



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Diego Haltiery dos Santos

Análise de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria
para uso em alvenaria modular

Ouro Preto, 2013

Diego Haldiery dos Santos

Análise de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria
para uso em alvenaria modular

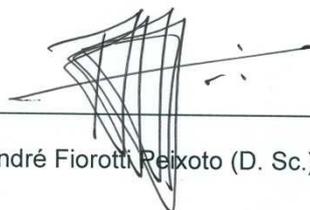
Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade Federal
de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto, 2013

Análise de blocos de concreto produzidos com escória de aciaria
para uso em alvenaria

Monografia de conclusão de curso para obtenção do Grau de Engenheiro Civil
na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em maio de
2013, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto (D. Sc.) – Orientador – UFOP



Prof.(a) Arlene Maria Sarmanho Freitas (D.Sc.) – UFOP



Prof. Geraldo Donizetti de Paula (D.Sc.) – UFOP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me ajudar a trilhar este caminho, a superar todas as dificuldades e colocar as pessoas certas que me auxiliaram para que fosse possível concluir esta etapa em minha vida.

Agradeço imensamente aos meus pais, Nirton e Edna, que não mediram esforços para ver o meu sonho de me tornar engenheiro sendo concluído. Aos meus irmãos, Brunno e Pricila, por colocar um pouco mais de juízo em minha cabeça com seus conselhos.

Agradeço a Thaís, minha namorada, pela paciência, incentivo e compreensão em todos os dias que dediquei minha atenção à monografia.

Agradeço aos professores e pesquisadores relacionados a este projeto por todas as colaborações prestadas sejam com equipamentos, orientações, conselhos ou ensinamentos bem como à Universidade, seus professores e funcionários.

Agradeço ao Grupo de Pesquisas em Resíduos Sólidos Industriais (RECICLOS) que proporcionou imensurável aprendizado. Aos seus membros por todo apoio nos ensaios e desenvolvimento da pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS
RESUMO.....
ABSTRACT.....
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivo Geral	14
1.3 Objetivos específicos:.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduos sólidos industriais.....	15
2.2 Escória de aciaria	16
2.2.1 Expansibilidade da escória de aciaria.....	18
2.2.2 Beneficiamento das escórias.....	20
2.2.3 Estabilização das escórias	21
2.2.4 Utilização das escórias	21
2.3 Agregados.....	23
2.3.1 Características dos agregados	24
2.4 Cimento Portland.....	26
2.4.1 Hidratação do cimento.....	27
2.4.2 Tipos de cimento	27
2.5 Blocos de concreto para alvenaria	28
3 METODOLOGIA E MATERIAIS CONSTITUINTES.....	30
3.1 Caracterização dos materiais	30
3.1.1 Cimento Portland.....	30
3.1.2 Análise químico-ambiental.....	30
3.1.3 Agregados artificiais	31
3.1.4 Determinação do teor de constituintes metálicos ferrosos	31
3.1.5 Agregados naturais.....	33
3.1.6 Análise granulométrica	33
3.1.7 Determinação do teor de umidade.....	34
3.1.8 Determinação do teor de material pulverulento	35
3.1.9 Determinação da massa específica.....	36

3.1.10	Determinação da massa unitária	38
3.1.11	Inchamento do agregado miúdo	39
3.2	Blocos de concreto para alvenaria modular	41
3.2.1	Dosagem do traço para os blocos modulares	41
3.2.2	Moldagem e cura dos elementos para alvenaria	41
3.2.3	Análise dimensional dos blocos.....	42
3.2.4	Teor de umidade.....	43
3.2.5	Absorção de água.....	43
3.2.6	Expansibilidade	44
3.2.7	Determinação da resistência à compressão.....	46
3.2.8	Análise da durabilidade dos blocos de concreto produzidos	47
3.2.9	Preparação da solução.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Análise dos agregados	50
4.1.1	Análise químico-ambiental da escória de aciaria.....	50
4.1.2	Teor de metálicos da escória de aciaria	51
4.1.3	Análise granulométrica dos agregados.....	52
4.1.4	Teor de Umidade	54
4.1.5	Teor de material pulverulento	54
4.1.6	Massa específica	55
4.1.7	Massa unitária	55
4.1.8	Inchamento.....	56
4.2	Análise dos blocos	57
4.2.1	Análise dimensional.....	57
4.2.2	Teor de umidade e Absorção de água.....	58
4.2.3	Expansibilidade	59
4.2.4	Resistência à compressão dos blocos.....	59
4.2.5	Durabilidade	61
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65
	ANEXO	69
	APÊNDICES	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo simplificado de produção do aço	16
Figura 2.2: Processo simplificado do beneficiamento da escória de aciaria	20
Figura 2.3: Limites granulométricos para os agregados miúdos	24
Figura 2.4: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos	24
Figura 2.5: Blocos de concreto modular	29
Figura 3.1 : Agregados miúdos e graúdos produzidos com escória de aciaria.	31
Figura 3.2: : Ensaio de determinação do teor metálico da escória.....	32
Figura 3.3: Agregados miúdos e graúdos provenientes de materiais naturais.....	33
Figura 3.4: Análise granulométrica dos agregados miúdos.....	34
Figura 3.5: Análise granulométrica dos agregados graúdos	34
Figura 3.6: Processo para a determinação do teor de umidade dos agregados	35
Figura 3.7: Ensaio para o teor de material pulverulento	36
Figura 3.8: Determinação da massa específica do agregado miúdo de escória:	37
Figura 3.9: Determinação da massa específica do agregado graúdo	38
Figura 3.10: Determinação da massa unitária dos agregados	39
Figura 3.11: Determinação do teor de umidade para cada adição de água.....	40
Figura 3.12: Curva de inchamento do agregado miúdo	40
Figura 3.13: Blocos de concreto fabricados	42
Figura 3.14: Análise dimensional dos blocos	42
Figura 3.15: Determinação de umidade dos blocos	43
Figura 3.16: Determinação da absorção de água nos blocos	44
Figura 3.17: Determinação da expansibilidade dos blocos de concreto.....	45
Figura 3.18: Determinação da resistência a compressão dos blocos	46
Figura 3.19: Corpo de prova padrão	47
Figura 3.20: Corpo de prova adaptado.....	47
Figura 3.21: Recipiente e suportes para o ataque químico	48
Figura 3.22: Produção dos corpos de prova a partir do corte dos blocos estruturais	49
Figura 3.23: Destilação da água e análise do PH da solução	50
Figura 4.1: Bloco de concreto produzido com escória de aciaria	51
Figura 4.2: Teores de metálicos presente na escória de aciaria elétrica.....	51
Figura 4.3: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	52
Figura 4.4: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos	53

Figura 4.5: Teor de umidade dos agregados.....	54
Figura 4.6: Teor de material pulverulento.....	55
Figura 4.7: Massa específica dos agregados	55
Figura 4.8: Massa unitária dos agregados	56
Figura 4.9: Curva de inchamento dos agregados miúdos	56
Figura 4.10: Análise dimensional dos blocos modular	57
Figura 4.11: Análise da espessura dos blocos estruturais	58
Figura 4.12: Teor de umidade e absorção de água dos blocos.....	58
Figura 4.13: Expansibilidade dos blocos modulares	59
Figura 4.14: Resistência à compressão dos blocos	60
Figura 4.15: Resistência característica dos blocos	61
Figura 4.16: Expansibilidade média do comprimento.....	61
Figura 4.17: Expansibilidade média da massa	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos resíduos sólidos.....	15
Tabela 2.2: Composição da escória de aciara elétrica e LD	18
Tabela 2.3: Parâmetros que influenciam na expansão das escórias	19
Tabela 2.4: Utilização da escória de aciaria.....	22
Tabela 2.5: Influência dos agregados nas propriedades dos concreto	23
Tabela 2.6: Matéria prima para produção do Cimento Portland.....	26
Tabela 2.7: Composição dos cimentos Portland	28
Tabela 2.8: Dimensões padronizada dos blocos.....	29
Tabela 3.1: Características do cimento CPV.....	30
Tabela 3.2: Traço dos blocos produzidos.....	41
Tabela 4.1: Parâmetro fora dos limites para a solubilização	50
Tabela 4.2: Análise granulométrica dos agregados miúdos.....	52
Tabela 4.3: Análise granulométrica dos agregados graúdos	53
Tabela 4.4: Classificação dos blocos	60

RESUMO

O setor da construção civil é responsável por um consumo elevado de recursos naturais não renováveis. O crescimento acelerado do mercado da construção civil impacta diretamente no aumento da demanda desses recursos necessários à construção, bem como no aumento de seus custos e na redução de suas reservas. Em face desses dados e da posição da sociedade moderna que está cada vez mais exigente e atenta aos temas relacionados à sustentabilidade, faz-se necessário a busca por melhores soluções ambientais e sociais. Neste contexto, o papel da indústria siderúrgica é relevante, visto que o processo de transformação do aço é responsável pela geração de um grande volume de resíduos sólidos que não possuem destinação adequada. Deste modo, propõe-se neste estudo um método de produção mais limpo que contribua com a preservação dos insumos provenientes de recursos não renováveis a partir da fabricação de blocos de concreto com resíduos sólidos da indústria siderúrgica: escória de aciaria. O comportamento dos blocos de concreto, confeccionados com agregados naturais e agregados de escória de aciaria, foram avaliados e comparados quanto às requisições das normas brasileiras. Os resultados demonstraram que os blocos de concreto fabricados com escória de aciaria podem ser empregados em alvenaria, constituindo uma oportunidade para o desenvolvimento e emprego de novos materiais e produtos de base tecnológica.

Palavras chave: concreto; blocos estruturais; escória de aciaria; siderurgia; sustentabilidade.

ABSTRACT

The section of civil construction is responsible for a high consumption of not renewable natural resources. The rapid growth of the civil construction market has a direct impact on increasing demand for these resources required for construction, as well as increasing their costs and reducing their reserves. In view of these data and the position of modern society that is increasingly demanding and attentive to issues related to sustainability, it is necessary a search for better environmental and social solutions. In this context, the role of the steel industry is important, since the transformation process of the steel is responsible for the generation of a large volume of solid waste lacking appropriate disposal. Thus, this study proposes a method of producing cleaner that contributes to the preservation of inputs from not renewable resources from the manufacture of concrete blocks with solid waste in the steel industry: steel slag. The behavior of concrete blocks, made with natural aggregates and steel slag aggregates, were evaluated and compared in relation to requests by Brazilian standards. The results showed that the concrete blocks manufactured with steel slag can be used in masonry and provide an opportunity for the development and use of new materials and technology based products.

Keywords: concrete, structural block, steel slag, steel industry, sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental vem sendo amplamente discutida nos foros nacionais e internacionais, nos últimos anos, tendo mobilizado a opinião pública e assumindo um papel preponderante nas comunidades. O conceito de sustentabilidade como sendo o melhor aproveitamento das matérias-primas, o reaproveitamento de resíduos e a disposição adequada dos resíduos impróprios para o uso, passou a ser entendido como uma alternativa plausível à degradação ambiental. A proteção do solo e água, a limitação de geração de resíduos e a sua reutilização são os itens chave no conceito do chamado "Desenvolvimento Sustentável". Este conceito foi criado, em março de 1991, pela European Commission Directive 91/156/EEC (PERA, 1996).

Na atualidade, o crescente apelo à conscientização ambiental tem forçado as empresas a buscarem soluções alternativas aos recursos e métodos utilizados nas etapas de sua produção investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização dos resíduos.

Aspecto importante dentro do contexto ambiental é a legislação, que estabelece critérios para que a produção não venha a provocar danos significativos ao meio ambiente. A redução de emissão de resíduos é uma meta, mas apesar do enorme esforço da indústria em minimizar a produção de resíduos, não é possível eliminá-los totalmente em alguns processos produtivos. Sendo assim torna-se necessária sua disposição adequada e até mesmo o seu emprego em processos de reciclagem não só porque resíduos provocam impactos ambientais negativos, como também a sua redução e aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico.

A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. De acordo com SJÖSTRÖM, citado por JOHN (2000), a construção civil consome entre 20% a 50% dos recursos naturais que são extraídos na terra. Segundo estimativa feita por JOHN (2000), o consumo de agregado para concreto e argamassa, no Brasil, é em torno de 220 milhões de toneladas por ano.

De acordo com o Instituto Aço Brasil (IABr, 2012), o Brasil produziu cerca de 35,2 milhões de toneladas de aço bruto em 2011, correspondendo a 2,4% da produção mundial e 51,3% da produção latino-americana do setor. No mesmo ano, as empresas siderúrgicas

geraram um total de 19,2 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos, sendo, 11,5 milhões de toneladas de escória.

Tendo em vista o panorama nacional e mundial que se encontra, apresenta-se a proposta de trabalho a fim de contribuir de maneira significativa, ao desenvolvimento de novas possibilidades para fabricação de produtos de base tecnológica para aplicação na construção civil, como blocos de concreto para alvenaria que podem ser moldados a partir de uma mistura de qualidade; e o estabelecimento de tecnologias apropriadas para o manejo e aplicação racionalizada do resíduo sólido de siderurgia, de forma viável técnica e economicamente.

1.1 Justificativa

Pesquisas internacionais realizadas pela *Civil Engineering Research Foundation* (CERF), entidade ligada ao *American Society of Civil Engineers* (ASCE), revelaram ser, a questão ambiental, uma das maiores preocupações dos líderes do setor da construção civil e construção pesada.

O elevado crescimento demográfico, bem como o desenvolvimento tecnológico, são responsáveis pelo aumento significativo do consumo de resíduos naturais necessários à construção civil. O consumo de agregados naturais varia entre 1 e 8 toneladas/habitante por ano. No entorno das cidades, agregados naturais tornam-se escassos, devido ao crescente controle ambiental da extração das matérias primas, o que eleva o custo da matéria prima e onera o processo de engenharia.

Ainda segundo o Instituto de Aço Brasil a atividade siderúrgica gera anualmente o equivalente a 4,5 milhões de toneladas de escória. Essa produção equivale, para cada tonelada de aço, uma geração de 0,17 toneladas de escória. O grande volume de resíduos gerados, o pequeno percentual de reaproveitamento e a inadequada destinação destes causam expressivo impacto ambiental, que pode ser observado através da poluição visual dos pátios de estocagem, da esterilidade provocada nas áreas destes pátios, da contaminação dos rios em virtude do carregamento de partículas finas para os cursos de água, dentre outros.

Considerando a geração de rejeitos e o consumo de materiais naturais, este trabalho pretende contribuir para a sustentabilidade dos setores de siderurgia e construção civil,

sugerindo produção de blocos estruturais de concreto produzidos integralmente com escória de aciaria em substituição aos agregados naturais.

1.2 Objetivo Geral

Estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da escória de aciaria em substituição aos agregados convencionais utilizados na fabricação de blocos de concreto para alvenaria, segundo parâmetros normativos estabelecidos como propriedades mecânicas, absorção de água, aspectos visuais, dentre outros.

1.3 Objetivos específicos:

- Caracterização física dos agregados naturais para produção de elementos de concreto para alvenaria;
- Caracterização física e ambiental dos agregados artificiais de escória de aciaria para produção de elementos de concreto para alvenaria;
- Determinação do comportamento mecânico dos elementos de concreto para alvenaria produzidos a partir da substituição de agregados naturais por agregados artificiais (escória de aciaria), comparativamente com aqueles produzidos com agregados naturais;
- Avaliação dos parâmetros relacionados à absorção, porosidade, geometria, aspectos estéticos/visuais, expansibilidade e durabilidade de elementos de concreto para alvenaria produzidos com substituição de agregados naturais por agregados artificiais (escória de aciaria), comparativamente com aqueles produzidos com agregados naturais;
- Disponibilizar informações relacionadas à viabilidade do uso de escoria de aciaria como agregado na construção de elementos para alvenaria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos industriais

A norma brasileira que trata da classificação dos resíduos (NBR 10004/04) define o mesmo como um resíduo sólido ou semissólido, que resultam de atividade de origem industrial dentre outras. Esses resíduos podem ser classificados como perigosos e não perigosos. A Tabela 2.1 apresentada a seguir indica a classificação segundo a norma.

Tabela 2.1: Classificação dos resíduos sólidos

Resíduos de classe I – Perigosos	
Resíduos de classe II – Não Perigosos	Classe II A – Não inertes
	Classe II B - Inertes

A construção civil não gera resíduos perigosos ao meio ambiente, no entanto é responsável pelo consumo de 20-50 % dos recursos naturais do planeta (SJÖSTRÖM, 1996). O parque industrial do Estado de São Paulo gerou nos últimos anos, mais de 500 mil toneladas de resíduos sólidos perigosos por ano, cerca de 20 milhões de toneladas de resíduos sólidos não-inertes e não-perigosos, e acima de um milhão de toneladas de resíduos inertes, CETESB (1996). Estes estudos revelam, ainda, que 53% dos resíduos perigosos são tratados, 31% são armazenados e os 16% restantes são depositados no solo.

A construção sustentável não é apenas uma tendência, mas sim uma questão primordial. Dados baseados na pesquisa internacional do Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade ligada à Sociedade Americana dos Engenheiros Civis (ASCE) revelam que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes do setor no mundo.

Levando em consideração o papel econômico e social desempenhado pela indústria da construção civil no Brasil, pode-se assegurar que ações que impliquem em melhorias ambientais são de suma importância para o alcance do desenvolvimento sustentável. Sabe-se, ainda, que a indústria da construção civil possui grande potencial para a solução dos problemas apresentados, visto que este setor apresenta viabilidade de incorporação de resíduos nos materiais de construção, permitindo, ainda, redução nos custos dos produtos da construção (ÂNGULO et al., 2000).

2.2 Escória de aciaria

O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação. Na etapa de refino, nas aciarias a oxigênio ou elétricas, transformam-se o gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro em aço líquido. Nessa etapa parte do carbono contido no gusa é removido juntamente com impurezas (escórias). Na Figura 2.1 a seguir temos o processo de produção do aço e geração da escória de aciaria de modo simplificado.

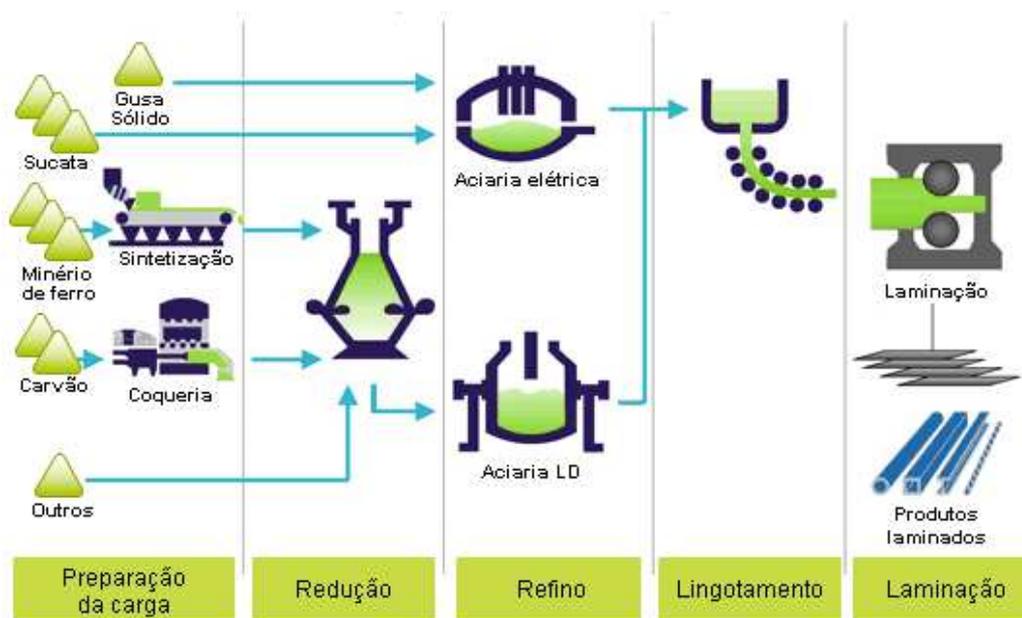


Figura 2.1: Processo simplificado de produção do aço

(Fonte: IABr, 2011).

De maneira simplificada, a escória de aciaria é um resíduo sólido proveniente das indústrias siderúrgicas na fabricação do aço, na etapa de refino, durante a transformação do ferro-gusa e sucata em aço. No Brasil as escórias podem ser geradas por meio de dois processos distintos: pelos conversores a oxigênio tipo LD (Linz-Donowitz), também conhecido como BOF (Blast Oxygen Furnace), e em fornos elétricos a arco ou EAF (Elétrica Arc Furnace), (MOURA, 2000).

O processo de produção de aço em forno elétrico utiliza fonte de calor externa e consiste na fusão da sucata de aço, gerada por um arco elétrico, formado entre o aço e eletrodos de grafita ou carvão amorfo. No processo de fusão são adicionados cales (calcítica e dolomítica). As cales juntamente com o oxigênio, atuam como agentes que removem as impurezas como o carbono (C), silício (Si) e o fósforo (P) através de reações de

oxidação. A adição de cal dolomítica visa proteger o recobrimento refratário do forno, portanto, a escória de aciaria elétrica é o produto resultante da combinação dos óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) com os elementos a serem retirados por oxidação da sucata metálica, formando silicatos e óxidos. Nessas escórias, devido ao elevado teor dos elementos de liga presente nas sucatas de aço, outros óxidos também podem ser encontrados, tais como TiO_2 e Cr_2O_3 (Machado, 2000). No final do processo de refino, após a oxidação do fósforo e silício, quando a cal adicionada ao processo de refino ultrapassa os limites de solubilidade da escória fundida, ocorre a precipitação de cal e magnésio. Este fato causa elevados teores de CaO e MgO reativos na escória.

O processo de conversores a oxigênio (LD) não há necessidade de fonte de calor externa. As matérias-primas (ferro gusa líquido, sucatas ferrosas, escorificantes como a cal e fluidificantes) são misturadas juntamente com o oxigênio na cuba. A fabricação do aço nesse processo consiste nas seguintes operações: carregamento do conversor; sopragem; observação do banho (temperatura e composição química); resopragem e formação do aço líquido e da escória. No lingotamento contínuo, última etapa do processo, o aço líquido é transformado em barras (CASTELO BRANCO, 2004).

No processo de aceração ou de afino se controla a percentagem de carbono e se elimina o excesso de impurezas que possam afetar a qualidade do aço. Com essa finalidade, são adicionados à carga metálica (gusa líquido e sucata) do conversor, materiais chamados fundentes que serão responsáveis pela fixação dos óxidos formados durante as reações. Os principais fundentes utilizados são cal (CaO) e fluorita (CaF_2). A fusão e o refino da carga se processam através das reações de oxidação das impurezas do aço, tais como silício (Si), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn) e através da redução do teor de carbono. Estes óxidos formados combinam-se com o CaO dissolvido e formam escória estável e distinta do banho metálico. O aço líquido e a escória resultante ficam separados dentro do conversor devido à diferença de densidade. Aproveita-se este fato para retirá-los do conversor separadamente: o aço sendo vertido em uma panela apropriada e a escória no "pote de escória" (recipiente de aço fundido que é transportado através de ferrovia). Segundo dados da Arcelor Mittal Tubarão (2013), no pote de escória ainda há cerca de 6% em peso de metal livre (FeO) misturado com a escória, que após o beneficiamento da escória, pode ser reaproveitado.

Além das fases não metálicas, a escória de aciaria pode conter partículas de aço ou ferro metálico. Estas partículas podem contribuir para a instabilidade volumétrica das escórias, através da geração de produtos de corrosão e oxidação (PEIXOTO, 2007).

A composição química da escória de aciaria é função do tipo de processo de produção empregado e da matéria prima utilizada na produção do aço. A Tabela 2.2, a seguir, ilustra a composição química das escórias LD e elétrica.

Tabela 2.2: Composição da escória de aciara elétrica e LD

	CaO	SiO₂	Al₂O₃	MgO	MnO	P₂O₅	Fe_{total}	CaO_{livre}
Escória LD	45±55	12±18	<3	<3	<5	<2	14±20	<10
	42±50	12±15	<3	5±8	<5	<2	15±20	<10
Escória Elétrica	30±40	12±17	4±7	4±8	<6	<1.5	18±28	<3
	25±35	10±15	4±7	8±15	<6	<1.5	20±29	<3

Fonte: H. Motz e J. Geiseler

2.2.1 Expansibilidade da escória de aciaria

A característica expansiva da escória de aciaria está associada, principalmente, devido a hidratação do óxido de cálcio de livre (CaO) e do periclásio (MgO) e à oxidação e corrosão do ferro metálico residual. Tais reações são responsáveis por um considerável aumento de volume em relação às dimensões originais dos cristais, podendo causar expansão destrutiva na escória de aciaria (Machado, 2000).

A porcentagem dos elementos e compostos presentes na composição química das escórias de aciaria varia em virtude do processo a qual foram submetidas: conversores de oxigênio LD e fornos elétricos a arco (MACHADO, 2000). Segundo Moura (2000) existe uma probabilidade de expansão mais significativa nas escórias provenientes de conversores de oxigênio LD devido aos maiores teores de cal livre e periclásio.

O aumento considerável de volume dos elementos em relação às dimensões originais seja por meio de hidratação, carbonatação (CaCO₃, CaCO₃ e MgCO₃) ou oxidação (FeO e Fe₂O₃) acarreta a expansão destrutiva das escórias de aciaria. A expansibilidade das escórias de aciaria representa um agravante para sua aplicação em razão da variação volumétrica dos elementos e compostos constituintes, entretanto, estudiosos acreditam

que a adoção de critérios que estipulam valores limite destes poderiam ser usados como parâmetro de classificação, visto que experimentos práticos demonstram instabilidade dimensional apenas para determinados teores (MACHADO, 2000).

A Tabela 2.3, a seguir, ilustra os elementos e compostos químicos e os parâmetros relacionados que influenciam na expansibilidade das escórias.

Tabela 2.3: Parâmetros que influenciam na expansão das escórias

Elementos e Compostos químicos	Parâmetros que influenciam na expansão	Mecanismos
CaO e MgO	Teor dos elementos no estado livre; Umidade; Temperatura; Teor de CO ₂ ; Tamanho dos grãos de escória.	Hidratação
Fe ⁰	Teor de Fe ⁰ ; Umidade; Tempo de exposição ao ar; Teor de oxigênio no resfriamento; Tamanho dos grãos de escória.	Oxidação
C ₂ S	Velocidade de resfriamento; Impurezas iônicas; Temperatura de resfriamento; Basicidade das escórias.	Transformação alotrópica

A estabilização da escória de aciaria está diretamente associada à formação de produtos estáveis. Para que os compostos formados sejam volumetricamente estáveis é necessário analisarmos fatores como o tempo de estocagem, o grau de exposição do material à umidade, à temperatura e o teor de CO₂. Deste modo, para minimizar a expansibilidade das escórias de aciaria é importante que o material esteja sujeito às condições que permitam, no decorrer do tempo, a hidratação ou carbonatação completa de todos os elementos e compostos químicos constituintes (MACHADO, 2000). Segundo Seki et al. (1986) citado por Machado (2000) as escórias de aciaria quando expostas à ação das intempéries, estabilizam-se num período mínimo de 3 meses.

2.2.2 Beneficiamento das escórias

O beneficiamento consiste no resfriamento da escória e no processamento em uma planta de britagem apropriada, onde é separada a fração metálica e classificada a escória resultante em faixas granulométricas comerciais. A escória para ser beneficiada precisa ser resfriada. Ao ser resfriada, por choque térmico com jatos de água, ocorre uma fragmentação em blocos de escória, gerando um material denominado Escória Bruta de Aciaria. Durante o processo de resfriamento de uma escória, ocorre a liberação de alguns elementos como nitrogênio, carbono, hidrogênio e enxofre acarretando na formação de uma estrutura de alta porosidade.

As escórias são armazenadas em pátios de estocagem, e, a fim de acelerar seu arrefecimento e as reações químicas dos óxidos de cálcio existentes podem ser expostas ao: resfriamento ao ar (processo lento), resfriamento controlado com água (formação de uma escória expandida com baixa massa específica) e o resfriamento brusco com água (formação de estruturas amorfas e propriedade de hidraulicidade) (POLISSENI,2005).

Após o resfriamento e britagem, a escórias de aciaria passam pelo processo de beneficiamento, onde as frações metálicas são recuperadas por separação magnética. Dessa forma, a sucata de retorno ou sucata recuperada retorna ao processo de produção do aço. A eficiência do processo determina, assim, o teor de metal no produto, uma característica importante quando se trata de reciclagem. Na Figura 2.2, a seguir, ilustra de forma simplificada o processo de beneficiamento da escória de aciaria.

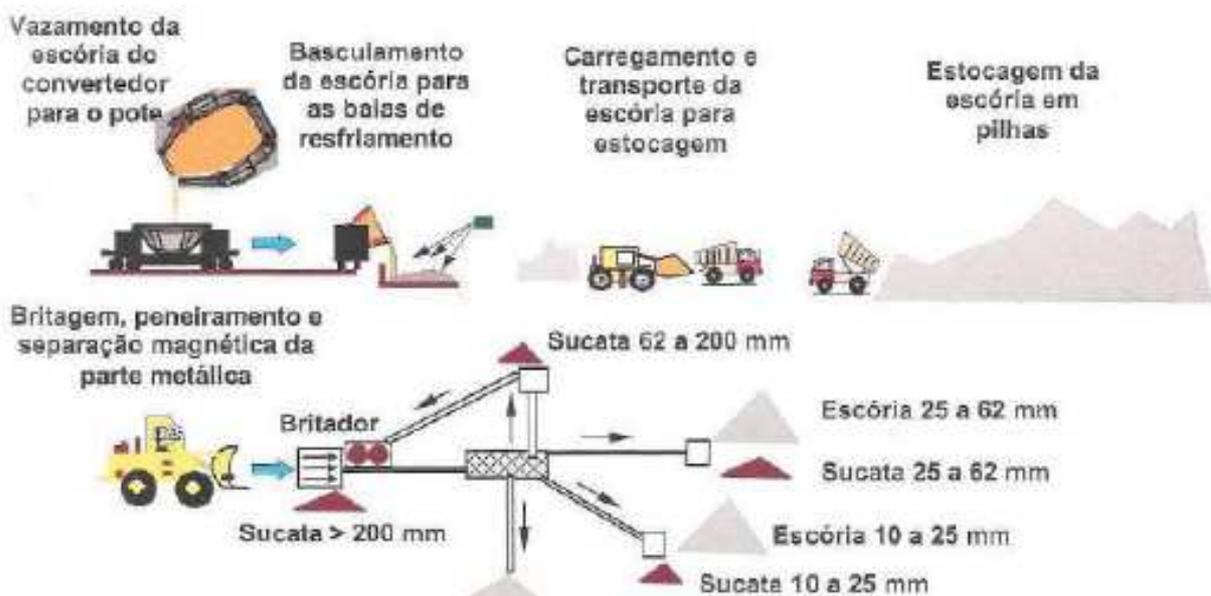


Figura 2.2: Processo simplificado do beneficiamento da escória de aciaria

2.2.3 Estabilização das escórias

Na construção civil, alguns materiais utilizados como matéria prima nas etapas de produção, podem não apresentar as características e propriedades necessárias para o seu uso. Esses materiais precisam passar por um processo corretivo para adequar suas características à utilização proposta. É o caso da escória de aciaria que necessita de um tratamento de estabilização para diminuir a sua expansão e atender os requisitos mínimos estabelecidos tecnicamente.

Essas escórias devem passar por um processo de tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos por meio de um período de estabilização química, cura ou adicionando agentes redutores estabilizantes.

No processo feito com mistura de materiais adiciona-se escória de alto-forno e/ou cinza volante que reagem quimicamente com os óxidos de cálcio e magnésio livres da escória de aciaria, reduzindo a expansão. De acordo com Raposo (2005) a escoria de alto-forno e as cinzas volantes são constituídas, normalmente, de partículas menores que a escoria de aciaria. Dessa forma elas preenchem os vazios da escória que nos interessa, aumentando o peso específico seco e o intertravamento, garantindo a estabilização mecânica. Além disso, as partículas dos materiais usados no tratamento têm propriedades aglomerantes e, se ativadas corretamente geram uma cimentação na mistura com a escória de aciaria. Com tudo isso, além da estabilização da escória, pode-se observar um ganho em outros aspectos. Outra forma de se estabilizar a escoria de aciaria é hidratando previamente os óxidos de cálcio e magnésio, (MOURA, 2000).

2.2.4 Utilização das escórias

As escórias de aciaria utilizadas como agregados graúdos para concreto asfáltico, base e sub-base, lastro de ferrovias e estabilização de solos já são comuns em muitos países. Contudo, as escórias de aciaria apresentam características mecânicas bastante satisfatórias e, por isso, seu emprego tem sido amplamente difundido.

As principais vantagens das escórias de aciaria em relação aos agregados convencionais são o menor custo, maior resistência ao desgaste e as formas dos grãos que garantem maior consistência e aderência às misturas. Além disso, são importantes na preservação de fontes não renováveis (MOURA, 2000). A Tabela 2.4, a seguir, mostra algumas utilizações no uso da escória de aciaria.

Tabela 2.4: Utilização da escória de aciaria

Aplicação	Vantagens	Limitações
Bases de estradas (agregados como brita e areia)	Bases mais duráveis; Drenagem livre; Camadas mais finas (5%)	Maior densidade; Potencial de expansão (CaO e MgO livres)
Asfalto (agregados como brita e areia)	Alta estabilidade; Resistência a derrapagem; Maior período de retenção de calor; Maior facilidade de compactação; Camadas mais finas (5%)	Potencial de expansão (CaO e MgO livres)
Lastro para Ferrovias (agregados como brita e areia)	Estrutura vesicular; melhor ajustamento dos dormentes; melhor drenagem	Condutividade
Reciclagem para alto forno (fundentes das cargas)	Menor energia ou combustível para o alto forno; menor consumo de calcário; disponibilidade local	Reinjeta Fósforo e Enxofre no alto forno; maior carga de poeira
Produção de cimento (clínquer, escória de alto forno, cinzas pozolânicas)	Menor custo	Teor de óxido de ferro; interferência no processo do clínquer (uso do forno)

Segundo Kamada et alli (2008), a fabricação de concreto com escória destinado à aplicação em pavimentos rígidos indica viabilidade técnica, econômica e ambiental. O estudo de caso realizado em uma ciclovia produzida com concreto de escória apresentou resultados satisfatórios devido a ausência de patologia como manchas superficiais, degradação, flechas e pontos de desagregação de concreto. Sendo assim, a aplicação do concreto no Brasil torna-se uma alternativa viável do ponto de vista socioeconômico, já que o transporte rodoviário exerce grande influência no desenvolvimento do país.

Machado (2000) afirma que a composição das escórias de aciaria, expressa em óxidos, é semelhante à encontrada na composição do cimento Portland. Assim, as escórias podem ser utilizadas para compor a matéria-prima de produção do clínquer. A adoção de tal medida contribui para a redução do custo de energia, o consumo de matérias-primas naturais e a emissão de CO₂ para a atmosfera. Entretanto, não há muitos estudos nesta área devido à carência de tecnologia para esta finalidade. As argamassas produzidas com escória de aciaria apresentam comportamento mecânico superior às argamassas convencionais, bem como superfície mais homogênea e menos porosa (PEIXOTO et alli., 2007).

2.3 Agregados

A norma NBR 7211/09 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e grãos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas. Os agregados utilizados na construção civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades estabelecidas para uso em obras de engenharia civil, tais como, a pedra britada, o cascalho e as areias naturais obtidas da fragmentação natural ou artificial de rochas. Além destes agregados, ditos como convencionais, surgem materiais substitutivos como argilas e resíduos sólidos inertes reciclados, oriundos de processos industriais, como as escórias de aciaria entre outros. O desempenho e estudo dos agregados são de suma importância no ponto de vista da tecnologia do concreto. Sabe-se que os agregados ocupam cerca de 70% do concreto e exercem grande influência em suas propriedades, não sendo assim, verdadeiramente inertes. Além de cumprir papel econômico de máxima importância em virtude do baixo custo por unidade de volume no concreto, o agregado atua de maneira determinante no desdobramento de certas características, tais como a resistência, estabilidade dimensional, redução da retração e durabilidade (BAUER et alli., 1982). A Tabela 2.5 a seguir mostra as propriedades do concreto que são influenciadas pelas características dos agregados.

Tabela 2.5: Influência dos agregados nas propriedades do concreto

Propriedades do concreto	Características dos agregados
Resistência mecânica	Resistência mecânica Textura superficial Forma dos grãos Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade Forma dos grãos Textura superficial Dimensão máxima
Massa Unitária	Massa específica Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima
Resistência a derrapagem	Tendência ao polimento
Economia	Forma dos grãos Granulometria Dimensão máxima Beneficiamento requerido Disponibilidade

2.3.1 Características dos agregados

2.3.1.1 Composição granulométrica

A análise da composição granulométrica encontra-se descrita na NBR NM 248/03 e consiste em separar uma amostra em quantidade suficiente de um determinado material em frações de partículas do mesmo tamanho retidas em conjunto de peneiras de malha conhecida. Os limites da distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos são apresentados na Figura 2.3 e Figura 2.4, respectivamente, a seguir.

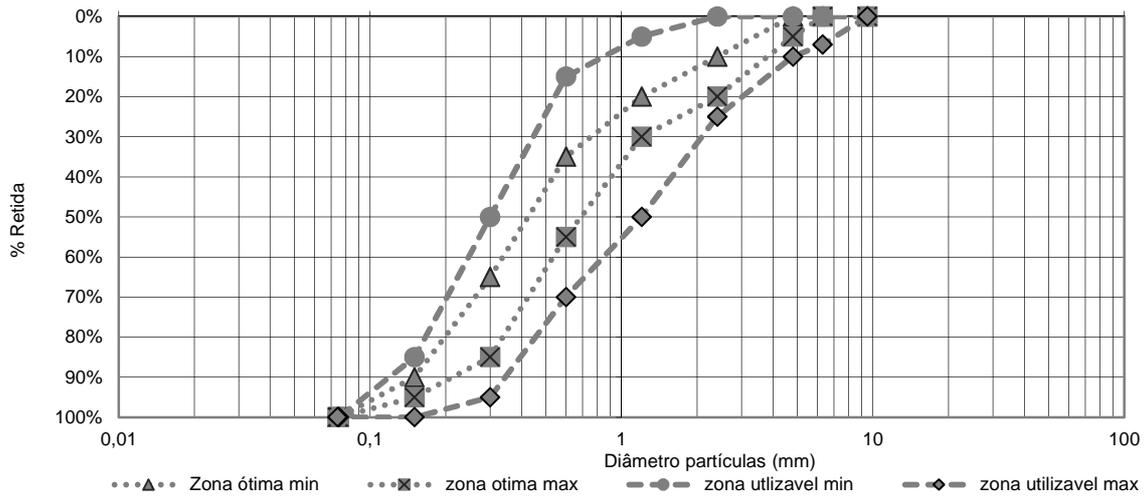


Figura 2.3: Limites granulométricos para os agregados miúdos

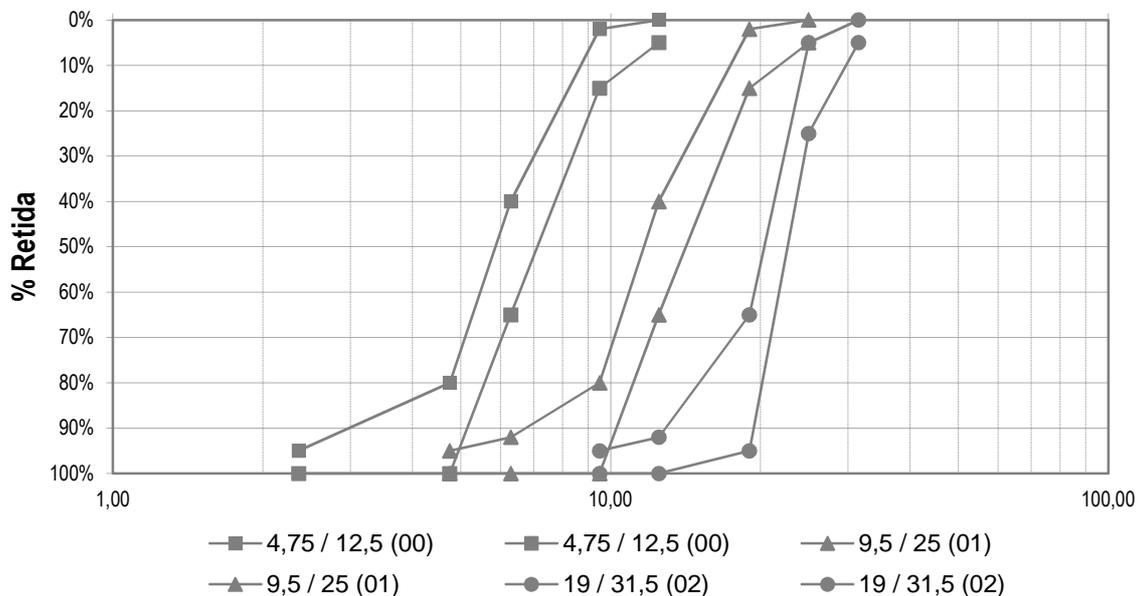


Figura 2.4: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos

2.3.1.2 Absorção e umidade

A capacidade de absorção e a umidade são essenciais para a correção das proporções de água utilizadas nas misturas de concreto, pois os agregados podem ceder ou retirar a água necessária à hidratação do cimento. A porosidade e a absorção dos agregados exercem influência sobre propriedades do concreto como a aderência entre o agregado e a pasta de cimento, a resistência ao congelamento e degelo, a resistência à abrasão e a estabilidade química (NEVILLE, 1982).

2.3.1.3 Massa Específica e Massa Unitária

Para fins de dosagem, a massa específica e massa unitária são extremamente importantes, isto é, o conhecimento do volume ocupado pelas partículas, bem como os poros existentes dentro destas. (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.1.4 Forma e textura superficial

A forma ou esfericidade do agregado dá-se pela relação entre a área da superfície da partícula e seu volume. As características de forma do agregado relacionam-se com a clivagem e estratificação da rocha-matriz e, ainda, pelo processo de britagem pelo qual as partículas foram submetidas (NEVILLE, 1982).

Sabe-se, portanto, que a forma e a textura das partículas dos agregados ocasionam variações nas propriedades do concreto, em especial no seu estado fresco. As partículas de textura áspera, angulosas e alongadas demandam maior quantidade de pasta de cimento para atingir misturas mais trabalháveis (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As partículas alongadas e lamelares, em especial, provocam efeitos desfavoráveis sobre a durabilidade do concreto, uma vez que tendem a se orientar segundo um plano e, conseqüentemente, acumular bolhas de ar em sua face inferior aumentando sua permeabilidade. Por outro lado, quanto maior o grau de aspereza da superfície do agregado, melhor a resistência do agregado (NEVILLE, 1982). A determinação do índice de forma pode ser obtida pela NBR 7809/08.

2.4 Cimento Portland

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos complexos, que, ao serem misturados com a água, hidratam-se, formando uma massa gelatinosa, finamente cristalina, também conhecida como “gel”. Esta massa, após contínuo processo de cristalização, endurece, oferecendo então elevada resistência mecânica. Ele pode ser definido também, como sendo um aglomerante ativo e hidráulico.

A Tabela 2.6 a seguir ilustra as matérias primas necessárias para a fabricação do cimento Portland bem com a sua porcentagem relativa de cada elemento.

Tabela 2.6: Matéria prima para produção do Cimento Portland

	ÓXIDOS	DESIGNAÇÃO	REPRESENTAÇÃO	%
Principais	CaO	Óxido de cálcio	C	60 a 68%
	SiO ₂	Dióxido de silício	S	17 a 25%
	Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio	A	2 a 9%
	Fe ₃ O ₃	Óxido de ferro (III)	F	0,5 a 6%
Secundários	MgO	Óxido de magnésio	M	0,1 a 4%
	SO ₃	Trióxido de enxofre	S	0,1 a 4%
	Na ₂ O	Álcalis	N	1 a 3%
	K ₂ O		K	0,5 a 1,5%

A cal (CaO), componente principal dos cimentos, origina-se da decomposição do carbonato de cálcio. Altos teores de cal contribuem com o aumento das propriedades mecânicas do cimento Portland desde que esta esteja combinada adequadamente, uma vez que a cal livre em estado anidro, acima de certos limites, é prejudicial à estabilidade de volume das argamassas e concretos. A sílica (SiO₂) origina-se das argilas utilizadas como matéria-prima e sua combinação com a cal é responsável pelos compostos mais importantes do cimento Portland. A alumina (Al₂O₃) também procede da argila. A combinação deste óxido com a cal resulta em um composto imprescindível no desenvolvimento das reações que permitem à formação do clínquer, entretanto, a quantidade deste composto deve ser pequena, já que é também responsável pela redução da resistência a sulfatos e aceleração do tempo de pega. O óxido de ferro (Fe₂O₃), oriundo da argila, apresenta papel fundente. O óxido de magnésio (MgO), é proveniente da dolomita que é uma impureza presente na maior parte dos calcários. Assim como a alumina, a presença deste óxido superior a certos limites pode ser prejudicial em virtude de suas propriedades expansivas.

O silicato tricálcico (C_3S) é o responsável pela resistência inicial do cimento e possui considerável importância no processo de liberação de calor. O silicato bicálcico (C_2S) apresenta importância significativa no processo de endurecimento e é responsável pela resistência em idades mais avançadas. O aluminato tricálcico (C_3A) reage com intensidade nos primeiros momentos de hidratação do cimento com forte participação no aumento do calor de hidratação e nos tempos de pega – fenômeno que compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta de cimento no início do processo de endurecimento. O ferro aluminato de cálcio (C_4AF), por sua vez, não contribui com a resistência (PETRUCCI, 1987).

2.4.1 Hidratação do cimento

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico, isto é, o cimento é capaz de tornar-se uma agente ligante, com propriedade adesiva, somente quando misturado à água. Deste modo, os silicatos e aluminatos mencionados formam produtos de hidratação que dão origem a uma massa firme e dura denominada pasta de cimento endurecida. Os compostos reagem com a água de duas maneiras distintas: hidratação propriamente dita e hidrólise. Contudo, o termo hidratação é usual para todas as reações do cimento com a água.

Os principais produtos hidratados são classificados em silicatos de cálcio hidratados e aluminatos tricálcicos hidratados. A evolução da hidratação pode ser determinada por meio da quantidade de hidróxido de cálcio – $Ca(OH)_2$; calor desenvolvido na hidratação; massa específica da pasta; quantidade de água combinada quimicamente, quantidade de cimento não-hidratado e resistência da pasta hidratada. Os hidratos C-S-H, que não possuem uma composição fixa, representam os produtos de hidratação dos silicatos. Para a hidratação completa, acredita-se que o $C_3S_2H_3$ seja o produto final. A alita e a belita são impurezas que podem estar presentes nos silicatos de cálcio hidratados, C_3S e C_2S respectivamente, e atuam consideravelmente nas propriedades destes. A reação do C_3A com a água dá-se imediatamente e resulta em hidratos cristalinos com liberação de grande quantidade de calor de hidratação (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1982; PETRUCCI, 1987).

2.4.2 Tipos de cimento

Os cimentos apresentam características especiais em detrimento dos teores dos compostos constituintes. Dessa forma, é possível produzir cimentos com alta resistência inicial, baixo calor de hidratação, alta resistência a sulfatos, dentre outros (MEHTA E

MONTEIRO, 2008). A Tabela 2.7, a seguir, ilustra a composição química dos diferentes tipos de cimento bem como as classes de resistência de cada tipo.

Tabela 2.7: Composição dos cimentos Portland

Cimento Portland (ABNT)	Classe de resistência	Tipo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material pozolânico	Material carbonático
CPI	25, 32, 40	Comum	100	-	-	-
CPI-S	25, 32, 40	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CPII-E	25, 32, 40	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CPII-Z	25, 32, 40	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CPII-F	25, 32, 40	Composto	90-94	-	-	6-10
CPIII	25, 32, 40	Alto forno	25-65	35-70	-	0-5
CPIV	25, 32	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CPV	-	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

2.5 Blocos de concreto para alvenaria

O aumento da demanda por obras e a necessidade de agilidade nos processos construtivos estimularam a procura por tecnologias que suportassem esse crescimento do mercado de forma ampla e sistemática. A partir disso foi consolidada a tecnologia da alvenaria modular com blocos de concreto.

O lado vantajoso da alvenaria modular em blocos de concreto é a construção de obras que causam menor impacto ao meio ambiente, por ter uma reduzida produção de resíduos sólidos e menor utilização da madeira, além de evitar a produção de entulhos, já que para a instalação de tubulações não necessita executar cortes nas paredes. O principal desafio da alvenaria é conseguir adaptar o projeto arquitetônico ao sistema construtivo em alvenaria modular e encontrar mão de obra especializada capaz de executar o serviço com perfeição.

As alvenarias modulares podem ser executadas com blocos de concreto em alvenarias sem função estrutural ou com função estrutural (NBR 6136/07). Os blocos com função estrutural são aqueles produzidos segundo a norma brasileira NBR 6136/07. Estes blocos devem ter, no mínimo, 4,5 MPa de resistência característica à compressão, para alvenaria revestida com argamassa e acima do nível do solo, e 6,0 MPa para alvenaria estrutural sem revestimento, valores estabelecidos na referida norma.

Mais usualmente, utilizamos dois conjuntos de dimensões para os blocos: de 29 cm e de 39 cm. Utilizar o conjunto de blocos de 29 cm significa projetar usando unidade modular 15 e múltiplos de 15, onde 15 é a medida do bloco de 14 cm, mais 1 cm de espessura das juntas. Utilizar o conjunto de blocos de 39 cm significa projetar usando a unidade modular 20 e múltiplos de 20, onde 20 é a medida do bloco de 19 cm, mais 1 cm de espessura das juntas. A Tabela 2.8 a seguir, ilustra as dimensões padronizadas pela norma NBR 6136/07 para os blocos estruturais.

Tabela 2.8: Dimensões padronizada dos blocos

Dimensões Nominais (cm)	Designação	Dimensões padronizadas (mm)		
		Largura	Altura	Comprimento
20x20x40	M-20	190	190	390
20x20x20		190	190	190
15x20x40	M-15	140	190	390
15x20x20		140	190	190

A Figura 2.5 a seguir ilustra os diferentes tipos e dimensões dos blocos de concreto utilizados para a construção das alvenarias modulares.

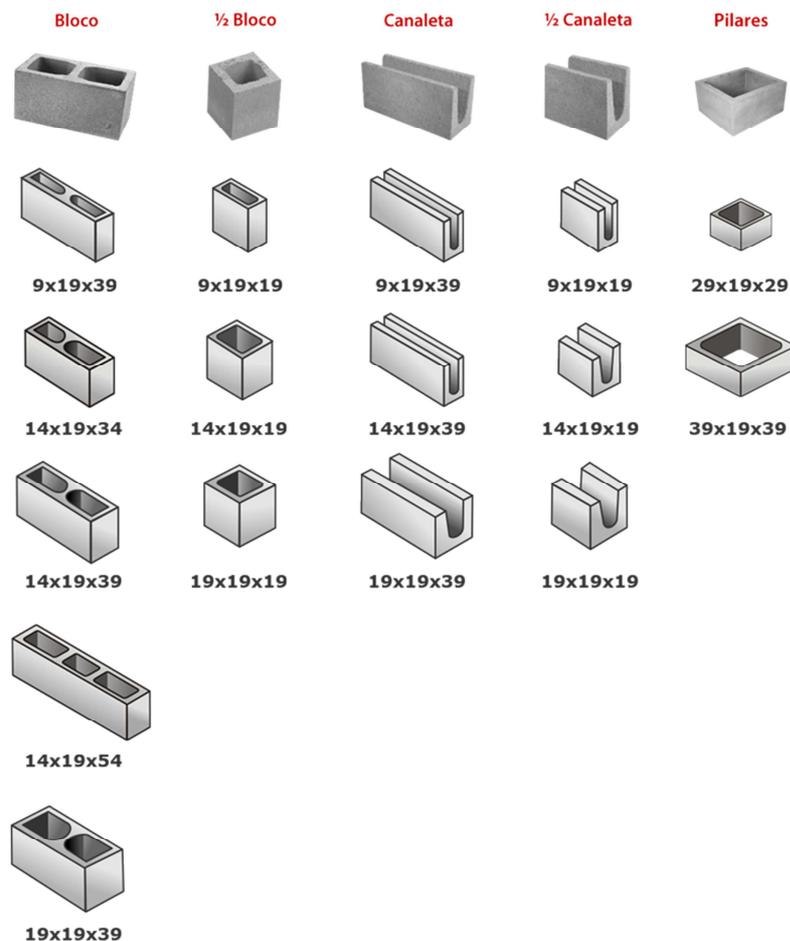


Figura 2.5: Blocos de concreto modular

3 METODOLOGIA E MATERIAIS CONSTITUINTES

Preliminarmente a produção dos blocos de concreto, os materiais utilizados neste trabalho (agregado natural e artificial de escória de aciaria) foram caracterizados segundo análises físicas e caracterização química do resíduo sólido de siderurgia segundo prescrições normativas brasileiras. A partir dos resultados obtidos, dimensionaram-se traços para a confecção dos blocos modulares utilizando os dois materiais como agregados. Os traços dimensionados reuniram critérios mínimos necessários para produção industrial e sofreram adaptações à planta industrial BLOCO SIGMA, onde foram produzidos os protótipos. Dessa forma, buscou-se avaliar o desempenho mecânico dos blocos de concreto convencional e com escória associados à pasta de cimento Portland, em atendimento aos requisitos da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Os ensaios experimentais encontram-se descritos a seguir.

3.1 Caracterização dos materiais

3.1.1 Cimento Portland

Para a confecção dos blocos para alvenaria modular, produzidos com agregados naturais e artificiais de escória de aciaria, optou-se pela utilização do Cimento Portland CPV ou também denominado como cimento ARI (Alta Resistência Inicial) produzido pela fábrica Cauê. A Tabela 3.1 a seguir ilustra as características do cimento utilizado neste trabalho.

Tabela 3.1: Características do cimento CPV

Resistência à Compressão					Blaine (cm ² /g)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)
Idades	24h	3d	7d	28 d			
NBR 5737/NBR5733	≥14	≥24	≥34	-	≥ 3000	≥ 60	≤ 600
CPV ARI CAUÊ	28	39	44	51	5100	160	270

3.1.2 Análise químico-ambiental

A escória de aciaria elétrica estudada foi analisada pela empresa Bioagri Ambiental Ltda. para caracterização químico-ambiental. As substâncias presentes no resíduo por meio das normas NBR 10005/04 e NBR 10006/04 foram comparadas às substâncias/parâmetros constantes na norma NBR 10004/04.

3.1.3 Agregados artificiais

As amostras de material artificial utilizadas devem ser coletadas de forma representativa para o procedimento de análises e reduzidas para ensaios laboratoriais como recomenda a norma brasileira NBR NM 27/01.

Proveniente da escória de aciaria bruta, os agregados artificiais utilizados neste trabalho receberam nomenclatura de AE e foram submetidos a um processo especializado para recuperação das frações metálicas, restando como agregado a fração não metálica presente na escória, sendo de interesse da construção civil somente as frações com baixo teor de metálicos.

O material a ser utilizado como agregado é separado granulometricamente, no processo industrial, por um conjunto de peneiras definidas de modo a garantir as faixas de 0-4 mm, 4-10mm, 10-19mm, e 19-32mm. Essas faixas serão comparadas a dos agregados miúdos e grãos provenientes de material natural e, ainda, aos limites normativos prescritos. A Figura 3.1, a seguir, ilustra os agregados artificiais de escória de aciaria utilizados neste trabalho.



Figura 3.1 : Agregados miúdos e grãos produzidos com escória de aciaria.

3.1.4 Determinação do teor de constituintes metálicos ferrosos

A escória de aciaria bruta foi submetida ao processo especializado, para recuperação das frações metálicas, cujo destino é o retorno ao processo siderúrgico de produção do aço, e a fração não metálica utilizada como agregado para a produção de matrizes de cimento. As escórias utilizadas neste trabalho para produção de blocos de concreto para alvenaria

modular, foram analisadas em laboratório segundo protocolo RECICLOS para aferição do teor de metálicos presentes nestas escórias.

O protocolo experimental consiste da passagem de uma amostra de no mínimo 2000 g de material miúdo ($\leq 4,8\text{mm}$), seco em estufa a 105°C até constância de massa, em um dispositivo magnético (cone magnético) com potencial de 2600 Gauss. A fração passante pelo cone magnético deve ser recirculada até que se obtenha um total de material retido no cone inferior a 1%.

O material retido no cone magnético é lavado para retirada da fração não metálica carregada pelo campo magnético do equipamento, para determinação do valor da fração metálica presente nas amostras. O processo de lavagem consiste em circular de forma contínua e laminar, um fluxo de água através do material, revolvendo a massa sólida periodicamente. O processo de lavagem encerra-se quando a água recirculada apresentar-se isenta de material sólido em suspensão.

A Figura 3.2, a seguir, ilustra o cone magnético utilizado para determinação do teor de metálicos presentes na amostra de escória de aciaria após pós-processamento industrial para retirada da fração metálica da escória de aciaria bruta.

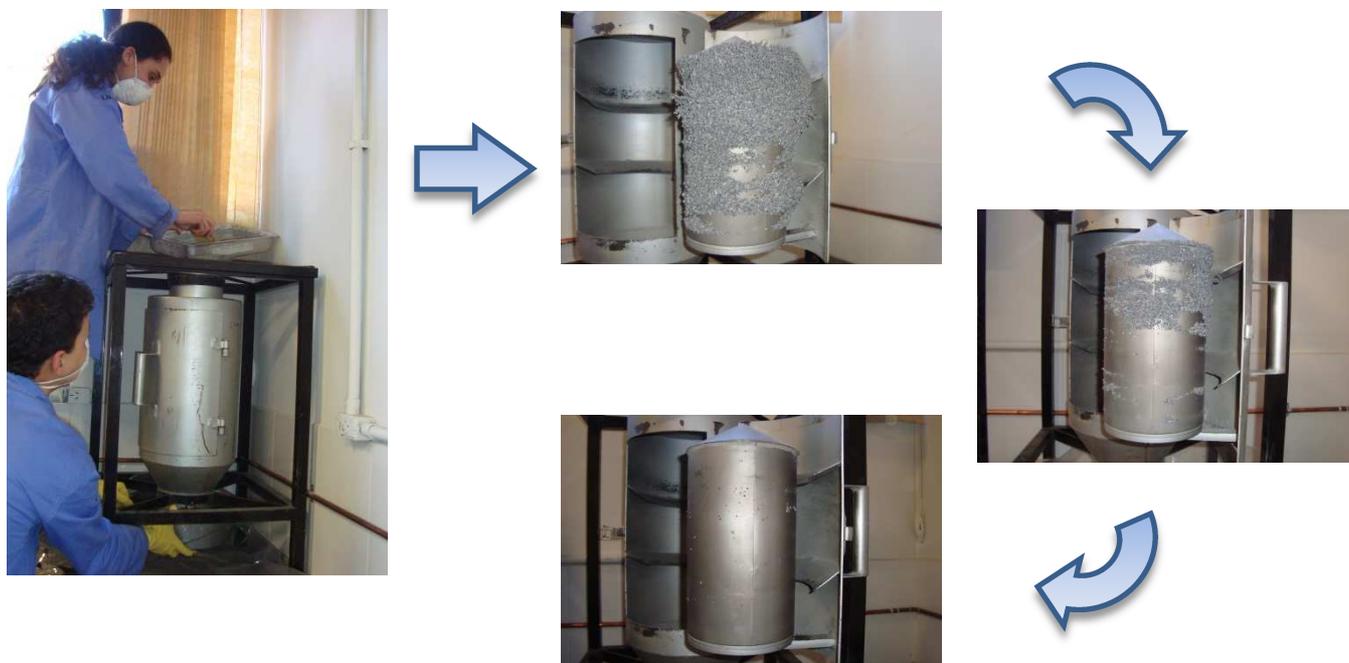


Figura 3.2: : Ensaio de determinação do teor metálico da escória

3.1.5 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados neste trabalho receberam nomenclatura de AN e consistem de materiais utilizados convencionalmente para a produção de concretos de cimento Portland em obras de arte corrente de engenharia e são facilmente replicáveis.

O material a ser utilizado como agregado é separado granulometricamente, no processo industrial, por um conjunto de peneiras definidas de modo a garantir as faixas de 0-4 mm, 4-10mm, 10-19mm, e 19-32mm. Essas faixas serão comparadas aos limites normativos prescritos.

As amostras de material artificial a serem utilizadas deverão ser coletadas de forma representativa para o procedimento de análises e reduzidas para ensaios laboratoriais como recomenda a norma brasileira NBR NM 27/2001. A Figura 3.3, a seguir, ilustra os agregados naturais utilizados neste trabalho.



Figura 3.3: Agregados miúdos e graúdos provenientes de materiais naturais.

3.1.6 Análise granulométrica

Para a caracterização granulométrica dos agregados naturais e artificiais, os materiais devem ser devidamente preparados e ensaiados conforme prescrições da norma NBR NM 248/03. Essa norma prescreve nas curvas de distribuição granulométricas os limites máximos e mínimos aceitáveis bem como os limites ótimos. Podem-se identificar, ainda, as faixas de interesse ao projeto, a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados através das porcentagens retidas e acumuladas no conjunto de peneiras.

Segundo a NBR NM 248/03 a dimensão máxima característica corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a

5% em massa. Já o módulo de finura é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividido por 100.

As figuras a seguir, Figura 3.4 e Figura 3.5, ilustram o conjunto de peneiras utilizadas para determinação da distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos provenientes dos materiais natural e artificial de escória de aciaria.



Figura 3.4: Análise granulométrica dos agregados miúdos



Figura 3.5: Análise granulométrica dos agregados graúdos

3.1.7 Determinação do teor de umidade

O ensaio para determinação do teor de umidade foi realizado com os agregados naturais e artificiais de escória de aciaria em acordo com as prescrições da norma NBR 9939/11. Este ensaio consiste na pesagem da massa inicial do material após 24 horas de exposição ao ar em temperatura ambiente, e uma segunda pesagem, após constância de massa, depois de submetido ao processo de secagem do material em estufa a uma temperatura de 105 ± 5 °C por igual período de 24 horas.

O teor de umidade do material é dado em percentual e é obtido pela Equação 3.1 a seguir.

$$TU = \frac{Pu - Ps}{Ps} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

TU é o teor de umidade da amostra em porcentagem

Pu é o peso úmido da amostra em gramas

Ps é o peso da amostra seco em estufa em gramas

A Figura 3.6 a seguir ilustra o processo de determinação do teor de umidade e a estufa utilizada para a realização deste ensaio.



Figura 3.6: Processo para a determinação do teor de umidade dos agregados

3.1.8 Determinação do teor de material pulverulento

Os agregados miúdos naturais e de escória de aciaria foram submetidos ao ensaio de teor de material pulverulento segundo a norma NBR NM 46/03. Neste ensaio consideram-se as partículas minerais com dimensão inferior a 0,75 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presente nos agregados.

Nos procedimentos para a realização deste ensaio, deve-se, inicialmente, coletar de forma representativa uma amostra de 500 g de cada material miúdo previamente seco em estufa até constância de massa. O ensaio consiste na lavagem do material sobre o jogo de peneiras com abertura de malha de 0,75 mm e 1,18 mm até que a água esteja clara.

O procedimento está ilustrado na Figura 3.7 a seguir. O teor de material pulverulento é correlativo a massa dissipada durante a lavagem comparativamente a massa inicial seca em estufa, obtido pela Equação 3.2 a seguir.

$$TP = \frac{P_s - P_l}{P_s} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

TP é o teor de material pulverulento da amostra em porcentagem

P_s é o peso inicial da amostra seco em estufa em gramas

P_l é o peso da amostra seco em estufa após lavagem em gramas



Figura 3.7: Ensaio para o teor de material pulverulento

3.1.9 Determinação da massa específica

A massa específica do agregado pode ser definida como a relação entre a massa do agregado seco em estufa até constância de massa e o volume igual do sólido, incluídos os poros impermeáveis. Os procedimentos para determinação da massa específica do agregado miúdo estão definidos na norma NBR NM 52/09.

O ensaio realizado com areia de escória de aciaria e areia natural é executado com o frasco de Chapman e consiste na adição de 500 g de agregado miúdo, seco em estufa, no frasco previamente preenchido com 200 ml de água. Durante o ensaio, o frasco deve ser agitado evitando a formação de bolhas entre os grãos e a água. Após a acomodação do material é realizada a leitura final do frasco, que corresponde ao volume de 200 ml de água mais o volume do agregado miúdo. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.,**

ilustra o ensaio de determinação da massa específica para o agregado miúdo de escória de aciaria.



Figura 3.8: Determinação da massa específica do agregado miúdo de escória:

A massa específica do agregado pode ser obtida pela Equação 3.3 a seguir.

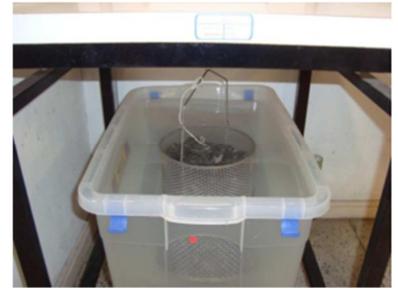
$$\gamma = \frac{500}{L-200} \quad (3.3)$$

Onde:

γ é massa específica do agregado miúdo em g/cm^3 ;

L é a leitura do frasco em cm^3 .

Para os agregados graúdos de escória de aciaria e brita a massa específica é obtida através dos procedimentos descritos na NBR NM 53/09. O ensaio consiste na determinação das massas das amostras em três condições: massa seca (A), massa saturada de superfície seca (B) e massa saturada (C). A massa seca é determinada com a pesagem do material seco em estufa por um período de 24 horas e submetido a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Para a determinação da condição de saturado de superfície seca a amostra deve permanecer imersa por um período de 24 horas e posteriormente seca com um pano absorvente para eliminação do excesso de água visível. A massa saturada é obtida através de uma balança hidrostática com o material submerso em um recipiente com água. As três condições estão ilustradas na Figura 3.9 a seguir.



- a. Seca em estufa (A) b. Saturada de superfície seca (B) c. Saturada (C)

Figura 3.9: Determinação da massa específica do agregado graúdo

A partir destes procedimentos, obtemos os valores de massa específica na condição seca e massa específica na condição saturada superfície seca, definidas pelas Equações 3.4 e 3.5, respectivamente, a seguir.

$$S = \frac{A}{B-C} \quad (3.4)$$

$$SSS = \frac{B}{B-C} \quad (3.5)$$

3.1.10 Determinação da massa unitária

A determinação da massa unitária foi conduzida, em conformidade com prescrições estabelecidas a NBR NM 45/06. A massa unitária pode ser definida como a relação entre a massa dos agregados, considerando os vazios entre eles, e o volume ocupado pelos mesmos. Para a determinação da massa unitária é necessário a preparação do dobro do material necessário para preencher o volume de um recipiente padrão sem que ocorra o seu adensamento. Após o preenchimento, a superfície deve ser regularizada com o nível superior do recipiente de modo a retirar o excesso de material ou compensar as saliências e reentrâncias. É determinada então a massa unitária através da Equação 3.6 a seguir.

$$MU = \frac{M}{V} \quad (3.6)$$

Onde:

MU é a massa unitária em g/cm^3

M é a massa do agregado em gramas

V é o volume aparente do recipiente em cm^3

A Figura 3.10 ilustra o procedimento para determinação da massa unitária dos agregados miúdos e graúdos.



Figura 3.10: Determinação da massa unitária dos agregados

3.1.11 Inchamento do agregado miúdo

O ensaio para a determinação do inchamento do agregado miúdo das amostras de areia natural e de escória de aciaria seguiram as especificações da norma NBR 6467/06. O inchamento é um fenômeno da variação do volume aparente, provocado pela absorção de água livre pelos grãos e que incide sobre a sua massa unitária.

O ensaio consiste em adicionar água sucessivamente de modo a obter teores de umidade próximos aos valores: 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. Sendo assim, deve-se determinar o teor de umidade e executar a massa unitária para cada adição de água. A determinação dos teores de umidades das amostras coletadas nas cápsulas é feita através da Equação 3.7.

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

h = teor de umidade total em porcentagem;

M_i = massa inicial da amostra em gramas;

M_f = massa final da amostra em gramas.

A umidade crítica obtida é o valor do teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio. Para cada umidade deve-se calcular o coeficiente de inchamento plotando o ponto no gráfico para traçar a curva. Determina-se o coeficiente de inchamento pela média aritmética entre os coeficientes de inchamento máximo e aquele correspondente à

umidade crítica. Para cada teor de umidade deve-se calcular o coeficiente de inchamento de acordo com a Equação 3.8 a seguir.

$$\frac{V_h}{V_o} = \frac{\gamma_s (100+h)}{\gamma_h \times 100} \quad (3.8)$$

Onde:

V_h é o volume do agregado com h% de umidade, em dm³;

V_o é o volume do agregado seco em estufa, em dm³;

γ_s é a massa unitária do agregado seco em estufa, em kg/dm³;

γ_h é a massa unitária do agregado com h% de umidade, em kg/dm³;

h é o teor de umidade do agregado, em %.

As figuras a seguir, Figura 3.11 e Figura 3.12, ilustram o método para determinação do teor de umidade de cada amostra após a adição de água e para o coeficiente de inchamento.



Figura 3.11: Determinação do teor de umidade para cada adição de água

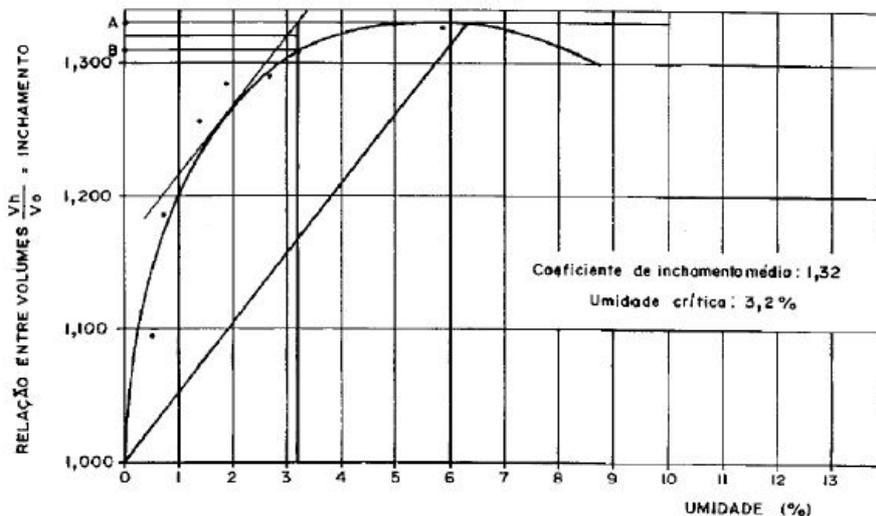


Figura 3.12: Curva de inchamento do agregado miúdo

3.2 Blocos de concreto para alvenaria modular

3.2.1 Dosagem do traço para os blocos modulares

Na produção dos blocos de concreto para alvenaria modular utilizou-se escória de aciaria como agregado em substituição total aos agregados naturais. O traço do bloco de concreto com escória foi determinado em função dos parâmetros de produção industrial de forma adaptada ao traço já utilizado para a fabricação do bloco de concreto convencional, utilizando agregados naturais, para $f_{bk} = 4,0$ MPa. Os blocos produzidos com escória de aciaria receberam nomenclatura de BE enquanto os blocos produzidos com agregados naturais BN. A Tabela 3.2 seguir apresenta os traços dos blocos de concreto em peso e em volume.

Tabela 3.2: Traço dos blocos produzidos

Traço dos blocos em peso (Kg)				
Bloco	Cimento	Areia miúdo	Agregado graúdo	Fator água/cimento
BN	1,00	12,5	1,39	0,50
BE	1,00	12,42	2,03	1,00

Traço dos blocos em volume (L)				
Bloco	Cimento	Areia miúdo	Agregado graúdo	Fator água/cimento
BN	1,00	7,96	1,07	0,50
BE	1,00	6,61	1,21	1,00

3.2.2 Moldagem e cura dos elementos para alvenaria

Os blocos de concreto para alvenaria foram produzidos na linha de produção da indústria de pré-moldados. A adição de materiais foi conduzida por processo gravimétrico e os elementos moldados em uma vibro prensa.

Os elementos com idade zero foram acondicionados sobre paletes, e levados à câmara úmida, com umidade relativa do ar maior que 95% e temperatura de 30°C onde permaneceram por 12 horas. Após cura úmida, os blocos foram envelopados por lonas de PVC onde permaneceram até a data para a realização dos ensaios mecânicos de compressão e flexão, nas idades de 3, 7, 14, 56 dias.

A produção dos blocos estruturais de concreto convencional e com escória foi realizada pela indústria de pré-moldados BLOCO SIGMA, localizada em Minas Gerais e certificada pela ABCP. Os blocos de agregado natural e de escória produzidos pela empresa podem ser visualizados na Figura 3.13 a seguir.

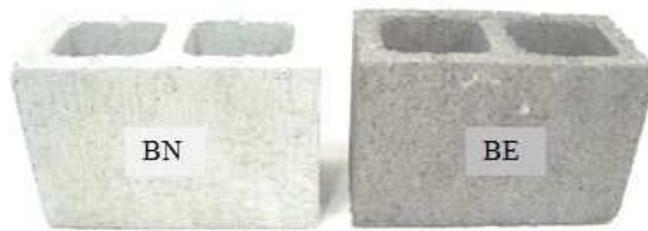


Figura 3.13: Blocos de concreto fabricados

3.2.3 Análise dimensional dos blocos

O ensaio consiste em analisar as dimensões do bloco modulares produzidos quanto à largura, à altura, ao comprimento, à espessura das paredes, às dimensões dos furos e aos raios das mísulas. Os blocos analisados foram verificados somente quanto à largura (l), à altura (h), ao comprimento (c) e à espessura das paredes (e). Devem-se analisar para a largura, altura e comprimento três determinações em pontos distintos de cada face. O valor da espessura mínima das paredes é obtido por duas determinações em cada parede longitudinal do bloco e uma determinação em cada parede transversal. As dimensões foram medidas utilizando um paquímetro.

A determinação da análise dimensional dos blocos estruturais de concreto, BN e BE, foram realizadas em conformidade com a NBR 12118/11. A Figura 3.14 ilustra as medições realizadas nos blocos.



a. Largura (l)



b. Altura (h)



c. Comprimento (c)



d. Espessura (e)

Figura 3.14: Análise dimensional dos blocos

3.2.4 Teor de umidade

A determinação do teor de umidade total dos blocos de concreto foi conduzida de acordo com a metodologia da NBR 9939/11. O ensaio consiste em determinar a massa do bloco na condição inicial, onde é determinada a massa do bloco em temperatura ambiente, e na condição final, onde é determinada a massa final do bloco seco em estufa em temperatura constante na faixa de 105°C - 110°C. A massa final é obtida quando a diferença entre os intervalos de pesagem não for superior a 0,1% de perda de massa do bloco. O teor de umidade dos blocos foi determinado através da Equação 3.9 a seguir.

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:

h = teor de umidade total em porcentagem;

M_i = massa inicial do bloco;

M_f = massa final do bloco após secagem em estufa.

A Figura 3.15 ilustra o procedimento para determinação da umidade dos blocos.



Figura 3.15: Determinação de umidade dos blocos

3.2.5 Absorção de água

A determinação da absorção de água dos blocos foi conduzida segundo as exigências da NBR 12118/06. A absorção de água é a relação existente entre a massa de água contida no bloco saturado e a massa do bloco seco em estufa até constância de massa. A verificação da secagem consiste em definir a massa do bloco seco em estufa à temperatura de 105±5 °C. Inicialmente, anota-se o valor da massa do bloco em temperatura ambiente. Para a obtenção da massa do bloco seco em estufa, deve-se

colocá-lo neste equipamento por 24 horas e após esse período determinar o valor da massa do bloco. O bloco deve retornar a estufa e permanecer por mais 2 horas anotando posteriormente o valor de massa obtido. É necessário repetir a operação a cada 2 horas até que em duas determinações sucessivas não apontem diferença de 0,5% em relação ao valor da massa anterior.

A verificação da saturação consiste em definir a massa do bloco saturado em água a temperatura de 23 ± 5 °C imergindo-o por 24 horas. Após esse período, deve-se remover a água visível na superfície do bloco, utilizando um pano absorvente, e anotar o valor da massa do bloco encontrado. O bloco deve retornar ao processo de imersão em água por mais 2 horas. É necessário repetir a operação a cada 2 horas até que duas determinações sucessivas não apontem diferença de 0,5% em relação ao valor da massa anterior.

A Figura 3.16 ilustra o procedimento para determinação da absorção de água nos blocos.



Figura 3.16: Determinação da absorção de água nos blocos

3.2.6 Expansibilidade

A determinação da expansibilidade dos elementos será procedida a partir da análise da estabilidade dimensional para os elementos fabricados em concreto convencional e escória de aciaria, segundo ciclos de molhagem e secagem.

Para a determinação da expansibilidade dos blocos devem ser fixados pinos de referência, na seção geométrica dos mesmos, de modo que sirvam de parâmetro para as determinações das medidas durante o ensaio, obtendo sua expansão através de um extensômetro. Antes do início de todos os ciclos devem ser determinados a massa, o

volume e a densidade dos materiais. Para estabelecer as determinações das medidas, devem-se utilizar três corpos de prova para os elementos fabricados em concreto convencional e três corpos de prova para os elementos fabricados com escória de aciaria.

Inicialmente, realiza-se a apuração do valor inicial correspondente a medida entre as faces internas dos pinos. Em seguida, devem-se colocar os corpos de prova na estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas. Após esse período, devem-se obter novas leituras entre os pinos de referência. Assim que as leituras forem efetuadas, os corpos de prova deverão ser imersos em um tanque com água. O procedimento para a leitura das medidas deve ser repetido para os intervalos de tempo de 7, 14, 28 e 56 dias.

A Figura 3.17 ilustra os procedimentos utilizados para determinação das expansibilidades dos blocos estruturais produzidos com agregados naturais e com escória de aciaria.



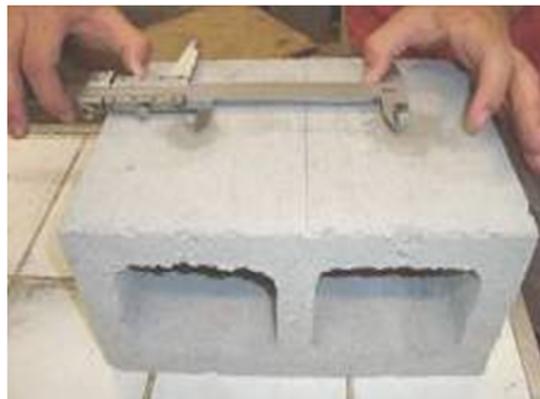
a: Marcação furos



b: Execução dos furos



c: Fixação dos pinos de referência



d: Determinação da expansibilidade

Figura 3.17: Determinação da expansibilidade dos blocos de concreto

3.2.7 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão simples será determinada individualmente para cada corpo de prova e expressa pela média de suas repetições. Para a execução do ensaio, deve-se inicialmente capear a superfície dos corpos de prova a fim de se obter a regularização de suas faces. Todos os corpos de prova devem ser dispostos de forma que a carga seja aplicada na direção do esforço que o bloco deve suportar durante o seu emprego. Ao colocar o corpo de prova na prensa deve-se posicioná-lo de modo que o seu centro de gravidade coincida com o eixo de carga dos pratos da prensa para que não ocorra efeito de torção.

Sua determinação é especificada pela NBR 12118/11 que descreve o procedimento de ensaio de determinação da resistência à compressão de elementos pré-moldados de concreto destinados à alvenaria. A resistência à compressão é definida através da Equação 3.10 a seguir.

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

Onde :

R_c é a resistência à compressão em MPa;

P é a carga de ruptura em kN;

A é a área bruta do corpo de prova em cm^2 .

A Figura 3.18, a seguir, ilustra os procedimentos necessários para determinação da resistência à compressão dos blocos de concreto para alvenaria modular.



a: Capeamento



b: Ensaio de compressão

Figura 3.18: Determinação da resistência a compressão dos blocos

3.2.8 Análise da durabilidade dos blocos de concreto produzidos

Afim de que pudessem ser determinados parâmetros de durabilidade para as misturas produzidas na confecção dos blocos de concreto para alvenaria modular foram produzidos corpos de prova com dimensão 25x25x200(mm), extraídos dos blocos obtidos do processo industrial.

Esse procedimento foi uma adaptação do método ASTM C-1012/97, onde foram adaptados parâmetros de moldagem, cura e geometria dos corpos de prova. Essa adaptação teve por finalidade estudar o comportamento dos agregados de escória de aciaria aplicados como matriz na produção de elementos pré-fabricados. Procedimentos relacionados ao número amostral, solução de ataque, tempo de análise e de mais análises de ações normalizadas foram mantidas. A Figura 3.19 e Figura 3.20, apresentadas a seguir, ilustram respectivamente o corpo de prova conforme norma ASTM e o corpo de prova com dimensões adaptadas este trabalho.

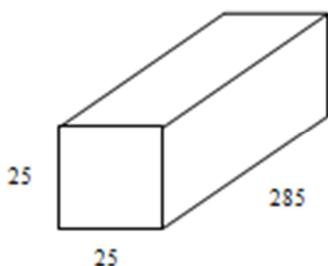


Figura 3.19: Corpo de prova padrão

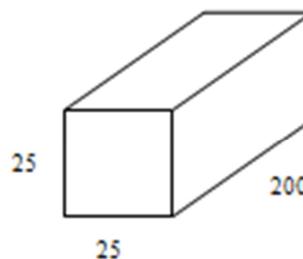


Figura 3.20: Corpo de prova adaptado

Foram fixados pinos de referência segundo ASTM C-426 sobre os corpos de prova prismáticos para medição das variações de comprimento segundo exposição ao ataque químico. Essas barras devem permanecer imersas em uma solução de 50g de Na_2SO_4 /L de água destilada pelo período experimental em recipiente inerte a fim de proporcionar uma deterioração controlada das matrizes de cimento Portland.

As determinações da expansibilidade foram processadas em idades de 1, 2, 3, 4, 8, 13 e 15 semanas após a imersão das barras na solução Na_2SO_4 . As variações de comprimento foram conduzidas partir das medições obtidas por paquímetro nos pinos de fixação soldados nas amostras. Para medições, os pinos devem estar limpos, isentos de quaisquer incrustações e depósitos de materiais, afim de que não sejam prejudicadas as medidas. As medidas devem ser conduzidas com 6 repetições para cada barra sendo o grupo amostral formado por 3 para determinação das variações do comprimento e para

determinação da perda de massa. A cada leitura, o paquímetro deve ser imediatamente limpo, seco e preparado para as próximas leituras.

Após cada leitura nos tempos (1, 2, 3, 4, 8, 13 e 15 semanas) a solução de Na_2SO_4 deve ser descartada, o recipiente deverá ser limpo com água corrente e enxaguado com água destilada. Nova solução deve ser produzida para disposição dos corpos de prova e início do próximo período experimental. Durante o processo de medição da variação de comprimento devem ser observadas quaisquer anormalidades como aspectos das barras, fissuras (localização, tipo, abertura e quantidade) depósitos na superfície, exsudatos quaisquer que sejam, devem ser registrados. Corpos de prova que apresentem anomalias expressivas deverão ser descartados.

Os corpos de prova devem ser apoiados em suportes específicos de modo que não toquem o recipiente e ainda exponham a maior superfície possível à solução. O recipiente deve ser acondicionado de modo a se evitar a evaporação da solução (tampa). A Figura 3.21 ilustra os recipientes e suportes adotados para o ensaio.



Figura 3.21: Recipiente e suportes para o ataque químico

A leitura inicial de todas as barras foi registrada antes do período de imersão à umidade e temperatura ambiente, que também foram registradas. Para a determinação da variação percentual do comprimento dos corpos de prova em relação ao período experimental para o método proposto adaptado da ASTM C-1012 deve ser determinada pela Equação 3.11.

$$\Delta l = \frac{l_i - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3.11)$$

Onde,

l_i – leitura do extensômetro no tempo i .

l_0 - leitura do extensômetro no tempo 0.

3.2.8.1 Adaptação ASTM C-1012/97

Os corpos de prova utilizados neste experimento foram extraídos dos blocos de concreto produzidos com agregados convencionais e com escória de aciaria justificando a necessidade de adaptação no dimensionamento dos prismas padrões. Em virtude do comprimento dos blocos, os prismas extraídos sofreram uma redução para 200 mm. A Figura 3.22, a seguir, ilustra os procedimentos para produção dos corpos de prova utilizados neste trabalho para análise da expansibilidade em ataque químico. Os corpos de prova (25x25x200 mm) foram produzidos por corte diamantado resfriado via úmida, a partir dos blocos (80x80x200 mm) produzidos segundo processo industrializado de pré-fabricação.



Figura 3.22: Produção dos corpos de prova a partir do corte dos blocos estruturais

3.2.9 Preparação da solução

Os reagentes utilizados devem ter sua pureza certificada, afim de não sejam comprometidos os resultados das análises. A água utilizada nesse experimento deve ser destilada e a solução deve ser homogeneizada suficientemente para que não forme precipitados. Para o preparo de 1 litro de solução devem ser adicionados 50g de Na_2SO_4 a 900 ml de água (destilada/ deionizada).

A solução deve ser preparada com 24 horas de antecedência à sua aplicação, devendo ser armazenada em ambiente com temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. O PH da solução deverá ser obtido antes do uso e deve estar entre $6 \leq \text{PH} \leq 8$, como indicado na Figura 3.23. As soluções que apresentarem valores excedentes aos limites indicados deverão ser descartadas. O volume da solução deve ser superior à $4x \text{ vol}^{\text{CP}}$. Será adotado nesse experimento um volume de solução com volume superior a $4,5x \text{ vol}^{\text{CPS}}$ imersos.

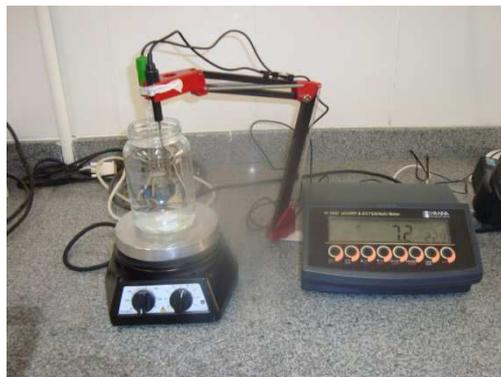


Figura 3.23: Destilação da água e análise do PH da solução

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos agregados

4.1.1 Análise químico-ambiental da escória de aciaria

A classificação da escória de aciaria elétrica da empresa Arcelor Mittal Piracicaba, foi obtida em conformidade com os parâmetros estipulados pelas normas brasileiras por empresa privada especializada.

Na análise efetuada, os parâmetros não ultrapassaram os limites máximos indicados para extrato (mg/L) o lixiviado. Contudo, a determinação quanto ao solubilizado apresentou-se acima do limite máximo permitido no extrato para o parâmetro alumínio. O valor limite proposto em norma bem como o valor obtido na análise da escória de aciaria para o parâmetro alumínio pode ser visualizado na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1: Parâmetro fora dos limites para a solubilização

Parâmetro Alumínio	
Limite máximo no extrato	0,2 mg/L
Valor presente na amostra de escória de aciaria	0,6 mg/L

Após essa análise a escória de aciaria elétrica da empresa Arcelor Mittal Piracicaba pode ser classificada como um resíduo sólido de classe II A – não inerte. Essa classificação consiste em afirmar que as amostras analisadas estão isentas de características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, todavia, possuem constituintes em quantidade superior ao estipulado por norma que podem ser solubilizados em água.

4.1.2 Teor de metálicos da escória de aciaria

A escória de aciaria bruta proveniente da siderúrgica Arcelor Mittal de Piracicaba apresentou um teor de metálicos de 52,7 %, valor este que inviabiliza a sua utilização de forma direta como agregado para a construção civil. As reações de endurecimento do cimento Portland desenvolvem competências mecânicas capazes de neutralizar as ações expansivas de óxidos de cálcio e magnésio (CaO e MgO) presentes na escória de aciaria. Porém, o mesmo não acontece para os óxidos de ferro (FeO) presentes em elevados teores nos agregados brutos de escória de aciaria. A Figura 4.1 a seguir, ilustra um bloco de concreto produzido com escória de aciaria bruta em substituição ao agregado natural e um bloco de concreto produzido com escória de aciaria pós-processada, ou seja, com teores de metálicos inferiores a 5%.



Figura 4.1: Bloco de concreto produzido com escória de aciaria

Quando submetidos às operações de pós-processamento utilizando o método proposto neste trabalho, as escórias de aciaria exibem teor percentual de material metálico de 0,04%. Esse resultado demonstra a viabilidade para o processo proposto na redução da fração metálica em escala laboratorial bem como a utilização deste material como agregado na produção dos blocos de concreto. Os resultados da análise de teor metálico da escória de aciaria antes e após o processamento podem ser visualizados na Figura 4.2 a seguir.

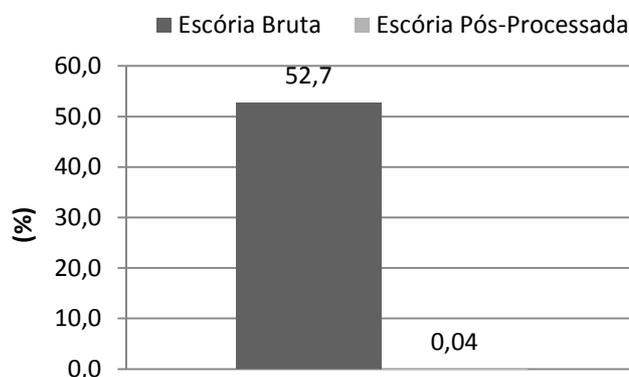


Figura 4.2: Teores de metálicos presente na escória de aciaria elétrica

4.1.3 Análise granulométrica dos agregados

Na análise granulométrica dos agregados miúdos a areia natural apresentou-se com uma distribuição adequada dos grãos e dentro dos limites utilizáveis enquanto o agregado miúdo proveniente da escória de aciaria apresentou trecho fora da zona utilizável prescrita na NBR NM 248/03 com uma fração de finos reduzida. Ausência de finos deste material pode ser justificada pelas operações de pós-processamento da escória, em que foram recuperadas frações metálicas deste material. Esse processo de recuperação acaba por retirar do material uma grande parte de finos na escória. O agregado de escória apresentou maior dimensão máxima característica e também maior módulo de finura comparativamente ao agregado natural. Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados obtidos para a dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados miúdos.

Tabela 4.2: Análise granulométrica dos agregados miúdos

	AE	AN
Dimensão máxima	9,5	4,8
Módulo de finura	3,82	2,84

A Figura 4.3 a seguir ilustra a distribuição granulométrica dos agregados miúdos de escória de aciaria elétrica e natural segundo a normatização brasileira.

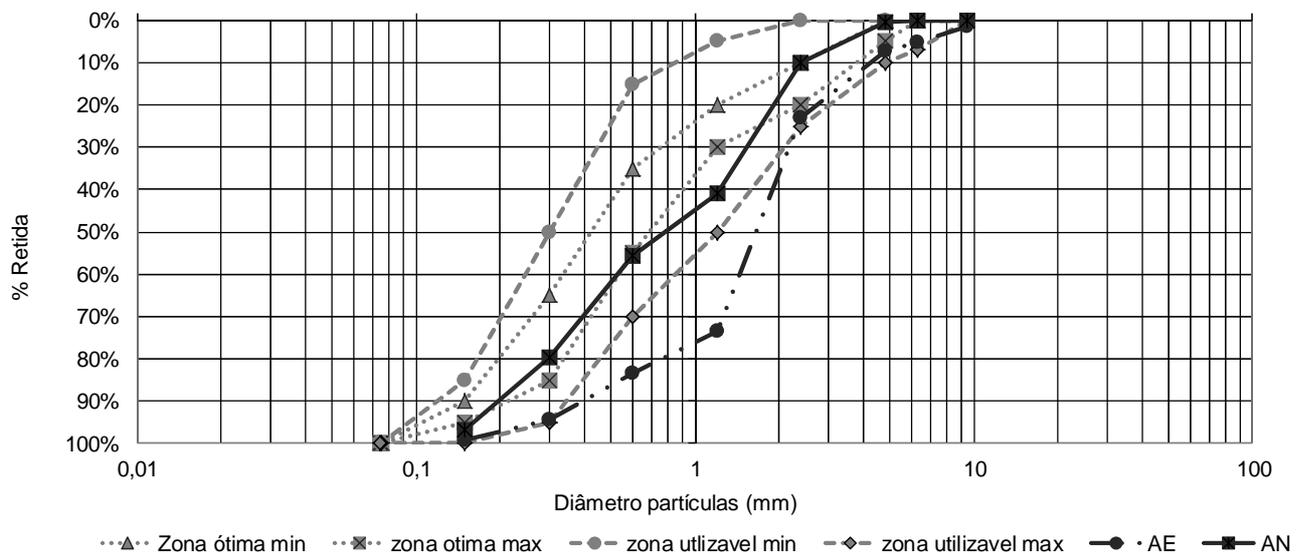


Figura 4.3: Distribuição granulométrica dos agregados miúdos

Na análise granulométrica dos agregados graúdos, o agregado natural (brita de gnaise) apresentou-se com granulometria predominante superior a granulometria predominante do agregado artificial (brita de escória) embora possam ser classificadas comercialmente em um mesmo tipo. O agregado proveniente da escória de aciaria apresenta cerca de 80% do material entre as granulometrias 6,3 – 9,0 mm sendo classificado como brita 0. O agregado natural proveniente da rocha gnaise apresenta, aproximadamente, 75% do material entre as granulometrias 9,5 -12 mm e, portanto, também classificada como brita 0. Na Tabela 4.3 a seguir são apresentados os resultados obtidos para a dimensão máxima característica e módulo de finura dos agregados graúdos.

Tabela 4.3: Análise granulométrica dos agregados graúdos

	AE	AN
Dimensão máxima	19,0	25
Módulo de finura	6,31	7,31

A Figura 4.4 a seguir ilustra a distribuição granulométrica dos agregados graúdos de escória de aciaria elétrica e natural segundo a normatização brasileira.

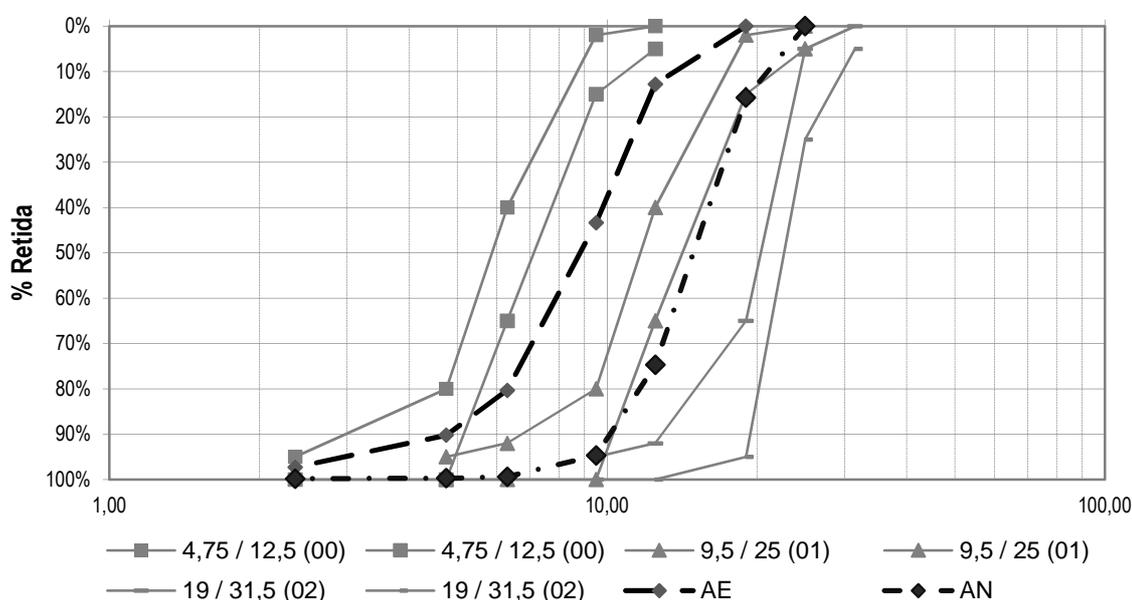


Figura 4.4: Distribuição granulométrica dos agregados graúdos

4.1.4 Teor de Umidade

Analisando o teor de umidade dos agregados temos que o agregado miúdo produzido a partir da escória de aciaria elétrica apresentou valor superior ao valor obtido do agregado miúdo natural, fato que evidencia a higroscopicidade destes grãos. Para os agregados graúdos, temos o inverso onde o agregado natural apresenta maior teor de umidade. Essa diferença de umidade entre os agregados fica evidente quando comparamos os agregados miúdos onde o agregado de escória apresentou uma umidade de 0,76% contra os 0,2% obtidos nos agregados naturais. Quando comparamos o teor de umidade dos agregados graúdos temos uma diferença mais discreta onde os agregados de escória apresentaram 0,1% de umidade e os agregados naturais 0,3%. A Figura 4.5 a seguir, ilustra os resultados obtidos para o ensaio de teor de umidade dos agregados miúdos e graúdos.

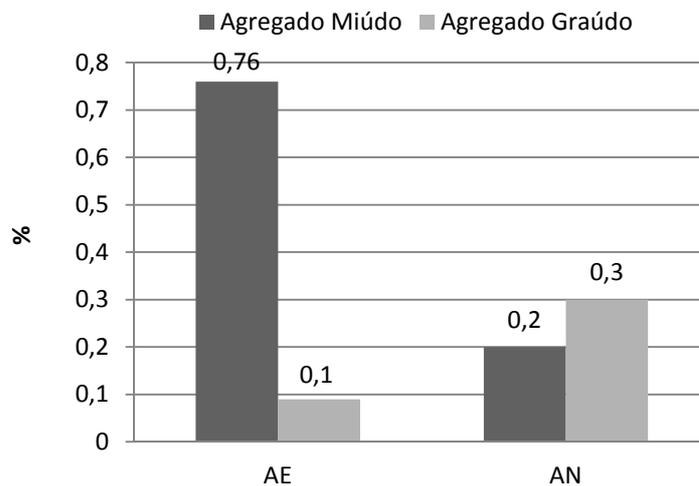


Figura 4.5: Teor de umidade dos agregados

4.1.5 Teor de material pulverulento

O agregado produzido com escória de aciaria apresentou porcentagem inferior ao agregado natural em relação ao teor de material pulverulento presente na amostra. O agregado artificial apresentou 1,2% enquanto o agregado natural 2,8%. Contudo as amostras dos materiais apresentaram valor inferior ao limite normativo estabelecido pela NBR 7211/09, a qual estipula 3,0 % para concreto submetido a desgaste superficial e 5,0% para concretos protegidos do desgaste superficial. A Figura 4.6, apresentada a seguir, ilustra os resultados para as amostras de escória e natural.

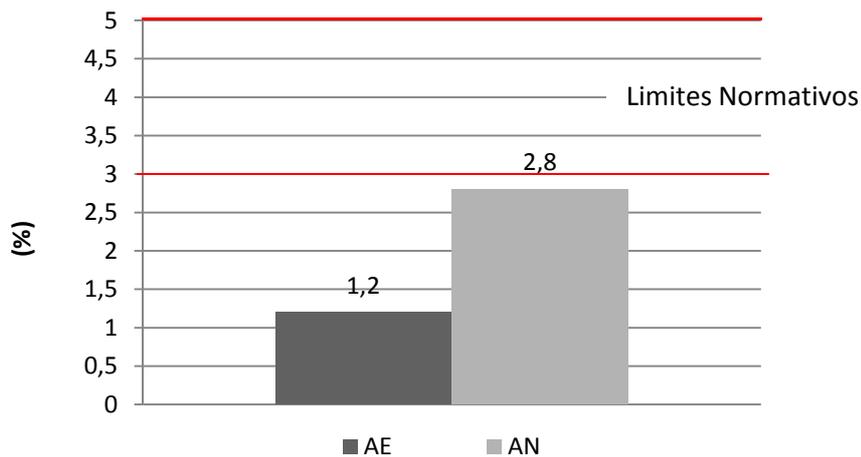


Figura 4.6: Teor de material pulverulento

4.1.6 Massa específica

Os agregados de escória de aciaria elétrica, miúdo e graúdo, apresentaram massa específica superior aos agregados naturais. O agregado miúdo artificial é 21,9% mais denso que o agregado natural enquanto essa diferença aumenta para 31,7% quando comparamos os agregados graúdos. A Figura 4.7, a seguir, ilustra os resultados obtidos para a massa específica dos agregados.

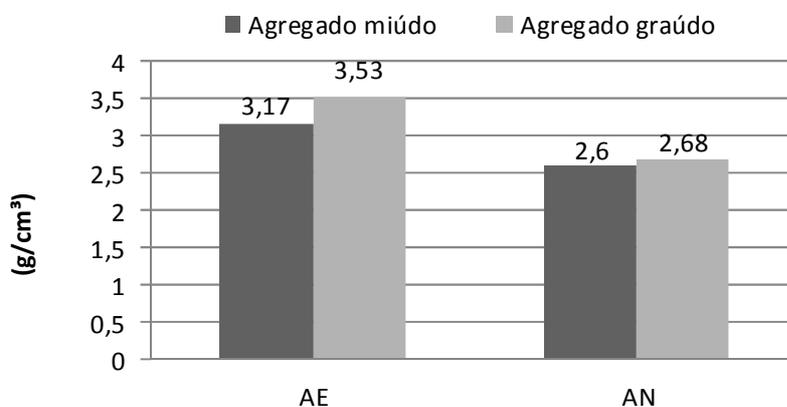


Figura 4.7: Massa específica dos agregados

4.1.7 Massa unitária

Os agregados miúdos e graúdos de escória de aciaria apresentam massa unitária superior aos agregados naturais. Os agregados naturais apresentaram valores entre 1 e 1,7 g/cm³ podendo ser classificados como agregados normais enquanto os agregados de escória apresentaram valores maior ou igual a 1,7 g/cm³ sendo classificados como agregados pesados. Apesar da redução do teor de metálicos para 0,04%, esses

agregados ainda apresentam massa unitária ligeiramente superior aos limites ($1,7 \text{ g/cm}^3$) indicados para massa unitária para os agregados convencionais. A Figura 4.8 a seguir ilustra os resultados obtidos para a massa unitária dos agregados utilizados neste trabalho.

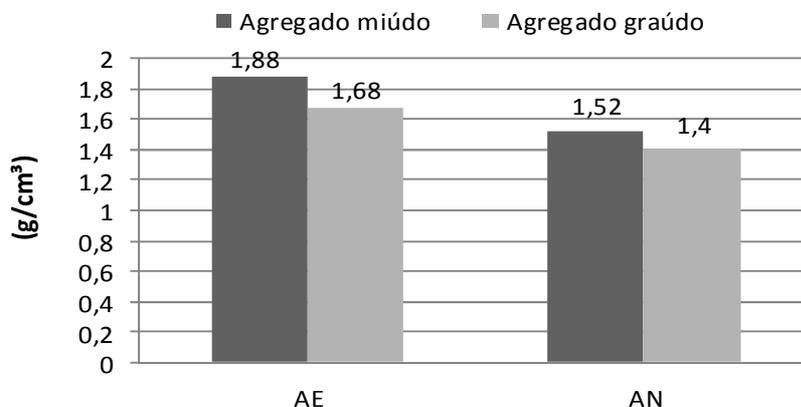


Figura 4.8: Massa unitária dos agregados

4.1.8 Inchamento

A Figura 4.9 a seguir, que ilustra os resultados obtidos para a curva de inchamento dos agregados, nos mostra que para um valor de umidade de aproximadamente 1,5% não há diferença entre os volumes dos agregados miúdos de escória e de areia natural. Porém, com o aumento da umidade a areia apresenta uma variação volumétrica maior que os agregados de escória. Observando resultados obtidos nesta análise, pode-se sugerir que os grãos de escória apresentam relativa porosidade e ainda possui alguma higroscopicidade, o que não se observa na areia natural.

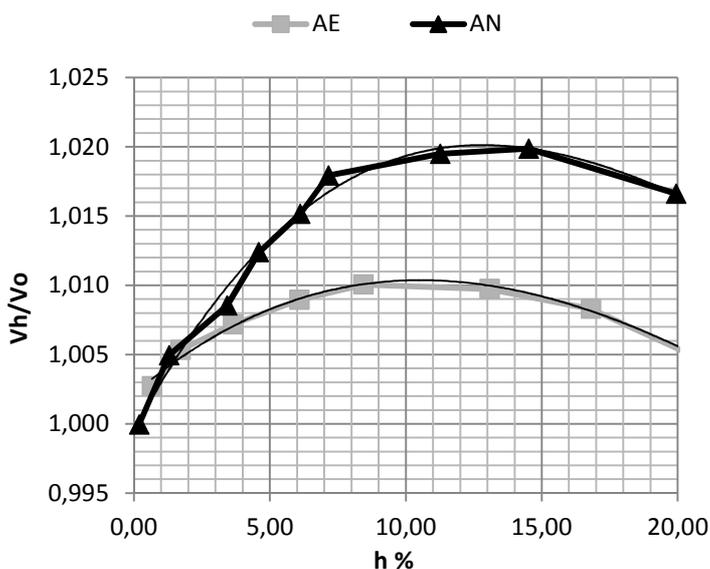


Figura 4.9: Curva de inchamento dos agregados miúdos

4.2 Análise dos blocos

4.2.1 Análise dimensional

Nesta análise observa-se que os blocos produzidos tanto com escória como com agregados naturais está dentro dos padrões prescritos em norma que limita a variação da largura em 2 mm e da altura e comprimento em 3 mm. Na análise dimensional da espessura, tanto os blocos de concreto convencional quanto os blocos de concreto com escória apresentaram resultados superiores aos estipulados por norma que estipula o limite de 25 mm para espessura transversal e espessura longitudinal. Em todas as dimensões analisadas os dois agregados apresentaram valores muito próximos indicando que não há diferença significativa na produção dos blocos utilizando escória de aciaria como agregado. As Figura 4.10 e Figura 4.11 a seguir, apresentam os resultados obtidos para as dimensões analisadas nos blocos modulares produzidos.

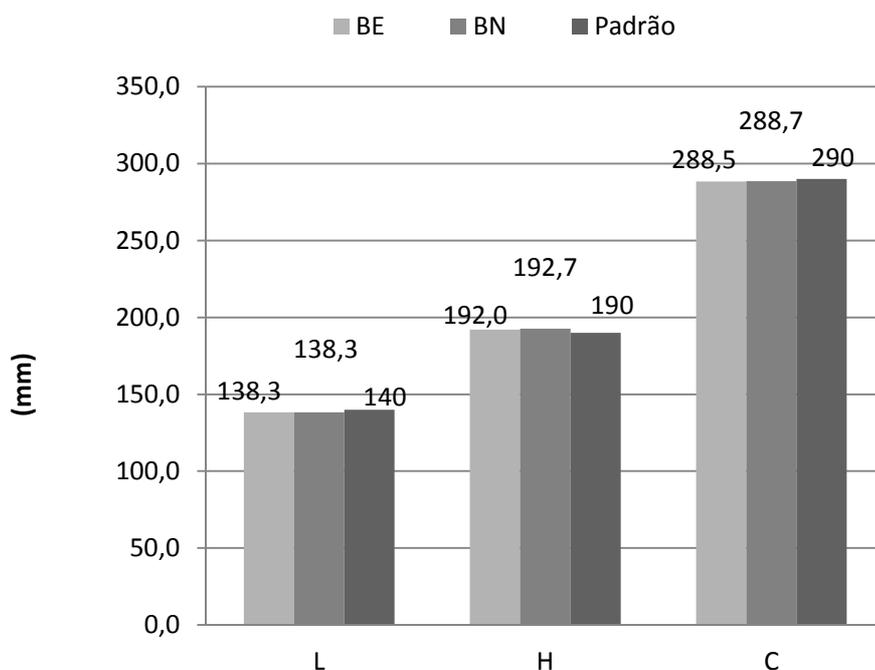


Figura 4.10: Análise dimensional dos blocos modular

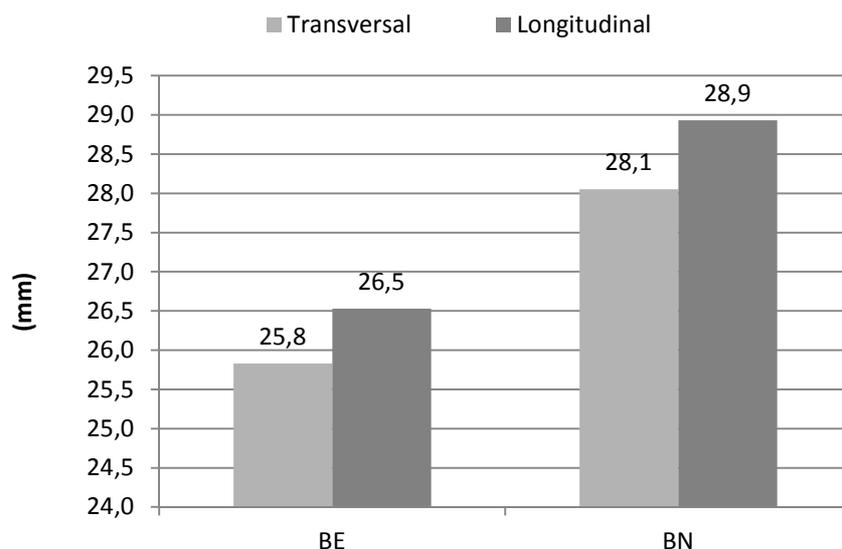


Figura 4.11: Análise da espessura dos blocos estruturais

4.2.2 Teor de umidade e Absorção de água

Os blocos de concreto produzidos com escória de aciaria apresentam teor de umidade superior e absorção de água inferior quando comparados com os blocos modulares produzidos com agregado natural. Os blocos produzidos com ambos os materiais apresentaram teores abaixo do limite normativo fixado em 10% para absorção de água. Tendo em vista os valores encontrados, percebe-se que os blocos de concreto com escória são menos absorptivos que os blocos naturais. Os resultados obtidos para os ensaios de teor de umidade e absorção de água dos blocos podem ser visualizados na Figura 4.12 a seguir.

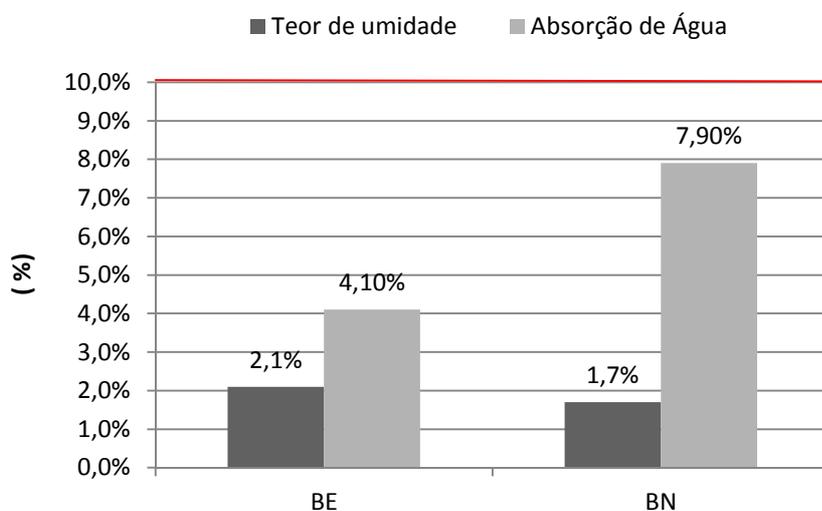


Figura 4.12: Teor de umidade e absorção de água dos blocos

4.2.3 Expansibilidade

A expansibilidade dos blocos, produzidos com escória de aciaria e agregado natural, apresentaram valores muito próximos em todas as idades analisadas apresentando pequenas variações nas medidas. Os blocos produzidos com areia natural apresentaram máxima variação dimensional de 0,07% enquanto os blocos produzidos com escória de aciaria apresentaram máxima variação dimensional de 0,09%. A expansibilidade medida nos blocos encontram-se dentro dos limites para os dois tipos de agregados utilizados neste trabalho. A Figura 4.13 a seguir, ilustra os resultados obtidos para a expansibilidade dos blocos ensaiados.

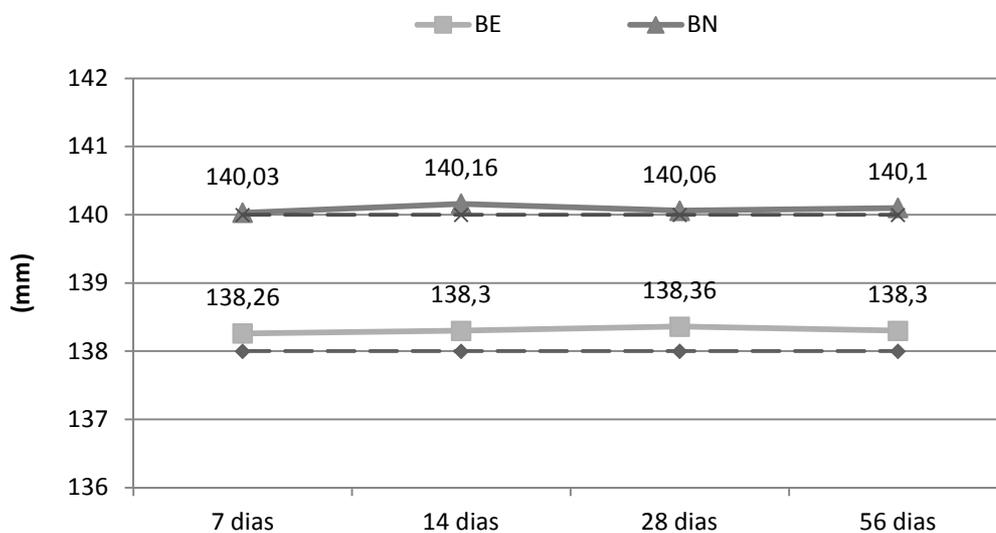


Figura 4.13: Expansibilidade dos blocos modulares

4.2.4 Resistência à compressão dos blocos

Para todas as idades os blocos estruturais produzidos com escória de aciaria apresentaram desempenho mecânico superior aos valores obtidos para os blocos produzidos com agregados naturais. Na resistência aos 28 dias esse aumento foi aproximadamente de 17,5%. A Figura 4.14 a seguir, ilustra os valores obtidos para a resistência a compressão dos blocos.

De acordo com a classe dos blocos a NBR 6136/07 estabelece limites normativos relacionados o valor de f_{bk} , indicando tipos possíveis de aplicação em construção civil e fornecendo classificações normativas para projetos. A classificação dos blocos, segundo a norma, pode ser vista na Tabela 4.4 a seguir.

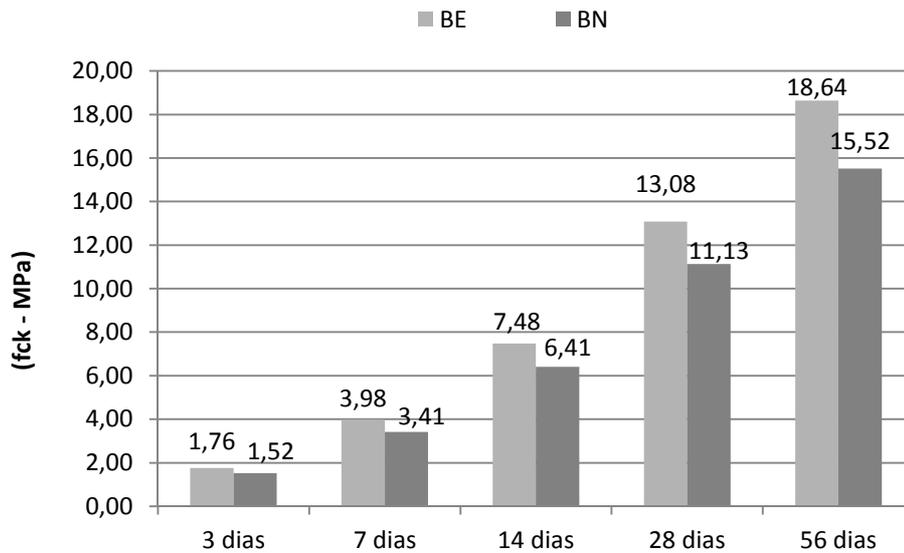


Figura 4.14: Resistência à compressão dos blocos

Tabela 4.4: Classificação dos blocos

Classes Blocos	
AE	Para uso geral, como em paredes externas acima ou abaixo do nível do solo, que podem estar expostas à umidade ou intempéries, e que não recebem revestimento de argamassa de cimento.
BE	Limitada ao uso acima do nível do solo, em paredes externas com revestimento de argamassa de cimento, para proteção contra intempéries e em paredes não expostas às intempéries.

Os blocos de concreto convencional e com escória apresentaram resultados que atendem a designação da norma para a utilização em construções modulares de alvenaria estrutural podendo ser enquadrados na classe AE 6 e BE 6 aos 28 dias ($f_{bk} = 6$ MPa), superior às classes convencionalmente comercializadas, BE 4,5 ($f_{bk} = 4,5$ MPa), de acordo exigências normativas. Na Figura 4.15 a seguir, podemos visualizar os valores de f_{bk} obtidos para os blocos de alvenaria modular.

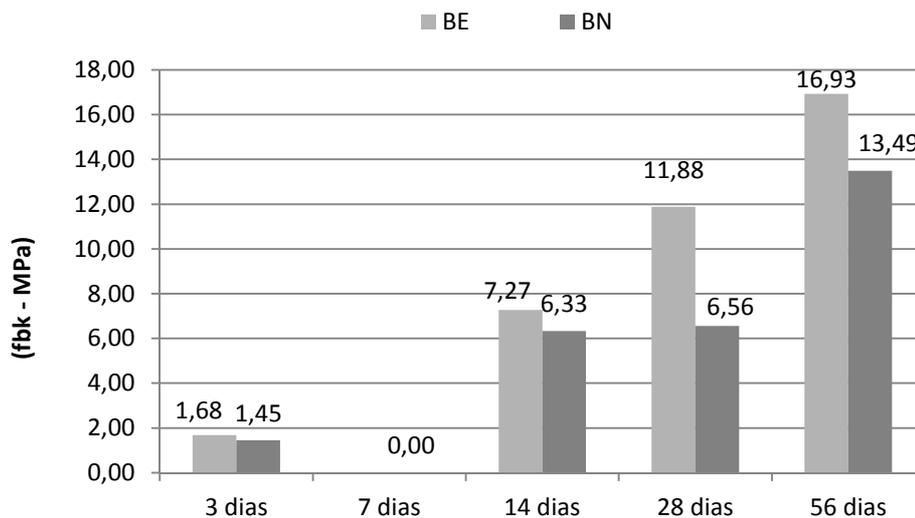


Figura 4.15: Resistência característica dos blocos

4.2.5 Durabilidade

Os corpos de prova oriundos dos blocos de agregados naturais e dos agregados artificiais apresentaram uma variação crescente para a dimensão principal após exposição à solução de Na_2SO_4 . Entretanto a variação observada foi de 0,12% entre a medição inicial e final para os blocos produzidos com agregados naturais e artificiais. Para um melhor ajuste dos dados e a fim de eliminar possíveis imperfeições nas leituras optou-se pela plotagem da linha de tendência linear dos dados. A Figura 4.16 a seguir ilustra a expansibilidade média obtida no comprimento dos corpos de prova durante o ensaio.

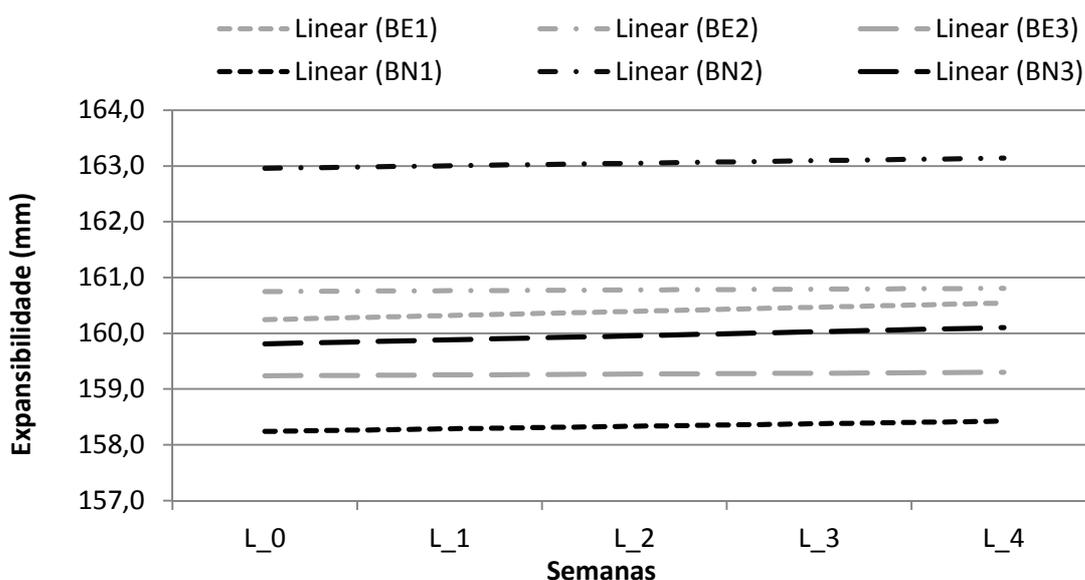


Figura 4.16: Expansibilidade média do comprimento

Os corpos de prova produzidos como agregados naturais e agregados de escória de aciaria apresentaram comportamento semelhante durante o período a que foram expostos ao ataque químico. Existe uma diferença de massa entre a primeira e segunda medição em consequência do material ter sido previamente seco em estufa, mas, nas medições seguintes a variação dimensional observada foi crescente e não ultrapassou 0,37% para os corpos de prova de escória de aciaria e 0,30% para os corpos de prova com agregado natural. A Figura 4.17 a seguir ilustra a variação na massa dos corpos de prova devido à saturação em solução química.

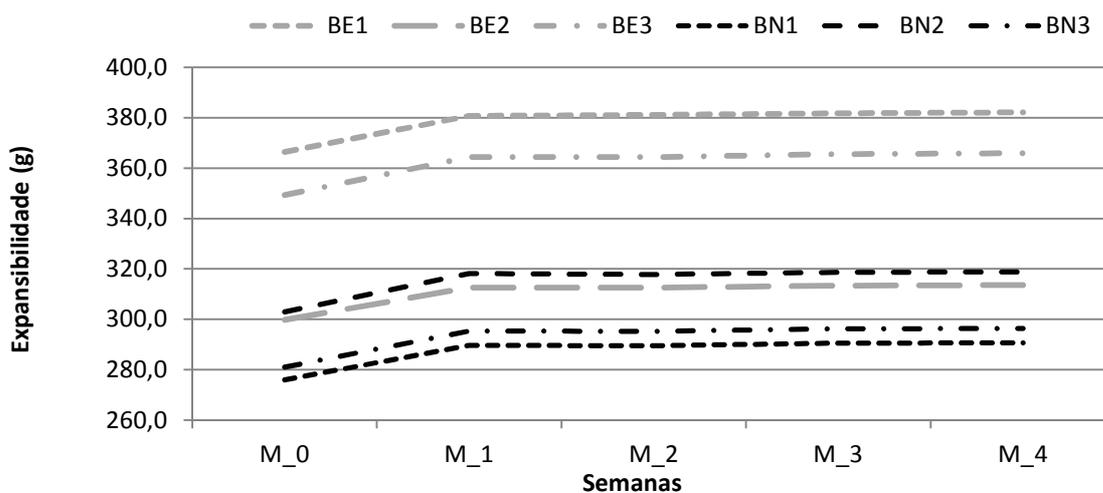


Figura 4.17: Expansibilidade média da massa

O aumento de massa observado nos corpos de prova devido ao ataque químico em solução de Na_2SO_4 sugere uma recombinação dos elementos químicos presentes na escória de aciaria (CaO , MgO , Al_2SO_4 , FeO) com o Na_2SO_4 . Essa recombinação dos elementos pode provocar o surgimento de novos compostos e cristais que provocariam o aumento de massa observado nos resultados. Para uma melhor análise e comprovação destes resultados é necessário um ensaio de Difração de Raios-X (DRX) que não estava previsto na metodologia adotada nesta monografia.

Segundo a metodologia proposta, a análise da expansibilidade dos blocos deveria ser analisada em um período de até quinze semanas sob o ataque químico proposto. Porém somente foi possível analisar as quatro primeiras semanas em virtude de atrasos na possibilidade de uso de equipamentos, instalações e entrega de produtos. Ainda assim, os experimentos continuam em carga afim de que seja cumprido o protocolo experimental proposto.

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista que a presença de metálicos nas matrizes de cimento, produzidos com escória de aciaria, consistem de potencial patológico, torna-se necessário para os agregados utilizados nesse experimento, o pós-processamento para retirada da fração metálica. Os resultados do pós-processamento proporcionaram significativa redução do teor de metálicos, o que viabilizou a utilização das escórias de aciaria como agregados para produção de elementos modulares para alvenaria de concreto de cimento Portland.

A caracterização física da amostra de escória de aciaria indicou características semelhantes aos materiais naturais. Embora a uma parte da distribuição granulométrica da escória esteja fora dos padrões normativos é possível corrigir estes desvios a partir do processamento (britagem), misturas ou adições destes mesmos materiais ocupando as faixas ótimas indicadas pela normatização.

De acordo com planejamento experimental adotado e resultados obtidos, podemos concluir que agregados de escória de aciaria elétrica possuem características, de acordo com normalização ABNT, que indicam viabilidade para seu emprego em substituição aos agregados naturais para produção de blocos de concreto para alvenaria modular.

Em relação aos blocos produzidos com agregados naturais e com escória de aciaria, todos atendem aos requisitos normativos relativamente a dimensões e não apresentam significativa expansibilidade dos comprimentos e da massa quando submetidos ao ataque químico, de acordo com os protocolos aplicados neste experimento.

Embora os agregados artificiais sejam de 22 a 32% mais densos que os naturais os blocos produzidos com escória são 22,1 % mais densos que os blocos naturais. Estes valores não inviabilizam seu uso em estruturas modulares. Os blocos produzidos com escória demonstram um desempenho mecânico superior aos blocos naturais em todas as idades e atendem as exigências normativas para o seu uso em alvenaria modular.

A utilização criteriosa da escória de aciaria elétrica viabiliza, para os parâmetros estudados neste trabalho, o uso como material constituinte de blocos de alvenarias nas aplicações correntes da construção civil, em substituição aos materiais naturais, contribuindo com o meio ambiente e constituindo, ainda, oportunidade para o desenvolvimento e emprego de novos materiais e produtos de base tecnológica.

Embora blocos produzidos com as escórias de aciaria analisadas apresentem competência mecânica para sua utilização como blocos de alvenaria modular, ainda resta algumas variáveis relativamente ao emprego destes blocos em condições de campo, utilização e serviço bem como para durabilidade que ainda necessitam ser determinadas.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Verificar a distorção nos resultados provocada pela adaptação dos comprimentos da barra e materiais utilizados para o ataque químico em solução de Na_2SO_4 .
- Realizar ensaios com os blocos produzidos com escória de aciaria em relação à segurança (estrutural, contra o fogo, no uso e na operação) e habitabilidade (estanqueidade, conforto térmico e acústico) conforme critérios estabelecidos na norma NBR 15575/2013 (Edificações Habitacionais – Desempenho).

REFERÊNCIAS

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf>. Acesso em 25 de outubro de 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004 – **Resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10005 – **Lixiviação de resíduos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10006 – **Solubilidade de resíduos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11578 – **Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12118. - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5732 – **Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5733 – **Cimento Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5735 - **Cimento Portland de alto-forno.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5736 – **Cimento Portland Pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5753 - **Cimento Portland Pozolânico: determinação da pozolanicidade.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6136 - **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6467-**Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7211 – **Agregado para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7809 – **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9938 – **Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9939 – **Agregado – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 27- **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 45. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 46 – **Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 52. **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** . Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM 53. **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro 2009.

ASSOCIATION STANDARD TEST METHOD (ASTM). C-1012. **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.** Estados Unidos, 1997.

ASSOCIATION STANDARD TEST METHOD (ASTM). C-426. **Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units.** Estados Unidos, 2010.

BAUER, L. A. Falcão (Coord.) et al. **Materiais de Construção I.** 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

CAMACHO, J. S. **Projeto de Edifício de Alvenaria Estrutural.** São Paulo, UNESP, Universidade Estadual Paulista “Julio De Mesquita Filho”. 2006.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado.** Rio de Janeiro, RJ. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário de resíduos industriais.** São Paulo, CETESB, 1996.

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

KAMADA, C. E. **Estudo da viabilidade do emprego de concreto produzido com escória de aciaria em pavimentos rígidos.** Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008. 144 p.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** São Paulo, SP. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2000.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2008.

Motz, H.; Geiseler, J., **A new BOF slag treatment technology**. 2. European Oxygen Steel Making Congress from 13±15 October 1997.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, RS. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 1ª edição. São Paulo: PINI, 1982.

PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti, PADULA, F. R. G, FRANÇA, M. B. B, KAMADA, C. E. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para a utilização de escória de aciaria na fabricação argamassa para alvenarias**. Congresso Construção. Universidade de Coimbra. Coimbra 2007.

PERA, J. **State of the art report – use of waste materials in construction in western europe**. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais**. São Paulo, 1996. p. 1-20.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Concreto de Cimento Portland**. 11ª edição. Rio de Janeiro: Globo, 1987.

POLISSENI, A. E. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escória de aciaria elétrica micronizada como material cimentício**. Porto Alegre, RS. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

RAPOSO, C.O.L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. Tese (Mestrado) –Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

SJOSTROM, E. Service life of the building. In: **Application of the performance concept in building**. CIB: Tel Aviv, 1996, v.2, p.6-1;6-11.

ANEXO

Anexo A – Análise químico-ambiental

A análise laboratorial de caracterização químico-ambiental da escória de aciaria elétrica Arcelor Mittal Piracicaba realizada pela empresa Bioagri.



BOLETIM DE ANÁLISE Nº 5002327 - 2
OS: 2005003631-04

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 Nº 05010663-20

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

23.02.05

Data de Conclusão

11.05.05

Informações Gerais

- **Identificação da Amostra:** Resíduo (Escória)
- **Coletor:** Edson – Bioagri Ambiental Ltda
 A amostragem foi realizada com base na NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos
- **Data/Hora da Coleta:** 22.03.05 – 17:01 hs.
- **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
Mercúrio:	SMEWW 3112 B – Cold-Vapor Atomic Absorption Spectrometric Method
Cianetos:	SMEWW 4500 – CN ⁻ - C – Total Cyanide after Distillation SMEWW 4500 – CN ⁻ - F – Cyanide-Selective Electrode Method
Fenóis Totais:	USEPA SW 846 – 9065 – Phenolics (Spectrophotometric, Manual 4-AAP with Distillation)
pH:	SMEWW 4500 – H ⁺ - B – Electrometric Method
Sólidos:	SMEWW 2540 – B Total Solids Dried at 103 – 105 °C.
Sulfeto:	SMEWW 4500 S ⁻² F – Iodometric Method
Surfactantes:	SMEWW 5540 C – Anionic Surfactants as MBAS

Resultados Analíticos da Amostra de Resíduo Escória (05010663-20)

Tabela 1. Determinações sobre a Massa Bruta.

Parâmetro	Unidade	LQ	Resultado	VMP
Umidade	% p/p	0,1	0,92	
Inflamabilidade^a				
Ponto de Fulgor	°C		> 60	60 ^d
Corrosividade^b				
pH (suspensão a 50%)			7,4	2,0 – 12,5
Reatividade^c				
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	99,1	
pH Final			8,8	
Tempo Total de Lixiviação (h)			18	18 ± 2
Inorgânicos				
Arsênio	mg/L	0,05	< 0,05	1,0
Bário	mg/L	0,1	1,21	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	12,5	150,0
Mercurio	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	0,2	< 0,2	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	0,01	< 0,01	0,07
Cloreto de Vinila	mg/L	0,2	< 0,2	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,2	< 0,2	100
Clorofórmio	mg/L	0,2	< 0,2	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	0,2	< 0,2	7,5
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,2	< 0,2	1,0
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,2	< 0,2	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
Metililcetona	mg/L	0,2	< 0,2	200,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,01	< 0,01	2,0
Piridina	mg/L	0,2	< 0,2	5,0
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,2	< 0,2	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,2	< 0,2	4,0
Tricloroetano	mg/L	0,2	< 0,2	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			8,4	
Inorgânicos				
Alumínio	mg/L	0,05	0,60	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Bário	mg/L	0,1	0,21	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	1,11	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	< 0,05	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	0,70	1,5
Manganês	mg/L	0,05	< 0,05	0,1
Mercurio	mg/L	0,001	< 0,001	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	0,1	< 0,1	10,0
Prata	mg/L	0,05	< 0,05	0,05
Selênio	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Sódio	mg/L	0,1	8,20	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	10,9	250,0
Surfactantes	mg/L	0,1	< 0,1	0,5
Zinco	mg/L	0,05	0,16	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.

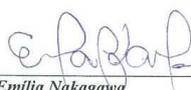
Nota 1: Os resultados referem-se somente à amostra analisada.
Este Boletim Analítico só pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

Nota 2: **Interpretação dos resultados:**

Solubilizado: O parâmetro Alumínio ultrapassou o Limite Máximo Permitido. 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 "Escória", 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.


 Emília Nakagawa
 Química
 CRQ 004144069 – 4ª Região

12,5,5
 Data


 Nereida Ap. Bongiorno
 Coordenador do Projeto
 CRQ 04409149 – 4ª Região

12/05/05
 Data

APÊNDICES

Apêndice A : Análise do Teor de Metálicos na Escória

	Escória de aciaria	
	Bruta	Pós-Processada
Massa seca em estufa (g)	2413,01	2146,9
1º material Retido	1235,7	2127
2º material Retido	24,3	1978,9
3º material Retido	6,7	0,8
4º material Retido	3,5	-
5º material Retido	1,4	-
6º material Retido	-	-
Total Retido (g)	1271,6	-

Apêndice B : Análises granulométricas dos agregados

PENEIRAS		MASSA RETIDA (G)	PORCENTAGEM RETIDA	PORCENTAGEM ACUMULADA
Número	Graduação (mm)	AE	AE	AE
3/8"	9,5	27,65	1,5	1,5
1/4"	6,3	67,25	3,7	5,2
4	4,8	41,20	2,2	7,4
8	2,4	284,75	15,5	22,9
16	1,2	931,30	50,6	73,5
30	0,6	183,75	10,0	83,5
50	0,3	204,90	11,1	94,6
100	0,15	83,95	4,6	99,2
200	0,075	12,30	0,7	99,8
Fundo	0,074	3,05	0,2	

PENEIRAS		MASSA RETIDA (G)	PORCENTAGEM RETIDA	PORCENTAGEM ACUMULADA
Número	Graduação (mm)	AN	AN	AN
3/8"	9,5	0,00	0,0	1,5
1/4"	6,3	0,00	0,4	5,2
4	4,8	11,10	9,6	7,4
8	2,4	296,00	31,0	22,9
16	1,2	957,40	14,8	73,5
30	0,6	457,30	23,9	83,5
50	0,3	739,40	17,1	94,6
100	0,15	528,20	2,6	99,2
200	0,075	79,00	0,6	99,8
Fundo	0,074	20,00	0,0	

Peneiras		Massa retida (g)	Porcentagem retida	Porcentagem acumulada
Número	Graduação (mm)	AE	AE	AE
3/4"	19,0	0	0,0	0,0
1/2"	12,5	257,1	12,8	12,8
3/8"	9,5	612,7	30,6	43,4
1/4"	6,3	737,4	36,8	80,3
4	4,8	198,3	9,9	90,2
8	2,4	142	7,1	97,3
16	1,2	53,4	2,7	99,90
30	0,6	0,7	0,0	100
50	0,3	0,2	0,0	100
100	0,15	0,0	0,0	100
200	0,075	0,0	0,0	100
Fundo	0,074	0,6	0,0	

PENEIRAS		MASSA RETIDA (G)	PORCENTAGEM RETIDA	PORCENTAGEM ACUMULADA
Número	Graduação (mm)	AN	AN	AN
3/4"	19,0	488,5	15,8	15,8
1/2"	12,5	1827,3	58,9	74,7
3/8"	9,5	620,5	20,0	94,7
1/4"	6,3	146,3	4,7	99,7
4	4,8	8,2	0,3	99,7
8	2,4	0,4	0,0	99,7
16	1,2	0,2	0,0	99,7
30	0,6	0,2	0,0	99,7
50	0,3	0,4	0,0	99,7
100	0,15	1,0	0,0	99,8
200	0,075	6,5	0,2	100
Fundo	0,074	0,9	0,0	

Apêndice C : Teor de umidade dos blocos

Espessura mínima da parede dos blocos (mm)								
	Blocos de concreto convencional				Blocos de concreto com escória			
	BN 1	BN 2	BN 3	Média	BE 1	BE 2	BE3	Média
Mi	9440,0	9280,0	9680,0	9440,0	1198,0	1218,0	1192,0	1202,7
Mf	9100,0	9060,0	9460,0	9100,0	1180,0	1198,0	1156,0	1178,0
h %	3,7%	2,4%	2,3%	3,7%	1,5%	1,7%	3,1%	2,1%

Apêndice D : Análise dimensional dos blocos modulares

Dimensões dos blocos (mm)							
Blocos de concreto convencional				Blocos de concreto com escória			
	l	h	c		l	h	c
BN 1	138,13	192,47	287,83	BE 1	138,00	190,09	288,10
BN 2	138,70	193,27	288,83	BE 2	138,37	193,10	288,97
BN 3	137,97	192,37	289,30	BE 3	138,37	192,80	288,33
Média	138,27	192,70	288,65	Média	138,25	192,00	288,47
Padrão	140,00	190,00	290,00	Padrão	140,00	190,00	290,00
Erro (mm)	1,73	-2,70	1,35	Erro (mm)	1,75	-2,00	1,53

Espessura mínima da parede dos blocos (mm)								
	Blocos de concreto convencional				Blocos de concreto com escória			
	BN 1	BN 2	BN 3	Média	BE 1	BE 2	BE3	Média
$e_{\text{transversal}}$	26,15	31,5	26,43	28,05	25,63	26,08	25,80	25,83
$e_{\text{longitudinal}}$	26,80	32,90	27,10	28,93	25,80	27,70	26,10	26,53

Apêndice E : Expansibilidade dos blocos modulares

Expansibilidade dos blocos (mm)							
	Blocos de concreto convencional			Blocos de concreto com escória			
	BN 1	BN 2	BN 3	BE 1	BE 2	BE 3	
Saturado	135,1	144,5	140,5	139,4	138,5	136,9	
Seco	134,0	143,1	139,4	138,0	137,4	135,6	
Δ 7 dias	-1,1	-1,4	-1,1	-1,4	-1,1	-1,3	
Saturado	135,3	144,4	140,8	139,5	138,4	137,0	
Seco	135,2	144,6	140,8	139,5	138,6	137,0	
Δ14 dias	-0,1	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	
Saturado	135,2	144,4	140,6	139,4	138,7	137,0	
Seco	135,2	144,5	140,7	139,4	138,5	137,0	
Δ 28 dias	0,0	0,1	0,1	0,0	-0,2	0,0	
Saturado	135,2	144,4	140,7	139,4	138,5	137,0	
Seco	135,2	144,5	140,7	139,4	138,7	137,0	
Δ 56 dias	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	

Apêndice F: Expansibilidade devido ao ataque químico

		BE			BN		
		CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3
T ₀	M	367,4	300,6	350,3	276,5	303,6	281,6
	L ₁	160,3	160,8	159,2	158,1	163	159,8
		160,3	160,7	159,4	158,2	162,9	159,8
		160,3	160,7	159,3	158,2	162,9	159,8
	L ₂	160,2	160,8	159,2	158,2	162,9	159,9
		160,2	160,8	159,2	158,1	162,9	159,9
		160,3	161	159,3	158,2	163	159,8
T ₁	M	380,7	312,6	364,4	289,7	318,1	295,4
	L ₁	160,3	160,7	159,2	158,4	163,4	159,7
		160,4	160,7	159,3	158,3	163	159,8
		160,4	160,8	159,4	158,2	162,9	159,8
	L ₂	160,4	160,8	159,4	158,3	162,9	159,8
		160,4	160,7	159,2	158,3	162,9	159,9
		160,3	160,8	159,4	158,3	162,9	159,9
T ₂	M	381,1	312,6	364,4	289,5	317,8	295,2
	L ₁	160,4	160,7	159,2	158,3	163,1	160
		160,3	160,7	159,2	158,4	163,1	160
		160,3	160,7	159,1	158,4	163,1	160
	L ₂	160,2	160,7	159,1	158,5	163,1	160
		160,3	160,7	159,1	158,5	163,1	160
		160,3	160,7	159,1	158,5	163,1	160
T ₃	M	381,7	313,4	365,5	290,5	318,7	296,2
	L ₁	160,5	160,7	159,3	158,4	163,1	160,0
		160,5	160,7	159,2	158,4	163,1	160,0
		160,4	160,7	159,3	158,4	163,1	160,0
	L ₂	160,4	160,8	159,2	158,4	163,1	160,1
		160,4	160,9	159,3	158,5	163,1	160,1
		160,4	160,8	159,3	158,5	163,1	160,1
T ₄	M	382,1	313,6	365,9	290,7	318,8	296,4
	L ₁	160,6	160,8	159,3	158,3	163,1	160,0
		160,6	160,9	159,4	158,3	163,1	160,1
		160,6	160,9	159,4	158,3	163,1	160,1
	L ₂	160,6	160,9	159,3	158,3	163,1	160,1
		160,6	160,8	159,4	158,4	163,2	160,1
		160,6	160,9	159,4	158,4	163,1	160,1