0,682	0,679	4,195	23,3	22
Média - L	0,701875	0,7085	4,533375	23,525	
Retração %	0,022	0,036	14,12		

CP 2	Variação 1 (mm)	Variação 2 (mm)	Massa (kg)	Temp. (oC)	Tempo Dias
	0,747	0,719	4,595	23,5	1
	0,73	0,719	4,462	23,4	4
	0,71	0,714	4,325	23,7	7
	0,688	0,704	4,239	23,2	10
	0,682	0,668	4,125	23,8	13
	0,661	0,667	3,995	23,4	16
	0,661	0,667	3,995	23,9	19
	0,661	0,667	3,995	23,3	22
Média - L	0,6925	0,690625	4,216375	23,525	
Retração %	0,043	0,026	13,06		

CP 3	Variação 1 (mm)	Variação 2 (mm)	Massa (kg)	Temp. (oC)	Tempo Dias
	0,722	0,702	4,595	23,5	1
	0,714	0,699	4,535	23,4	4
	0,712	0,696	4,353	23,7	7
	0,677	0,664	4,298	23,2	10
	0,659	0,661	4,187	23,8	13
	0,658	0,660	3,935	23,4	16
	0,658	0,660	3,935	23,9	19
	0,658	0,660	3,935	23,3	22
Média - L	0,68225	0,67525	4,221625	23,525	
Retração %	0,032	0,021	14,36		

Fonte – Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados da tabela 7.8, nota-se que os valores de retração estão variando de 0,043% a 0,021%, sendo a média de 0,030%. A NBR 6136 (1994) prescreve valores de retração por secagem inferiores a 0,065%; em todos os corpos de prova do composto escória-cimento analisados, os valores obtidos ficaram abaixo do estabelecido pela norma.

Figuras 7.39. Evolução da retração por secagem dos CPs em %.- Fonte - Laboratório de Sistemas Estruturais – UFSCar, elaborado pelo autor.

Na figura 7.39, nota-se que a evolução da retração por secagem do traço T9 escória-cimento deu-se de forma mais intensiva após o quarto dia de ensaio, estabilizando após o décimo sexto dia, quando as dimensões aferidas permaneceram inalteradas.

De maneira geral, os resultados obtidos de retração por secagem para os corpos de prova avaliados, podem utilizar os valor limite de retração prescrito pela NBR 6136, como um comparativo de análise de resultados. Além disso, as condições de secagem em estufa com cloreto de sódio, adotadas neste trabalho, mostraram-se adequadas, uma vez que puderam ser estabelecidas relações entre a umidade presente nos CPs e sua respectiva retração. Em todos os corpos de prova avaliados, observou-se que a retirada, cerca de 14%, em média,

da água contida nos CPs não provocou uma retração significativa; segundo MEHTA E MONTEIRO (1994), a perda de água livre retirada nas grandes cavidades não é acompanhada de retração significativa, uma vez que essa água livre não está atrelada à estrutura dos poros hidratados por ligações físico-químicas fortes.

Como pudemos analisar neste capítulo, o composto escória-cimento traço T9 atendeu a todos os ensaios a que foi submetido, ficando dentro das normas adotadas como referência aplicada a blocos de concreto, comprovando a sua viabilidade técnica para utilização em alvenaria estrutural.

6

Capítulo

INDUSTRIALIZAÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO.

Neste item, foi desenvolvido um modelo do processo de industrialização do elemento construtivo, que procura assimilar as inovações tecnológicas, originárias dos conceitos de racionalização da tecnologia.

As fábricas exigem grandes espaços para abrigar as máquinas, as linhas de produção e montagem, estocagem de matéria-prima e produtos acabados. Exigindo, ainda, conforme nosso caso, a proximidade das fontes geradoras do resíduo e fontes de energia, mercados consumidores e mesmo de mão de obra. A organização da produção industrial é baseada na racionalidade e eficiência, com variáveis que vão da matéria-prima ao produto final.

6.1 VARIÁVEIS DA ETAPA DE PRODUÇÃO:

- Produção na usina: - possibilidade de produzir os componentes construtivos, em grande número, através de atividades rotinizadas e em série.
- Estocagem e preparação do material: – consideração das áreas necessárias, das necessidades de produção de equipamentos especiais, de conservação, estocagem da matéria-prima que entra na composição dos elementos construtivos.
- Estocagem do produto acabado: analogamente, consideração sobre áreas, equipamentos de transporte e sua circulação, equipamentos especiais de conservação, ordenação dos pátios, estoque mínimo.
- Mecanização: - consideração de tecnologia que irá substituir o trabalho humano, isto é, máquinas que realizam a produção.

- Automação: - consideração de tecnologia na forma de máquinas autocontroladas ou controladores de máquinas.
- Mão de Obra: - consideração da mão de obra envolvida, sua especialização e sua relação com a tecnologia mobilizada.
- Transporte da matéria-prima: - desde a estocagem até seu processamento, e depois até o início da produção.
- Transporte interno na usina: - no sentido de circulação dos elementos construtivos que estão sendo produzidos até os pátios de estocagem.
- Custos de produção: - custo em relação às unidades/dia produzidas, da mão de obra, da tecnologia mobilizada, da matéria-prima, do custo de manutenção da usina e dos equipamentos, etc.
- Custo de implantação da usina.
- Controle de qualidade – das diferentes fases do processamento e do produto final.

Para implantação da usina de componente do elemento construtivo escória-cimento seria necessária uma área de aproximadamente 10.000m², para organização de todo processo produtivo, que vai do beneficiamento da matéria-prima (escória de aciaria) até a estocagem do produto final acabado. Por se tratar de um resíduo industrial, a área utilizada para implantação da usina transformadora deverá obter licença ambiental para a atividade específica. Esta licença é expedida por órgãos fiscalizadores de atividades industriais, cada estado ou país possui um departamento responsável para fiscalização e emissão desta licença; no caso do estado de São Paulo, o órgão responsável é a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental). A seguir, segue o detalhamento da industrialização do processo produtivo da usina modelo de transformação do resíduo escória de aciaria em elementos construtivos.

6.1.1 Classificação do agregado siderúrgico

Como visto anteriormente, o melhor local para a implantação da usina de transformação, seria dentro da própria planta da usina geradora de resíduo, mas nem sempre isto é possível devido a várias exigências e restrições impostas por ela mesma, portanto, seria ideal que a implantação da usina de transformação fosse o mais próximo possível da usina geradora do resíduo – que corresponde ao maior volume de insumo utilizado. Com isso, haveria o barateamento em transporte da matéria-prima, fundamental neste processo.

O resíduo de escória de aciaria chega até a usina transformadora em “bags” de aproximadamente 1.000 kg, figuras 8.1 e 8.2. Na usina o material deverá ser armazenado a granel, de preferência, em local coberto para não sofrer alteração de sua umidade em virtude das variações climáticas.

Figuras 8.1 e 8.2. Escória de aciaria em “Bags” – como é transportada até a usina transformadora. Fonte – Foto do autor

Apesar da escória de aciaria sofrer um beneficiamento granulométrico, na própria usina geradora do resíduo, o material mais fino obtido neste processamento chega à unidade transformadora fora das especificações granulométricas definidas por esta pesquisa. Para ser utilizado, este material deve sofrer um processamento de classificação granulométrica na usina transformadora figura 8.3. O processo de classificação granulométrica ocorre da seguinte forma: a escória de aciaria é direcionada a um funil que leva o material até o moinho de martelos, para homogeneizar a granulometria e deixar mais fino o agregado; em seguida, passa por uma peneira rotativa que classifica a porção do agregado na malha 2,4 mm – o agregado que ficar acima de 2,4mm retorna

ao moinho até que fique dentro da granulometria desejada –, o excedente não classificado durante o processo de beneficiamento é armazenado e moído novamente, até que fique dentro das especificações desejadas.

Figura 8.3. Fluxograma de beneficiamento da escória da usina transformadora.

Fonte – Projeto do autor

Para esta etapa de produção é necessária uma área de 1200 m² de cobertura. Esta linha de classificação do agregado siderúrgico está dimensionada para processar 50 t/h, com potência total (plena carga) de 190CV, conforme equipamentos Tabela 8.1, suficiente para uma produção de 12500 peças/h (capacidade máxima) do elemento construtivo. Esta fase requer um investimento em equipamentos da ordem de R\$ 503.655,00, Tabela 8.2, além da aquisição do terreno e obras civis.

Tabela 8.1, Composição dos equipamentos da linha de classificação do agregado siderúrgico.

Pos. Fig_	Denominação	Qt.	Tipo	Motor CV (unit.) Polos		Red.	Obs.
1	Funil Direcional	1	BJ - 265				
2	Transportador de Correias C/C 1600	1	TC - 24"	5	IV	RS75	
3	Moinho de Martelos	1	MM - 304D	150	IV		c/ Grelha abert. 16mm
4	Transportador de Correias C/C 1800	1	TC - 20"	5	IV	RS75	
5	Peneira Rotativa Classificadora	1	PRC - 315	4	V	Ø 1500mm C. 4000mm	Malha Ø 0,2mm Malha Ø 0,5mm
6	Transportador de Correias C/C 1800	2	TC - 18"	5	IV	RS30	
7	Transportador de Correias C/C 1500	1	TC - 18"	5	IV	RS30	

Fonte: Piacentini & CIA Ltda – Piracicaba – SP e HMBL – Projetos de Equipamentos Industriais Ltda – Limeira – SP

Tabela 8.2 Composição do custo dos equipamentos envolvidos na linha de classificação do agregado siderúrgico.

Denominação	Qt.	Tipo	Valor R\$ 20/03/2010
Funil Direcional	1	BJ - 265	3.890,00
Transportador de Correias C/C 1600	1	TC - 24"	9.450,00
Moinho de Martelos	1	MM - 304D	90.545,00
Transportador de Correias C/C 1800	1	TC - 20"	13.950,00
Peneira Rotativa Classificadora	1	PRC - 315	28.500,00
Transportador de Correias C/C 1800	2	TC - 18"	12.700,00
Transportador de Correias C/C 1500	1	TC - 18"	6.920,00
Pá Carregadeira Caterpillar - 143hp	1	924K	325.000,00
		TOTAL	503.655,00

Fonte: Piacentini & CIA Ltda – Piracicaba – SP e HMBL – Projetos de Equipamentos Industriais Ltda – Limeira - SP

Como podemos observar na tabela 8.2, o equipamento mais caro na composição da linha de classificação do agregado siderúrgico é o moinho de martelos, que também é o equipamento com maior manutenção durante o processo de classificação, pois o resíduo de escória de aciaria é um material de alta ductilidade, ocasionando o desgaste prematuro dos martelos do moinho, componentes com custo elevado que, no processo de produção, deverão ser trocados mensalmente. Em nossa linha experimental de produção, montada no

pátio do LCC-USP, utilizamos uma peneira de arroz figura 8.4, a qual adaptamos para esta finalidade de classificação do agregado siderúrgico, com malha 0,5 mm e 2,4 mm. Recebemos da ArcelorMittal a quantia de 60.000 kg de escória de aciaria, o total do material classificado corresponde a 45%. Como vimos nos capítulos anteriores, não utilizamos o moinho de martelos pela baixa produção de nossa linha experimental.

Figura 8.4: Peneira elétrica 2HP de arroz adaptada para classificação do agregado siderúrgico, locada no LCC- EESC – USP. Fonte – foto do autor.

A necessidade de utilização do moinho de martelos em uma linha com alta produtividade deve-se ao aproveitamento da totalidade do material que chega à usina transformadora. Em uma produção como a sugerida acima, de 50t/h, se não houvesse o moinho de martelos, apenas 45% deste material seria utilizado, cerca de 22,5 t/h. O restante do material, 27,5 t/h, ficaria no pátio sem utilização e representaria um custo elevado de armazenamento e transporte para retorno deste material à usina geradora. Caso contrário, a usina transformadora estaria assumindo o passivo ambiental da usina geradora.

6.1.2 Industrialização do agregado siderúrgico

Após a classificação do agregado siderúrgico na usina transformadora, inicia-se o processo de fabricação do elemento construtivo, em linhas de

produção. Os equipamentos utilizados na linha de produção serão os mesmos utilizados na fabricação de blocos de concreto, com algumas adaptações figura 8.5.

Figura 8.5. Linha típica de produção de blocos de concreto – Fonte – Tprex, equipamentos para construção civil.

Para esta etapa de produção, é preciso uma área de 1.000m^2 de cobertura para abrigar todo processo produtivo. Conforme Figura 8.5, serão necessárias duas linhas de produção. Este dimensionamento não está relacionado somente com a quantidade de peças produzidas, mas também com a segurança da produção – caso haja algum problema em algum equipamento

de uma das linhas, a produção da fábrica não para, o que comprometeria trabalhadores, equipamentos e máquinas ociosas. Esta configuração está dimensionada para produzir 9.216 peças/dia do elemento construtivo, por linha de produção, totalizando 18.432 peças/dia com as duas linhas em funcionamento. Esta etapa requer um investimento em equipamentos da ordem de R\$ 1.579.668,70, Tabela 8.3, além de obras civis.

Tabela 8.3. Equipamentos da linha de produção figura 8.5, composição de custo unitário e total.

Pos. Fig_	Denominação	Qt.	Tipo	R\$ Unitário 22/03/2011	R\$ Total 22/03/2011
1	Dosador de Agregado M. - Dosaprex	1	D51	114.506,61	114.506,61
2	Esteira de Captação Reversora 11m	1	ECR11	28.317,05	28.317,05
3	Esteira de Ligação Dosadora/Misturador 7m	2		24.646,47	49.292,94
4	Silo Controlador de Pesagem de Cimento	2	SPC-2	51.599,97	103.199,94
5	Controlador de aditivo e Umidade	2	CAU 2	3.990,26	7.980,52
6	Sistema integrado de controle	2		52.011,71	104.023,42
7	Misturador Premixer eixo vertical	2	MPL45	75.427,05	150.854,10
8	Esteira de ligação misturador/máquina 7m	2		24.646,47	49.292,94
9	Prensa Adaptada ao elemento Constr.	2	Bl. Concr.	333.292,39	666.584,78
	Alimentador de Pallets - Rack Porta tabuleiro	110	T 720	1.268,18	139.499,80
10	Mesa Fixa	2		3.213,48	6.426,96
	Mesa Tracionada	2	VP-100	17.815,61	35.631,22
11	Pinça	2	PE-15	34.529,21	69.058,42
	Empilhadeira CLARK	1	2,5 t	55.000,00	55.000,00
				TOTAL	1.579.668,70

Fonte – Tprex, equipamentos para construção civil.

Após a produção, as peças serão encaminhadas para câmaras de cura térmica, com ciclo de duração de 4 a 5 horas e regime isotérmico de (60°C – 67°C). Para absorver a produção dimensionada acima, seriam necessárias câmaras de 5,50x25m com capacidade de cura de 18.500 peças/dia. Para que haja sempre câmaras disponíveis para produção, seriam necessárias cinco unidades – estas ocupariam uma área de 625m² dentro da planta da usina. Toda movimentação de insumos e produto acabado, dentro da usina, será feita por máquinas. Esta linha de produção consome oito funcionários, entre operadores de máquinas, controladores de produção e ajudantes.

A edificação da usina transformadora, acima dimensionada, deverá ocupar uma área mínima de 5.150m², conforme o programa de necessidades:

- Galpão para receber a matéria-prima e classificação das granulometrias – 1200m².
- Galpão para receber equipamentos para duas linhas de produção – 1.000m².
- Câmaras de cura térmica para peças produzidas – 625m².
- Pátio de estoque de mercadorias – 1.000m².
- Pátio de manobras – 1.000m².
- Área de manutenção e insumos – 120m².
 - Oficina.
 - Controles elétricos.
 - Motores auxiliares.
 - Estoque de cimento e aditivo.
 - almoxarifado.
- Área de controle de qualidade/ laboratório – 50m².
- Área administrativa, escritórios, comercial – 35m².
- Área de convívio operacional – 118m².
 - Sanitários.
 - Refeitório.
 - Cozinha.
 - Vestiários.

Nossa linha experimental de produção, montada no pátio do LCC-USP, Figuras 8.6 e 8.7, ocupa uma área de 50m², na produção de 16.000 peças para aplicação piloto em protótipo.

Figura 8.6. Linha de produção experimental das peças escória/cimento no LCC – EESS _ USP.

Figura 8.7. “Layout” da linha de produção experimental das peças escória/cimento no LCC – EESS _ USP. Fonte – Projeto do autor

A referida linha de produção tem capacidade para 180 blocos/hora. Em um turno de 8 horas são produzidos 1.440 peças, com quatro funcionários, sendo duas pessoas responsáveis pelo abastecimento do misturador e peneiramento, mais duas pessoas para desforma e acomodação das peças para cura. Durante o processo de produção, houve problema com a umidade da mistura, pois a escória classificada era armazenada ao relento e, durante vários dias, tivemos períodos de chuva, impossibilitando a produção das peças. Em dias úmidos, sem chuva, a produção era de 500 peças/dia, apenas em dias bem secos a produção atingia 1.400 peças/dia.

Figura 8.8: Funcionários responsáveis pela mistura e peneiramento - LCC- EESC – USP. Fonte - Foto do autor

Figura 8.9: Funcionários responsáveis pela desforma e acomodação das peças - LCC- EESC – USP. Fonte - Foto do autor

O processo de cura das peças no laboratório foi feito à sombra. Após 48h da desforma, as peças foram colocadas em pallets, com 280 peças Figura 8.10. As peças foram molhadas duas vezes ao dia, durante sete dias, para auxiliar a hidratação do cimento.

Figura 8.10: Pallets em processo de cura no estacionamento do LCC- EESC – USP. Foto do autor

Durante o processo de produção e cura, algumas peças quebram figura 8.10, estas são cortadas e reaproveitadas, o restante da peça é moído e incorporado novamente à mistura. Na utilização do elemento construtivo há uma relação entre peças inteiras e meias-peças – esta relação é de 50 peças inteiras para uma meia peça. Para a quantidade produzida, além das peças quebradas, cortamos muitas peças ao meio para compor esta relação. A peça do elemento construtivo, composta de escória-cimento, tem as mesmas características de ductilidade da escória: para cortá-lo utilizamos disco diamantado com água para diminuir a temperatura do corte e não gerar pó, mesmo assim o disco de corte era consumido rapidamente.

Figura 8.11: Peças quebradas reaproveitadas no sistema construtivo.

Figura 8.12: Corte das Peças

Figura 8.13: Outras peças produzidas na máquina de corte.

Outras peças são produzidas na máquina de corte, como a peça com caixa elétrica para receber a fiação, peças-canaletas para concretagem de cintas de amarração. Em um processo industrial de alta produção, como foi proposto acima, o equipamento a ser utilizado para executar esta tarefa é a serra de pedra, empregado em marmorarias como pode observar em visita à fábrica de tijolos de solo-cimento da empresa Andrade Gutierrez, localizada em Nova Iguaçu – RJ, Figura 8.14.

Figura 8.14: Serra de pedra utilizada pela Andrade Gutierrez, na fábrica de tijolos de solo-cimento – Nova Iguaçu – RJ.

6.1.3 A logística da produção do elemento construtivo

Neste item, será apresentada toda movimentação de insumos e produto acabado – desde a chegada da matéria-prima (escória de aciaria) na usina transformadora, passando pelo processo produtivo no interior da usina, até o produto final acabado e o escoamento da produção.

Como citamos anteriormente, o ideal para redução de custos com transporte é que a usina transformadora fique próxima à usina geradora do resíduo e próximo do mercado consumidor. Tomaremos como exemplo a unidade geradora de resíduo ArcelorMittal, localizada em Piracicaba –SP. As próprias usinas geradoras já estão estrategicamente localizadas próximas a

grandes mercados consumidores. O pátio de estocagem de resíduo desta usina está localizado a 15 km da aciaria, em uma área rural de um pequeno município (Iracemapolis-SP), onde há uma grande quantidade de áreas para implantação da usina transformadora.

O transporte da escória de aciaria até a usina transformadora poderia ser feito a granel por caminhões basculantes, mas por se tratar de resíduo industrial classe II – B, este material deve ser transportado em “bags” figura 8.15, por exigências ambientais.

Figura 8.15. Transporte da escória até as usinas transformadoras (pátio do LCC-USP).

Já no interior da usina transformadora, este material será armazenado a granel em área coberta. Toda movimentação para classificação da escória e outros insumos a granel será feita por uma pá carregadeira CAT 924k. Outra etapa do processo produtivo, realizada pela empilhadeira CLARK 2,5t, será a movimentação das peças recém-produzidas para as câmaras de cura, posteriormente armazenadas no pátio e carregadas em caminhões.

O dimensionamento das peças colocadas nos pallets levou em consideração a capacidade de carga das empilhadeiras existentes no mercado, como também a capacidade de carga dos caminhões responsáveis pelo escoamento desta produção. Para que o pallet configure o peso ideal, foram colocadas 280 peças, correspondentes a 1.120 kg, figura 8.16.

Figura 8.16. Pallets com 280 peças (1,10 x 1,10 x 0,85m) e 1.120kg.

Esta quantidade de peças por pallets é determinada pela logística de mobilidade do produto acabado. O peso de 1.120kg está dentro da capacidade de 90% das empilhadeiras utilizadas no mercado, também pode ser acomodado em vários tipos de caminhões, Tabela 8.4.

Tabela 8.4 - Relação de pallets / capacidade dos caminhões

Figura	Tipo de Caminhão	Dimensões Plat.		Pallets		Peso Bruto
		Larg	Compr.	Quant.	Peso	Máximo
		mm	Mm	no.	kg	kg
Toco	2.600,00	9.000,00	12	13.440,00	16.000,00
Truck	2.600,00	12.000,00	16	17.920,00	23.000,00
Carreta 2 Eixos	3.000,00	18.150,00	24	26.880,00	33.000,00
Carreta Baú	3.000,00	18.000,00	32	35.840,00	41.500,00
Carreta 3 Eixos	3.200,00	18.150,00	32	35.840,00	41.500,00
Carreta Cavalo Trucado	3.200,00	18.150,00	34	38.080,00	45.000,00
Carreta Cavalo Trucado Baú	3.200,00	18.000,00	34	38.080,00	45.000,00
Bi-trem (treminhão) - 7 Eixos	3.500,00	36.000,00	45	50.400,00	57.000,00

Fonte : CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito.

Para logística da produção utilizada na aplicação piloto em protótipo, o total de peças consumidas no projeto é de 16.000. Utilizamos para esta logística o caminhão carreta de três eixos figura 8.18, com capacidade para 41.500 kg brutos, para levar 8.000 peças em duas viagens de São Carlos a Americana-SP, percorrendo um trecho de 118 km.

Figuras 8.17 e 8.18. Logística do carregamento das peças de São Carlos a Americana – SP.

No local da obra, utilizamos um caminhão “Munck” para descarregar as peças e colocá-las dentro da obra, exatamente no local onde cada tipologia de peça será utilizada, como veremos no próximo capítulo deste trabalho.

Figura 8.19 Logística do descarregamento das peças em Americana – SP.

Se considerarmos nosso exemplo de central de produção na cidade de Piracicaba – SP, e estabelecermos um raio de atuação e escoamento do produto de 250 km, englobaria neste raio milhões de pessoas, em cidades com grande desenvolvimento urbano e movimentação de capital como: São Paulo, Campinas, Ribeirão Preto, Sorocaba, Barueri, Etc, Figura 8.20.

Figura 8.20. Raio de 250 km de atuação da usina localizada em Piracicaba - SP

Nestas condições a usina do elemento construtivo, proposto neste trabalho, estaria atuando na região mais rica do país, com grande mercado consumidor para escoamento do produto.

6.1.4 Análise de viabilidade econômica

Neste item, será desenvolvido um estudo simplificado de viabilidade econômica da produção das peças do elemento construtivo com resíduo de escória de aciaria, focado principalmente no custo dos insumos. De acordo com Jadovsk (2005), os custos típicos de uma usina de reciclagem podem ser divididos em: a) custo de implantação (aquisição de equipamentos, aquisição de máquinas e veículos, instalação de equipamentos, aquisição do terreno e obras civis); b) os custos de operação (mão de obra, veículos e máquinas alugados,

insumos de operação, despesas administrativas e aluguel de terreno); c) os custos de manutenção (troca de peças de desgaste, manutenção preventiva dos equipamentos de britagem, manutenção corretiva, depreciação dos equipamentos, manutenção de obras civis e depreciação das obras civis)

Na tabela 8.5, apresentamos o custo do investimento para implantação da usina transformadora de sistema construtivo produzido com o resíduo de escória de aciaria, objeto deste trabalho.

Tabela 8.5, Custo de implantação da usina de sistema construtivo.

Classificação do Resíduo Denominação	Qt.	Tipo	R\$ 20/03/2010
Funil Direcional	1	BJ - 265	3.890,00
Transportador de Correias C/C 1600	1	TC - 24"	9.450,00
Moinho de Martelos	1	MM - 304D	90.545,00
Transportador de Correias C/C 1800	1	TC - 20"	13.950,00
Peneira Rotativa Classificadora	1	PRC - 315	28.500,00
Transportador de Correias C/C 1800	2	TC - 18"	25.400,00
Transportador de Correias C/C 1500	1	TC - 18"	6.920,00
Pá Carregadeira Caterpillar - 143hp	1	924K	325.000,00
Fonte: Piacentini & CIA Ltda e HMBL		Total	503.655,00

Linhas de produção Denominação	Qt.	Tipo	R\$ 22/03/2011
Dosador de Agregado M. - Dosaprex	1	D51	114.506,61
Esteira de Captação Reversora 11m	1	ECR11	28.317,05
Esteira de Ligação Dosadora/Misturador 7m	2		49.292,94
Silo Controlador de Pesagem de Cimento	2	SPC-2	103.199,94
Controlador de aditivo e Umidade	2	CAU 2	7.980,52
Sistema integrado de controle	2		104.023,42
Misturador Premixer eixo vertical	2	MPL45	150.854,10
Esteira de ligação misturador/máquina 7m	2		49.292,94
Prensa Adaptada ao elemento Constr.	2	Bl. Concr.	666.584,78
Alimentador de Pallets - Rack Porta tabuleiro	110	T 720	139.499,80
Mesa Fixa	2		6.426,96
Mesa Tracionada	2	VP-100	35.631,22
Pinça	2	PE-15	69.058,42
Empilhadeira CLARK	1	2,5 t	55.000,00
Fonte - Tprex equip. para constr. civil		Total	1.579.668,70

Obras Civas Denominação	Área m2	R\$ 2011
Classificação do Agregado Siderúrgico	1200	970.872,00
Linha de produção	1000	809.060,00
Câmaras de cura	625	505.662,50
Administração, Manutenção, insumos	323	261.326,38
Refeitório, sanitários, Vestiários, etc..		
Fonte - Pini - custo R\$809,06m2 ano 2011	Total	2.546.920,88

Valor Total do Custo de Implantação	4.630.244,58
Não esta inclusa a aquisição do terreno	-

Para a implantação da usina transformadora será necessário um investimento de aproximadamente R\$ 4.630.244,00 (quatro milhões, seiscentos e trinta mil, duzentos e quarenta e quatro reais), este recurso pode ser obtido através de investimentos da própria usina geradora do resíduo (escória de aciaria). Segundo Buttler (2006) e John e Ângulo (2002), os prováveis benefícios para uma empresa geradora de resíduos, que invista em tecnologia e equipamentos de reciclagem, são: a) redução do impacto ambiental global; b) diminuição do custo para gerenciamento dos resíduos; c) adequação às normas ISSO 14000; d) melhoria da imagem perante o mercado consumidor; e) mudança na cultura da empresa: o “lixo” transforma-se em um novo produto. Em contrapartida, esta empresa espera que as seguintes metas sejam alcançadas para o sucesso do empreendimento: a) estabilidade no fornecimento do resíduo por período suficientemente longo para amortizar o investimento; b) taxa atrativa do retorno do investimento; c) aumento do faturamento; d) produto reciclado de qualidade similar aos que são produzidos normalmente; e) custo final dos elementos com agregados reciclados inferiores aos elementos comumente fabricados; f) aceitação pelo mercado consumidor (viabilidade de mercado).

Com relação aos custos operacionais, iremos focar mais o custo dos insumos. Utilizaremos, como comparativo, os valores dos insumos na composição de preço do bloco de concreto convencional, e por questões dimensionais utilizaremos também o comparativo com tijolos de solo-cimento Tabela 8.6.

Tabela 8.6. Comparativo de custos dos insumos, bloco de concreto, solo-cimento e escória-cimento.

Comparativos de custos dos insumos				
Ano base 2014		Bloco de concreto	Solo-cimento	Escória-cimento
Unidades	Dimensões	19 x 39 x 19	15 x 30 x 7,5	12,5 x 25 x 8
	Peso	16,5-16,97-17,97kg	5 kg	4 kg
	Valor	R\$	R\$	R\$
Insumos (Com Frete)	Cimento	645,05t	645,05t	645,05t
	Solo		80,00/m ³	
	Escória			-
	Areia	77,00/m ³		
	Pedrisco	78,00/m ³		
	Pó de Pedra	78,00/m ³		
	Aditivo	6,59/l	6,59/l	6,59/l
	Água	17,01/m ³	17,01/m ³	17,01/m ³
Custo Comerc. das Unidades	4,5 MPa	3,13/un	1,00/un	1,00/un
	8,0 Mpa	3,77/un		
	12,0MPa	5,11/un		
R\$ Insumos p/ prod. da unidade				
Δ_{custo} (4,5 Mpa)	R\$ insumo	1,35/un	0,45/un	0,22/un
Δ_{custo} (8,0 Mpa)	R\$ insumo	1,84/un		
Δ_{custo} (12,0 Mpa)	R\$ insumo	2,31/un		
	R\$	Insumo por m ²		
R\$ Insumo m ²		R\$ 16,20	R\$ 18,45	R\$ 11,00

Fontes – Tatu pré-moldado e Jaboti solo-cimento.

Como pode-se observar na tabela 8.6, o custo dos insumos na produção de bloco de concreto e da produção de tijolos de solo-cimento corresponde a R\$ 1.35 e R\$ 0,45, na composição final do custo de venda, enquanto a peça de escória-cimento corresponde a apenas R\$ 0,22. A peça de escória-cimento se comercializada com mesmo preço ao da peça de solo-cimento, uma vez que o consumo de unidades por metro quadrado de ambas, são bem próximo, o elemento construtivo escoria-cimento geraria mais lucro no preço final de venda.

Para compor o preço final de venda do elemento construtivo escória-cimento, tem que levar em consideração os seguintes aspectos:

- **Cálculo da produtividade**

Quantas máquinas ou linhas de produção estão envolvidas na confecção do produto.

Quantas horas são necessárias por máquina para confecção do produto.

Quantos ciclos de produção por mês.

Quantas unidades são produzidas por ciclo.

Tempos em horas gastas na produção.

Porcentagem de horas disponíveis gastas.

Quantidades de lotes que precisa produzir.

- **Cálculo dos custos totais**

Custos fixos totais

Custos com matéria-prima

Média de investimento mensal

Custos totais

Custos totais por hora de produção

- **Calculo dos custos Totais**

Custos Fixos Totais

Custo com matéria-prima

Média de investimento mensal

Custos Totais

Custos Totais por hora de produção

- **Formação de preço**

Mark-up sobre o custo%

Preço de venda unitário

Comissão de venda

Comissão do cartão

Impostos mais comissão %

- **Dimensionamento da produção**

Lucro ou prejuízo bruto do produto

Margem Bruta

Lucro ou prejuízo bruto do líquido

Margem Líquida

Ponto de equilíbrio

Não nos foi informado qual a margem de lucro nos componentes, das empresas consultadas para formular a tabela 8.6 – estima-se que está entre 25 a 30%. Tomando como base nosso exemplo de implantação de usina de elementos construtivos escória-cimento, apresentado anteriormente, temos duas linhas de produção capazes de produzir 18.432 peças/dias, o que daria, em 22 dias trabalhados, uma produção mensal de 405.504 peças mês. Se considerarmos um lucro líquido de 35%, que seria uma estimativa pessimista, o lucro líquido por peça do elemento construtivo escória-cimento seria de R\$ 0,35 (trinta e cinco centavos) e com a quantidade de peças produzidas mensalmente teríamos um lucro mensal de R\$ 141.926,40 (cento e quarenta e um mil, novecentos e vinte e seis reais). Como vimos na tabela 8.5, o custo de implantação da usina, embora os preços estejam defasados há três anos, será de R\$ 4.630.244,58 (quatro milhões, seiscentos e trinta mil, duzentos e quarenta e quatro reais); com nosso faturamento mensal, levará 32,6 meses para pagar o investimento inicial de implantação da usina, o que corresponde a dois anos e sete meses. Para um investimento deste porte o retorno do investimento é muito rápido.

Em nossa produção experimental de peças escória-cimento para aplicação piloto, realizada no laboratório LCC-USP, tivemos um ônus de R\$ 15.925,20 (quinze mil, novecentos e vinte e cinco reais) – levando em conta a necessidade de adaptar equipamentos, insumos e funcionários. Ao considerar somente os custos de produção, foi consumido em insumos e mão de obra o valor de R\$ 8.491,60 (oito mil, quatrocentos e noventa e um reais) para produção de 16.000 peças Tabela 8.7.

Tabela 8.7, Custo do investimento para produção experimental no LCC-USP.

Montagem da linha experimental de produção	
Adaptação de equipamentos	4.751,98
Motor 2kv para destorroador	350,00
Malha 2,4mm para peneira	150,00
Redutor e motor para esteira	800,00
Cabeamento, fiação e disjuntores	200,00
pallet 18pç	540,00
Bandeja saque tijolo 500pç	571,62
Extras	70,00
TOTAL	7.433,60

Fonte – Elaborado pelo autor.

Tabela 8.8, Custo do investimento para produção experimental no LCC-USP.

Fabricação das 16mil peças traço (1:9:2)	
Cimento Ari = 82 sacos a R\$14,00	1.148,00
Aditivo 400 a R\$ 4,00	1.600,00
Mão de Obra 3 func. Registrado piso R\$ 670,00	
mais passe R\$ 50,00 sexta basica R\$ 80,00	
Encargos sociais R\$ 540,00 e mais ICMS 18%	4.743,60
Despesas de viagem e acompanhamento	1.000,00
TOTAL	8.491,60

Fonte – Autor, dados de 2010.

Na produção experimental, notamos que o maior custo refere-se à mão de obra, isto ocorreu pela baixa produtividade dos equipamentos e problemas enfrentados com armazenamento de matéria-prima ao relento, como já relatamos anteriormente. Nestas condições experimentais, o custo da peça ficou em R\$ 0,53 (cinquenta e três centavos), não levando em consideração despesa diretas e indiretas, como energia elétrica, água, entre outras. Diante destas constatações, o experimento desta pesquisa na produção de alvenaria estrutural torna-se perfeitamente viável economicamente e competitivo no mercado.

SITEMA CONSTRUTIVO ESCÓRIA-CIMENTO

7.1 SISTEMAS CONSTRUTIVOS

O sistema construtivo de alvenaria estrutural com componentes de escória-cimento propõe um novo material de construção, pré-fabricado e de pequeno porte, que compõe um sistema aberto, possibilitando diversas variações em sua composição.

O sistema construtivo pode ser definido como um grupo de componentes ou partes inter-relacionadas e interdependentes que formam a unidade complexa do todo e regem seu funcionamento. Os sistemas fechados são convenientemente associados ao objeto moderno, deterministas e previsíveis em sua essência, e pouco favoráveis a uma adequação com o meio ambiente e com os fatores exógenos que os influenciam, sem aptidão para conduzir processos de crescimento e mudança. Os sistemas abertos, por sua vez, apresentam uma forte interação com o meio, adaptando-se e reorganizando-se a partir de forças externas e eventos, reconstruindo a estabilidade do todo a partir de alteração dos componentes ou partes que estão inter-relacionadas. Os sistemas arquitetônicos abertos são plenamente influenciados por fatores ambientais, tecnológicos, simbólicos e socioeconômicos (MONTANER, 2008,P.11).

As vantagens do ciclo aberto, é que este permite uma grande variedade de combinações, satisfazendo uma larga escala de necessidades funcionais e estética. Segundo CROSBY⁵(1965, Apud BRUNA, 2002), as características básicas do sistema aberto, que permite a obtenção de um sistema flexível adequado à complexidade da vida social urbana contemporânea, podem ser definidas por peças que sejam:

⁵CROSBY, Theo. **Architecture city sense**. London: Studio Vista, 1965.

“Substituíveis por outras de diferentes origens; intercambiáveis, isto é, possam assumir diferentes posições dentro de uma mesma obra; combináveis entre si, formando conjunto maior (aditividade dos termos), e que por sua vez sejam permutáveis por uma peça maior ou por um número de peças menores” (CROSBY, 1965, Apud BRUNA, 2002, P.63).

Segundo MAHFUZ (1995, p. 38), o todo arquitetônico apresenta uma organização hierárquica, composta por partes organizadas conforme algum princípio estrutural, obrigatoriamente relacionado ao contexto social em que se insere. Diante desta estruturação espacial, o objeto arquitetônico, constituído a partir de sistemas construtivos abertos, apresenta componentes construtivos com funções próprias/ específicas, aptos a responder conforme eventos exógenos, com articulações estabelecidas em busca de um equilíbrio físico, sem imposições. Nessa perspectiva, a imposição de uma condição uni funcional e definitiva conduz a crise do objeto, comprometendo a liberdade do uso e a possibilidade de atualização de sua função.

7.2. A PRÉ – FABRICAÇÃO

O sistema construtivo escória-cimento consiste em peças de pequeno porte, pré-fabricadas, que compõe o método construtivo “*Kit-of-parts*” – refere-se a um *kit* de peças de um sistema construtivo projetado conforme normas prévias, associado à industrialização e à pré-fabricação de componentes construtivos.

FRIEDMAN (2001, p. 112) reconhece três métodos construtivos principais pertinentes à pré-fabricação:

- Modular – refere-se à construção de seções na fábrica (módulos inteiros de uma habitação ou partes dessa). Os módulos tridimensionais normalmente são enviados em duas ou mais seções para o posicionamento na base do local de construção através de guindastes ou guias. Podem ser agrupados horizontalmente ou empilhados para constituir uma habitação completa.

- Estrutura de painéis – painéis pré-fabricados de diferentes dimensões, verticais e horizontais, nas versões *abertas* (apenas a estrutura exterior, sem os isolamentos, tubulações e revestimentos que são adicionados no local de construção) e *fechadas* (painéis completos de vedação e isolamento, que podem conter portas, janelas, serviços internos e acabamentos).
- *Kit-of-parts* – *kit* de peças, com inúmeros componentes distintos que são encaminhados ao local e montados.

A popularização dos Kits deve-se ao desenvolvimento tecnológico, com uma alta diversidade de formas, aplicações e materiais, desde fundações, estruturas, lajes, coberturas, vedações e componentes como escadas, esquadrias de portas e janelas.

Segundo RICHARD (2007, apud AZUMA, 2008, p. 52), nesse sistema construtivo, todos os subsistemas, incluindo a estrutura, são produzidos industrialmente e transportados ao canteiro de obras em partes separadas, o que significa uma imensa operação de montagem no local da obra. Os sistemas desta categoria são distintos pela geometria da estrutura que determina o processo de montagem no canteiro. Devido à existência de juntas secas, todos esses sistemas podem ser realocados e desmontados, de modo a contribuir tanto para a flexibilidade da construção, como para a sustentabilidade ambiental.

No sentido mais amplo da palavra, “*o termo pré-fabricação abrange todo o processamento de materiais que não ocorre no local efetivo do edifício; é a tendência em direção à produção manufaturada de edifícios e produtos da construção*” (MADGE, 1946, p.114). O método industrial transfere as atividades do canteiro para a usina, através da produção em massa de componentes e elementos para montagem e instalação, posteriormente, no local da obra, mediante dispositivos de elevação. Esse sistema representa uma antítese em relação ao trabalho artesanal, tradicional, que exige uma mão de obra qualificada, a cada etapa do processo construtivo, para priorizar a confecção de elementos provenientes da mecanização industrial e a posterior operacionalização e montagem já no canteiro. A liberdade proveniente da combinação de elementos e materiais à vértebra da edificação pode ser

denominada como construção aberta, com a tendência à adição, subtração e substituição de componentes – estratégias que favorecem a flexibilidade arquitetônica.

O conceito de pré-fabricação, construído por BREGATTO (2005, p. 211), desmembra-se em: *Pré-fabricação total*: produção de unidades construtivas totalmente pré-fabricadas em usinas e montadas *in loco*; e *Pré-fabricação elementar integrada*: sistema de construção pelo qual elementos construtivos padronizados, no tipo e dimensões, são produzidos pelas usinas para serem montados nos canteiros com equipamentos adequados, com ênfase na modulação como elemento metodológico básico (proposto no sistema escória-cimento).

As vantagens da pré-fabricação incluem agilidade construtiva, redução de custos e mão de obra, aumento da produtividade, economia de materiais, redução de resíduos, facilidade de transporte e montagem, adaptabilidade posterior favorável (atualização estética ou funcional, manutenção, reaproveitamento) e benefícios ambientais.

Para muitos arquitetos contemporâneos a pré-fabricação representa, hoje, a probabilidade de criação de soluções inovadoras, consentindo, inclusive, a articulação aos métodos construtivos tradicionais. A busca pela individualização, imersa no processo de pré-fabricação, pode ser obtida com a elaboração pormenorizada dos subsistemas construtivos (estruturais, vedação e instalações) e componentes, com a possibilidade da participação do usuário para adaptar e transformar o objeto conforme suas necessidades. A contraposição aos processos tradicionais resulta em benefícios, como organização, agilidade e qualidade.

7.3. O SISTEMA CONSTRUTIVO ESCÓRIA-CIMENTO

A proposta deste novo material é criar um sistema construtivo aberto, para execução de edificações pré-fabricadas, sistema elementar integrado, formado por um “*Kit*” de componentes que irá compor a etapa da alvenaria estrutural, de forma mais eficiente que a usual. Atualmente, a alvenaria estrutural

é um dos sistemas construtivos mais utilizados no Brasil, incorpora flexibilidade, economia e velocidade na execução. A racionalização dos sistemas construtivos contribui para melhorar a qualificação da mão de obra, o planejamento e a execução das obras, transformando os canteiros em verdadeiras linhas de montagem, aumentando a produtividade, reduzindo custos e melhorando a qualidade.

O elemento construtivo, proposto neste trabalho, tem sua origem formal nos tijolos de solo-cimento, mas então qual seria seu diferencial? O diferencial está na “Performance” do material, a qualidade obtida nas peças da mistura escória-cimento, em relação ao desempenho estrutural, acabamento, absorção de água, entre outros, é superior ao do solo-cimento. Na figura 9.1, temos as peças que compõem o elemento construtivo (peça inteira, meia-peça, peça com caixa 2x4 para interruptores e tomadas e peça pigmentada na cor terra-cota).

Figura 9.1. Peças que compõem o sistema construtivo.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa houve descarte de escória de aciaria com granulometria superior a 2,4 mm. Este material deu origem ao desenvolvimento de outra pesquisa no Laboratório LCC – USP, “Utilização de escória proveniente da reciclagem de aço em concreto de cimento Portland”, desenvolvida pela pesquisadora Kamila Ângela Leal do Nascimento, que demonstrou a potencialidade da incorporação de escória de aciaria em substituição total dos agregados naturais (areia e brita) em concretos. Este concreto com escória de aciaria seria utilizado para confeccionar as peças complementares que compõem o “Kit” do sistema construtivo, proposto neste trabalho, como as vergas de portas e janelas, contravergas de janelas e vigas,

todas pré-fabricadas, moldadas em formas metálicas com dimensões variadas, de acordo com as necessidades do projeto, Figura 9.2.

Figura 9.2. Projeto de peças e componentes complementares irá compor o sistema construtivo.

Fonte – Projeto do autor

As peças protótipos não foram confeccionadas devido aos custos das formas metálicas e ausência de verba para o desenvolvimento deste complemento do sistema construtivo. Outro elemento que faria parte do “*Kit*” do sistema construtivo seriam as lajes alveolares produzidas com concreto de escória de aciaria figura 9.3.

Figura 9.3. Projeto de peças de laje alveolar produzidas com concreto de escória de aciaria, que complementaria o sistema construtivo – Fonte – Projeto autor.

A industrialização de peças de pequeno porte do sistema construtivo escória-cimento produz um sistema aberto, devido ao não condicionamento prévio do espaço projetado do tipo standardizado, produzido em série.

Esta proposta pode parecer complexa de se realizar, pois demanda a elaboração do sistema quase como um “meta-sistema de construção”, que permite a possibilidade de conciliar as necessidades da produção industrial em massa com os requisitos de preservação da capacidade criativa e inovadora por parte de quem utiliza o sistema construtivo, podendo, inclusive, e esta é a ideia principal, que a tarefa de projetar e construir os espaços sejam acessíveis a todos os indivíduos da sociedade e não somente àqueles que detenham um conhecimento tecnológico.

Como visto no item 9.2, a modulação é o elemento metodológico básico para utilizar a “*Pré-fabricação elementar integrada*”, que compõe o sistema construtivo escória-cimento. A modulação proposta para utilização do sistema estabelece que as medidas de projeto tenham como módulo horizontal 0,125m, e módulo vertical de 0,08m submetendo a possibilidade de geração de dimensões múltiplas e submúltiplos do módulo, adotado como base. figura 9.4.

Figura 9.4. Modulação proposta para utilização do sistema construtivo escória-cimento. Fonte – Projeto do autor.

Com este módulo de pequena proporção, é possível obter uma infinidade de medidas, criando um sistema dimensional que permita a aditividade e a integração geométrico-espacial dos diferentes elementos e componentes produzidos por outras usinas ou unidades produtivas, como portas, janelas e outros elementos existentes no mercado figura 9.5.

responsabilidade pelos problemas do setor. Em pesquisa recente da EY (Ernst & Young) com empresas de capital aberto da construção, a qualificação de mão de obra foi citada por 78% como uma das lacunas da produtividade nos últimos dois anos, figura 9.6.

Editoria de arte/Folhapress

PROJETOS EM SINTONIA

Sondagem feita com as maiores empresas de capital aberto do setor

Principais lacunas apontadas no impacto da produtividade*, em % das respostas

Ações das empresas para alavancar a produtividade**, em % das respostas

*Nos últimos dois anos **Nos próximos dois anos Fonte: EY

Figura 9.6. Resultado da pesquisa da EY.

Fonte – Jornal Folha de São Paulo, 10 de setembro 2014

O baixo nível técnico e educacional do brasileiro é uma queixa generalizada dos empresários de todos os setores, mas está longe de ser o principal problema. A chave para entender o problema são os itens que figuram no topo da lista da mesma pesquisa da EY: melhoria de projetos, de gestão e de métodos.

Segundo Ana Estela, pesquisadora do IBRE-FGV, "*A questão não é qualificar o trabalhador para o que é feito hoje, e sim passar para um processo industrializado, com menor dependência desse artesanato, onde cada serviço tem uma característica diferente. Quando você tem o trabalhador em um ambiente industrial, aí sim você pode qualificar pra valer*".

O sistema construtivo, proposto neste trabalho, é uma tentativa de atender estas necessidades de projeto, gestão e métodos da indústria da construção civil. A racionalidade do sistema construtivo proposto possibilita sua

utilização, absorvendo mão de obra não qualificada em autoconstrução, programas sociais, construções emergenciais, reurbanização de favelas, entre outros. Mas esta racionalidade proposta no sistema construtivo possibilita a industrialização automatizada na montagem das peças e componentes, transformando esta etapa em uma linha de montagem.

A automação trouxe um grande avanço para a indústria. Os benefícios teóricos de utilizar robôs em uma indústria são numerosos e vão desde o aumento da produtividade, a melhoria e a consistência na qualidade final do produto (a qual também minimiza a necessidade de operações adicionais), passando pela menor demanda de contratação de mão de obra especializada, que é difícil de encontrar, a confiabilidade no processo, a facilidade na programação e uso dos robôs, a operação em ambientes difíceis e perigosos ou em tarefas desagradáveis e repetitivas para o ser humano e, finalmente, a capacidade de trabalho sem descanso por longos períodos.

Desde que a empresa Unimation instalou o primeiro robô industrial, em 1961, na atualidade, mais de 700.000 robôs são empregados nas indústrias em todo o mundo. Os robôs, de acordo com a Associação de Indústrias de Robôs dos Estados Unidos (Robot Industries Association - RIA), são "*manipuladores reprogramáveis e multifuncionais, projetados para manipular materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados, através de movimentos variáveis programados para a realização de tarefas diversas*" (COUTO 2000). Com respeito a sua estrutura, um robô é um sistema mecânico, de geometria variada, formada por corpos rígidos, articulados entre si, destinados a sustentar e posicionar/orientar o órgão terminal, que dotado de garra mecânica ou ferramenta especializada, fica em contato direto com o processo. A mobilidade do manipulador é o resultado de uma série de movimentos elementares, independentes entre si, denominados graus de liberdade do robô.

Na indústria da construção civil os robôs atuam diretamente nas indústrias cerâmicas de componentes, subsistemas, etc., figura 9.7, mas são pouco utilizados diretamente nas etapas da construção do edifício. A proposta do sistema construtivo escória-cimento, composto por um número reduzido de

peças e componentes, possibilita a utilização desta tecnologia diretamente na etapa de execução da alvenaria estrutural.

Figura 9.7. Robô utilizado na indústria de louças, (montagem dos pallets).

Fonte- tekmeka.blogspot.com.br/2014/04/Robótica.

Entretanto, na prática, a aplicação de robôs na indústria requer uma solução confiável e robusta, que desempenhe de forma consistente as funções predeterminadas. Ou seja, ao existir um problema a resolver, este deveria ser resolvido com um êxito próximo a 100%, em 100% do tempo, de tal forma que se tenha a confiança que o sistema robotizado realiza o trabalho para o qual foi designado. Qualquer porcentagem de êxito menor que esta frequentemente não é aceita.

As indústrias que pretendem robotizar todos os seus processos, normalmente possuem problemas complexos para resolver, o que implica na necessidade de robôs caros e de alta precisão, que muitas vezes não trabalham como requerido. Na prática, o êxito no uso de robôs é alcançado com a robotização apenas de determinados processos, não de sua totalidade – 100% de soluções para 90% dos problemas normalmente é muito melhor que 90% de solução para 100% dos problemas.

Em algumas aplicações os processos alcançam 100% de robotização, tal como na manipulação de materiais diversos, soldagem por resistência por

pontos e pintura na indústria automobilística. E esse sucesso não é porque sejam processos simples; pelo contrário, são processos complexos, mas é um bom exemplo da relação custo-benefício, além de substituir a mão de obra humana em um trabalho repetitivo, difícil e, em muitas vezes, de alto risco.

Partindo do princípio que um robô é um dispositivo, ou grupo de dispositivos, eletromecânicos ou biomecânicos, capazes de realizar trabalhos de maneira autônoma, pré-programada, ou através de controle humano, teríamos que adaptar este equipamento ao sistema construtivo escória-cimento da seguinte forma:

A - A princípio, o robô seria alimentado com o projeto a ser executado e as dimensões físicas de todo elemento de vedação.

B - Em seguida, seriam inseridos os dados com as quantidades e variedades de peças e componentes que serão utilizados nesta função.

C - Para que o robô realize seu trabalho com 100% de sucesso, a totalidade das peças e componentes deve ser posicionada em local pré-determinado, para que o robô alcance a localização no espaço circundante. Este espaço físico de atuação do membro robótico chama-se “volume de trabalho”, Figura 9.8.

Figura 9.8. Volume de Trabalho de vários membros robóticos.
Fonte (Figuras 2.11, 2.15, 2.14 de COUTO 2000)

Os robôs são projetados para atuar sobre seu ambiente, mas para isto devem ser dotados, em seu órgão terminal, de garras ou mãos mecânicas figura 9.9:

- Com sujeição por pressão
- Com sujeição magnética
- Com sujeição a vácuo
- Com sujeição de peças a temperaturas elevadas
- Resistentes a produtos corrosivos/perigosos
- Dotadas de sensores, etc.

Ferramentas especializadas:

- Pistolas pulverizadoras (pintura, metalização)
- Soldagem por resistência por pontos
- Soldagem por arco
- Furadeiras
- Polidoras, etc.

Figura 9.9 - Possibilidade de ferramentas e garras para robôs.
Fonte (Figuras COUTO 2000)

Para utilização do sistema construtivo, o terminal do robô deverá contar com dois dispositivos, um com sujeição por pressão para as peças inteiras e meia-peça, e outro com garras para os componentes de vergas, contravergas e vigas.

Porém, o robô utilizado para montagem das peças e componentes construtivos não poderá ser fixo, mas ter uma plataforma móvel que amplie seu volume de trabalho. A empresa norte-americana Raytheon Sarcos, criadora do exoesqueleto XOS 2, desenvolveu uma plataforma robótica, figura 9.10 , com par de braços mecânicos, que poderá ser bastante útil em todo tipo de construções ou transporte de carga. A plataforma robótica pode ser utilizada com um operador a bordo ou controlada remotamente a quilômetros de distância. Este equipamento pode ser utilizado na montagem do sistema construtivo, proposto neste trabalho, com adaptações e programas específicos; a plataforma robótica pode atuar na montagem da etapa de alvenaria estrutural sem o auxílio de operador.

Figura 9.10. Plataforma robótica desenvolvida pela Raytheon Sarcos

Fonte – KSL News 5 em <http://www.tecnologiasdeultimogrito.com/robo-prototipo-emita-humanos/#.VA4BMqNNaz4>

7.4.1 Adaptação da automação do sistema construtivo.

A seguir, faremos uma simulação de como deveria ser o processo de adaptação da automação do sistema construtivo na etapa da alvenaria estrutural, que deve ocorrer da seguinte forma:

Após a execução da fundação, rede de esgoto, componentes elétricos, e contrapiso nivelado, a base está pronta para receber o sistema de automação da alvenaria estrutural. Nas extremidades da base deverão ser colocadas as guias para que a plataforma robótica utilize seus sensores para o “reset”, fazer a leitura espacial e processá-la junto ao projeto de alvenaria armazenado em seu software, e dar início às operações figura 9.11.

Figura 9.11 - Identificação da plataforma robótica ao projeto da edificação e as tarefas que serão realizadas. Fonte – Projeto do autor

O aparecimento da nova geração de robôs permitiu interconectar sensores exteroceptivos com o controlador do robô, podendo utilizar tais sensores para obter propriedades relevantes do ambiente, e controlar o sistema na realização da tarefa. O emprego de sensores externos possibilita um controle em malha fechada que permite a realização de aplicações complexas, tais como agarrar objetos aleatoriamente posicionados e orientados, seguir objetos em

movimento em um ambiente 3D, realizar a montagem de dispositivos mecânicos, realizar a inspeção/controle de qualidade de peças, efetuar a busca e identificação de objetos, além de ter um controle preciso do manipulador. (COUTO 2000).

Para que a plataforma robótica execute a montagem das peças, os componentes do sistema construtivo devem ser posicionados na planta, de forma predeterminada pela programação existente no software da máquina que determina o volume de trabalho, de maneira que encontre todas as peças e componentes nos lugares onde serão utilizados, figura 9.12.

Figura 9.12 - Peças e componentes posicionados em local predeterminado, para que o robô alcance a localização no espaço circundante. Fonte – Projeto do autor

Durante a etapa de automação da alvenaria estrutural, o início e o final da etapa de serviço devem ser predefinidos, assim como todo trajeto a ser percorrido pela plataforma robótica, para que no final de etapa o robô esteja posicionado fora da planta executada, figura 9.13.

Figura 9.13 - Sequência de execução e caminho percorrido pela plataforma robótica. Fonte – Projeto do autor

Figura 9.14 - Demarcação de início e final do campo de trabalho. Fonte – Projeto do autor

Em obras em que há verticalização na utilização do sistema construtivo, as peças e componentes deverão seguir o posicionamento do pavimento inicial, e a plataforma robótica deverá ser programada para que seu trajeto a ser percorrido seja de forma horizontal, na execução de cada pavimento, e vertical, ao passar para o pavimento superior – subir ao próximo pavimento após 99% da montagem do piso executado. Ao término do serviço, a plataforma robótica se encontrara na cobertura do edifício, quando deverá ser içada por guias ou guindastes para ser removida da obra.

A industrialização da construção civil será o futuro do setor, para atender a demanda e as necessidades do crescimento populacional, e como em todo processo industrializado, a automação fará parte de algumas etapas do processo. E abre-se um enorme campo de pesquisa neste segmento.

APLICAÇÃO PILOTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

Neste capítulo, será apresentada a aplicação piloto do componente de alvenaria estrutural como alternativa de sistema construtivo. A proposta deste novo material é criar uma melhoria de projetos, de gestão e de métodos, para execução de alvenaria estrutural de forma mais eficiente que a usual. Atualmente a alvenaria estrutural é um dos sistemas construtivos mais utilizados no Brasil, que incorpora flexibilidade, economia e velocidade. A racionalização dos sistemas construtivos contribui para melhorar a qualificação da mão de obra, o planejamento e a execução das obras, transformando os canteiros em verdadeiras linhas de montagem, aumentando a produtividade, reduzindo custos e melhorando a qualidade.

As peças do componente construtivo proposto neste trabalho tem sua origem formal nos tijolos de solo-cimento, mas com um diferencial. Mas então qual seria seu diferencial? O diferencial está na “Performance” do material, a qualidade obtida nas peças da mistura escória-cimento proporciona um desempenho estrutural, de acabamento, de absorção de água, entre outros, superior ao de solo-cimento. Como também, o elemento construtivo proposto fará parte de um conjunto de peças que irá compor o sistema construtivo.

A aplicação experimental piloto do sistema construtivo escória-cimento utilizou apenas as peças inteiras e meias-peças – os componentes de vergas, contravergas e vigas não foram utilizados. Verificamos a interface das peças com outros elementos construtivos existentes no mercado, utilizando mão de obra fornecida por empresa do setor da construção civil (Construtora Di Capri Ltda.).

8.1. LOCAL DO DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO PILOTO.

O desenvolvimento da aplicação piloto está localizado na cidade de Americana – SP. Estrategicamente desenvolvida no cruzamento de duas grandes rodovias estaduais, Anhanguera (SP 330) e Bandeirantes (SP 348), chama a atenção por sua forte economia, que representa 14,6% do PIB paulista. Seu dinamismo econômico, acompanhado da integração, está causando uma tendência à relativa conurbação entre os municípios de Campinas (incluindo Valinhos, Vinhedo, Paulínia, Sumaré, Hortolândia, Nova Odessa, Monte Mor e Indaiatuba), com derivação para Americana e Santa Barbara d'Oeste, e extensão até o triângulo agroindustrial – constituído por Limeira, Rio Claro e Piracicaba –, envolvendo uma população de aproximadamente 3,5 milhões de pessoas, com uma taxa média de crescimento de 1,80% entre 2000 a 2008. Figura 10.1.

Figura 10.1: Localização da área de implantação do protótipo da casa modelo.

Fonte-Relatório Síntese Plano das bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba Capivari e Jundiá 2010 a 2020

A sede administrativa do consórcio PCJ está em uma área que pertence à Usina Carioba. Como podemos observar na figura 10.3, a vizinhança da área de implantação da aplicação piloto já sofreu bastante interferência de atividades urbanas e está ambientalmente comprometida por indústrias de grande porte que consomem parte do manancial hídrico local e grande parte da energia elétrica disponível na região. Existe no local um aterro sanitário de resíduos de construção civil (RCC), o que valoriza ainda mais nossa iniciativa de implantação deste projeto neste local, demonstrando que existe a possibilidade de desenvolver atividades de construção civil sem gerar resíduos e com baixo impacto ambiental.

Figura 10.3: Caracterização da área onde foi implantado o experimento piloto, centro de educação ambiental. - Fonte - Google eart 9/7/2012

Na área de 30mil m² da Usina Carioba, verificamos um local com topografia suave (cerca de 12% de declividade), para não ter movimentação brusca de terra e para manter o perfil do terreno o mais original possível. Também observamos a vegetação existente, para que não haja sacrifícios de árvores e possibilitando que elas nos ajudem a manter a temperatura de nossa edificação mais agradável, figuras 10.4 e 10.5.

Figuras 10.4 e 10.5 - Terreno onde foi implantado o experimento piloto – Fonte: Foto do autor

8.2. O PROJETO DA APLICAÇÃO PILOTO DA CASA MODELO.

Para utilizar o sistema construtivo proposto, é necessário um projeto de qualidade que respeite as coordenadas modulares estabelecidas pelas peças e componentes construtivos utilizados. Este conceito subentende a possibilidade de geração de dimensões múltiplas e submúltiplas de um módulo adotado como base (0,125 m). Este módulo de pequena proporção possibilita obter uma infinidade de medidas, criando um sistema dimensional que promove a integração geométrica espacial dos diferentes elementos e componentes produzidos por diferentes usinas ou unidades produtivas, com as peças e componentes propostos no sistema construtivo, objeto deste trabalho.

O projeto piloto foi desenvolvido para atender as necessidades do Consórcio PCJ de um Centro de Educação Ambiental (Casa Modelo) para conscientização do uso racional de água e energia. O projeto deverá conter os ambientes de uma casa modelo, com todos os equipamentos, eletrodomésticos aparelhos sanitários, para atender uma família de quatro pessoas, que possa ser utilizado de forma didática na demonstração do consumo dos recursos naturais e energéticos. Deverá também conter uma pequena sala didática, para promover palestras e cursos aos visitantes, e uma área de exposição. O objetivo do consórcio PCJ com este projeto é promover a conscientização do consumo de água e energia elétrica.

Programa de necessidades:

- Construção com aproximadamente 250 m²
- Hall de exposição (pequeno)
- Sala de estar - modelo
- Cozinha - modelo
- Banheiro – modelo
- Dormitório – modelo
- Escritório reversível – modelo
- Banheiro Masculino e Feminino - Funcional
- Sala para cursos e palestras – aproximadamente 35 lugares

Plano de massa com fluxograma das atividades no pavimento térreo e pavimento superior, Figura 10.6.

Figuras 10.6 - Fluxograma do projeto piloto PCJ. Fonte: Projeto do Autor

Outro requisito do programa de necessidades solicitado para o projeto da casa modelo é que tenha características sustentáveis em seu processo construtivo e em seu desempenho energético. Para o desenvolvimento de projetos com características de sustentabilidade, outros fatores deverão ser considerados como:

8.2.1. Condições Climáticas Locais.

Para elaborar o projeto de uma edificação com menor impacto ambiental e maior eficiência energética, devemos analisar os dados climatológicos locais. O experimento piloto está localizado na cidade de Americana – SP, o terreno tem as seguintes coordenadas: Lat. 22° 42' 41,02"S e Long. 47° 20' 45,66"O e uma altitude de 551 metros. A vegetação original que possuía a cidade era a Mata Atlântica, que foi devastada. Assim como outros 13 municípios da Região Metropolitana de Campinas, o município sofre um grave estresse ambiental, sendo que Americana, juntamente com Campinas e Artur Nogueira, é considerada como uma das áreas mais sujeitas a enchentes e assoreamentos, e conta com menos de 5% de cobertura vegetal⁶. O clima de Americana é tropical de altitude (tipo Cwa segundo Köppen)⁷, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 21,8°C, tendo invernos secos e amenos (raramente frios de forma demasiada) e verões chuvosos com temperaturas moderadamente altas. O mês mais quente, fevereiro, conta com temperatura média de 24,6°C, sendo a média máxima de 30,3°C e a mínima de 19,0°C. E o mês mais frio, julho, com média de 18,0°C, sendo 25,2°C e 10,9°C a média máxima e mínima, respectivamente. Outono e primavera são estações de transição. A precipitação média anual é de 1.291,8 mm, sendo julho o mês mais seco, quando ocorrem apenas 27,3 mm. Em janeiro, o mês mais chuvoso, a média fica em 238,7 mm⁸.

⁶ Pró-Ambiente Campinas (14 de abril de 2009). Recursos Hídricos e Florestais da RMC. Arquivo do original em 10 de junho de 2011. Página visitada em 5 de maio de 2012.

⁷ World Maps of the Köppen-Geiger climate classification. World Map of the Köppen-Geiger climate classification. Institute for Veterinary Public Health. Arquivado do original em 24 de abril de 2011. Página visitada em 5 de maio de 2012.

⁸ Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (Cepagri). Clima dos Municípios Paulistas - Americana. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Arquivado do original em 5 de maio de 2012. Página visitada em 20 de novembro de 2012.

8.2.2. Diretrizes de Zoneamento Bioclimático.

Uma ferramenta importante para avaliação de desempenho térmico de edificações no Brasil é a NBR 02:135.07-001/3 set 2003⁹, que apresenta recomendações técnicas quanto ao desempenho térmico aplicável na fase de projeto. Ao mesmo tempo em que estabelece um Zoneamento Bioclimático Brasileiro, são feitas recomendações de diretrizes construtivas e detalhamentos de estratégias de condicionamento térmico passivo, com base em parâmetros e condições de conforto fixado.

De acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro, o experimento piloto se encontra inserido dentro da zona bioclimática 3 – Z3, (zoneamento referente a cidade de Campinas SP que está a 30km do experimento piloto), portanto o projeto deverá atender as diretrizes relativas a este zoneamento. Lembrando que esta NBR é para adequação de habitação unifamiliar com até três pavimentos, sem caráter normativo. Para a formulação das diretrizes construtivas de cada zona bioclimática brasileira, e para estabelecimento das estratégias de condicionamento térmico passivo, foram considerados os seguintes parâmetros e condições:

- Tamanho das aberturas para ventilação;
- Proteção das Aberturas;
- Vedação externa: (Parede - **Leve e refletora**. Cobertura – Leve e isolada); e
- Estratégia de condicionamento térmico passivo.

8.2.3. Índices Pluviométricos Locais.

Para obtenção de dados mais precisos de temperatura e índices pluviométricos para dimensionamento do projeto, trabalhamos com dados

⁹ ABNT – (Associação Brasileira de Norma Técnica), Projeto 02:135.07-001/3 set 2003 – Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitação unifamiliares de interesse social.

relativos ao aeroporto de Viracopos, Campinas; este está localizado a vinte quilômetros do experimento piloto, com coordenadas de lat. 23° 00'S, Long. 47° 08'O e altitude 648m e características climáticas semelhantes ao do nosso terreno. Escolhemos este local por possuir informações estatísticas de temperatura e pluviometria mais precisas, que é de 1.424,50mm/ano.

8.2.4. Índices de radiação solar.

Para produzir edificações autossuficientes energeticamente, utilizaremos fontes de energias renováveis, solar, eólica, oceânica, geotérmica o da biomassa. Analisamos o local onde será implantado o experimento piloto, os recursos disponíveis e a viabilidade econômica de implantação. Nesta região, havia apenas duas opções, a energia eólica, descartada devido à baixa incidência de ventos na região, o que inviabilizaria o projeto, e a energia solar, que se tornou a mais favorável pelo alto índice da radiação solar, de 5900 a 5700 Wh/m²dia¹⁰, além de o custo ser acessível de implantação.

8.2.5. Projeto arquitetônico do experimento piloto.

Com a definição do programa de necessidades, fluxograma e as condições bioclimáticas e energéticas do local, foi desenvolvido o projeto arquitetônico do Centro de Educação Ambiental (Casa Modelo) do consórcio PCJ, com características de sustentabilidade. A seguir, o projeto da aplicação experimental do sistema construtivo escória-cimento Figuras 10.7 a 10.10. O projeto completo encontra-se no anexo M.

¹⁰ Mapa de radiação solar do Brasil em unidade de Wh/m²-dia, ou seja, quantidade de energia (watts-hora) recebida do sol por cada metro quadrado de área durante o período de um dia. Fonte: Curso de Energia Solar Fotovoltaica – UNICAMP – apostila Eudora Solar.

Figura 10.7. Projeto pavimento térreo – Fonte- Projeto do autor

Figura 10.8. Projeto pavimento superior – Fonte – Projeto do autor

Figura 10.9. Corte esquemático - Fonte – Projeto do autor

Figura 10.10. Projeto fachada – Fonte – Projeto do autor

8.3. APLICAÇÃO PILOTO DO SISTEMA CONSTRUTIVO.

O experimento do sistema construtivo utilizou apenas as peças inteiras e meia-peça, o restante dos componentes não foram fabricados e utilizados. Durante o processo construtivo, optou-se por aplicar materiais existentes no mercado, que em seu processo de fabricação tenha baixo consumo energético e baixo impacto ambiental, para compor com a aplicação piloto do sistema construtivo. A seguir, todo processo construtivo do Centro de Educação Ambiental PCJ (Casa Modelo), explicado através de fotos.

O início da obra se deu com a implantação do projeto ao terreno, devido à topografia original da área escolhida ser suave, houve pouca movimentação de terra. A locação da obra e a fundação foram feitas de forma convencional, com gabarito de madeira e abertura manual das valas, figura 10.11_.

Figura 10.11. Gabarito de madeira e abertura do alicerce – Fonte: Foto do autor

O sistema de fundação utilizado é composto por brocas, sapatas e baldrames, dimensionados para o tipo de solo encontrado no local. Para compor o concreto da fundação, utilizamos cimento CP III e areia de cava, como agregado do concreto. Todos os materiais utilizados na obra tiveram sua origem

a menos de 80km de distância do local da aplicação experimental. A figura 10.12, ilustra a concretagem das brocas e a figura 10.13, a concretagem das sapatas e baldrame. Observa-se, por esta segunda figura, uma ferragem de ¼” em pontos preestabelecidos em projeto para compor com as peças do elemento construtivo, a fim de grautear os pontos de maior esforço, cantos e amarração de paredes, pontos que recebem vigamento metálico, entre outros.

Figuras 10.12 e 10.13 - Concretagem das brocas, sapatas e baldrame.

Fonte: Foto do autor.

Após a concretagem da fundação, foi feito o nivelamento do alicerce com tijolinho cerâmico, impermeabilizado e aterrado com terra do local, figura 10.14. Notamos por esta figura que a ferragem concretada no baldrame foi alinhada e posicionada com mais precisão. A qualidade da execução das medidas de projeto, aplicadas à obra, é de fundamental importância para a utilização do sistema construtivo proposto, uma vez que não pode haver ajustes nas peças, como cortes e adaptação de medidas no canteiro.

Figura 10.14: Nivelamento e impermeabilização do alicerce e aterro. - Fonte: Foto do autor.

Após o nivelamento do alicerce, as peças do sistema construtivo são posicionadas de acordo com o projeto executivo, figura 10.15. Nos locais de grandes vãos, onde receberá vigamento metálico, as peças foram duplicadas, aumentando a superfície de apoio e consequentemente a resistência neste ponto.

Figura 10.15 - Distribuição das peças de acordo com projeto executivo – Fonte: Foto do autor.

O sistema construtivo proposto não utiliza argamassa no assentamento das peças, isto proporciona maior agilidade na execução da alvenaria estrutural, consequentemente o canteiro de obras e a disposição dos pallets com as peças devem ser organizados de forma que se aproxime de uma linha de montagem.

Neste processo construtivo as tubulações elétricas e hidráulicas devem acompanhar a execução da alvenaria. O design das peças possibilita a passagem dos componentes da hidráulica e elétrica, evitando cortes de paredes, geração de resíduos e diminuindo mais uma etapa no processo construtivo convencional, figuras 10.16, 10.17 e 10.18.

Figura 10.16 - Tubulações elétricas e hidráulicas acompanham a alvenaria. Fonte: Fotos do autor

Figuras 10.17 e 10.18 - Detalhe das tubulações elétricas e hidráulicas que acompanham a alvenaria. Fonte: Fotos do autor

Durante a construção do experimento, os materiais foram escolhidos, analisando o ciclo de vida do edifício. Se houvesse a necessidade de desmontar o experimento piloto, conseguiríamos reaproveitar 90% dos materiais empregado na construção. O fato da alvenaria não estar colada com argamassa, ao desmontarmos, o reaproveitamento das peças para construir outra habitação seria de 90%, somente as peças que se encontram concretadas, cerca de 10%, seriam moídas e poderiam ser remoldadas.

A estrutura metálica do telhado e mezanino está apoiada na alvenaria, em determinados pontos, sem qualquer tipo de engastamento ou solda, Figuras 10.19 e 10.20, o que facilitaria sua desmontagem para ser reaproveitada ou enviada a aciarias, para serem recicladas.

Figuras 10.19 e 10.20 - Detalhe do apoio da estrutura metálica na alvenaria. – Fonte: Foto do autor.

No experimento foi utilizado materiais convencionais que são comuns na prática usual da construção civil. O objetivo é analisar a interface entre as peças do sistema construtivo proposto com estes materiais. Foi utilizado a laje pré-fabricada h-12 de concreto apenas em dois ambientes, dormitório e escritório, figura 10.21. Seu engastamento foi feito utilizando a ferragem do graute da alvenaria, que ultrapassou 50 cm acima do término da parede. Após a montagem da laje, estas pontas foram dobradas no sentido do trilho da laje e concretada no seu interior. Outro material utilizado foi a janela metálica, figura 10.22, utilizada usualmente nas construções atuais – sua colocação ocorreu após a execução da alvenaria. Toda a alvenaria é executada para posteriormente as aberturas externas e internas receberem as caixilharias, figura 10.23.

Figura 10.22. Janelas metálicas – Fonte:

Figura 10.21. Laje pré-fabricada piso. – Fonte: Autor

Figura 10.23. Interface entre a estrutura metálica do telhado, laje pré-fabricada, e aberturas externas prontas para receber as caixilharias – Fonte: Foto do autor.

8.3.1. O sistema de cobertura do experimento piloto.

O sistema construtivo proposto pode utilizar qualquer tipo de telha em sua composição. A telha de cobertura e forros utilizados no experimento foi feito com resíduos de materiais da indústria alimentícia, figuras 10.24 a 10.27, para a edificação propor conceitos de sustentabilidade. Para aumentar a durabilidade das telhas e tentar diminuir a temperatura do interior do experimento, aplicamos tinta branca na superfície externa das telhas. Houve um problema de execução nesta etapa: ao aplicar a tinta, os funcionários não removeram o plástico que reveste a telha, com a ação do sol, este revestimento plástico começou a se soltar da telha, levando consigo a pintura que foi aplicada na intenção de diminuir a temperatura no interior do edifício, uma vez que não sabemos o comportamento deste material com relação às trocas térmicas.

Figura 10.24 - Telhas de resíduo da indústria alimentícia. Fonte: Fotos do autor

Figura 10.25 - Placa de resíduo da indústria

Figura 10.26 - Telhas de resíduo aplicada no protótipo
Fonte: Fotos do autor.

Figura 10.27: Forro de placa de resíduo.

8.3.2. Materiais de acabamento aplicados ao experimento piloto.

No experimento piloto, foi utilizado vários tipos de revestimento para avaliar a interface com as peças do elemento construtivo. Na parte externa, a alvenaria recebeu um rejunte com argamassa AC 3 entre as peças, e pintura à base de água, deixando as peças à mostra, figura 10.28, e atendendo a norma de desempenho NBR 15575-4 com relação à estanqueidade, como veremos no capítulo a seguir.

Figura 10.28: Paredes rejuntadas com argamassa AC 3 – Fonte: Foto do autor.

Na parte interna, protegida da água, foi utilizado vários tipos de revestimento, como laboratório para analisar seu desempenho e sua trabalhabilidade com as peças de escória-cimento. No ambiente da sala de estar deixamos a alvenaria in natura, sem revestimento e sem rejunte, para observar seu comportamento, figura 10.29 e 10.30, em outra parede, não utilizou o rejunte, somente pintura sobre as peças que compõem a alvenaria, figura 10.31. No ambiente do hall de entrada, sala de exposição, cozinha e área de serviço, utilizou-se reboco aplicado à alvenaria, figura 10.32.

Figura 10.29: Parede in natura, sala de estar sem rejunte

Fonte: Fotos autor

Figura 10.30 : Parede in natura

Figura 10.31: Parede com pintura

Figura 10.32 Parede com reboco – Fonte: Foto autor.

Observa-se na figura 10.33, acima, que todos os ambientes do experimento (Casa Modelo) possuem um medidor de energia para verificação do consumo em cada compartimento. Por se tratar de uma edificação com finalidade didática, estes equipamentos auxiliam na conscientização ambiental do consumo de energia, tendo em vista os equipamentos eletrônicos utilizados nos ambientes.

Nos ambientes dormitório e escritório, utilizamos como revestimento o gesso aplicado diretamente às peças de escória-cimento, figuras 10.33 e 10.34, e nas áreas molhadas, que realmente são utilizadas como os banheiros masculinos e femininos utilizamos revestimento cerâmico, aplicado diretamente na alvenaria.

Figuras 10.33 e 10.34 - Dormitório e escritório revestido com gesso. Fonte: Foto do autor

Em outras áreas, a título de experimento de revestimento, foi aplicado textura, madeira, etc., figura 10.35.

Figura 10.35: WC didático, revestimentos em cerâmica, madeira e textura – Fonte: Foto do autor.

Figura 10.36: Projeto experimental piloto (Casa Modelo) acabado – paredes rejuntadas e pintura à base de água. Fonte: Foto do autor.

8.3.3. Avaliação preliminar do experimento piloto.

O projeto experimental piloto, (figura 10.36), é um laboratório de análise do comportamento do sistema construtivo, proposto neste trabalho. As questões analisadas no experimento são:

- Desempenho na execução do sistema construtivo (produção $\text{m}^2/\text{homem}/\text{dia}$).
- Comportamento estrutural do sistema construtivo.
- Interface do sistema construtivo e materiais de construção convencionais existente no mercado
- Comportamento dos revestimentos aplicados ao sistema construtivo.

O sistema construtivo escória-cimento consome 50 peças inteiras por metro quadrado de alvenaria. No planejamento da execução desta etapa, os pallets com 280 peças inteiras foram dispostos ao longo da futura alvenaria, e os pallets com 560 unidades de meia-peça foram dispostos na intersecção da alvenaria, como estratégia de promover maior rapidez na execução. O tempo gasto para construção de 1m^2 de alvenaria, sem rejunte, foi de 4 minutos por trabalhador em altura de até 1,5 m; este tempo aumentou para 6 minutos em altura de andaime de 1,5 m a 3,0 m, fator de fornecimento de peças pelos ajudantes. Pode-se observar que pelo fato das instalações elétricas e hidráulicas acompanharem o andamento da alvenaria em áreas de instalação hidráulica este tempo também aumentava, por depender de outro tipo de mão de obra. Em uma linha de montagem industrial ou automatizada da alvenaria, as instalações hidráulicas poderiam ser colocadas posteriormente através de painéis independentes, com toda instalação independente da alvenaria. Já as instalações elétricas não causaram nenhum atraso na execução do serviço.

Os postos com maior esforço empregado na alvenaria estrutural do sistema construtivo escória-cimento foram os apoios da estrutura metálica do mezanino, que foi estimado em 400 kg/m^2 , e o apoio das lajes pré-fabricadas, figura 10.37.

Figura 10.37: Pontos de maior solicitação na alvenaria estrutural – Fonte: Projeto do autor.

O experimento piloto foi concluído em janeiro de 2010. O monitoramento é feito anualmente e, até os dias de hoje, a alvenaria estrutural do sistema construtivo escória-cimento não apresentou patologia de deslocamento, fissuração, etc., confirmando os resultados obtidos em ensaios de prisma de bloco e miniparedes, apresentados no capítulo 5.3.2.

Os materiais utilizados no experimento piloto não sofreram qualquer tipo de adaptação ou ajustes para serem utilizados no sistema construtivo escória-cimento, o que torna esta tecnologia perfeitamente aplicável e pronta para ser utilizada na construção civil do mercado.

Foi aplicado no experimento os revestimentos de alvenaria mais utilizados usualmente, como revestimento cerâmico, reboco, gesso, etc. E durante o período de monitoramento (quatro anos) não ocorreu perda de aderência entre os componentes de acabamento e sua respectiva base

(descolamento), ou qualquer tipo de patologia, portanto, o sistema construtivo escória-cimento está apto a receber revestimentos comumente empregados na construção civil, sem a necessidade de tratamento especial à alvenaria.

Através de todos os experimentos realizados na aplicação piloto, pode-se concluir que o sistema construtivo escória-cimento interage com todos os materiais utilizados usualmente na construção civil, e pode ser utilizado como novo material aplicado à alvenaria de vedação estrutural. Outro fator importante constatado, na aplicação piloto, é o fato de durante o processo construtivo, não houve resíduo gerado em todas as etapas. Através do experimento piloto, conclui-se que o elemento construtivo escoria-cimento se demonstrou viável para ser utilizado em alvenaria estrutural.

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo apresentaremos o resultado de alguns ensaios realizados no experimento piloto. Os ensaios utilizaram parâmetros contidos na NBR 15575 , parte 4, desempenho de sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE). Dentre os vários requisitos e critérios utilizados nesta norma, consideramos as exigências relativas à segurança estrutural, capítulo 7 e as exigência relativas à habitabilidade, com relação à estanqueidade e ao desempenho térmico, que apresentamos a seguir.

9.1. AVALIAÇÃO QUANTO AO DESEMPENHO À ESTANQUEIDADE.

A exposição à água de chuva, à umidade proveniente do solo e àquela proveniente do uso da edificação habitacional devem ser consideradas em projeto, pois a umidade acelera os mecanismos de deterioração e acarreta a perda das condições de habitabilidade e de higiene do ambiente construído.

Devem ser previstos no projeto detalhes que assegurem a estanqueidade de partes do edifício que tenham a possibilidade de ficar em contato com a água gerada na ocupação ou manutenção do imóvel, devendo ser verificada a adequação das vinculações entre instalações de água, esgotos ou águas pluviais e estrutura, pisos e paredes, de forma que as tubulações não venham a ser rompidas ou desencaixadas por deformações impostas (ABNT NBR 15575-4: 2012).

Em atendimento à NBR acima citada, os requisitos a infiltração de água e critérios a estanqueidade à água de chuva, considerando-se a ação dos ventos, em sistemas de vedações verticais externas (fachadas), devem atender às condições de exposição indicadas na Tabela 11.1 , e conforme as regiões de exposição ao vento, indicadas na Figura 11.1. Os sistemas de vedação vertical

externa da edificação habitacional, incluindo a junção entre a janela e as paredes, devem permanecer estanques e não apresentar infiltrações que proporcionem borrifamentos, escorrimentos ou formação de gotas de água aderentes na face interna, podendo ocorrer pequenas manchas de umidade, com áreas limitadas aos valores indicados na Tabela 11.2. A região da cidade de Campinas SP, foi adotada como parâmetros de análise, por estar próximo a aplicação piloto.

Tabela 11.1 – Condições de ensaio de estanqueidade de sistemas de vedações verticais externas.

Região do Brasil	Condições de ensaio de paredes	
	Pressão estática Pa	Vazão de água L/min/m ²
I	10	3
II	20	
III	30	
IV	40	
V	50	

Fonte – ABNT NBR 15575-4: 2012.

Tabela 11.2 – Estanqueidade à água de vedações verticais externas (fachadas) e

esquadrias. Edificação	Tempo de ensaio h	Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade na face oposta à incidência da água, em relação à área total do corpo de prova submetido à aspersão de água, ao final do ensaio
Térrea (somente a parede, seja com ou sem função estrutural)	7	10
Com mais de um pavimento (somente a parede, seja com ou sem função estrutural)	7	5
Esquadrias	Devem atender à ABNT NBR 10821-3	
O Anexo F contém recomendações relativas a outros níveis de desempenho.		

Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

Figura 11.1 - Condições de exposição conforme as regiões brasileiras.
 Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

9.1.1. Execução do ensaio.

O ensaio foi realizado segundo o Anexo C (normativo) da NBR 15575-4, que consiste em submeter, durante um tempo determinado, a face externa de um corpo de prova do SVVE (superfície vertical de vedação externa) a uma vazão de água, criando uma película homogênea e contínua, com a aplicação simultânea de uma pressão pneumática sobre essa face.

As aparelhagens necessárias utilizadas para a realização do ensaio estão mostradas esquematicamente na figura 11.2, e são as seguintes:

Figura 11.2 _ : Esquema de dispositivo para medida de vazão.
Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

Os equipamentos utilizados para realização dos ensaios, figura 11.3, estão discriminados a seguir:

Figura 11.3 - Aparelhagens utilizadas para realização dos ensaios –
Fonte: Foto do autor.

A- Câmara de formato prismático, com dimensões 70x70 cm e 25 cm de profundidade, figura 11.4.

- 1- Abertura de uma das faces para fixação do corpo de prova.
- 2- Orifício de saída de água na base, com um sifão que possibilite a formação de um fecho hídrico no interior da câmara.
- 3- Orifício para ligação da alimentação de água, do sistema de aplicação de pressão, do manômetro e para saída de ar.

Figura 11.4 - Câmara prismática 70x70x25 cm utilizada nos ensaios.
Fonte: Foto do autor

B- Sistema constituído por ventoinha, tubulação e registros reguladores de pressão que possibilitem a aplicação de pressão

pneumática uniforme de até 50 Pa no interior da câmara durante o ensaio. A pressão utilizada foi de 40 Pa, devido a localização do experimento piloto estar na região IV do Brasil, conforme tabela 11.1. NOTA: O ar deve ser introduzido no interior da câmara por uma de suas faces laterais, a fim de impedir a incidência direta do ar sobre o corpo de prova. Utilizamos um compressor da marca Twister, modelo CSA-7,8, deslocamento 147 l/min, pressão máxima 8,3 bar ou 120 psig, potência 1,1Kw e rotação 3520 rpm, figura 11.5.

Figura 11.5: Câmara prismática 70x70x25 cm utilizada nos ensaios.
Fonte: Foto do autor

C- Equipamento para medição de pressão, instalado de maneira que a medição não seja afetada pela velocidade do ar e tenha resolução de 0,5 Pa.

Figura 11.6: Controlador de pressão instalado ao compressor.
Fonte: Foto do autor

D- Sistema constituído de reservatório de água, tubulações, registros e tubo com dispersores de água, que deve permitir a aplicação de vazão constante e igual a $3,0 \text{ dm}^3/\text{min}$. junto à parede superior da face externa, criando uma película homogênea e contínua. Os equipamentos utilizados foram: medidor de vazão da marca Dwyer, bomba d'água da marca Eletroplas, modelo ICS-50B, potência de 0,5 HP, vazão máxima de $2,2 \text{ m}^3/\text{h}$, altura máxima de 34 m e uma caixa d'água de 310L, da marca tigre.

Figura 11.7 - Controlador de vazão ligado a caixa d'água.
Fonte: Foto do autor

E- Medidores de vazão que permitam seu controle durante o ensaio, tais como tubos de venturi, rotâmetros e outros, com resolução igual a 1 % do fundo de escala.

O ensaio foi realizado fixando-se a câmara prismática, com suas guarnições esponjosas, junto à dispersão de água voltada ao corpo de prova (parede de alvenaria escória-cimento). O sistema de dispersão de água deve ser acionado e precisa ser estabelecida uma vazão igual a $(3,0 \pm 0,3) \text{ dm}^3/\text{min.}$, que tem que ser mantida constante durante o ensaio. Em seguida, aplica-se a pressão pneumática especificada acima, que deve ser mantida constante durante o ensaio.

A duração do ensaio é de 7 h. Após este período, a pressão pneumática deve ser anulada, e a dispersão de água, interrompida.

Aplicamos o ensaio na alvenaria de escória-cimento in natura, figuras 11.8 e 11.9, e também na mesma alvenaria apenas com pintura látex à base de água, figura 11.10.

Figura 11.8 – parede in natura

Figura 11.9 - Ensaio aplicado à alvenaria in natura.
Fonte. Foto do autor

Figura 11.10– Parede com pintura sem
rejunte. Fonte. Foto do autor

Em ambos os casos, a alvenaria escória-cimento não atendeu aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma NBR 15575-4, anexo F (informativo). Em apenas 4 minutos a água escorria pelo outro lado do local onde havia sido aplicado o ensaio.

Os níveis de desempenho para sistemas de vedações verticais externas (SVVE), quando ensaiados segundo os métodos descritos em 10.1.1.1, com relação à estanqueidade à água de chuva, considerando-se a ação dos ventos, são indicados na Tabela 11.3.

Tabela 11.3 – Níveis de desempenho para estanqueidade à água de vedações verticais externas (fachadas) e esquadrias

Edificação	Tempo de ensaio h	Percentual máximo da soma das áreas das manchas de umidade na face oposta à incidência da água, em relação à área total do corpo de prova submetido à aspersão de água, ao final do ensaio	Nível de desempenho
Térrea (somente a parede de vedação)	7	10	M
		Sem manchas	I; S
Com mais de um pavimento (somente a parede de vedação)	7	5	M
		Sem manchas	I; S
Esquadrias	Devem atender à ABNT NBR 10821-3		M

Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

Este Anexo estabelece os níveis mínimos (M) de desempenho para cada requisito, que devem ser atendidos. Considerando a possibilidade de melhoria da qualidade da edificação, com uma análise de valor da relação custo/benefício dos sistemas, neste Anexo são indicados os níveis de desempenho intermediário (I) e superior (S), e repetido o nível M para facilitar a comparação. Recomenda-se que o construtor ou incorporador informe o nível de desempenho dos sistemas que compõem a edificação habitacional quando exceder o nível mínimo (M).

Ao ensaiar a alvenaria escória-cimento utilizando rejunte de argamassa AC 3, e pintura com tinta Látex à base de água, figura 11.11. Após 7 horas o lado oposto ao prisma de ensaio não apresentou manchas, o que

caracteriza a alvenaria, nestas condições, como intermediária e superior, segundo o anexo F da referida norma,.

Figura 11.11 - Aplicação do ensaio em parede escória-cimento com rejunte de argamassa AC 3.
Fonte: Foto do autor.

Figura 11.12 - Parede escória-cimento com rejunte de argamassa AC 3, após 7h de ensaio sem manchas. Fonte: Foto do autor.

Pode-se concluir que o rejuntamento das peças com argamassa AC 3 garante os requisitos de intermediário e superior, do anexo F, da NBR 15575-4, relativos à estanqueidade. Portanto, a recomendação o sistema construtivo escória-cimento, quando utilizado como sistema de vedação vertical externa (SVVE), deverá haver a obrigatoriedade da utilização de rejunte das peças com argamassa AC 3, e pintura em Látex acrílico.

9.2. Avaliação quanto ao desempenho térmico

O sistema construtivo escória-cimento será avaliado quanto ao desempenho térmico segundo a NBR 15575-4 de 2012. O experimento piloto deverá reunir características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na ABNT NBR 15220-3.

Esta parte da ABNT NBR 15575 apresenta os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico de vedações verticais externas (SVVE), conforme definições, símbolos e unidades das ABNT NBR 15220-1 e ABNT NBR 15220-5.

Os SVVE podem ser avaliados, primeiramente, de acordo com os critérios de desempenho constantes nesta parte da ABNT NBR 15575, considerando o procedimento simplificado de análise. Caso o SVVE não atenda aos critérios analisados conforme o procedimento simplificado, é necessário aplicar o procedimento de análise de acordo com a ABNT NBR 15575-1, levando em conta o procedimento de simulação do desempenho térmico ou o procedimento de realização de medições em campo.

9.2.1. Requisito para adequação de paredes externas.

O procedimento simplificado de análise requer apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que proporcionem, pelo menos,

desempenho térmico mínimo estabelecido na tabela 11.4 e tabela 11.5, para cada zona bioclimática estabelecida na ABNT NBR 15220-3.

Tabela 11.4. Valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas.

Transmitância térmica U W/m ² .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5
^a α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.		

Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

Tabela 11.5. Valores máximos admissíveis para a capacidade térmica (CT) das paredes externas.

Capacidade térmica (CT) kJ/m ² .K	
Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem requisito	≥ 130

Fonte: ABNT NBR 15575-4: 2012.

O método de avaliação se dá através de cálculos, conforme procedimentos apresentados na ABNT NBR 15220-2. Este método está sendo considerado como simplificado para efeito de análise, conforme ABNT NBR 15575-4. O nível mínimo para aceitação é o **M** (denominado mínimo), ou seja, atende aos valores indicados nas tabelas 11.4 e 11.5.

No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a 0,065 W/(m.K) e resistência térmica maior que 0,5 (m².K)/W, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar.

9.2.2. Ensaio para obter as propriedades térmicas

Os ensaios para obter as propriedades térmicas do composto escória-cimento, que compõe o sistema construtivo, foram realizados no Laboratório de Propriedades Térmicas da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Hoje são encontrados na literatura vários métodos para a determinação da condutividade térmica de materiais. O método utilizado no ensaio do composto escória-cimento foi uma adaptação ao método conhecido como método da coluna fracionada.

O método da coluna fracionada, originalmente desenvolvido por Lindop, é um método estacionário e comparativo com uma coluna composta por material padrão – amostra – material padrão e um calorímetro resfriado por água. A coluna é aquecida por um forno, e esta técnica foi especialmente desenvolvida para determinação da condutividade térmica em atmosfera não oxidante.

No método utilizado, a coluna fracionada é substituída por uma cavidade, isto é, uma caixa sem fundo feita internamente de manta cerâmica e tijolos isolantes, sendo a estrutura lateral externa de aço inoxidável. O fundo da caixa é uma placa de carbetto de silício, que é aquecida por um forno bastante simples: temperatura controlada e variável até 500°C, figura 11.13.

Figura 11.13 - Cavidade que substitui a coluna fracionada. Fonte: Foto do autor

Figura 11.14. Equipamentos utilizados no ensaio. – Fonte: Foto do autor.

Legenda:

- A – Coletor de dados
- B – Controlador de temperatura
- C – Forno
- D – Cavidade que substitui a coluna fracionada.

Para a realização do ensaio foi preparada apenas uma amostra em forma de paralelepípedo retangular, com as dimensões de (200 mm X 100 mm X 15 mm), figura 11.15. Foram utilizadas duas amostras-padrão, com o conhecimento preciso de sua condutividade térmica e com a temperatura necessária (Alumina A-1000, prensada e queimada).

Figura 11.15. Amostra do composto escória-cimento. Fonte: Foto do autor.

O procedimento de cálculo será demonstrado a seguir. Na ausência de perdas de calor lateral a condutividade é calculada pela equação de Fourier:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

Onde q é o fluxo de calor que atravessa a área A , $\frac{dT}{dx}$ (dT - diferença de temperatura e dx espessura) é o gradiente de temperatura através da superfície A , e K é a condutividade térmica do material. A figura 11.16, mostra o fluxograma ilustrativo do procedimento de ensaio e o arranjo dos corpos de prova.

Figura 11.16. Fluxograma ilustrativo do arranjo dos corpos de prova.
Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que o estado estacionário é atingido, as temperaturas registradas pelos termopares 1,2 e 3 são registradas e a condutividade é calculada pela equação:

$$K_{\text{amostra}} = \frac{K_{\text{padrão}} \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{\text{padrão}}}{\left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{\text{amostra}}}$$

Onde K_{amostra} e $K_{\text{padrão}}$ são as condutividades térmicas da amostra e do padrão, respectivamente.

O ensaio procedeu conforme fluxograma ilustrativo do arranjo dos corpos de prova. A amostra do composto escória-cimento é posicionada entre as placas padrão de Alumina A-1000, com os termopares 1,2 e 3 nas posições corretas, figuras 11.17, 11.18 e 11.19.

Figuras 11.17, 11.18 e 11.19. Cavidade com placa padrão, amostra escória-cimento e placa padrão, com termopares posicionados. Fonte: Foto do autor

O estado estacionário adotado ao corpo de prova estabeleceu-se à temperatura de 70°C, com fluxo de calor constante, figura 11.20.

Figura 11.20. Corpo de prova sobre o forno com temperatura de 70°C. Fonte: Foto do autor

Para registrar as temperaturas pelos termopares 1,2 e 3, foi estipulado um tempo inicial de 420 min., com a quantidade de 480 leituras, em intervalos de 1 min. figura 11.21.

Figura 11.21. Equipamento pronto para efetuar as leituras. Fonte: Foto do autor.

COMPORTAMENTO TÉRMICO AMOSTRA COMPOSTO ESCÓRIA-CIMENTO

Figura 11.22. Resultado do ensaio da amostra composto escória-cimento. Fonte: elaborada pelo autor.

Como podemos observar na figura 11.22, o resultado do ensaio realizado obteve um valor de condutividade térmica do composto escória-cimento de **0,773 W/m,K**, o que é considerado baixo, uma vez que 90% do composto é de escória de aciaria elétrica, material originário da fusão do aço, que tem uma alta condutividade térmica.

9.2.3. Cálculos para obter as propriedades térmicas

Para determinar se o material atinge os critérios mínimos de desempenho térmico com relação à transmitância térmica e a capacidade térmica, utilizamos a ABNT NBR 15220-2, Projeto 02;135.07-001/2, que estabelece procedimentos para cálculo das propriedades térmicas.

Para definir a transmitância e a capacidade térmica do componente, é necessário definir anteriormente a resistência térmica do material pela expressão:

$$R = e/\lambda$$

Onde “e” é a espessura de uma camada e “ λ ” é a condutividade térmica do material. Inserindo os dados na expressão acima, obtivemos o resultado de resistência térmica para o composto escória-cimento de **$R = 0,0379 \text{ m}^2\text{K/W}$** . Definida a resistência térmica, é necessário definir a resistência térmica total (R_t), de superfície a superfície, da alvenaria do sistema construtivo, que é constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, determinada pela expressão:

$$R_t = \frac{A_a}{\frac{A_a}{R_a}} + \frac{A_b}{\frac{A_b}{R_b}} + \dots \frac{A_n}{\frac{A_n}{R_n}}$$

Onde $A_a, A_b \dots A_n$ são as áreas das “n” camadas homogêneas, determinadas na pela expressão anterior. E $R_a, R_b \dots R_n$, são as resistências térmicas das “n” camadas de ar, obtidas na tabela 11.6.

Tabela 11.6. Resistência térmica da câmara de ar não ventilada, com largura muito maior que a espessura.

Natureza da Superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2.K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente

Superfície de alta emissividade $\epsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\epsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Fonte: NBR 15220-2, Projeto 02;135.07-001/2.

Notas:

1- H é a emissividade hemisférica total.

2- Os valores para câmara de ar com superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e for previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.

3- Para cobertura recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas, desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies – a inferior – continuará limpa, sem poeira. Casos, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido por esta tabela.

Utilizando os dados acima aferidos, obtemos o valor da resistência total para a alvenaria do sistema construtivo, que é de $R_t = 0,4252 \text{ m}^2.K/W$. A resistência total é um dado importante, pois é utilizado na definição da transmitância térmica da alvenaria do sistema construtivo de ambiente a ambiente. A transmitância térmica é inversamente proporcional à resistência total, conforme a expressão.

$$U = \frac{1}{R_t}$$

Onde obtemos que a transmitância da alvenaria do sistema construtivo escória-cimento é de $U = 3,7 \text{ W/m}^2.K$, portanto atende às exigências

mínimas estabelecidas pela NBR 15575-4, tabela 11.4, Transmitância térmica de paredes externa.

Outro requisito mínimo de desempenho térmico estabelecido pela norma é a capacidade térmica do elemento construtivo, que é determinado pela expressão:

$$C_T = \sum_{i=1}^n O_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot Y_i \quad \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot Y_i$$

Onde: O_i - é a condutividade térmica da camada i^a ;

R_i - é a resistência térmica da camada i^a ;

e_i - é a espessura da camada i^a ;

c_i - é o calor específico do material da camada i^a ;

Y_i - é a densidade de massa aparente do material da camada i^a ;

Inserindo os dados na expressão, obtivemos o resultado da capacidade térmica da alvenaria do sistema construtivo de **$C_T = 151,20 \text{ KJ/m}^2.\text{K}$** , portanto, o sistema construtivo atende aos requisitos mínimos de desempenho térmico, estabelecidos pela NBR 15575-4, tabela 11.5 - capacidade térmica de paredes externa.

Para que o elemento construtivo proposto no trabalho seja utilizado nas diretrizes construtivas de zoneamentos bioclimáticos brasileiros, são necessárias as informações do material quanto ao atraso térmico do componente e o fator de ganho de calor solar ou fator solar.

O atraso térmico em placas homogêneas (constituídas por um único material), com espessura “e” e submetidas a um regime de térmico variável e senoidal com período de 24 horas, pode ser estimado pela expressão:

$$Y = 0,7284 \cdot \sqrt{R_t \cdot C_T}$$

Onde: M - é o atraso térmico

R_t - é a resistência térmica de superfície a superfície do componente

C_T - é a capacidade térmica do componente

Inserindo os dados na expressão, obtemos o atraso térmico do componente de alvenaria escória-cimento de **$Y = 5,84 \text{ horas}$** .

Para obter o fator de ganho de calor solar (fator solar) do elemento construtivo proposto neste trabalho, utilizamos a expressão:

$$FS_o = 100.U.\alpha.R_{se}$$

Onde: FS_o - é o fator solar de elementos opacos em porcentagem

U - é a transmitância térmica do componente

Δ - é a absorptância à radiação solar – função da cor, dada pela tabela 11.7_

R_{se} - é a resistência superficial externa

Como R_{se} é admitido constante e igual a 0,04, a expressão pode ser reescrita na forma da expressão:

$$FS_o = 4.U.\alpha$$

Tabela 11.7. Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas) e emissividade (ϵ) para radiação a temperaturas comuns (ondas longas).

Tipo de superfície	α	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	0,05
Chapa de alumínio oxidada	0,15	0,12
Chapa de aço galvanizado (nova e brilhante)	0,25	0,25
Caiação nova	0,12 / 0,15	0,90
Concreto aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,75 / 0,80	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,30 / 0,50	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor	0,06 / 0,25	0,84
Vidro colorido	0,40 / 0,80	0,84
Vidro metalizado	0,35 / 0,80	0,15 / 0,84
Pintura: Branca	0,20	0,90
Amarela	0,30	0,90
Verde clara	0,40	0,90
"alumínio"	0,40	0,50
Verde escura	0,70	0,90
Vermelha	0,74	0,90
Preta	0,97	0,90

Fonte: NBR 15220-2, Projeto 02;135.07-001/2.

Ao substituir os dados na expressão de ganho de calor solar (fator solar), obtemos para a alvenaria do sistema construtivo in natura (sem revestimento), um fator solar de **$FS_o = 6,11\%$** . Com os resultados dos cálculos efetuados neste item, conseguimos classificar o elemento construtivo de escória-cimento, para ser utilizado nas diretrizes construtivas de habitações no zoneamento bioclimático brasileiro. ABNT NBR 15220-3, Anexo D (Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico de algumas paredes e coberturas). Tabela 11.8.

Tabela 11.8. Transmitância térmica, capacidade térmica e atraso térmico.

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [KJ/(m ² .K)]	Y [horas]
Parede de composto Escória-cimento Espessura total da parede 12,5 cm	3,7	151,2	5,84

Fonte: Elaborada pelo autor

9.2.4. Avaliação do desempenho térmico por medição.

A avaliação global do desempenho térmico da aplicação piloto é feita através de medições in loco, segundo a NBR 15575, Anexo A. Os requisitos são: “apresentar condições térmicas no interior do edifício habitacional melhores ou igual às do ambiente externo, à sombra, para o dia típico de verão”. O valor máximo diário da temperatura do ar no interior do recinto de permanência prolongada, como por exemplo, salas e dormitórios, sem a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral), deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior.

Para maior conforto dos usuários, recomenda-se, para os níveis de desempenho intermediário (I), superior (S) e o nível mínimo (Y), os valores apresentados na tabela 11.9.

Tabela 11.9. Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.

Nível de Desempenho	Critérios	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ}\text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ}\text{C})$

Fonte: NBR 15220-2, Projeto 02;135.07-001/2.- Anexo E

$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação. Em graus Celsius.

$T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no exterior da edificação. Em graus Celsius.

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação. Em graus Celsius.

$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no exterior da edificação. Em graus Celsius.

Nota: Zonas bioclimáticas, de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

O ensaio de aferição de temperatura in loco, no experimento piloto, foi realizado durante o solstício de verão, com permanência de quinze dias coletando dados de temperatura, a cada cinco minutos, no período de 05 a 20 de dezembro de 2013. O equipamento utilizado para o ensaio de aferição de temperatura foi o HOBOS data logger, da marca ONSET, figura 11.23.

HOBO[®] Temp - H08-001-02

Figura 11.23: Equipamento HOBOS para aferição de temperatura.
Fonte: www.onsetcomp.com/products/data-logger/h08-001-02.

Os equipamentos foram localizados no interior do experimento em vários ambientes, como nos de maior permanência – sala e dormitórios. Outro equipamento foi implantado na parte externa do experimento à sombra, como recomenda a ABNT NBR 15575-1, Anexo E, para fazer um comparativo da temperatura externa e da temperatura no interior da edificação, figura 11.24.

Localização dos HOBOS no experimento piloto.

Figura 11.24. Localização dos HOBOS no experimento piloto –
Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados obtidos estão representados nos gráficos a seguir:

Temperatura HOB0 1 Externo a Edificação

Figura 11.25 Resultado da temperatura externa durante o período aferido.
Fonte : Elaboradas pelo autor

Temperatura HOB0 2 Sala de Estar

Figura 11.26 - Resultado da temperatura no interior da sala de estar, durante o período aferido
- Fonte : Elaboradas pelo autor

Temperatura HOBO 4 Dormitório

Figuras 11.27 - Resultado da temperatura no interior do dormitório durante o período aferido.
Fonte : Elaboradas pelo autor

Analisando os dados obtidos com os equipamentos HOBOS, durante o período determinado, a temperatura máxima registrada no exterior do experimento foi de $T_{e,max} = 36,57^{\circ}\text{C}$ e temperatura mínima externa de $T_{e,min.} = 21,33^{\circ}\text{C}$, enquanto que no interior do experimento a temperatura máxima registrada na sala foi de $T_{e,max} = 28,31^{\circ}\text{C}$ e mínima de $T_{e,min.} = 22,48^{\circ}\text{C}$ e no dormitório a máxima e mínima, respectivamente, foram de $T_{e,max} = 28,31^{\circ}\text{C}$ e mínima de $T_{e,min.} = 21,71^{\circ}\text{C}$. Para avaliar o nível de desempenho, conforme tabela 11.9, Anexo E, a diferença entre a máxima temperatura externa e a máxima temperatura interna, do experimento, foi de $8,26^{\circ}\text{C}$, o que classifica o sistema construtivo escória-cimento com desempenho térmico **Superior (S)**, para todo zoneamento bioclimático brasileiro.

Há possibilidade futura de ensaios de desempenho acústico assim como de impacto de corpo mole e corpo duro, existentes na norma de desempenho adotada neste capítulo.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, através dos experimentos realizados, pode-se concluir que a escória de aciaria elétrica possui potencial para ser utilizada como agregado, em substituição total dos agregados convencionais (areia e brita), na fabricação de elementos construtivos de alvenaria estrutural. Em razão da discussão dos resultados e apresentação das conclusões dos capítulos anteriores, neste capítulo é feita uma análise geral de todos os aspectos já comentados. Com relação à aplicação da escória de aciaria elétrica na fabricação de elementos construtivos, deve-se atentar para as seguintes necessidades:

- Por se tratar de um resíduo industrial, escória de aciaria elétrica não tem um padrão de amostragem, portanto, sempre que utilizada, deverá ser analisada com relação a sua toxicidade, ao solubilizado e lixiviado. E, após sua aplicação, deverá haver um monitoramento ao longo do tempo, verificando a estabilidade deste resíduo em relação a sua composição na incorporação aos componentes da mistura proposta.
- A escória de aciaria tem o maior volume residual produzido pelas aciarias elétricas na produção do aço, porém, para sua utilização ser viável ambientalmente e economicamente, sua aplicação não deverá ser distante da usina geradora.
- Este resíduo possui uma característica marcante, na maioria dos trabalhos científicos consultados, sua expansividade deve ser considerada. No composto do componente construtivo não ocorreu a expansividade do material por ter utilizado granulometrias menores de 2,4mm. Outra característica que observada nos ensaios é a não retenção de água por parte deste material. Ficou demonstrado que o teor de umidade na mistura é tão importante

quanto a porcentagem de cimento adotada para se alcançar características físicas (massa específica, resistência à compressão, absorção de água e índices de vazios) a um patamar de utilização. Portanto, a escolha da granulometria correta e a relação de água-cimento na composição da mistura, são de fundamental importância para se obter êxito na utilização deste resíduo.

- No processo de industrialização de componentes desenvolvidos com escória de aciaria, pelas suas características físicas, não há como utilizar os mesmos equipamentos de vibroprensagem usados na compactação de agregados convencionais, pois trata-se de um material extremamente dúctil e abrasivo, que consome rapidamente os componentes dos equipamentos utilizados. É necessário o desenvolvimento de maquinários e equipamentos de compactação específicos para utilização deste material residual.
- O componente de alvenaria desenvolvido neste trabalho, com material residual, procurou ser o mais racionalizado possível. Esta característica incorporada ao elemento construtivo ficou comprovada na aplicação experimental piloto, pelo fato do componente de alvenaria ser intertravado na montagem das peças, proporcionou a diminuição do tempo na execução da alvenaria. Outro benefício constatado, é a não geração de resíduos durante o processo construtivo.
- Ficou constatado que para utilizar este novo material como elemento de alvenaria estrutural é obrigatório o rejuntamento das peças que compõe as paredes externas, com argamassa AC 3, para garantir o desempenho da estanqueidade da alvenaria, uma vez que esta não utiliza argamassa no assentamento das peças.
- A incorporação de resíduos industriais na fabricação de elementos construtivos, para serem utilizados na construção civil, será viável economicamente se o novo material possuir as mesmas características de desempenho dos materiais utilizados usualmente no processo construtivo. O principal fator econômico é o ganho ambiental, nem sempre computado por consumidores e empresas

que comercializam materiais para construção civil. Este objetivo foi alcançado por este trabalho, comprovando a viabilidade econômica e ambiental deste novo material, que pode ser utilizado como elemento construtivo na execução de alvenaria estrutural.

- A racionalização do novo material proposto neste trabalho possibilita inúmeras aplicações, desde a industrialização e automação do processo construtivo de alvenaria estrutural, até a sua utilização em programas sociais, como construções emergenciais, urbanização de favelas e programas de habitação popular. Em seu processo de utilização e montagem não há necessidade de utilizar mão de obra especializada, o que faz com que este processo absorva um número maior de trabalhadores e viabilize sistemas de construção em processo de mutirão.
- A importância da certificação deste material através deste trabalho, fez com que a empresa ArcelorMittal de Piracicaba, obter autorização para comercialização do resíduo escória de aciaria, que até então eram gastos milhares de tolares para manter o acondicionamento de armazenamento deste material, na planta da empresa, ficando livre deste passivo ambiental.

A viabilidade de aplicação do resíduo de escória de aciaria em elementos construtivos de alvenaria estrutural, proposto por este trabalho de pesquisa, vem atender às necessidades ambientais e econômicas da produção industrial, que passa a dar um novo destino a este material, que até então ocupava grandes espaços no interior das plataformas das aciarias, quando não, depositadas em aterros sanitários. 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 e possibilitar a melhora das características de alguns materiais, mais ainda, pode diminuir o custo da edificação, fator importante quando se avalia o déficit habitacional existente no Brasil.

10.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O desenvolvimento deste elemento construtivo, incorporando escória de aciaria, por se tratar de um tema inédito e possuir pouca literatura a respeito, merece ser mais explorado, permitindo diversas abordagens interessantes, como as sugeridas a seguir:

- Estudo para normatização e certificação do uso da escória de aciaria;
- Estudar a evolução das propriedades mecânicas do elemento construtivo escória-cimento em diferentes condições de cura e armazenamento;
- Elaborar análises estruturais de ligações de paredes em amarração direta e indireta;
- Sugerir e avaliar detalhes construtivos em pontos críticos da alvenaria, por exemplo, nas aberturas de portas e janelas, quando submetidas a esforços de compressão e flexo-compressão;
- Avaliar o desenvolvimento da microestrutura do sistema escória-cimento em função da dispersão de materiais que compõem essa mistura e suas interfaces;
- Desenvolver portas e janelas com sistema de encaixe, que trabalhe como complemento ao sistema construtivo;

- Estudo de desenvolvimento de novas peças para complementar o elemento construtivo, como: vergas e contravergas;
- Desenvolvimento de formas metálicas para componentes complementares do sistema construtivo;
- Elaboração de aplicativos e softwares para plataforma AutoCad, SketchUp, entre outras, que utilize a modulação e as peças do sistema construtivo no processo projetual e na quantificação das diferentes peças que serão utilizadas;
- Desenvolvimento de unidade robótica para utilizar as peças do elemento construtivo na automação da montagem da alvenaria estrutural;
- Comportamento da mistura que compõe o sistema construtivo escória-cimento, ao longo do tempo, com relação às suas características ambientais de solubilização e lixiviação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 555-01. Removal and reuse of hardened concrete. **ACI Materials Journal**. P. 300-325, may-jun. 2002.

AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION – AFNOR. N°X31-211: Déchets- Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. Normalisation Française. Paris, 1994. 13 p.

ALBUQUERQUE Neto, A. J. P. C. *A reciclagem de resíduos sólidos na construção civil*. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em M.B.A.). COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. 72p.

ALACERO - Asociación Latinoamericana Del Acero. Disponível em www.alacero.org consultado em 08 de julho de 2014.

ÂNGULO, S.C.; Viabilidade de agregados graúdos de resíduo de construção e demolição reciclados. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação de (mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ANGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JHON, V.M. *Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil*. In. SIMPOSIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., 2001, São Paulo. Anais... São Paulo: CT 206 – IBRACON, 2001. P. 43-56.

ANDRADE, M. L. A; *Mercado Mundial de Sucata*. Gerência Setorial de Mineração e Metalurgia - Editoração – AO2-GESIS – Novembro de 2000: (on line) Disponível na internet: www.bnds.gov.br. Acessado em 20 de agosto 2006.

ARAÚJO, M.; IDHEA - Instituto para o Desenvolvimento da Habitação Ecológica. (Artigo): (on line) Disponível na internet. www.idhea.com.br. – Acessado em 05 de maio de 2007.

IBRACON – CT-206- Meio Ambiente – Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção Civil: Materiais Reciclados e suas Aplicações, 2001, São Paulo. *Anais*. São Paulo, IBRACOM, 2001. V.I. p.43-56.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. O Brasil e a futura série ISO 14000 Rio de Janeiro, 1994. 15p.

_____. NBR 12024 – *Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro. ABNT, 1992.

_____. NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, Set 2003.

_____. NBR 15220-2, Projeto 02;135.07-001/2, Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e fator solar de elementos e componentes de edificação.

_____. NBR 15575-4 Edifícios habitacionais até cinco pavimentos - Desempenho. Abril de 2012.

_____. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, maio 2004.

_____. NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, maio 2004.

_____. NBR 05712 Blocos vazados modular de concreto. Rio de Janeiro, (1982).

_____. NBR 6136 Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, (1994).

_____. NBR 7217: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 1987 – Substituída pela NBR NM 248, Rio de Janeiro, de julho de 2003.

_____. NBR 7128/86 – Ensaio Normal de Compactação. Ensaio Proctor Normal; R. Proctor (1933)

_____. NBR 7184 Blocos de concreto simples para alvenaria: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro (1992).

_____. NBR 8492 – Tijolos – maciços de solo-cimento: determinação da resistência à compressão e a absorção de água. Métodos de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 1982.

_____. NBR 8798 – execução e controle de obras de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto. Rio de Janeiro, 1985.

_____. NBR 9776 – “Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman”. Rio de Janeiro , ABNT, 1987.

BARBOSA, K. C. Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto. 2005. 235f. Dissertação de (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

BNDES - GERÊNCIA SETORIAL DE MINERAÇÃO E METALURGIA
Maria Lúcia Amarante de Andrade

BREGATTTO, Paulo Ricardo. Coordenação Modular: breve história e aspectos importantes. In: BREGATTTO, Paulo Ricardo (Org.). Documentos de Arquitetura: Traços & Pontos de Vista. Canoas: Ed. ULBRA, 2005.

BRUNA, Paulo, J.V. **Arquitetura, Industrialização e Desenvolvimento**. 2. Ed. São Paulo. Perspectiva, 2002.

BUGALHO, A.; (2000) *Competitividade das indústrias de cimento do Brasil e da América do Norte*. In: Estudos Econômicos da Construção. Vol. 4. No 1 (7). São Paulo: Sinduscon-SP.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregado graúdo reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199f. Dissertação de (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BUTTLER, A. M.; CORREA, M. R. S.; RAMALHO, M. A. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. **Revista Concreto**. Ano XXXIII, n. 37, p 24-27, dez. – fev. 2005.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499f. Dissertação de (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CAMARGO, A. R. Industrialização da construção no Brasil. – 1975. Tese (Mestrado em Arquitetura) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1975.

CAPUZZO NETO, V. **Interação de paredes em alvenaria estrutural sob ações verticais**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CASALI, J. M. Estudo comparativo do comportamento de diferentes tipos de argamassas de assentamento para alvenaria estrutural de blocos de concreto. 2003. Dissertação de (Mestrado- Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CAVALCANTE, J. R., CHERIAF, M. *Ensaios de avaliação para ambiental de materiais com resíduo 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

CESAR, A.C.G. **Desenvolvimento de blocos confeccionados com escória proveniente da reciclagem do aço**. 2008. Tese (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CETESB – Resíduos Sólidos Industriais, Atlas/São Paulo, 1993.

COUTO, Carlos, **Introdução à Robótica Industrial**, Lisboa, Universidade Aberta, 2000.

DINIZ FILHO, S. P. Relatórios de ensaio de cimento: CP V ARI PLUS. Limeira, 2005, Período 12/02/2005 a 12/04/2005. 1p.

DRYSDALE, R. G.; HAMID, A. A.; BAKER, L. R. **Masonry structures: behavior and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 784p.

DRYSDALE, R. G.; KHATTAB, M. M. Shrinkage characteristics of concrete blocks. In: CANADIAN MASORNR Y SYMPOSIUM, 7., 1995, Hamilton, Ontario. **Proceedings...** Canada, 1995, p.950-960.

EUROSLAG – The European Association Representing Metallurgical Slag Producers and Processors. Disponível em <http://www.euroslag.com>, consultado em 08 de fevereiro de 2014.

FERREIRA, S. Produção de blocos de concreto para alvenaria: prática recomendada. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1990. (Boletim Técnico 107).

FLESCH, 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 No. 10/ Ano VI – Outubro/2004.

FRASSON JUNIOR, A. Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural. 2000. 146f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade federal de Santa Catarina – Florianópolis, 2000.

FREITAS, A. A. Estudo numérico e experimental da compressão de peças de alvenaria estrutural. Relatório técnico final do projeto de auxílio à pesquisa apresentado a FAPESP, 2006.

FRIEDMAN, Avi. **The Adaptable house: Designing homes for change**. New York, McGraw-Hill. 2001 a.

GERDAU – Relação com investidores. *Composição dos principais insumos para composição de uma tonelada de aço*.

JADOVSK, I. **Diretrizes técnicas e econômicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição**. 2005. 178f. Dissertação de (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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.

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.; CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V. *Novos mercados Para As Escórias de Alto Forno*. In: V Encontro Regional de Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica, 1995. Anais. Vitorias – ES, 1995.

JUSTE, A. E. **Estudo da resistência e da deformabilidade da alvenaria de blocos de concreto submetida a esforços de compressão**. 2001. 236f. Dissertação de (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

Instituto Aço Brasil - (antigo Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS) – Disponível em <http://www.acobrasil.org.br/>, consultado em 08 de julho de 2014.

INESFA - Instituto Nacional das Empresas de Preparação de Sucata de Ferro e Aço Disponível em - <http://www.inesfa.org.br/> consultado em 09 de junho de 2013.

LA ROVERE, H. L.; RODRIGUES, R. M. Análise do comportamento mecânico de prismas de alvenaria de blocos de concreto pelo MEF. In: JORNADAS SULAMERICANOS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 28, 1997. São Carlos. Anais... São Carlos. P 179-188.

LINS, A. H. P. (1994). *Comportamento tensão-deformação-resistência dos solos compactados não saturados*. In: 21ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Salvador. Anais. p. 160-175, set.

MADGE, Jonh. **Tomorrow's house. New Building methods, structures and materials.** London: Pilot Press. 1946.

MAHFUZ, Edson da Cunha. **Ensaio sobre a razão compositiva. Uma investigação sobre a natureza das relações entre as partes e o todo na composição arquitetônica.** Belo Horizonte. AP. Cultural. 1995.

MARCIANO, E.; KIHARA, Y. Looking green. World Cement. Abril, 1997.p.82-88.

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C.; VILELA, A. *Resíduo da indústria caureira: caracterização e potencialidade de uso de cinza de serragem cromada.* In: workshop Reciclagem e Reutilização de Resíduos como Materiais de Construção Civil, 1996, São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. P 61-68

MASUERO, A. B.; DAL MOLIN, D. C.; VILELA, A. *Emprego de escória de aciaria elétrica como adição a concretos.* CPGEC/NORIE – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. P 1-18.

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

MEDEIROS, J. S. Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto. São Paulo. 1993. 449f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Pini, 1994.

MG / ES – Sistema Infraestrutural – Arte/Cidade – PUC/SP e UFES – Disponível em http://www.pucsp.br/artecidade/mg_es/english/textos.htm consultado em 08 de julho de 2014. 20:00 hr.

MONTANER, Josep, Maria. **Sistemas Arquitetônicos Contemporâneos.** Barcelona. Gustavo Gili. 2008.

NASCIMENTO, K. A. L. **Utilização de escória proveniente da reciclagem do aço em concreto de cimento portland** - 2007. 110f. Dissertação de (Mestrado em Física e Química) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NORMATIVA – Nº 152/2007/C/E, - *Procedimentos para gerenciamento de areia de Fundação.* São Paulo, 8 de agosto de 2007.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo, Pini, 1982. 738p.

PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: *Seminário de Redução, Matérias-Primas e Resíduos na Siderurgia*, 25, 1994, Volta Redonda, RJ. Anais... Volta Redonda, 1994. p.187-199

SIMEÃO, L.; Situação alarmante. Revista Brasileira do Aço, v.64, 2003. (on-line) Disponível na internet: www.inda.org.br/revista. Acessado em 10 de outubro de 2013.

SINDINESFA – Sindicato do Comércio Atacadista de Sucata Ferrosa e Não-Ferrosa do Estado de São Paulo-SP. (on-line) Disponível na internet: www.sindinesfa.org.br. Acessado em 12 de outubro de 2013.

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

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

RAMALHO, M. A.; CORREA, M. R. S. Projeto de edifícios de alvenaria estrutural. São Paulo: Editora Pini, 1ª. Edição, 2003. 188p.

RICHARD, R. B. **A generic classification of industrialized building systems**. In: KAZI, A. S. et. Al. **Open Building manufacturing**. Core concepts and industrial requirements. Finlândia: VTT, Technical Research Centre of Finlanf, 2007, p35-48

R. PROCTOR (1933) → Ensaio Proctor Normal → NBR 7128/86 – Ensaio Normal de Compactação.

ROCHA, A. F. (1996). *Estudo experimental sobre misturas de solo-cimento para a região de Campos Novos dos Parecis. MT*. Dissertação de Mestrado. EESC USP, São Carlos.

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, EOUSP/ANTAC, 1997. P 131-136.

SICETEL; Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos. Análise do mercado do aço 2013.

SILVA, M. S. (2001). *A terra crua como alternativa sustentável para habitação social*. Escola de Engenharia de São Carlos (Dissertação de Mestrado) – Universidade de São Paulo.

SOARES, S. R. Conception et évaluation d'un système à base de connaissances pour l'élimination de déchets. França. Institut Nacional des Sciences Appliquées de Lyon. Tese de doutorado. 1994.

TANGO, C. E. Fundamentos de dosagem de concreto para blocos estruturais. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON STRUCTURAL MASONRY FOR DEVELOPING COUNTRIES, 5., 1994, Florianopolis. Anais ... Santa Catarina, 1994.

UNCTAD - United Nations Conference on Trade And Development. É a sigla em inglês para Conferência das Nações Unidas para Comércio e Desenvolvimento. Disponível em <http://unctad.org/en/Pages/Home.aspx>, consultado em 08 de maio de 2013.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SERVIÇO DE BIBLIOTECA. (1996). *Diretrizes para a elaboração de dissertação e teses na EESC-USP*. São Carlos. 2. Ed. Ver. E ampl. SVBIBL.

WILES, C. C. Solidification and stabilization technology. In: Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Edited by Harry Freeman. New York : McGraw-Hill, 1989, seccion 7.8, p. 7.85-7.101

World Steel Association.(WSA) – Disponível em www.worldsteel.org consultado em 08 de maio de 2013.

ANEXO – A

COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA ESCÓRIA DA BMP

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

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa solicitante:	BMP Siderúrgica S/A
Endereço:	Av. Marechal Castiel 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
			Escória
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
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
Silica + 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 as análises foram executadas dentro do prazo de validade de cada parâmetro segundo o Guia de Coleta e Preservação de 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 Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography

Sódio: SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method

Potássio: SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method

Nereida Ap. Bongiorno
Coordenadora Técnica
CRQ. 04409149 – 4ª Região

Data

Marcos Donizete Ceccatto
Gerente Técnico
CRQ. 04432847- 4ª Região

Data

ANEXO – B

DETERMINAÇÃO DE MASSA BRUTA, LIXIVIADO E SOLUBILIZADO DA ESCÓRIA DA BMP

**OBS: Nota-se no Boletim de Análise N° 5000882-A: o material é classificado
como Classe II – B – Inerte**

BOLETIM DE ANÁLISE N° 5000882-A
OS: 2005001418-27

DADOS REFERENTES AO CLIENTE	
<i>Empresa solicitante:</i>	BMP Siderúrgica S/A
<i>Endereço:</i>	Avenida Marechal Castelo Branco, 101 – Vila Rezende – Piracicaba / SP – CEP: 13412-901
<i>Nome do Solicitante:</i>	Sandra Nogueira

ESCÓRIA

Amostra N° 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

- **Identificação da Amostra:** Resíduo (Escória)
- **Coletor:** João Carlos - Bioagri Ambiental Ltda.
A amostragem foi realizada com base na NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos
- **Data/Hora da Coleta:** 02.02.04 / 17:10h
- **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

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 Ion 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

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 Resíduos Sólidos
- **Data/Hora da Coleta:** 02.02.04 / 17:10h
- **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 Ion Chromatography
- Sódio:** SMEWW 3111 B – Direct Air-Acetylene Flame Method
- Metais:** SMEWW 3120 B – Inductively Coupled Plasma (ICP) Method
- Mercurio:** 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 S²⁻ F – Iodometric Method
- Surfactantes:** SMEWW 5540 C – Anionic Surfactants as MBAS

Resultados Analíticos da Amostra 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 do Resíduo 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 Epóxidos	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

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

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Outros Orgânicos				
Benzeno	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Benzo(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
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

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
Mercúrio	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

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

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
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 Dieldrin	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** 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 10.004.

Lixiviado: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados na listagem N°. 7 da ABNT NBR 10.004.

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 10.004:2004.

Boletim Analítico revisado em 18.03.05

André Alex Colletti
Técnico Químico
CRQ 04447446 – 4ª Região

18/03/05
Data

Nereida Ap. Bongiorno
Responsável pelo Projeto
CRQ 04409149 – 4ª Região

18/03/05
Data

ANEXO – C

**ENSAIO COMPLETO DE COMPACTAÇÃO ESCÓRIA-
CIMENTO-CAL**

Escola de engenharia de São Carlos - USP							
Departamento de Transportes - STT							
Laboratório de estradas							
Ensaio de compactação de solos							
Identificação: Amostra		75% - Escoria				Cilindro: 12	
		16,7% - Cal				Tara: 2300 g	
		8,3% - Cimento				Voume: 1013 cm ³	
Compactação							
Determinação		1	2	3	4	5	6
Volume do cilindro	(cm ³)	1013	1013	1013	1013	1013	
Cilindro com solo úmido	(g)	4250	4340	4385	4385	4365	
Tara do cilindro	(g)	2300	2300	2300	2300	2300	
Solo úmido	(g)	1950	2040	2085	2085	2065	
ρ_w	(g/cm ³)	1,925	2,014	2,058	2,058	2,038	
ρ_d	(g/cm ³)	1,695	1,735	1,753	1,722	1,681	
Teor de umidade							
Cápsula	(g)	31	39	45	67	84	
Cápsula com solo úmido	(g)	104,29	98,50	100,36	95,74	100,13	
Cápsula com solo seco	(g)	95,42	88,63	89,75	84,59	87,88	
Água	(g)	8,87	9,87	10,61	11,15	12,25	
Tara da cápsula	(g)	30,16	27,27	28,87	27,40	30,21	
Solo seco	(g)	65,26	61,36	60,88	57,19	57,67	
Umidade	(%)	13,59	16,09	17,43	19,50	21,24	
Umidade ótima (w _{ot})		17,80 %		Massa específica aparente seca máxima (ρ_{dmax})			
				1,755 g/cm ³			
Energia: Normal				Data: 25-set-06			
Operador :							

ANEXO – D

**ENSAIO COMPLETO DE ABSORÇÃO DE AGUA DO
COMPOSTO ESCÓRIA-CIMENTO**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
LABORATÓRIO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
Fones: (0**16) 3373-9315 - (0**16) 3373-9297- FAX: (0**16) 3373-9315
<http://www.saplei.eesc.usp.br/lcc/>

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM TIJOLO DE ESCÓRIA

INTERESSADO : FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesq. e do Aperfeiçoamento Industrial

PROCEDÊNCIA DECLARADA : Obra : Pesquisa - Blocos de Escória - LCC

SOLICITANTE : Antonio Carlos Giocondo César

FORNECEDOR : Arcelor Mittal

CARACTERÍSTICAS DECLARADAS: Tijolos Maciços de Escória

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Tijolo

Amostra	Amostras	Massa Saturada	Massa Seca	Absorção Individual
(N.o)	(Tipo)	(Kg)	(Kg)	(%)
1 A	Tijolo de Escória	4386,3	3960,0	10,77
1 B		4438,5	4016,5	10,51
1 C		4447,2	4021,1	10,60

OBSERVAÇÕES

- 1) Os resultados aplicam-se às amostras fornecidas pelo solicitante do ensaio.
- 2) Todos os dados são fornecidos pelo solicitante do ensaio.

São Carlos, 10/10/2008

Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

ANEXO – E

**ENSAIO COMPLETO DE COMPRESSÃO SIMPLES EM
PEÇA DE ESCÓRIA-CIMENTO**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
 DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
 LABORATÓRIO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
 Fones: (0**16) 3373-9315 - (0**16) 3373-9297- FAX: (0**16) 3373-9315
<http://www.saplei.eesc.usp.br/lcc/>

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES EM TIJOLO MACIÇO DE ESCÓRIA

INTERESSADO : FIPAI – Fundação para o Incremento da Pesq. e do Aperfeiçoamento Industrial

PROCEDÊNCIA DECLARADA : Obra : Pesquisa - Blocos de Escória - LCC

SOLICITANTE : Antonio Carlos Giocondo César

FORNECEDOR : Arcelor Mittal

CARACTERÍSTICAS DECLARADAS: Tijolos Maciços de Escória

Cp	Dimensões Médias (mm)			Tijolo Maciço	Área de Trabalho	Data Moldagem	Data Ruptura	Idade	Carga Ruptura		Tensão Ruptura
N.o	L	A	C	(Tipo)	(mm ²)	(D/M/A)	(D/M/A)	(Dias)	TF	KN	(MPa)
01	125	153	250	Escória	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	14,36	141	4,5
02	125	152	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	12,76	125	4,0
03	125	153	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	11,28	111	3,5
04	125	157	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	11,98	117	3,8
05	125	152	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	14,82	145	4,7
06	125	153	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	13,30	130	4,2
07	125	155	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	13,46	132	4,2
08	125	154	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	13,52	133	4,2
09	125	154	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	14,46	142	4,5
10	125	152	250	"	31250	20/08/2008	17/09/2008	28	13,12	129	4,1

OBSERVAÇÕES

- 1) Os resultados aplicam-se às amostras fornecidas pelo solicitante do ensaio.
- 2) Todos os dados são fornecidos pelo solicitante do ensaio.

São Carlos, 10/10/2008

 Prof. Dr. Osny Pellegrino Ferreira

ANEXO – F

**ENSAIO COMPLETO DO LIXIVIADO E SOLUBILIZADO
DO COMPOSTO ECC.**

Ensaio Físico-Químico Para Caracterização e Classificação de Resíduos Sólidos Industriais

Índice

1 – Objetivo.....	2
2 – Metodologia de coleta e ensaios.....	2
3 – Coleta da amostra.....	2
4 – Ensaio físico-químico – extrato da lixiviação.....	3
5 – Ensaio físico-químico – extrato da solubilização.....	3
6 – Avaliação do resíduo.....	4
7 – Classificação dos resíduos.....	4

1 – Objetivo.

O objetivo do presente trabalho foi a Caracterização Físico-Química do Resíduo Sólido Industrial da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira Ltda - Piracicaba – SP para fins de Classificação quanto aos riscos à saúde e ao meio ambiente, quando de sua manipulação e disposição final.

O resíduo foi encapsulado nas proporções 1:7 e 1:10 (uma parte de cimento e sete partes de resíduo e uma parte de cimento e dez partes de resíduo).

2 – Metodologia de Coleta e Ensaios.

Coleta do resíduo sólido de acordo com a Norma NBR 10007 – Amostragem de Resíduos.

As metodologias utilizadas para lixiviação e solubilização são as descritas nas normas NBR 10005 e NBR 10006, respectivamente.

Os ensaios foram realizados de acordo com os métodos da 20ª Edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA – AWWA – WEF.

O critério de qualificação adotado foi a Norma ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos.

3 – Coleta da Amostra

Foi coletada, pelo Interessado, 01 amostra representativa do resíduo para os ensaios de lixiviação e solubilização assim identificada:

01 – Corpo de prova – 1:7.

02 – Corpo de prova – 1:10.

03 – Corpo de prova – escória calcária.

Ensaio Físico-Químico Para Caracterização e Classificação de Resíduos Sólidos Industriais

4 – Ensaio físico-químico – Extrato da Lixiviação.

Foi executado o ensaio de lixiviação do resíduo sólido conforme Norma NBR 10005. Para estes ensaios foi utilizada uma proporção de 100 gramas de amostra para 1600 mililitros de água destilada.

Agitou-se por cinco minutos e verificou-se o pH inicial.

Esta mistura foi submetida a agitação constante e ajustou-se o pH para $5,0 \pm 0,2$, quando necessário, com ácido acético 0,5 Normal após espaços de tempo de 5, 15, 30, 60 minutos e 24 horas.

Adiciona-se um volume de água destilada a cada frasco em função do volume de ácido acético adicionado para correção do pH e filtrou-se em membrana de $0,45 \mu\text{m}$, gerando assim o extrato da lixiviação.

Os resultados do Ensaio de Lixiviação e os Resultados Analíticos podem ser vistos em anexo.

5 – Ensaio Físico-Químico – Extrato da Solubilização

Foram executados os ensaios de solubilização do resíduo conforme Norma NBR 10006. Para estes ensaios foi utilizada uma proporção de 250 gramas de amostra para 1000 mililitros de água destilada.

A mistura foi agitada por cinco minutos, deixada em repouso por sete dias e filtrada por membrana de $0,45 \mu\text{m}$, gerando assim o extrato da solubilização.

Os resultados do Ensaio de Solubilização e os Resultados Analíticos podem ser vistos em anexo.

6 – Avaliação dos Resíduos

Nos ensaios efetuados no extrato da lixiviação, nenhum parâmetro ultrapassou o limite fixado na Norma NBR 10004.

Nos ensaios efetuados no extrato da solubilização, os parâmetros *Chumbo*, *Cádmio*, *Ferro Total* e *Fluoreto* ultrapassaram o limite fixado na Norma NBR 10004.

7 – Classificação do Resíduo

De acordo com as Características Físico-Químicas apresentadas, e segundo a Avaliação, este resíduo é **Classificado como:**

Classe II – Não Inerte.

SÃO CARLOS, 14 DE SETEMBRO DE 2005

P/LAB.DE SANEAMENTO-SHS-EESC-USP
JULIO CESAR TROFINO
CRQ – 04216517 – 4ª REGIÃO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Laboratório de Saneamento

INTERESSADO

COMPANHIA SIDERÚRGICA BELGO MINEIRA LTDA
PIRACICABA – SP

AMOSTRA
DATA DA COLETA
COLETADA POR

RESÍDUO SÓLIDO ENCAPSULADO
16.08.2005
INTERESSADO

ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS-NBR-10.005

ENSAIOS EFETUADOS DE ACORDO COM A 20ª EDIÇÃO DO STANDARD METHODS

PARÂMETROS		AMOSTRAS (*)		
		01	02	VMP
pH INICIAL		9,75	9,48	X
pH FINAL		4,90	5,03	X
VOLUME ÁC. ACÉTICO 0,5 N ADICIONADO	(mL)	18,0	15,0	X
TEMPO DE LIXIVIAÇÃO	(HORAS)	24	24	X
CHUMBO	(mg Pb/L)	< 0,02	< 0,02	1,0
CÁDMIO	(mg Cd/L)	< 0,0006	< 0,0006	0,5
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	< 0,005	< 0,005	5,0
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	5,0
FLUORETOS	(mg F ⁻ /L)	0,67	0,53	150,0

(*) 01 – CORPO DE PROVA – 1:7.
02 – CORPO DE PROVA – 1:10.
VMP – VALOR MÁXIMO PERMITIDO – ANEXO G LISTAGEM Nº 7 – CONCENTRAÇÃO – LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO OBTIDO NO TESTE DE LIXIVIAÇÃO (mg/L).

OS RESULTADOS APRESENTADOS NESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO, NA DATA DA COLETA INFORMADA PELO INTERESSADO.

OBS: O ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO FOI EXECUTADO SEGUNDO A NORMA NBR-10.005/1987 POR SOLICITAÇÃO DO REQUERENTE, CABENDO AO MESMO TODA E QUALQUER RESPONSABILIDADE QUANTO A CLASSIFICAÇÃO E DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO.

SÃO CARLOS, 14 DE SETEMBRO DE 2005

P/LAB. DE SANEAMENTO-SHS-EESC-USP
JULIO CESAR TROFINO
CRQ – 04216517 – 4ª REGIÃO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Hidráulica e Saneamento
Laboratório de Saneamento

INTERESSADO

COMPANHIA SIDERÚRGICA BELGO MINEIRA LTDA
PIRACICABA – SP

AMOSTRA
DATA DA COLETA
COLETADA POR

RESÍDUO SÓLIDO ENCAPSULADO
16.08.2005
INTERESSADO

ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS-NBR-10.006

ENSAIOS EFETUADOS DE ACORDO COM A 20ª EDIÇÃO DO STANDARD METHODS

PARÂMETROS		AMOSTRAS (*)			
		01	02	03	VMP
pH INICIAL		9,80	9,65	9,73	X
pH FINAL		10,43	10,41	10,53	X
ZINCO	(mg Zn/L)	< 0,002	< 0,002	< 0,002	5,0
CHUMBO	(mg Pb/L)	0,09	0,12	0,13	0,05
CÁDMIO	(mg Cd/L)	0,01	0,01	0,03	0,005
FERRO TOTAL	(mg Fe/L)	0,54	< 0,005	< 0,005	0,3
MANGANÊS	(mg Mn/L)	0,02	0,01	0,01	0,1
COBRE	(mg Cu/L)	< 0,003	0,01	< 0,003	1,0
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,05
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05
ALUMÍNIO	(mg Al/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,2
SÓDIO	(mg Na/L)	12,3	11,7	19,5	200,0
FLUORETOS	(mg F/L)	1,70	1,35	1,73	1,5
NITRATOS	(mg N/L)	4,10	5,43	10,17	10,0
CLORETOS	(mg Cl/L)	63	90	180	250,0
DUREZA TOTAL	(mg CaCO ₃ /L)	136	142	128	500,0
SULFATOS	(mg SO ₄ ²⁻ /L)	16	14	28	400,0
CIANETOS	(mg CN/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1
FENÓIS	(mg C ₆ H ₅ OH)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001

- (*) 01 – CORPO DE PROVA – 1:7.
02 – CORPO DE PROVA – 1:10.
03 – CORPO PROVA – ESCÓRIA CALCÁRIO.
VMP – VALOR MÁXIMO PERMITIDO – ANEXO H LISTAGEM Nº 8 – PADRÕES PARA O TESTE DE SOLUBILIZAÇÃO – LIMITE MÁXIMO NO EXTRATO (mg/L).

OS RESULTADOS APRESENTADOS NESTE CERTIFICADO REFEREM-SE EXCLUSIVAMENTE ÀS AMOSTRAS ENVIADAS AO LABORATÓRIO, NA DATA DA COLETA INFORMADA PELO INTERESSADO.

OBS: O ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO FOI EXECUTADO SEGUNDO A NORMA NBR-10.006/1987 POR SOLICITAÇÃO DO REQUERENTE, CABENDO AO MESMO TODA E QUALQUER RESPONSABILIDADE QUANTO A CLASSIFICAÇÃO E DISPOSIÇÃO DO RESÍDUO.

SÃO CARLOS, 14 DE SETEMBRO DE 2005

P/LAB. DE SANEAMENTO-SHS-EESC-USP
JULIO CESAR TROFINO
CRQ – 04216517 – 4ª REGIÃO

ANEXO – G

**ENSAIO COMPLETO DO SOLUBILIZADO DOS
CIMENTOS PORTLAND**

INTERESSADO**PESQUISADOR : ANTONIO CARLOS GIOCONDO CESAR**
Dep. ARQUITETURA E URBANISMO – LCC**AMOSTRAS**Novembro / 2005
COLETADA POR**RESIDUO – ESCÓRIA****CIMENTOS – CP 05, CPII-E32, CPIII-32RS**
INTERESSADO**ENSAIO DE SOLUBILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS – NBR- 10006****ENSAIOS EFETUADOS DE ACORDO COM A 20.ª EDIÇÃO DO STANDARD METHOD**

PARAMETROS		AMOSTRAS				
		CP 05	CPII-E32	CPIII-32RS	ESCORIA	VMP
ph inicial		12,58	12,45	12,48	12,46	x
ph final		12,67	12,78	12,54	12,34	x
ZINCO	(mg Zn/L)	0,22	0,20	0,01	0,08	5,0
CHUMBO	(mg Pb/L)	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,05
CADMIO	(mg Cd/L)	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0006	0,005
FERRO TOTAL	(mg Fé/L)	0,15	0,18	0,09	0,15	0,3
MANGANÊS	(mg Mn/L)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,1
COBRE	(mg Cu/L)	0,01	< 0,003	0,01	0,02	1,0
CROMO TOTAL	(mg Cr/L)	0,29	0,28	0,08	0,04	0,05
PRATA	(mg Ag/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,05
ALUMÍNIO	(mg Al/L)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,52	0,2
SÓDIO	(mg Na/L)	603,3	235,30	293,8	28,0	200,0
FLUORETOS	(mg F/L)	1,20	1,83	1,80	2,60	1,5
NITRATOS	(mg N/L)	0,46	0,51	13,20	15,48	10,0
CLORETOS	(mg Cr/L)	700	300	2300	2900	250
DUREZA TOTAL	(mg CaCo/L)	1358	1455	2328	1698	500
SULFATOS	(mg SO ₄ /L)	< 1	< 1	1800	< 1	400
CIANETOS	(mg CN/L)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,1
FENÓIS	(mg C ₄ H ₂ OH)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,060	0,001

DATA: NOVEMBRO/2005

- SOLUBILIZAÇÃO -

INTERESSADO: ANTONIO CARLOS GIOCONDO – SAP – USP – SÃO CARLOS – SP.

ENSAIOS → AMOSTRAS ↓	Zn (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Ag (mg/L)	Al (mg/L)	Na (mg/L)
01 – CP 05	0,22	< 0,02	< 0,0006	0,15	0,02	0,01	0,29	< 0,001	< 0,01	603,3
02 – CP II – E 32	0,20	< 0,02	< 0,0006	0,18	0,02	< 0,003	0,28	< 0,001	< 0,01	235,3
03 – CP III – 32 RS	0,01	< 0,02	< 0,0006	0,09	0,01	0,01	0,08	< 0,001	< 0,01	293,8
04 – ESCÓRIA	0,08	< 0,02	< 0,0006	0,15	0,01	0,02	0,04	< 0,001	0,52	28,0

DATA: NOVEMBRO/2005

- SOLUBILIZAÇÃO -

INTERESSADO: ANTONIO CARLOS GIOCONDO – SAP – USP – SÃO CARLOS – SP.

ENSAIOS → AMOSTRAS ↓	Cianeto	Fenol	Fluoreto	Nitrato	Cloreto	Dureza Total	Sulfato	pH Inicial	pH Final
01 – CP 05	< 0,001	< 0,001	1,20	0,46	700	1358	< 1	12,58	12,67
02 – CP II – E 32	< 0,001	< 0,001	1,83	0,51	300	1455	< 1	12,45	12,78
03 – CP III – 32 RS	< 0,001	< 0,001	1,80	13,20	2300	2328	1800	12,48	12,54
04 – ESCÓRIA	< 0,001	0,060	2,60	15,48	2900	1698	< 1	12,46	12,34

ANEXO – H

**DETERMINAÇÃO DE MASSA BRUTA, LIXIVIADO E
SOLUBILIZADO DO COMPOSTO ECC**

Traço Definitivo

BOLETIM DE ANÁLISE Nº 29327/2006-0 A
Processo Comercial: 3221/2006-1

DADOS REFERENTES AO CLIENTE	
<i>Empresa solicitante:</i>	Belgo Siderurgia S.A.
<i>Endereço:</i>	Avenida Marechal Castelo Branco, 101 – Vila Rezende - Piracicaba / SP – CEP: 13.412-901
<i>Nome do Solicitante:</i>	Sandra Nogueira

RESÍDUO TIJOLO CONCRETO + CAL (CORPO DE PROVA)

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

09.06.2006

Data de Conclusão

25.07.06

Informações Gerais

- **Identificação da Amostra:** Resíduo (Tijolo Concreto + Cal – Corpo de Prova)
- **Coletor:** Interessado
- **Data/Hora da Coleta:** 08.06.06
- **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

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 Ion 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 S²⁻ F – Iodometric Method
- Surfactantes:** SMEWW 5540 C – Anionic Surfactants as MBAS

Resultados Analíticos da Amostra de Resíduo de Tijolo e Concreto + Cal – Corpo de Prova

Tabela 1. Determinações sobre a Massa Bruta.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Umidade	% p/p	0,1	2,00	
Inflamabilidade ^a				
Ponto de Fulgor	°C		> 60	60 ^d
Corrosividade ^b				
pH (suspensão a 50%)			11,6	2,0 – 12,5
Reatividade ^c				Não reativo
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,2	< 0,2	250
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1,0	< 1,0	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 do Resíduo 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	98,0	
pH Final			7,96	
Solução de Extração			2	
Tempo Total de Lixiviação (h)			18	18 ± 2
Inorgânicos				
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Bário	mg/L	0,1	0,337	70,0
Cádmio	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo Total	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	4,2	150,0
Mercurio	mg/L	0,001	< 0,001	0,1
Prata	mg/L	0,005	< 0,005	5,0
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	1,0
Pesticidas				
Aldrin + Dieldrin	mg/L	0,003	< 0,003	0,003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,003	< 0,003	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 Epóxidos	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

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

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Outros Orgânicos				
Benzeno	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,01	< 0,01	0,07
Cloreto de Vinila	mg/L	0,01	< 0,01	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,1	< 0,1	100
Clorofórmio	mg/L	0,5	< 0,5	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
Metiltilcetona	mg/L	5,0	< 5,0	200,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	2,0
Piridina	mg/L	5,0	< 5,0	5,0
Tetracloreto 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

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

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
pH Final			12,69	
Inorgânicos				
Alumínio	mg/L	0,05	1,0	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,1	0,43	0,7
Cádmio	mg/L	0,005	< 0,005	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,025	< 0,025	0,07
Cloreto	mg/L	1,0	11,2	250,0
Cobre	mg/L	0,05	< 0,05	2,0
Cromo Total	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Fenóis Totais	mg/L	0,01	0,04	0,01
Ferro	mg/L	0,05	< 0,05	0,3
Fluoreto	mg/L	0,5	0,7	1,5
Manganês	mg/L	0,01	< 0,01	0,1
Mercúrio	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,5	< 0,5	10,0
Prata	mg/L	0,005	< 0,005	0,05
Selênio	mg/L	0,008	< 0,008	0,01
Sódio	mg/L	0,5	20,9	200,0

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

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Sulfato (como SO ₄)	mg/L	5	< 5	250,0
Surfactantes	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,01	0,037	5,0
Orgânicas				
Aldrin e Dieldrin	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**: 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° 29327/2006.

Nota 2: **Interpretação dos resultados:**

Solubilizado: Os parâmetros Alumínio e Índice de Fenóis ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados no Anexo G. da ABNT NBR 10.004.

Lixiviado: Os parâmetros não ultrapassaram os Limites Máximos Permitidos. Limites baseados no Anexo F. da ABNT NBR 10.004.

Em relação aos parâmetros monitorados, a amostra de resíduo identificada como "Resíduo de Tijolo e Concreto + Cal – Corpo de Prova.", deve ser considerado como de Classe II A – Não 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 10.004:2004.

Boletim Analítico Revisado em 07.08.06

Luci C. Gheleri Andrietta
MSc. Luci C. Gheleri Andrietta
Química
CRQ 04253374 – 4ª Região

07/08/06
Data

Nereida Ap. Bongiorno
Nereida Ap. Bongiorno
Coordenadora do Projeto
CRQ 04409149 – 4ª Região

07/08/06
Data

ANEXO – I

**ANÁLISE COMPLETA DOS PARÂMETROS DE
MICROTOX NO COMPOSTO ECC**

BOLETIM DE ANÁLISE Nº 29328/2006-0

Processo Comercial Nº 3221/2006-1

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa solicitante:	Belgo Siderurgia S/A.
Endereço:	Avenida Marechal Castelo Branco, 101 - - Vila Rezende - Piracicaba - SP - CEP: 13.412-901
Nome do Solicitante:	Sandra Nogueira

DADOS REFERENTES A AMOSTRA

Identificação do Cliente:	Tijolo Concreto + Cal (Corpo de Prova)		
Amostra Rotulada como:	Resíduo		
Coletor:	Interessado	Data da coleta:	8/6/2006 09:00:00
Data da entrada no laboratório:	09/06/2006	Data de Elaboração do BA:	10/08/2006

RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	98,2
Microtox			Resultado em Anexo

Notas

LQ = Limite de Quantificação.

Abrangência

O(s) resultado(s) referem-se somente à(s) amostra(s) analisada(s).

Este Boletim de Análise só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

Data de realização das análises

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

Plano de Amostragem

Plano de amostragem de responsabilidade do interessado.

Trabalhos Subcontratados

As análises dos parâmetros Microtox foram executadas em laboratório subcontratado autorizados pela GQL – Bioagri Ambiental.

Não conformidades, desvios e observações

Resultado de Toxicidade no Boletim Nº EAMM/43554/2006 da CETESB em anexo.

Referências Metodológicas

Sólidos Totais: SMEWW 2540 - B Total Solids Dried at 103 - 105 °C

Revisores

Marcos Ceccatto

Nereida Aparecida Bongiorno

Marcos Donizete Ceccatto
Coordenador de Projeto
CRQ 04432847 – 4ª Região

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
EAMM - SETOR DE ANÁLISES TOXICOLÓGICAS
BOLETIM DE ANÁLISES

Pág: 1/ 2

N.º EAMM/43554/2006

DADOS GERAIS

Amostra: 0630394
OS: 71100100
Programa: VENDA-ANÁLISE DE LABORATÓRIO
SS/Processo: 682/2006/APPC
Emissão do Boletim: 07/07/2006

COM CAL

DADOS DO CLIENTE

Nome: BIOAGRI AMBIENTAL LTDA
Endereço: R. AUJOVIL MARTINI, 201
Município: PIRACICABA Estado: SP

DADOS DA COLETA

Descrição: 96719 - Tijolo concreto + corpo de prova.
Coletor (es): Interessado
Data da coleta: 08/06/2006 Hora da coleta: 09:00
Tipo: material sólido

DADOS DO RECEBIMENTO DA AMOSTRA NO LABORATÓRIO

Condições da amostra: Conforme
Data/hora do recebimento: 14/06/2006 16:11

RESULTADOS ANALÍTICOS

Teste Toxicidade Aguda-*Vibrio fischeri*

	Resultado	Unidade	Data do ensaio	Hora do ensaio
CE20, 15 min (pH corrigido)	N.T. (---)	%	22/06/2006	10:05
CE50, 15 min Controle Positivo	3,49 (2,30 - 5,29)	mg/L	-	-

LEGENDAS

CE20 15 min: concentração efetiva da amostra que causa 20% de redução na quantidade de luz emitida por *Vibrio fischeri* a 15 °C, após 15 minutos de exposição.
CE50 15 min: concentração efetiva da amostra que causa 50% de redução na quantidade de luz emitida por *Vibrio fischeri* a 15 °C, após 15 minutos de exposição.
N.T. : Não tóxica.

OBSERVAÇÕES

O pH do solubilizado da amostra analisada foi alterado de 11,8 para 6,5 utilizando-se uma solução de HCl 1N.

CONCLUSÕES

O solubilizado da amostra analisada não apresentou efeito tóxico agudo frente a cultura de *Vibrio fischeri*.

MÉTODOS

Análise de toxicidade segundo SQ PR/LB-018 - Bioensaio de Toxicidade Aguda com *Vibrio fischeri* em amostras aquosas - Sistema Microtox
Solubilização aquosa segundo EPA - USA Permit Guidance Manual on Hazardous Waste Land Treatment Demonstration (1986).

NOTAS

Concentração máxima da amostra testada: 81,9%.
Controle positivo: Solução de ZnSO₄.7H₂O 100 mg/L.

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração

Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada

Atendimento ao cliente: fone: 11-3030 7065, fax: 11-3030 6103 e-mail: apdq@cetesb.sp.gov.br

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Sede: Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - CEP 05459-900 - São Paulo - SP - Tel.: (0xx11) 3030-6000, Fax: (0xx11) 3030-6402 - Telex.: 1183053 - C.N.P.J. n.º 43.776.491/0001 - 70 - Insc. Est. n.º 109.091.375-118 - Insc. Munic. n.º 8.030.313-7 - Site.: www.cetesb.sp.gov.br

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
EAMM - SETOR DE ANÁLISES TOXICOLÓGICAS
BOLETIM DE ANÁLISES

Pág

N.º EAMM/43554/2006

DADOS GERAIS

Amostra: 0630394
OS: 71100100
Programa: VENDA-ANÁLISE DE LABORATÓRIO
SS/Processo: 682/2006/APPC
Emissão do Boletim: 07/07/2006

Gisela de Aragão Umbuzeiro
Gerente da Divisão de Toxicologia,
Genotoxicidade e Microbiologia Ambiental
Reg. 01 4491-0 - CRB 02.110/01-D

GILSON ALVES QUINAGLIA
Químico
Registro CETESB: 4486-5
CRQ:04220481

Este boletim de análises só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração

Os resultados desta análise referem-se tão somente à amostra encaminhada

Atendimento ao cliente: fone: 11-3030 7065, fax: 11-3030 6103 e-mail: apdq@cetesb.sp.gov.br

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Sede: Av. Prof. Frederico Hermann Jr., 345 - CEP 05459-900 - São Paulo - SP - Tel.: (0xx11) 3030-
Fax: (0xx11) 3030 - 6402 - Telex.: 1183053 - C.N.P.J. n.º 43.776.491/0001 - 70 - Insc. Est. n.º 109.091.375-118 - Insc. Munic. n.º 8.030.313-7 - Site.: www.cetesb.sp.gov.br

ANEXO – J

**VIABILIDADE AMBIENTAL CETESB PARA
FABRICAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DAS PEÇAS
ESCORIA-CIMENTO**

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

cr-356/2010/LJP

Piracicaba, 18 de agosto de 2010.

À
ARCELORMITTAL BRASIL S/A
PIRACICABA - SP

Referência: Proc. nº 21/01399/08 (**favor citar esta referência**)

Prezados Senhores,

Vimos por meio desta encaminhar cópia da Informação Técnica nº 050/10/TACR que trata da manifestação da CETESB sobre a solicitação de parecer técnico sobre o assunto em referência.

Após avaliação das informações apresentadas, entendeu-se que o resíduo denominado escória de aciaria gerado pela ARCELORMITTAL Piracicaba, **apresenta viabilidade ambiental para ser utilizado na fabricação de artefatos de concreto.**

Ressaltamos que a fabricação do material acima citado, depende licenciamento junto à CETESB, Agência Ambiental de Piracicaba.

Atenciosamente,

José Ferreira Assis

CREA 0682382291 - Reg. 21-3002-0

ANEXO – K

ENSAIO DE PRISMA PEÇAS DE ESCÓRIA-CIMENTO

ANEXO – L

**ENSAIO DE PRISMA EM MINI-PAREDES DE
COMPOSTO ESCÓRIA-CIMENTO**

ANEXO – M

**MEMORIAL DESCRITIVO CASA MODELO E PROJETO
COMPLÉTO**

ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO CASA MODELO

Os colaboradores que participam do projeto são:

Consórcio PCJ, Belgo-Mineira de Piracicaba, USP, CPFL, Amanco Brasil Ltda., Unilever Brasil, Reciplac, etc.

A especificação do projeto da casa modelo será conforme memorial descritivo, sujeito a alterações, como segue:

1 - Serviços Iniciais:

Constarão de limpeza do terreno, terraplenagem e montagem do canteiro de obras;

2 - Fundação:

Será feita sondagem no solo para definição da profundidade das brocas; em seguida serão executadas as sapatas e vigas baldrame, conforme indicado no projeto executivo de fundação. Os serviços devem ser executados de acordo com as normas técnicas apropriadas;

3 - Estrutura:

Será em alvenaria estrutural com blocos de escória 4mpa, espessura da parede de $\frac{1}{2}$ =12,50cm e parede de 1= 25,00cm. Serão executados grautes com fero $\frac{1}{4}$ " no interior dos blocos indicados no projeto de execução. O mezanino será em estrutura metálica, conforme indicação no projeto arquitetônico.

4 - Alvenaria:

A alvenaria será executada com blocos de escória 4mpa, com espessura da parede de $\frac{1}{2}$ =12,50cm e parede de 1=25,0cm, assentados a seco sem argamassa, somente encaixados.

Obs.: Os blocos serão doados pela ArcelorMittal e pelo IAU – USP;

5 - Lajes:

Será do tipo pré-fabricada, com lajotas em cerâmica e capa de concreto esp.=5cm, somente nos dormitórios e banheiros. O acabamento final na parte inferior da laje será com gesso (e=2 cm) desempenado para receber 2 (duas) demãos de látex;

6 - Telhado:

O telhado será executado com estrutura metálica, telhas de material reciclado nas dimensões de 0,90m x 2,20m, sobreposição de 15cm a 20cm, fixadas sobre a estrutura metálica de acordo com projeto de execução. A estrutura metálica do telhado deverá receber uma proteção anticorrosiva e pintura na cor preta fosca. Na área externa, as vigotas e telhas serão aparentes, sendo que na parte interna será revestida com forro de PVC branco e manta térmica.

Obs.: As telhas serão doadas pela **Unilever**;

7 - Pisos Internos:

O piso interno será de cerâmica 40cm x 40cm do tipo porcelanato, na área do *hall*, dormitórios, salão, estar, cozinha, wc didático e parte do mezanino; os wcs funcionais terão piso cerâmico antiderrapante;

8 - Pisos Externos:

O piso da área externa será de concreto estampado nas cores ocre e branco;

9- Revestimento:

O revestimento de azulejo nos banheiros, cozinha e área de serviço será de cerâmica na dimensão 20cmx20cm de cor branca, com arremate de faixa 10cmx15cm até a altura de 1,50m, sendo o restante da parede revestido com gesso (e=2cm). As paredes internas dos dormitórios serão revestidas com gesso (e =2 cm) desempenado e as paredes externas com tijolo aparente e textura;

10 - Pintura:

Tinta látex PVA na cor branca e Marrocos na fachada, aplicada em duas demãos; na parte interna, tinta látex na cor branca e palha nas paredes, forros de laje na cor branca, aplicada em duas demãos. As tintas das ferragens e estrutura metálica serão esmalte sintético na cor preto fosco e a caixilharia esmalte sintético na cor branco acetinado;

11 - Caixilharia:

As janelas e portas dos dormitórios serão de madeira imbuia para verniz, assim como as portas dos banheiros; as janelas de cozinha e banheiros didáticos terão batentes em madeira com vidros temperados e com abertura do tipo basculante, variando dimensões e modelos conforme descrito em projeto. As fachadas terão detalhes em estrutura metálica e vidro temperado, conforme o projeto e as portas de entradas serão em chapas metálicas. As janelas de ventilação localizadas na parte superior do telhado serão de tipo veneziano em acrílico branco leitoso, nas dimensões indicadas no projeto;

12 - Fechaduras:

Em todas as portas, dormitórios, banheiros e portas de entrada, as fechaduras serão da marca Arouca ou Papaiz, ambas cromadas;

13- Vidros:

O vidro dos dormitórios será transparente com espessura de 3mm, e os vidros restantes serão temperados na cor bronze com espessura de 8mm, nas dimensões descritas no projeto;

14 - Instalação Hidráulica e Esgoto:

Todo o sistema de água fria, águas pluviais, esgoto primário e secundário serão executados com tubos e conexões de PVC da marca Amanco, nas dimensões especificadas no projeto hidráulico, em conformidade com as normas da ABNT.

Os pontos de água fria serão os seguintes:

- **Entrada de água:** com hidrômetro individual, padrão da concessionária local;
- **Jardim interno:** dois pontos de torneira para limpeza externa e irrigação de jardim;
- **Banheiros funcionais:** quatro pontos de água fria e quente para lavatórios, dois ponto para as bacias com caixa acoplada e dois pontos para ducha higiênica em cada banheiro, sendo um masculino e outro feminino;
- **Banheiro didático:** seis pontos de água nos lavatórios, sendo um ponto de água quente e cinco de água fria; dois pontos de água para bacias sanitárias, sendo um para válvula hidra e um para caixa acoplada, além de um ponto para ducha higiênica e três pontos de água para chuveiro, sendo um de água quente e dois de água fria;
- **Cozinha:** três pontos de água para pia de cozinha, sendo um de água quente e dois de água fria;
- **Lavanderia:** dois pontos de água fria, sendo um para o tange e outro para a máquina de lavar roupas;
- **Casa de máquinas:** o sistema hidráulico terá uma caixa d'água de 1000L e um sistema de aquecedor solar composto por 4 placas de 1,20mx2,00m e um boiler de 500L.

Obs.: Por se tratar de uma casa ecológica, será executado um sistema de cisterna para captação e armazenamento de água de chuva, o qual irá abastecer uma caixa d'água de 1000L para redistribuição desta água. Outro dispositivo hidráulico será o sistema de tratamento de esgoto, que tratará o esgoto doméstico e o conduzirá para irrigação do viveiro de plantas, conforme projeto de execução.

Os tubos e conexões, assim como as caixas d'água e cisternas, serão doadas pela **Amanco**;

15 – Louças e Metais

As louças serão na cor branca e os metais serão cromados; nas bancadas de cozinha bica móvel e fixa nos lavatórios, bancadas de granito cinza andorinha, medidas especificadas em projeto-executivo;

- **Banheiros funcionais:** duas bacias de louça com caixa acoplada na cor branca, duas duchas higiênicas cromadas e três cubas de louça na cor branca fixadas na bancada do lavatório, que será em granito cinza andorinha. O lavatório terá três torneiras cromadas com misturador para água quente e fria;
- **Banheiro didático:** terá uma bancada em granito cinza andorinha, com três cubas de louça branca e três torneiras, uma com misturador água quente e água fria, outra somente com água fria, e outra com sensor de movimento que controla o abrir e fechar da água;
- **Cozinha:** pia com bancada de granito cinza andorinha, nas dimensões de acordo com projeto; cuba dupla em inox e duas torneiras com misturador água quente e fria, ambas com bica móvel;
- **Lavanderia:** tanque de louça com coluna na cor branca, torneiras cromadas para máquina de lavar roupa e tanque;
- **Área externa:** terá duas torneiras para irrigação de jardim e limpeza.

Obs.: Por se tratar de uma casa ecológica e didática, será executado um sistema de acrílico transparente com graduação numérica para medir o consumo de água nos pontos hidráulicos do banheiro didático, na cozinha e na área de serviço.

17 - Instalações Elétricas:

Serão executadas de acordo com a concessionária local, segundo as normas técnicas. As instalações elétricas serão descritas a seguir, de acordo com o projeto elétrico:

- **Fachadas:** constarão nas fachadas frontais dois pontos elétricos para tomadas 110V e 220V, além de dois pontos para arandelas de parede e um ponto para arandela de teto;

- **Hall de exposição:** constarão de cinco pontos de tomadas 110V, dois pontos para telefone (internet), um ponto para luminária de teto, caixa de interruptores e ponto para medidor de energia no ambiente;
- **Salão de painéis:** constarão de quatro pontos de tomadas 110V, caixa de distribuição com capacidade para doze disjuntores, nove pontos para iluminação embutida dicróica e incandescente, além de seis pontos para iluminação fluorescente; no jardim interno 3 pontos para iluminação de jardim, além de interruptores do próprio ambiente e dos ambientes de acesso. Constarão também os medidores de energia do próprio ambiente como os dos ambientes de acesso.
- **Dormitórios:** em cada dormitório haverá quatro pontos de tomadas 110V, um ponto de telefone (internet), um ponto de TV, um ponto de iluminação incandescente no teto e caixa de interruptores, além do medidor de energia do ambiente;
- **Estar:** constarão quatro pontos de tomadas 110V, um ponto de TV, ponto de iluminação incandescente no teto e caixa de interruptores, além do medidor de energia do ambiente;
- **Cozinha:** constarão cinco pontos de tomadas, sendo três 110V e duas 220V, ponto de iluminação incandescente no teto e caixa de interruptores, além do medidor de energia do ambiente;
- **Área de serviço:** constarão três pontos de tomada 110V, ponto de iluminação incandescente no teto e caixa de interruptores, além do medidor de energia do ambiente;
- **Banheiro didático:** constarão três tomadas, sendo uma 110V e duas 220V, ponto de iluminação incandescente no teto caixa de interruptores, além do medidor de energia do ambiente;
- **Banheiro funcional:** constarão dois pontos de tomadas 110V, ponto de iluminação incandescente no teto, ponto de iluminação incandescente de parede e caixa de interruptores em cada banheiro;
- **Mezanino** constarão seis pontos de tomadas 110V, seis pontos de iluminação incandescente, três pontos de iluminação fluorescente e caixa de interruptores;
- **Casa de máquinas** contarão quatro pontos de tomadas, sendo duas 110V e duas 220V, um ponto de iluminação incandescente no teto, caixa de interruptores e caixa para seis disjuntores.

Obs.: Por se tratar de uma casa ecológica e didática, em todos os ambientes haverá um medidor de consumo de energia, com exceção da casa de máquinas, mezanino, banheiro funcional e fachadas.