



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



Rafael Vital Januzzi

Estudo do comportamento mecânico de blocos com escória de aciaria
visando à aplicabilidade em Alvenaria

Ouro Preto
2012

Rafael Vital Januzzi

Estudo do comportamento mecânico de blocos com escória de aciaria visando à aplicabilidade em Alvenaria

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
2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por apoiarem as minhas decisões e sempre se esforçarem para que meus sonhos fossem concretizados.

As minhas irmãs pelo apoio e amizade.

A minha companheira, Stefany, pela paciência, dedicação e amor.

Ao grupo Pet Civil pelo apoio e companheirismo.

Aos amigos da Engenharia Civil pelos momentos de diversão, alegria e muito estudo.

Ao Professor Ricardo Fiorotti pelo apoio e conhecimentos agregados.

Aos demais Professores da Escola de Minas que compartilharam um pouquinho de seus conhecimentos, construindo assim os engenheiros de amanhã.

A todos o meu Muito Obrigado!

"Ensinar é fazer o aluno enxergar o mundo (...). Se o que ele aprendeu não tiver nada a ver com o mundo que ele percebe e no qual vive, continuará pensando como pensava e esquecerá tudo que, aliás, não aprendeu."

Angélica Russo

RESUMO

Atualmente a geração de resíduos sólidos, devido a processos industriais diversos, é um fator preocupante. Esse é o cenário vivido tanto pelo setor siderúrgico quanto pela construção civil, líderes na geração de rejeitos. Na siderúrgica tem-se a geração da escória de aciaria, caracterizada como resíduo, e a de alto-forno, utilizada como matéria-prima para a indústria cimenteira. Com a finalidade de transformar a escória de aciaria uma matéria-prima para a construção civil, o homem vem desenvolvendo diversas técnicas para utilização e aplicação em vários momentos. Este é o caso dos blocos, com fins estruturais, confeccionados a partir do emprego da escória de aciaria como agregado. Esse resíduo siderúrgico, decorrente da transformação do ferro gusa em aço, tanto pelo processo LD (Linz-Donawitz) quanto arco elétrico, vem se tornando um grande passivo ambiental para tais empresas. Visando a sua reutilização, utilizou-se a escória de ambos os processos para a produção de blocos com fins estruturais. Na literatura não foram encontrados estudos que caracterizem o comportamento mecânico desses blocos quando submetidos ao esforço de compressão. Assim, observou-se a necessidade de estudar este assunto a fim de complementar a literatura com dados e informações de relevância. O uso deste material se torna vantajoso, visto que, o meio ambiente recebe atualmente grande parte deste rejeito das siderúrgicas. Foram feitas análises práticas e teóricas nos blocos já produzidos. Fez-se uma comparação entre as resistências apresentadas nos ensaios práticos e os resultados encontrados em modelagem numérica via método dos elementos finitos, sendo possível, a caracterização dos pontos favoráveis para sua utilização como elemento portante da edificação.

Palavra chave: Alvenaria Estrutural, bloco de escória de aciaria, escória de aciaria, simulação numérica.

ABSTRACT

Currently, solid waste generation due to various industrial processes is a major fact concern. This is the scenario experienced by both the steel industry and by the construction industry, leaders in generating of wastes. In the steel industry there is the generation of steel slag, characterized as waste, and the blast furnace slag, used as raw material for the cement industry. In order to transform the steel slag as raw material for the construction industry, man has developed several techniques for use and application at various times. This is the case of the blocks, with structural purposes, as made using steel slag aggregate. This steel residue resulting from the processing of pig iron into steel by both the electric arc process as LD (Linz-Donawitz) has become a major environmental liability for such companies. Aiming at its reuse, we used the slag from both processes for the production of blocks with structural purposes. In literature there are no studies that characterize the mechanical behavior of these blocks when subjected to compressive stress. Thus, there is a need to study this subject in order to complement the literature with data and information of relevance. Use of this material becomes advantageous since the environment currently receives much of this waste of steel. Analyzes were performed theoretical and practical blocks ever produced. A comparison was made between the resistances presented in practical tests and the results found in numerical modeling via finite element method, it was therefore possible to characterize the points favorable for its use as an element of the building.

Key words: Structural masonry, steel slag block, steel slag, numeric simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo da arquitetura pré-histórica da Alvenaria estrutural. a) Casa tipo colméia - Vila em Cyprus (5650 a.C) b) Casas retangulares - Vila no Iraque (5500 - 5000 a.C). Fonte: (MUSGROVE, et al., 1989).....	13
Figura 2 - A Pirâmide de Quéops (única ainda existente), em Gizé.....	14
Figura 3 - Edifício Monadnock.....	14
Figura 4 - Desenho esquemático da produção do aço. Fonte: (MASUERO, et al., 2004).....	18
Figura 5 – Sequência de operação do conversor a oxigênio tipo LD: (a) carregamento da sucata; (b) carregamento do ferro gusa líquido; (c) sopro de oxigênio; (d) vazamento do aço, e (e) vazamento da escória de aciaria no pote de escória. Fonte: (ARAUJO, 1997).....	19
Figura 6 - Exemplo do uso inadequado de escória de aciaria - fissuração longitudinal irregular em pátio de estacionamento. Fonte (MENDONÇA, 2006).....	21
Figura 7 - Esquema das ações atuantes sobre a estrutura em alvenaria estrutural..	24
Figura 8 - Dimensões do bloco.....	27
Figura 9 - Módulo de elasticidade ou deformação longitudinal.....	31
Figura 10 - Módulo de deformação tangencial Inicial.	31
Figura 11 - Deformação longitudinal e transversal.	32
Figura 12 - Tipos e formas de elementos.	34
Figura 13 –Critério de von Mises com interrupção na tração	37
Figura 14 - Vista frontal do esquema de ensaio e modo de ruptura.....	38
Figura 15 - Abertura provocada pelos deslizamentos da parte superior do bloco (b) sobre a inferior (a). Fonte: Adaptada (MOHAMAD, 2007).....	39
Figura 16 - Bloco de concreto para alvenaria estrutural e bloco de escória de aciaria	40
Figura 17 - Amostras de BE e BC utilizadas para os ensaios.	41
Figura 18 - Modelo carregado uniformemente e respectivas condições de contorno.	42

Figura 19 - Elemento C3D8. Fonte: Manual do ABAQUS.	42
Figura 20 - Distribuição da malha de elementos finitos sobre o modelo.	43
Figura 21 – Tensão x deformação do bloco de concreto	46
Figura 22 – (A) distribuição pasta agregado para matriz dos blocos de concreto convencional BC. (B) distribuição pasta agregado para matriz dos blocos de concreto convencional BE. Fonte: (SILVA, et al., 2010).....	47
Figura 23 – (A) Análise dimensional do bloco: comprimento. (B) Espessura mínima das paredes: longitudinal.	48
Figura 24 - A) Análise dimensional largura. B) Análise dimensional altura	49
Figura 25 - Espessura mínima da parede dos blocos	50
Figura 26 - Representação das dimensões essenciais para o modelo 3D.....	50
Figura 27 - Gráfico análise dimensional dos blocos	51
Figura 28 - Massa específica dos blocos	52
Figura 29 – A) Capeamento do bloco B) Ensaio de resistência a compressão.....	52
Figura 30 - Bloco após o rompimento	53
Figura 31 - Gráfico da resistência à compressão dos blocos	53
Figura 32 - Tensão de deformação do modelo numérico	56
Figura 33 - Elemento da geometria do bloco.....	57
Figura 34 - Distribuição de tensões no modelo	57
Figura 35 - distribuição interna de tensão no modelo.....	58
Figura 36 - Deformação máxima e mínima do modelo.....	58
Figura 37 - Deslocamento vertical do modelo	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das escórias de aciaria elétrica (GEYER et al.,1994) e de aciaria LD (CASTELO BRANCO, 2004)	20
Tabela 2 - Limite normativo fbk	26
Tabela 3 - Dimensões padronizadas do bloco conforme NBR 6136 (1994).....	27
Tabela 4 - Espessura mínima das paredes dos blocos conforme NBR 6136 (1994)	28
Tabela 5 - Umidade máxima segundo a NBR 6136 (1994).....	29
Tabela 6 - Valores das constantes Segundo NBR 6136	44
Tabela 7 - Propriedades dos blocos de concreto (BC) compilados de ALI & PAGE (1988).....	46
Tabela 8 - dimensões obtidas via análise dimensional dos blocos	48
Tabela 9 – Dimensões mínimas da espessura (ϵ) da parede dos blocos - via análise dimensional	49
Tabela 10 - Dados coletados no ensaio de determinação da massa específica	51
Tabela 11 - Resistência à compressão dos blocos de escória e de concreto	53
Tabela 12 - Propriedades dos blocos de escórias de aciaria utilizados na simulação numérica.....	55

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

A.C – Antes de Cristo

AE – Aciaria Elétrica

BC – Bloco de Concreto convencional

BE – Bloco de Escória de aciaria

D.C – Depois de Cristo

Eq – Equação

FEM – Finite Element Method

IABr – Instituto Brasileiro do Aço

LD - Linz-Donawitz

NBR – Norma Brasileira Registrada

MEF – Método dos Elementos Finitos

RCC – Resíduo de construção Civil

RECICLOS – Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos Industriais – CNPQ

LISTA DE SIMBOLOS E UNIDADES

cm – centímetro

g – Grama

g/cm³ - Grama por centímetro cúbico

Kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

GPa - Gigapascal

MPa – Megapascal

m³ - Metro cúbico

mm – Milímetro

N – Newton

t - Tonelada

% - Percentual

± - Mais ou menos

ε – Deformação

σ – Tensão

R_{cc} – Resistência a compressão

E – módulo de elasticidade longitudinal

υ - Coeficiente de Poisson

Δ – Variação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	Erro! Indicador não definido.
1.2 PROBLEMA	16
1.3 PERGUNTA CIENTÍFICA.....	16
1.4 OBJETIVOS GERAL	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	18
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	18
2.1.1 Processos siderúrgicos	18
2.1.2 Escória de aciaria.....	19
2.2 ALVENARIA ESTRUTURAL	21
2.2.1 Demanda estrutural.....	21
2.2.2 Elementos estruturais	22
2.2.3 Distribuição dos esforços	23
2.3 BLOCO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL	24
2.3.1 Classificação dos blocos segundo a NBR 6136 – 1994.....	25
2.3.2 Modulação dos blocos de concreto vazados	27
2.3.3 Propriedade físicas dos blocos	28
2.3.4 Propriedades mecânicas dos blocos.....	30
2.3.5 Modulo de elasticidade.	30
2.3.6 Coeficiente de Poisson	32
2.4 ELEMENTOS FINITOS	33
2.4.1 Modelo elastoplástico para o concreto	36
2.4.2 Bloco de Alvenaria	34
2.4.3 Componentes para a modelagem numérica	37
a) Geometria.....	37
b) Propriedade dos elementos.....	37

c) Condição de contorno e carregamento	38
D) Comportamento na ruptura	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 MATERIAIS ANALISADOS	40
3.1.1 Blocos	40
3.1.2 Aquisição digital de imagens	41
3.2 MODELO NUMÉRICO	41
3.2.1 Bloco de Alvenaria	Erro! Indicador não definido.
3.2.2 Componentes para a modelagem numérica	Erro! Indicador não definido.
3.2.3 Condição de contorno e carregamento	41
3.2.4 Elemento finito e constituição da malha	42
3.3 ENSAIOS COM BLOCOS	43
3.3.1 Resistência a compressão de blocos	43
3.3.2 Análise dimensional de blocos	44
3.3.3 Massa específica dos blocos	44
3.3.4 Resistência à tração.....	44
3.4 CONSIDERAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO BLOCO	47
4.1.1 Aquisição de Imagens digitais	47
4.1.2 Dimensões	48
4.1.3 Massa específica	51
4.1.4 Resistência à compressão	52
4.1.5 Resistência à tração.....	54
4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	55
4.2.1 Dados para a simulação	55
4.2.2 Diagrama tensão e deformação teórico	55
4.2.3 Distribuição de tensão no bloco	56
5 CONCLUSÃO.....	60
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	61
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	62

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A alvenaria estrutural é um processo construtivo no qual se utilizam blocos de concreto ou tijolos cerâmicos na concepção da estrutura da edificação. Esses materiais são utilizados, pois apresentam, principalmente, alta resistência à compressão. Unidos por argamassa, compõem o elemento responsável por absorver e dissipar os carregamentos impostos à edificação (peso-próprio, esforço de vento e outros).

Esse sistema construtivo teve sua origem associada ao surgimento das primeiras civilizações. Relatos comprovam que as primeiras construções, utilizando esse sistema, são datadas de 9000 – 8000 anos antes de Cristo (a.C)., próximas do lago Hulen, em Israel, onde foram encontradas cabanas de pedra com formato circular e semi-subterrâneos (MUSGROVE, et al., 1989). Nesse período, o sistema trabalhava basicamente sobre esforços de compressão, portanto, os monumentos foram concebidos segundo o princípio de pedra sobre pedra, conforme observa-se na Figura 1.

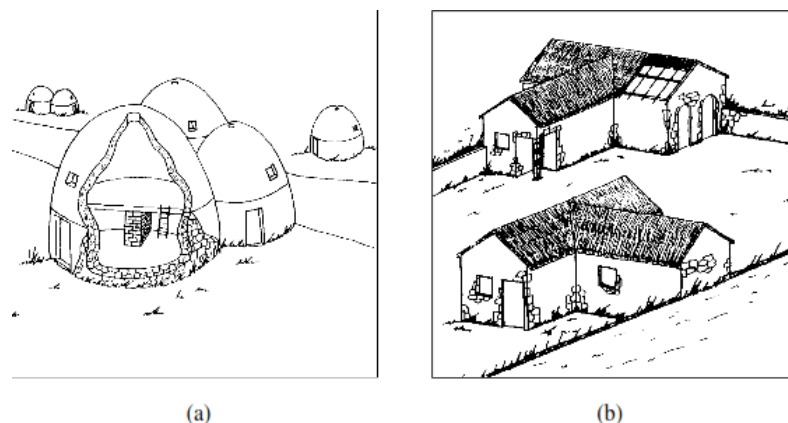


Figura 1 - Exemplo da arquitetura pré-histórica da Alvenaria estrutural. a) Casa tipo colméia - Vila em Cyprus (5650 a.C) b) Casas retangulares - Vila no Iraq (5500 - 5000 a.C). Fonte: (MUSGROVE, et al., 1989)

Várias edificações resistiram ao tempo, mostrando para a civilização atual, toda a cultura daquela época, como é o caso das pirâmides egípcias, Figura 2. São três

grandes pirâmides, Quéfen, Quéops e Miquerinos, construídas em blocos de pedra que datam de aproximadamente 2600 a.C. (CORRÊA, et al., 2003).



Figura 2 - A Pirâmide de Quéops (única ainda existente), em Gizé.

Outro marco monumental foi o Farol de Alexandria, concebido pelo arquiteto grego Sóstrato há aproximadamente 280 a.C., que foi destruído por um terremoto no século XIII. Podemos citar ainda o Coliseu, 70 anos depois de Cristo (d.C.), e a Catedral de Reims, em estilo gótico, foi construída entre 1211 e 1300 d.C.

No final do século XIX o edifício Monadnock, Figura 3, foi construído em alvenaria estrutural sendo, então, considerado por muitos o marco desse sistema construtivo. Construído por volta de 1889 a 1891 com seus 16 pavimentos e 65 metros de altura, foi considerado uma obra ousada como se explorasse os limites dimensionais possíveis para edifícios de alvenaria (CORRÊA, et al., 2003). Esse edifício apresenta 1,80 metros de espessura nas paredes de base devido às técnicas da época que se baseavam em conhecimentos empíricos. Atualmente, essa medida é considerada exorbitante.



Figura 3 - Edifício Monadnock

Com o surgimento de novas técnicas, foi construído, na Suíça, um edifício de 13 andares com paredes de 37 cm de espessura em alvenaria estrutural não armada, evidenciando as vantagens desse processo construtivo. Esse edifício tornou-se então, o marco inicial da “Moderna Alvenaria Estrutural”. A partir desse momento, os estudos científicos foram aflorando em vários meios. Novas normas foram criadas, além de vários trabalhos apresentados. Toda essa preocupação visou promover a tecnologia necessária para um bom aproveitamento do método construtivo.

Já no Brasil, a alvenaria estrutural só teve o seu início por volta da década de 60. A cronologia das edificações realizadas com blocos vazados estruturais é um pouco controversa, mas, pode-se supor que os primeiros edifícios construídos no Brasil tenham surgido em 1966 em São Paulo (CORRÊA, et al., 2003). A disseminação desse método construtivo se deu por volta da década de 80 com a construção de conjuntos habitacionais públicos. Em contrapartida, surgiu, na população brasileira, um preconceito a respeito desse método construtivo. Muitos entendiam que a alvenaria estrutural só era aplicável na construção de conjuntos habitacionais populares ou em edifícios de poucos pavimentos.

Com o passar dos tempos esta visão de edifício popular foi sendo esquecida e uma nova concepção se formou. Devido as suas diversas vantagens e ao surgimento de fornecedores confiáveis, atualmente este sistema construtivo vem ganhando cada vez mais espaço no Brasil. É possível encontrar edifícios de pequeno à grande porte que adotaram a alvenaria estrutural em sua concepção.

Outro setor em desenvolvimento é o siderúrgico que, cada vez mais, vêm aumentando sua produtividade em função da crescente demanda. Consequentemente tem-se o crescimento da geração dos resíduos sólidos decorrentes do processo de produção de aço como, por exemplo, a escória de aciaria e a escória de alto forno.

Isto posto, o presente trabalho propõe a utilização de escória de aciaria, como alternativa na fabricação de Blocos de Aciaria Elétrica (BE), em substituição dos agregados naturais. Segundo Silva e Peixoto (20120) essa proposta representa uma alternativa tecnológica e viável que pode contribuir expressivamente para a redução da utilização dos materiais não renováveis.

1.2 PROBLEMA

- É possível empregar os blocos, que utilizam a escória como agredado, em alvenaria estrutural?

1.3 PERGUNTA CIENTÍFICA

Atualmente o que se tem visto no Brasil é o aumento na produção de aço, conforme dados da Instituição Aço Brasil - IABr. Desde o início do ano a produção chegou a $34.423,4 \times 10^3$ t de aço bruto (IABr, 2012), um aumento de 6,2% da produção se comparado com o mesmo período do ano anterior. Observa-se que na produção do aço há a geração de aproximadamente 330 Kg de escória para cada tonelada de aço produzido (IABr, 2012). Tendo em vista que, a alvenaria estrutural é um método já difundido no setor da construção civil e, considerando a sua facilidade de execução, propõem-se as seguintes perguntas:

- É possível incorporar resíduos de siderurgia em matrizes de cimento?
- As matrizes de cimento com resíduos garantem características mecânicas que atendam a demanda de engenharia?
- É possível implementar processos de pré-fabricação utilizando essas matrizes produzidas com resíduos?
- Qual comportamento mecânico dos elementos produzidos com resíduos em condição de utilização?
- Qual contribuição dos blocos de escória de aciaria (BE) para a sustentabilidade da indústria siderúrgica?

1.4 OBJETIVOS GERAL

Propõe-se a utilização de blocos de escória de aciaria elétrica como elemento para alvenaria estrutural.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar as propriedades físicas dos blocos produzidos com escória de aciaria elétrica (BE) com os Blocos de Agregados Naturais (BC);
2. Analisar o comportamento mecânico dos blocos de escória de aciaria elétrica segundo análises experimentais e por simulação numérica;
3. Propor alternativa para aplicação de blocos de escória de aciaria elétrica como elementos de alvenaria.

1.5 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Atualmente o cenário vivido por vários setores da economia, como o siderúrgico e o da construção civil, é a geração exorbitante de resíduos nos processos. Assim torna-se relevante encontrar novas técnicas para solucionar ou mitigar esses problemas.

Nesse contexto, a indústria de produção do aço gera como resíduo sólido, principalmente, a escória de alto-forno e de aciaria. O primeiro é empregado na composição de cimento Portland. Já o segundo, ainda é objeto de estudo. Pesquisadores vêm desenvolvendo novas técnicas para torná-lo aplicável em diversos momentos, objetivando transformá-lo em um subproduto da construção civil. Sendo esse um setor promissor para a reciclagem de resíduos, segundo MASUERO (et al., 2004), propõe-se a substituição dos agregados naturais nos blocos de concreto por escória de aciaria.

Finalmente, serão realizadas nesse trabalho análises experimentais e simulações numéricas em blocos de escória de aciaria (blocos de escória de aciaria elétrica - BE) e em blocos de concreto convencionais (blocos de concreto com agregados naturais - BC) com a finalidade de compreender o comportamento físico e mecânico dos blocos. Convenientemente, serão feitas comparações entre os blocos a fim de mostrar os pontos favoráveis da utilização dos blocos de escória em alvenaria estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

2.1.1 Processos siderúrgicos

O aço é um dos principais materiais utilizado na fabricação de produtos como, celular, tubulação hidráulica, componente estrutural dos prédios, aviões, carro encontrando-se bastante presente na vida das pessoas. É considerado um dos principais elementos que possibilitam a sociedade desfrutar da modernidade e comodidade oferecidas pelos bens de consumo.

A crescente demanda por aço incentiva o aumento da produtividade das siderúrgicas. Assim, aliada a evoluções tecnológicas, o setor vem aumentando a produção atendendo demandas cada vez maiores. A fim de ilustrar o processo de fabricação do aço é apresentado na Figura 4 um esboço de suas principais fase de produção.



Figura 4 - Desenho esquemático da produção do aço. Fonte: (MASUERO, et al., 2004)

A produção de aço no Brasil é realizada em usinas siderúrgicas integradas e semi-integradas. Nas usinas integradas, o aço é obtido a partir do ferro primário, isto é, a

matéria-prima é o minério de ferro que é transformado em ferro gusa na própria usina, mais precisamente, nos altos-fornos. Depois de gerado o ferro gusa líquido, no alto-forno, ocorre a sua transformação em aço, no convertedor LD - Linz-Donawitz, onde também é gerada a escória de aciaria LD (MOURÃO, et al., 2007). A Figura 5 apresenta um esquema da produção do aço utilizando o convertedor LD.

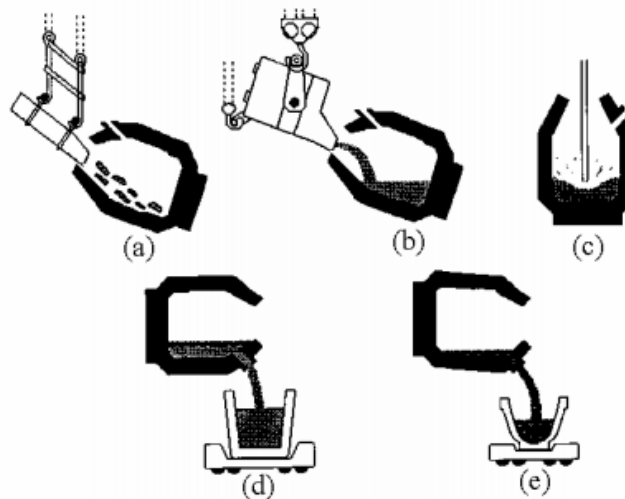


Figura 5 – Sequência de operação do conversor a oxigênio tipo LD: (a) carregamento da sucata; (b) carregamento do ferro gusa líquido; (c) sopro de oxigênio; (d) vazamento do aço, e (e) vazamento da escória de aciaria no pote de escória. Fonte: (ARAUJO, 1997)

Já a usina semi-integrada é aquela na qual o aço é obtido a partir do ferro secundário, ou seja, a matéria-prima é sucata do aço, não havendo necessidade da etapa de redução do minério de ferro. A matéria-prima é conduzida ao forno de arco elétrico e então gerado o aço e a escória de aciaria elétrica (MOURÃO, et al., 2007).

2.1.2 Escória de aciaria

A escória de aciaria é um resíduo gerado na produção de aço. Estima-se que para cada tonelada de aço produzido gera-se em média 330 Kg de escória (IABr, 2012). No processo, a escória, oriunda da aciaria, é vazada para o pote de escória e destinada a pátios de resfriamento. Posteriormente, em um processo interno feito nas usinas, faz-se a recuperação dos metálicos em frações granulométricas variando de 10 a 200mm. A escória remanescente desse processo é destinada às empresas de beneficiamento que recuperam as frações granulométricas inferiores a 10 mm.

Esta escória é classificada, segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), como um resíduo sólido não inerte (Classe II-A), porém, ressalta-se que o material não apresenta características de periculosidade para uso (NASCIMENTO, et al., 2005). No entanto, um dos principais problemas na utilização dessa escória como matéria prima para outros produtos é sua propriedade expansiva quando aplicada em condições de confinamento diversas. Segundo NASCIMENTO (2005), essa expansibilidade é provocada pela hidratação dos óxidos de cálcio livres e óxidos de magnésio não reagidos, que em presença de umidade aumentam de volume.

A expansibilidade da escória de aciaria é explicada por sua propriedade de retenção da cal virgem empregada para a produção do aço. A cal tem a função de retirar do aço os elementos fósforos e enxofre, além de proteger o ataque dos refratários do forno (CINCOTTO, 1992). Na Tabela 1, a seguir, é mostrado a composição química das escórias de aciaria elétrica e LD.

Tabela 1 - Composição química das escórias de aciaria elétrica (GEYER et al., 1994) e de aciaria LD (CASTELO BRANCO, 2004)

Composto	Brasil (%)		EUA (%)	Japão (%)	Itália (%)	Alemanha (%)
	LD	Elétrica				
CaO	5 - 45	33	41	40	41	32
SiO₂	7 - 16	18	17	25	14	15
Al₂O₃	1 - 4	6	8	5	7	4
FeO	8 - 30	30	18	19	20	31
MgO	1 - 9	10	10	4	8	10
MnO	3 - 7	5	4	7	6	4
S	-	-	0,2	0,06	0,1	0,1
P₂O₅	-	-	0,6	-	0,9	1,4

Percebe-se que a expansibilidade é um fenômeno indesejável para a escória, porém, ela pode ser contornada. ABREU (et al., 1994) explica que, para que a escória se estabilize, e o uso seja possível, é necessário um tratamento prévio nela. As escórias devem ser colocadas em pilhas de pequenas alturas e serem irrigadas durante seis meses antes de sua utilização. Assim, com esse tratamento, o fenômeno de expansibilidade torna-se desprezível.

A fim de ilustrar o perigo em se utilizar escória de aciaria baseando-se apenas em empirismo, segue abaixo uma figura (6) que mostra a utilização da escória, sem tratamento prévio, como sub-base de estradas. Percebem-se na imagem os fenômenos patológicos, decorrente da falta de técnica.



Figura 6 - Exemplo do uso inadequado de escória de aciaria - fissuração longitudinal irregular em pátio de estacionamento. Fonte (MENDONÇA, 2006)

2.2 ALVENARIA ESTRUTURAL

2.2.1 Normatizações

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo que vem sendo utilizado em larga escala devido às suas vantagens, como p. ex., menor desperdício de materiais e menor custo construtivo. As estruturas construídas, segundo essa técnica, sofrem, predominantemente, esforços de compressão. Comumente, atuam sobre elas ações de esforços laterais, como o vento. Nesta situação, segundo SANTOS (2011), a resistência da alvenaria deve ser suficiente para suportar esforços combinados de cisalhamento e compressão.

Desse modo, tratando-se de normatização, cada país é regido por uma norma responsável por guiar o processo de projeto e execução da alvenaria estrutural. Pode-se citar como exemplo, o EUROCODE 6, que traça diretrizes para o

procedimento de cálculo das estruturas neste método construtivo. No Brasil até 2011, a norma que regia o processo de cálculo era a NBR 10837 - 1989 - *Cálculo de Alvenaria Estrutural de Blocos Vazados de Concreto*. A crescente utilização de sistemas estruturais em alvenaria estrutural no país demandou a necessidade da reestruturação das diretrizes normativas, assim revogou-se a NBR 10837 – 1989 estando em vigor, desde 18/08/2011, a NBR 15961-1 – 2011 *Alvenaria estrutural – Blocos de concreto; Parte 1: Projeto* e a NBR 15961-2 – 2011 *Alvenaria estrutural – Blocos de concreto; Parte 2: Execução e controle de obras*. Portanto, diferentes normas são aplicadas nas diferentes fases do projeto como um todo.

2.2.2 Elementos estruturais

Os edifícios em alvenaria estrutural apresentam as suas paredes como principal elemento estrutural, podendo ser confeccionadas em tijolos cerâmicos ou em blocos de concreto. Assim, a estrutura pode ser classificada em três categorias:

a) **Alvenaria estrutural não armada:** são aquelas constituídas de blocos, assentados com argamassa, podendo conter armaduras com finalidades construtivas ou de amarração, não consideradas na absorção dos esforços calculados (PRUDÊNCIO et al., 2002).

b) **Alvenaria estrutural armada:** são aquelas em que as paredes são constituídas de blocos assentados com argamassa, cujas cavidades são preenchidas continuamente com graute, que envolve quantidade suficiente de armaduras dimensionadas para absorver esforços calculados, além daquelas armaduras com finalidade construtiva ou de amarração (PRUDÊNCIO et al., 2002).

c) **Alvenaria parcialmente armada:** são aquelas em que algumas paredes são constituídas segundo as recomendações da alvenaria armada e as demais de acordo com as prescrições da alvenaria estrutural não armada (PRUDÊNCIO et al., 2002).

Além das paredes resistentes que apresentam a função de transmitir os diferentes carregamentos, a que são impostas, e definir os espaços geométricos e a vedação,

existem outras partes da estrutura que também desempenham funções semelhantes, são elas:

- Paredes de contraventamento;
- Pilares de alvenaria.

Entende-se por paredes de contraventamento o componente estrutural que possui um papel específico nos edifícios que é o de garantir a estabilidade da estrutura e resistir às ações horizontais (por exemplo, o vento) transmitindo-as a fundação.

Já os pilares de alvenaria são blocos grauteados (preenchimento interno dos blocos com argamassa de propriedades mecânicas semelhantes a dos blocos), dispostos em locais estratégicos ao longo do edifício e tem como função receber carregamentos verticais de grande intensidade e transmiti-los a fundação.

2.2.3 Distribuição dos esforços

Edifícios construídos em alvenaria estrutural são considerados um sistema estrutural tipo caixa, em que as paredes resistentes trabalham em conjunto com as lajes. Essa estrutura está sujeita às mesmas ações que as estruturas em concreto armado ou metálicas. Atuam sobre elas as ações verticais (carga permanente e acidental) e ações horizontais (carga de vento e outras). A função das paredes estruturais é receber as reações das demais estruturas, ou, até mesmo, as próprias ações externas e transmiti-las à fundação. Para ilustrar, pode-se citar a ação do vento atuando diretamente sobre a parede estrutural, ela terá que transmitir os esforços de forma contínua aos elementos de fundações, responsáveis por descarregá-los no terreno (adaptação CAMACHO, 2006).

Segundo CAMACHO (2006), as ações horizontais agindo ao longo de uma parede de fachada, são transmitidas às lajes que trabalham como diafragma rígido, transmitindo-a as paredes paralelas à direção dessas ações. Essas paredes, denominadas paredes de contraventamento, irão transmitir as ações horizontais às fundações. Assim, faz-se necessário que uma ligação laje/parede seja capaz de resistir ao esforço cortante que surge nessa região.

Lembra-se que segundo a NBR 8798 (1985) diafragma é o componente estrutural laminar trabalhando como chapa em seu plano e que, quando horizontal e convenientemente ligada às paredes, tem a finalidade de transmitir esforços do plano médio às paredes.

A Figura 7 exemplifica a distribuição dos carregamentos em uma estrutura de alvenaria estrutural.

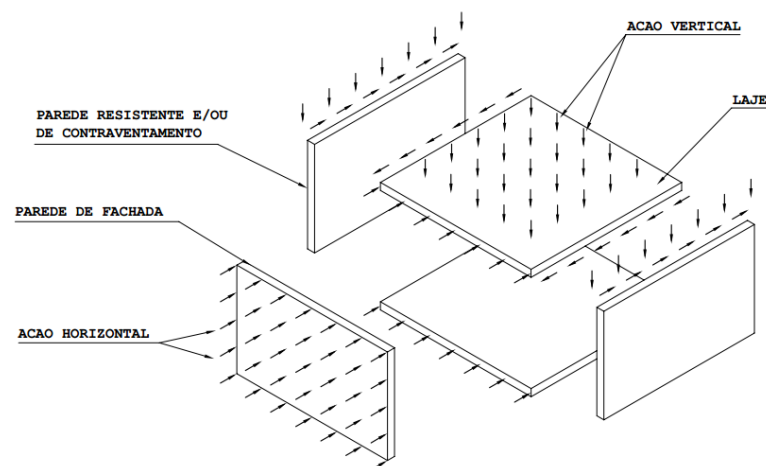


Figura 7 - Esquema das ações atuantes sobre a estrutura em alvenaria estrutural.

Fonte: (CAMACHO, 2006)

2.3 BLOCO PARA ALVENARIA ESTRUTURAL

Os blocos utilizados na alvenaria estrutural são os principais componentes da estrutura. A NBR 6136 (2007) especifica em seu texto os principais componentes utilizados em sua fabricação, quais sejam:

- Agregados graúdos: pedra britada e pedregulho natural;
- Agregado miúdo: areia natural e areia artificial;
- Aglomerantes: cimento Portland;
- Aditivos plastificantes;
- Água.

Em função do processo de fabricação, o concreto a ser utilizado apresenta-se em estado “seco” (abatimento no tronco de cone denominado de “slump” próximo de zero) diferindo do concreto plástico empregado nas construções em concreto

armado. A principal diferença entre eles está na menor quantidade de água utilizada no concreto para a fabricação dos blocos, facilitando assim, a desforma imediata das peças.

Em virtude desta característica, em geral, o concreto não segue as leis que governam as propriedades dos concretos de consistência plástica e, por isso, a qualidade final dos blocos está intimamente relacionada ao porte, eficiência e regulação do maquinário de vibro-compressão (SANTOS, 2011).

Dessa forma, na maioria dos casos, a técnica de fabricação dos blocos destinados à alvenaria estrutural se baseia na adoção e emprego de equipamentos nomeados de vibro-prensa que, devido ao fato do concreto ser pouco úmido, necessita do emprego de equipamentos especiais para a compactação. Aplicando-se, simultaneamente, um esforço de compressão aliado a um efeito de vibração tem-se a eliminação dos vazios e a modelagem das peças.

2.3.1 Classificação dos blocos segundo a NBR 6136 – 1994

A produção de blocos de concreto destinados à alvenaria estrutural deve respeitar todos os procedimentos de execução e controle presentes na NBR 6136 – 1994 (Bloco vazado de concreto). Essa norma torna-se importante também, pois estabelece padrões necessários para a produção dos blocos, garantindo a uniformidade das características do mesmo.

Segundo a NBR 6136, bloco é definido como elemento de alvenaria cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta.

Esta norma também classifica os blocos em diferentes classes, quanto ao seu uso, sendo:

- Classe 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. Sua resistência característica à compressão mínima é de 6,0 MPa;

- Classe 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. Sua resistência à característica à compressão mínima é de 4,5 Mpa.

Ainda, segundo a NBR 6136, com relação ao aspecto visual, o bloco deve apresentar-se homogêneo, ser compacto, possuir arestas vivas e não apresentar trincas ou defeitos que possam prejudicar o seu assentamento ou afetar a resistência e a durabilidade da obra. Em relação ao acabamento superficial, a norma prescreve que os blocos destinados à alvenaria aparente devem-se apresentar lisos e sem imperfeições na face exposta e, aqueles que receberão revestimento devem apresentar superfície áspera, porém homogênea, a fim de facilitar a aderência do revestimento (CARVALHO, 2006). Na Tabela 2 apresenta-se as classificações dos blocos quanto a resistência a compressão, segundo a NBR 6136 – 1994,.

Tabela 2 - Limite normativo fbk

<i>Limites Normativos NBR 6136/94</i>		
Fbk - Valores Mínimos (MPa)		
Classe de Resistência	Classe AE	Classe BE
4,5	*	4,5
6	6	6
7	7	7
8	8	8
9	9	9
10	10	10
11	11	11
12	12	12
13	13	13
14	14	14
15	15	15
16	16	16

* Resistência não permitida à classe AE

2.3.2 Modulação dos blocos de concreto vazados

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo padronizado e, assim sendo, para atender a essa demanda, os blocos seguem limites normativos que os classificam em diferentes modulações. Os blocos devem atender os requisitos da NBR 6136 – 1994, tendo tolerância de ± 2 mm para a largura e ± 3 mm para a altura e comprimento. A Tabela 3, a seguir, foi compilada da NBR 6136 – 1994 que prescreve as modulações e suas respectivas dimensões para os blocos de concreto.

Tabela 3 - Dimensões padronizadas do bloco conforme NBR 6136 (1994)

Dimensões normais (cm)	Designação	Dimensões padronizadas (mm)		
		Largura	Altura	Comprimento
20 x 20 x 40	M-20	190	190	390
20 x 20 x 20		190	190	190
15 x 20 x 40	M-15	140	190	390
15 x 20 x 20		140	190	190

A Figura 8 apresenta um esquema das dimensões dos blocos com a finalidade de facilitar o entendimento.

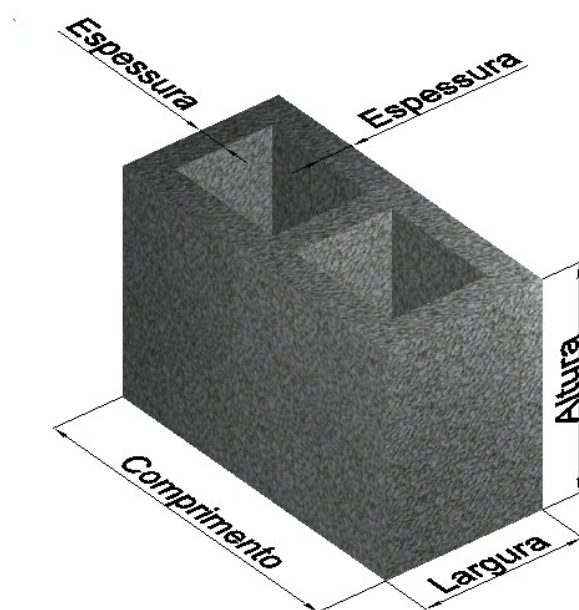


Figura 8 - Dimensões do bloco

A Tabela 4 adiante foi copilada da NBR 6136 – 1994, em que prescreve as espessuras mínimas das paredes do bloco de concreto.

Tabela 4 - Espessura mínima das paredes dos blocos conforme NBR 6136 (1994)

Designação	Paredes longitudinais (mm)	Paredes transversais	
		Paredes (mm)	Espessura equivalente (mm/m)*
M-15	25	25	188
M-20	32	25	188

*Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em mm), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em m)

Ainda, segundo a norma, as menores dimensões dos furos não devem ser inferiores a 8 cm para o bloco de 14 cm de largura (M-15) e 12 cm para o bloco de 19 cm de largura (M-20).

2.3.3 Propriedades físicas dos blocos

Um importante fator a ser considerado nos blocos são as suas propriedades físicas e mecânicas que estão diretamente vinculadas à resistência do mesmo aos esforços a ele aplicados. Em seu trabalho, MATA (2006) enumera três importantes propriedades físicas que um bloco deve possuir para que tenha boa qualidade, são elas:

- Absorção de água;
- Teor de umidade;
- Retração por secagem.

Com relação à primeira propriedade, absorção de água, a NBR 6138 (1994) expõe índices ideais que um bloco deve apresentar. Esse valor não deve ultrapassar o limite de 10%, sendo aplicado para qualquer um dos blocos ensaiados e qualquer que seja a classificação do bloco (classe AE ou BE). A NBR 12118 – 2006 prescreve o método de ensaio para a determinação da absorção de água nos blocos. Pode-se definir, como sendo absorção de água, a relação entre a massa de água presente nos interstícios do bloco e a massa seca em estufa até constância da massa do

bloco. Abaixo é apresentada a equação 1 que corresponde a formulação presente na norma, que resulta no teor de absorção do elemento:

$$a = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 \quad \text{Eq. 01}$$

Onde:

a= absorção de água em porcentagem;

m_1 = massa do bloco seco em estufa em gramas;

m_2 = massa do bloco saturado em gramas.

Já com relação à segunda propriedade, teor de umidade, os limites máximos para um bloco são prescritos pela NBR 6136 – 1994. A Tabela 5 a seguir, compilada da NBR 6136 – 1994, mostra esses limites.

Tabela 5 - Umidade máxima segundo a NBR 6136 (1994)

Retração Linear (%)	Umidade máxima em porcentagem do valor da absorção para diferentes condições de umidade relativa do ar de utilização		
	Local úmido ⁽¹⁾	Local de umidade relativa intermediária ⁽²⁾	Local árido ⁽³⁾
≤ 0,03	45	40	35
> 0,030 à ≤ 0,045	40	35	30
> 0,045 à ≤ 0,065	35	30	25

(1) umidade relativa anual média superior a 75%

(2) umidade relativa anual média entre 50% e 75%

(3) umidade relativa anual média inferior a 50%

Finalmente, o terceiro fator, retração por secagem, ocorre devido à perda de água no interior do bloco devido à evaporação. Esse processo acarreta a diminuição do volume do bloco. Outro tipo de retração, a linear, é ocasionada devido à variação do comprimento, do corpo de prova, quando úmida para o estado seco. Essas considerações são estabelecidas na NBR 6136 (1994), onde os limites de retração são estabelecidos visando garantir a uniformidade e comportamento dos blocos. Segundo a norma, o máximo valor de retração por secagem é estabelecido em

0,065%, considerando esse valor aplicável a todas as classes (classe AE e BE). De acordo com MATA (2006), os fatores que podem influenciar esse tipo de comportamento são diversos, como por exemplo, o tipo de cimento e agregado utilizado na fabricação, a cura, a temperatura e umidade do meio, assim como vários outros.

2.3.4 Propriedades mecânicas dos blocos

Tendo em vista que, o sistema construtivo em alvenaria estrutural trabalha principalmente sobre o esforço de compressão, as estruturas são dimensionadas de forma que resistam a tal esforço, sendo este, o principal parâmetro a ser considerado nos estudos. Por ser a propriedade mecânica mais importante, várias outras variáveis estão intimamente relacionados a ela, como por exemplo, a durabilidade dos blocos.

Assim, além da resistência a compressão, outros fatores também são considerados para caracterizar a propriedade mecânica dos blocos, sendo eles:

- Resistência à tração;
- Módulo de elasticidade;
- Coeficiente de Poisson.

2.3.5 Módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade é uma característica fundamental em análise estrutural. Sabe-se, da Resistência dos Materiais, que a relação entre tensão e deformação, Figura 9, para determinados intervalos, pode ser considerada linear (Lei de Hooke), ou seja, $\sigma = E \cdot \epsilon$, sendo σ a tensão, ϵ a deformação específica e E o Módulo de Elasticidade ou Módulo de Deformação Longitudinal. (PINHEIRO, et al., 2010)

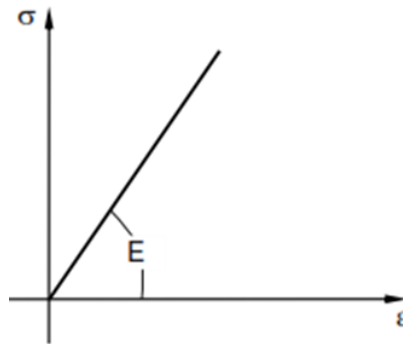


Figura 9 - Módulo de elasticidade ou deformação longitudinal.
Fonte: (PINHEIRO, et al., 2010)

Para o concreto, a expressão do Módulo de Elasticidade é aplicada somente à parte retilínea da curva, tensão versus deformação, conforme Figura 10, ou, quando não existe uma parte retilínea, a expressão é aplicada a tangente da curva na origem. Desta forma é obtido o Módulo de Deformação Tangencial Inicial.

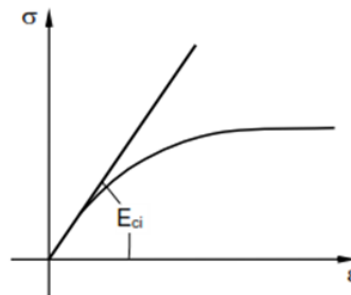


Figura 10 - Módulo de deformação tangencial Inicial.
Fonte: (PINHEIRO, et al., 2010)

Isto posto, para a determinação do módulo de elasticidade, MATA (2006) explica que não existe ensaio normatizado para a determinação do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade dos blocos. Porém, utilizando dados de ensaio tensão x deformação, adota-se como valor correspondente o coeficiente angular da reta que une os pontos desse diagrama, correspondendo a 05 e 33% da tensão de ruptura.

Com relação ao módulo de Elasticidade, MATA (2006) sugere três formulações para a sua obtenção, são elas:

- O CEB – FIP Model Code (1990), expressa pela equação 2;
- ACI Building Code 318, expressa pela equação 3;
- NBR 6118 (2003), expressa pela equação 4, que propõe o módulo de elasticidade do concreto.

$$E_b = 0,0428 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot (W_b)^{1,5} \quad \text{Eq. 02}$$

$$E_b = 4730 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Eq. 03}$$

$$E_b = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Eq. 04}$$

Onde:

E_b = Módulo de elasticidade do bloco (Mpa);

f_{ck} = resistência à compressão do bloco (Mpa);

E_b = massa específica unitária do bloco (Kg/m^3).

2.3.6 Coeficiente de Poisson

Quando uma força uniaxial é aplicada sobre a peça de concreto, resulta uma deformação longitudinal na direção da carga e, simultaneamente, uma deformação transversal ao contrário (PINHEIRO, et al., 2010). A Figura 11 exemplifica o carregamento sendo aplicado em um corpo de prova e, conseqüentemente, a deformação resultante do mesmo.

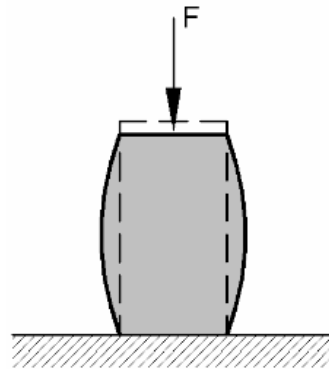


Figura 11 - Deformação longitudinal e transversal.
Fonte: (PINHEIRO, et al., 2010)

A relação entre a deformação transversal e a longitudinal é denominada coeficiente de Poisson, conforme equação 05 (PINHEIRO, et al., 2010).

$$\nu = - \frac{\epsilon_{\text{transv}}}{\epsilon_{\text{long}}} \quad \text{Eq. 05}$$

2.4 Método dos elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (Finite Element Method) é atualmente um dos mais utilizados em análises numéricas por se tratar de uma ferramenta que tem se mostrado coerente com as análises práticas. O MEF tem inúmeras aplicações na área da engenharia, sendo que uma delas é em aplicações estruturais.

Relatos históricos revelam que as primeiras aplicações desse método, em engenharia, foram no ramo da aeronáutica e de estruturas civis, justificando o grande avanço das empresas nesse ramo.

Além do método dos elementos finitos, existem, ainda, vários outros métodos relevantes, podendo-se destacar:

- Método dos elementos de contorno;
- Método das diferenças finitas;
- Método dos volumes finitos;

Deve ficar claro que nenhum destes métodos pode ser considerado superior ao outro. Isto depende do tipo de aplicação, solução desejada, capacidade computacional, etc., que um engenheiro tem em mãos no momento de resolver um problema de engenharia. O MEF acabou se tornando o mais popular de todos, sobretudo, pelo aparecimento de diferentes pacotes de software comerciais sobre o assunto (ANSYS, NASTRAN/PATRAN, ADAMNS, ABAQUS, SAP 200, etc.) e pela sua facilidade de implementação relativa (SILVA, 2009).

Em seu trabalho, SILVA (2009) explica que a ideia básica do MEF é realizar uma divisão do domínio de integração de uma estrutura ou sistema de interesse em um conjunto de pequenas regiões, chamadas de elementos finitos, transformando o domínio de contínuo em discreto. Esta divisão do domínio é conhecida como malha ou grid, que nada mais é do que o conjunto de elementos finitos resultante da discretização. A malha é formada por elementos compostos de nós, que são pontos de interseção e ligação entre os elementos. A grande vantagem do MEF é de não buscar uma função analítica que satisfaça às condições de contorno para todo o domínio, o que pode ser praticamente impossível em um problema complexo, e sim, buscar estas soluções em cada elemento separadamente.

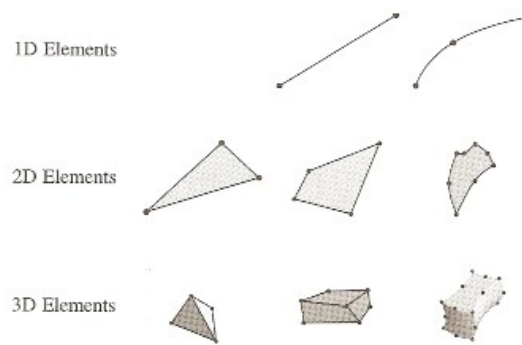


Figura 12 - Tipos e formas de elementos.

Fonte: (SILVA, 2009)

A Figura 12 mostra os diferentes tipos de elementos possíveis de serem utilizados no MEF. Cada elemento é indicado para situações diferentes. O primeiro (1D) é comumente aplicado em elementos de barras e vigas, já o elemento 2D é muito empregado em elementos de placas, também sendo utilizado em vigas, e, por último, o 3D (tridimensional) é empregado como o elemento sólido. Muitos autores consideram que o último elemento apresenta resultados sempre superiores aos demais, porém, a escolha de um elemento deve ser feita levando-se em consideração o tipo de geometria do modelo e as aproximações de solução que se deseja obter.

A qualidade (acurácia) da aproximação é diretamente proporcional à quantidade de elementos usados. O custo computacional também é ligado ao número de elementos, uma vez que, o sistema de equações torna-se maior. Em um problema MEF, uma estrutura pode ser uma malha com vários níveis de discretização em regiões onde se necessita maior acurácia (malha mais refinada). Já regiões onde não há maiores interesses, pode-se utilizar malhas menos refinadas.

2.4.1 Bloco de Alvenaria

A alvenaria é um conjunto estrutural composto de várias unidades (blocos ou tijolos) de concreto ou cerâmico e de argamassa. Conforme apresentado em PELETEIRO (2002), pode-se afirmar que a alvenaria se trata de um material heterogêneo e anisotrópico que apresenta, por natureza, uma resistência à compressão elevada dependente, principalmente, da resistência da unidade. Por outro lado, a resistência à tração é baixa e está determinada pela adesão da unidade com a argamassa.

Em virtude destas várias variáveis e da complexidade do conjunto, a simulação numérica da alvenaria estrutural torna-se trabalhosa. São vários os fatores que influenciam as propriedades do mesmo. Abaixo são citadas algumas delas:

- Dimensão das unidades;
- Espessura das juntas;
- Propriedades das unidades e das argamassas;
- Arranjo das juntas horizontais e verticais e;
- Qualidade do assentamento das unidades.

O processo de desenvolvimento de uma análise utilizando software consiste em diferentes etapas. Inicialmente, é necessário um modelo que descreva, da melhor forma possível, todo o conjunto de parâmetros que é observado no modelo real. Devido à complexidade de uma estrutura de concreto, é que existem vários estudos que mostram diferentes formas de descrevê-lo. Cada modelo visa obter diferentes resultados, tornando-se de grande importância um estudo aprofundado nessa fase.

Para a análise de uma estrutura é importante o conhecimento do comportamento dos elementos constituintes do modelo real e da interação entre eles. Esse comportamento, e as possíveis equações que o descrevam, são estudados por um ramo da Física, chamado de Reologia. Segundo FILHO (2003), existem três tipos básicos de comportamento reológico: o elástico, o plástico e o viscoso. O comportamento dos materiais reais pode ser descrito com maior ou menor precisão pela combinação destes tipos básicos, dando origem aos chamados modelos conjugados.

Assim, percebe-se que, atualmente o interesse em simulações numéricas dos elementos da alvenaria vem ganhando força. Cada vez mais, pesquisadores propõem modelos conjugados mais sofisticados. Dessa forma, a característica empírica dos cálculos vem sendo substituída por modelos sofisticados nos quais dão possibilidade de tomadas de decisões com maior segurança.

2.4.2 Modelo elastoplástico para o concreto

Neste trabalho utilizou-se o software ABAQUS[®], que é um software para modelagem e análise utilizando o método dos elementos finitos. O programa possui interface de fácil compreensão e apresenta a possibilidade de simular materiais de diferentes propriedades.

Adotou-se o modelo elastoplástico que, segundo o manual do software, é aplicado ao concreto em situações nas quais o carregamento é monotônico e a tensão de confinamento do mesmo é menor do que quatro a cinco vezes a maior tensão de compressão uniaxial. Esse modelo considera que a fissuração é uma das mais importantes diretrizes do comportamento do material, considerando que elas ocorrem na estrutura quando as tensões atuantes atingem a superfície de ruptura definida para o modelo.

Segundo ALI & PAGE (1988), por serem os blocos considerados materiais frágeis apresentando propriedades similares as do concreto, as teorias comumente empregadas para o concreto também podem ser aplicados aos blocos, aplicando-se dessa forma, o critério de von Mises para a fissuração ou esmagamento.

Esse critério foi formulado por von Mises em 1913 sugerindo que um material, quando deformado por carregamento externo, tende a armazenar energia internamente em todo o seu volume. A energia por unidade de volume do material é chamada de densidade de energia de deformação (BUFFONI, S.d.). A representação analítica da envoltória de tensões de von Mises adotada no modelo numérico está representada na equação 6 como segue:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 - f_c^2} \quad \text{Eq. 06}$$

Onde:

σ_1 = tensão de tração;

σ_2 = tensão de compressão;

f_c = Resistência à compressão;

f_t = Resistência à tração

Com base na equação 06, faz-se a construção da representação gráfica da envoltória de tensões de von Mises, que é representado na Figura 13 a seguir.

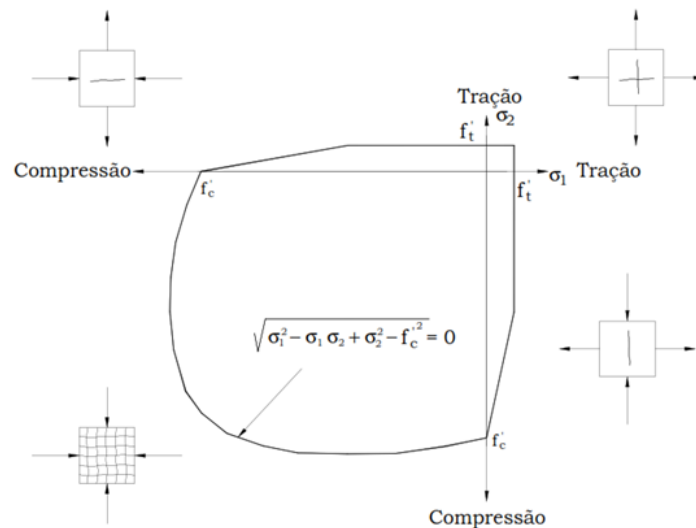


Figura 13 –Critério de von Mises com interrupção na tração
Fonte: (PELETEIRO, 2002)

2.4.3 Componentes para a modelagem numérica

Diferentes informações, referentes ao modelo real, são essenciais para criar um modelo numérico representativo. Assim, as informações essenciais fornecidas ao software, ABQUS, para a simulação numérica foram:

a) Geometria

Essa fase consiste em obter informações da geometria do que será simulado. Para tal, realizou-se a análise dimensional nas amostras a fim de obter medidas reais para o modelo numérico. Dessa forma, foi possível a concepção de um modelo 3D no ambiente virtual do software.

b) Propriedade dos elementos

Adotou-se o modelo elastoplástico para o concreto que compõe a estrutura do bloco. Fez-se o levantamento das características a serem consideradas, de modo que, melhor representassem o modelo real. Para tal, as seguintes propriedades do bloco foram avaliadas:

- Módulo de Elasticidade;
- Coeficiente de Poisson;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração.

c) Condição de contorno e carregamento

O carregamento irá determinar os esforços principais que surgem ao longo da estrutura do modelo. As condições de contorno são parte fundamental na simulação, pois são responsáveis por representar como a interação do elemento se desenvolve com o meio externo.

D) Comportamento na ruptura

Nesse trabalho simulou-se o comportamento do bloco, quando em ensaio de compressão uniaxial, visando criar um modelo justificado pelos ensaios experimentais realizados no laboratório de materiais de construção civil (LCC) da Escola de Minas. Um modelo de ruptura para blocos, quando em ensaio de compressão uniaxial, foi proposto por MOHAMAD (2007). Em seu trabalho foram realizados ensaios experimentais comprovando regiões típicas de fissuração para blocos nessas condições de carregamento.

Na Figura 14, adiante, apresenta-se um esquema do ensaio a compressão uniaxial de blocos.

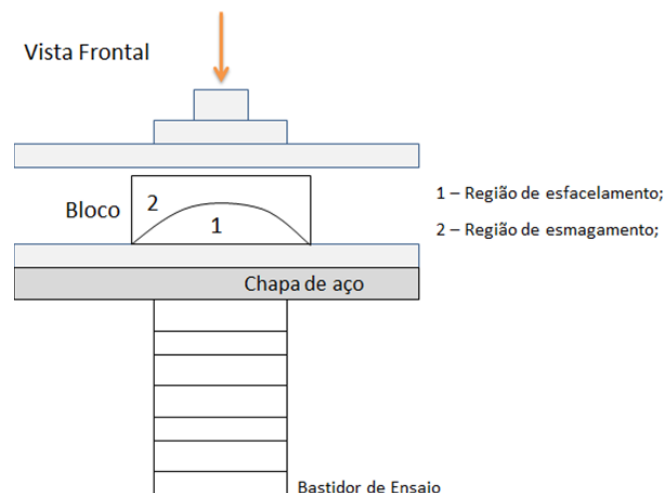


Figura 14 - Vista frontal do esquema de ensaio e modo de ruptura.

Fonte: Adaptada (MOHAMAD, 2007)

A Figura 14 mostra uma vista frontal do esquema de teste juntamente com o modo de ruptura verificado nos ensaios de compressão dos blocos. Notam-se duas formas básicas de ruptura assinaladas como região 1 e 2. A região 1 caracteriza-se pelo esfacelamento da superfície do bloco gerado pelas tensões biaxiais. Essas fissuras são as primeiras a aparecer; logo após, surge, na região 2, o esmagamento das paredes laterais do bloco de concreto, causado pelo deslizamento entre a parte superior do bloco e a região 1 (MOHAMAD, 2007).

A Figura 15 mostra a forma de ruptura, onde as forças de atrito impõem um deslocamento horizontal maior na base, definindo a região de ruptura “a” (região de esfacelamento). A região de ruptura “b” desliza sobre a “a”, como mostra a linha tracejada, e induz a ruptura diagonal no bloco (MOHAMAD, 2007).

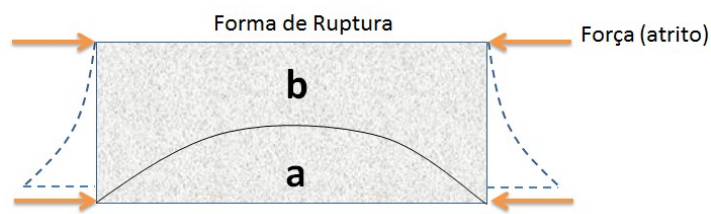


Figura 15 - Abertura provocada pelos deslizamentos da parte superior do bloco (b) sobre a inferior (a). Fonte: Adaptada (MOHAMAD, 2007)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta do trabalho envolve estudos para a análise experimental e numérica dos blocos de escória de aciaria e de concreto convencionais.

3.1 MATERIAIS ANALISADOS

Os agregados naturais e de escória de aciaria utilizados neste trabalho, foram caracterizados segundo prescrições normativas da ABNT. Os blocos de alvenaria tipo estruturais (AE), confeccionados pela empresa SIGMABLOCOS, foram produzidos com agregados naturais e artificiais (SILVA; PEIXOTO, 2010).

3.1.1 Blocos

No presente trabalho foi estudado, essencialmente, o bloco de escória de aciaria elétrica (BE), porém, em diversos momentos foram feitas comparações com os blocos de agregado natural (BC), comumente empregado em alvenaria estrutural. Essa comparação foi realizada a fim de identificar as diferenças relacionadas na utilização da escória de aciaria ao invés do agregado natural, na composição dos blocos. A Figura 16 ilustra os blocos BC e BE utilizados nesse experimento.

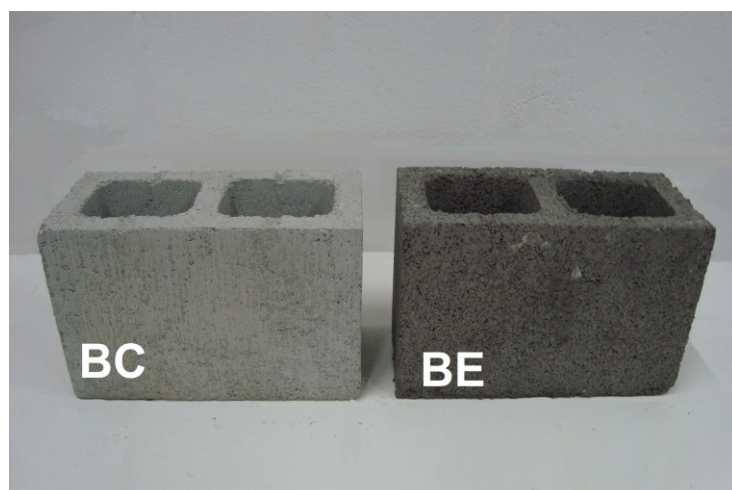


Figura 16 - Bloco de concreto para alvenaria estrutural e bloco de escoria de aciaria

A Figura 17 apresenta amostras do BC e BE utilizados nos ensaios.

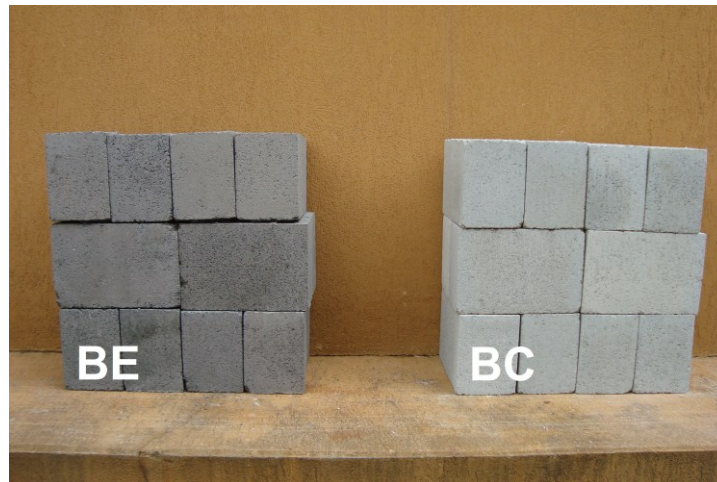


Figura 17 - Amostras de BE e BC utilizadas para os ensaios.

3.1.2 Aquisição digital de imagens

Com o objetivo de caracterizar as matrizes de cimento Portland e os agregados, foram produzidas imagens digitais destes compostos.

3.2 MODELO NUMÉRICO

As diferentes informações fornecidas ao software ABQUS, para a simulação numérica, encontram-se descritas a seguir.

3.2.1 Condição de contorno e carregamento

Em função da escassez de dados para análise numérica de blocos BE, foram utilizados os estudos feitos por ALI e PAGE (1988), nos quais, realizaram-se ensaios práticos experimentais e simulações numéricas (utilizando elementos finitos) em blocos de concreto convencional para alvenaria estrutural. Como condição de contorno inicial, para a simulação do bloco de escória de aciaria, considerou-se o engastamento da base, translação vertical livre no topo, restrição horizontal do topo, conforme apresentado na Figura 18.

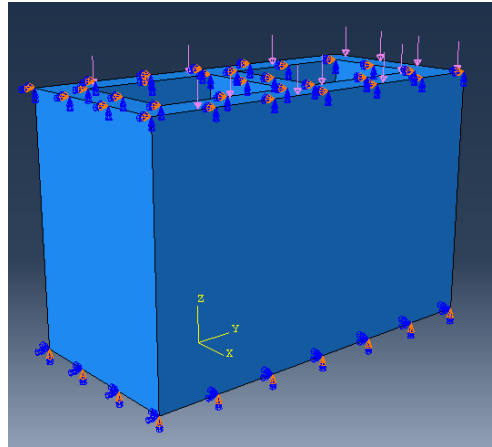


Figura 18 - Modelo carregado uniformemente e respectivas condições de contorno.

Em função da maior carga de ruptura apresentada para blocos com idade de 14 dias, obtida no ensaio de compressão uniaxial, adotou-se uma tensão de 19 MPa no topo do modelo, de forma descendente, simulando, assim, o efeito de compressão realizado pela prensa hidráulica nos ensaios experimentais.

3.2.2 Elemento finito e constituição da malha

Para a modelagem, utilizou-se o elemento finito sólido tipo C3D8 (ABAQUS) com 8 nós por elemento, apresentando interpolação linear nos nós. Um esquema da distribuição dos nós é mostrado na Figura 19.

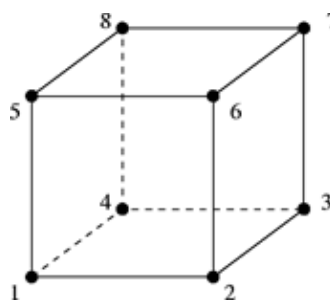


Figura 19 - Elemento C3D8. Fonte: Manual do ABAQUS.

A composição dos elementos finitos, ao longo da geometria do modelo, resulta na malha de elementos finitos que é gerada de forma automática pelo programa. Assim, adotou-se para cada elemento o tamanho aproximado de 0,015 u.c. O resultado dessa malha de elementos finitos pode ser vista na Figura 20.

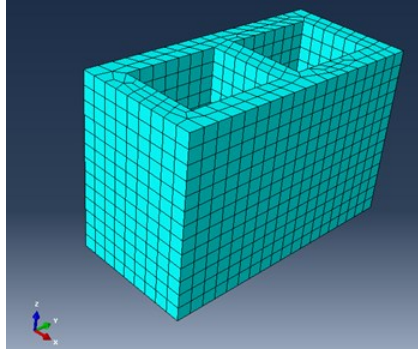


Figura 20 - Distribuição da malha de elementos finitos sobre o modelo.

3.3 Ensaios experimentais com blocos

3.3.1 Resistência à compressão de blocos

A determinação da resistência à compressão dos blocos é prescrita pela NBR 12118 - 2006. Para a execução desse ensaio, os blocos foram preparados respeitando as diretrizes estabelecidas pela norma. As superfícies superiores e inferiores das amostras foram, então, capeadas com enxofre, a fim de, se obter a regularização de suas faces. Após esse procedimento, colocou-se o corpo-de-prova na prensa hidráulica de modo que o seu centro de gravidade estivesse no eixo de carga dos pratos desse equipamento. Todo o ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Já a determinação da resistência característica dos blocos é prescrita pela NBR 6136 - 1994, em que a estimativa do quantil de 5% da distribuição de resistência característica à compressão do bloco, f_{bk} , é estimada pela equação 7:

$$f_{bk,est} = 2 \cdot \frac{f_{b1} + f_{b2} + \dots + f_{bm-1}}{m - 1} - f_{bm} \quad \text{Eq. 07}$$

Onde:

$f_{bk,est}$ = resistência a compressão característica estimada do lote;

n = é o número de blocos ensaiados;

$m = \frac{n}{2}$, se n for par;

$m = \frac{(n+1)}{2}$, se n for ímpar;

$f_{b1}, f_{b2}, \dots, f_{bn}$ = valores de resistência à compressão, em ordem crescente.

Ressalta-se que, o valor adotado para o $f_{bk,est}$ deve ser inferior a 85% da média das resistências dos blocos da amostra, nem menor do que $\psi_6 \times f_1$, sendo ψ_6 dado pela Tabela 6:

Tabela 6 - Valores das constantes Segundo NBR 6136

n	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ψ	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01

3.3.2 Análise dimensional de blocos

As prescrições, quanto ao ensaio de análise dimensional, estão na NBR 12118 – 2006 que regulamenta o padrão dimensional para os blocos de concreto específico para alvenaria estrutural. O ensaio baseia-se na realização de sequências de medidas e, ao final, é feito a média dos dados coletados. Verifica-se a largura, a altura, o comprimento, a espessura das paredes, a dimensão dos furos e raio das mísulas, respeitando a precisão de 0,5 mm.

Para cada bloco, corpo de prova, realizaram-se três medições em pontos distintos de cada face. Já em relação à espessura das paredes, foram realizadas apenas duas medições nas paredes longitudinais e apenas uma nas paredes transversais.

3.3.3 Massa específica dos blocos

Para a determinação da massa específica aparente de cada tipo de bloco foram determinadas suas massas e relacionadas com as dimensões de cada peça das amostras. Essas determinações foram procedidas para o estado natural, seco e saturado.

3.3.4 Resistência à tração

Outra propriedade importante a se determinar é a resistência à tração, pois, esse dado é essencial para a determinação da envoltória de tensões de von Mises.

Devido à falta de dados experimentais referentes a essa propriedade, fez-se a caracterização por fórmulas de correlação entre os dados obtidos experimentalmente. Assim, utilizou-se a formulação proposta por CHEEMA e KLINGNER (1986) para aferir a resistência à tração dos blocos de concreto. Essa formulação é mostrada na equação 5.

$$f_{tb} = 0,41 \cdot \sqrt{f_b} \quad \text{Eq. 05}$$

Onde:

f_b = resistência a compressão do bloco em MPa;

f_{tb} = resistência a tração do bloco em MPa.

3.3.5 CONSIDERAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO

Com o objetivo de definir um modelo numérico para os blocos produzidos com escória de aciaria, construiu-se um modelo sólido no ambiente de pré-processamento do software ABAQUS, que utiliza o método dos elementos finitos para a discretização de problemas. Tomando-se como base os estudos apresentado em ALI & PAGE (1988), no qual foram feitas análises práticas e teóricas em blocos de concreto convencional para alvenaria estrutural, propôs-se um modelo semelhante para os blocos de escória de aciaria.

Em ALI & PAGE (1988) foram conduzidos diversos ensaio experimentais em blocos de concreto (com agregados naturais) e argamassa de assentamento, a fim de, caracterizar os principais elementos constituintes da alvenaria estrutural. Segundo os autores, quando se compreende as partes integrantes de uma estrutura é possível entender melhor o comportamento do conjunto. Esses dados experimentais realizados nos blocos serviram de subsídio aos autores para a criação de um modelo numérico também em elementos finitos.

De acordo com ALI & PAGE (1988), os blocos são tratados como isotrópicos apresentando características de deformação não linear. Os resultados, para os

blocos de concreto obtidos experimentalmente por ALI & PAGE (1988), encontram-se compilados à Tabela 7, apresentada a seguir.

Tabela 7 - Propriedades dos blocos de concreto (BC) compilados de ALI & PAGE (1988)

Propriedade dos blocos	
Resistência a compressão	15,3 MPa
Resistência a Tração	1,2 MPa
Módulo de Elasticidade	14,7 GPa
Coeficiente de Poisson	0,16
Deformação última à compressão (ϵ_{cu})	270×10^{-5}

Assim, apresenta-se na Figura 21 modelo numérico proposto por ALI & PAGE (1988). Essa figura representa a curva de tensão e deformação do bloco de concreto obtido de forma experimental e de forma numérica, utilizando método dos elementos finitos.

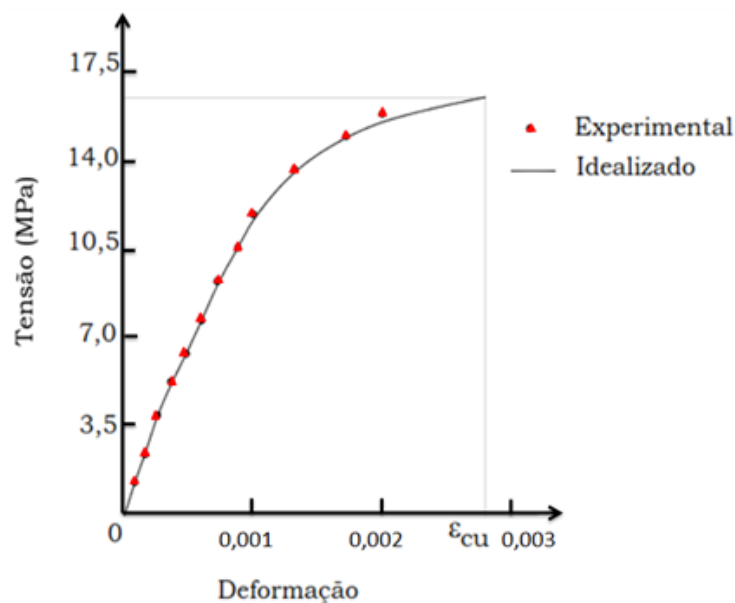


Figura 21 – Tensão x deformação do bloco de concreto

Fonte :Adaptada de (ALI, et al., 1988)

Com relação ao coeficiente de Poisson, ALI & PAGE (1988) o obtiveram de forma experimental. Devido a falta de ensaios em blocos de escória de aciria para a determinação dessa propriedade, adotou-se o mesmo valor para a construção do modelo numérico para o BE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A qualidade dos dados utilizados na simulação é essencial, pois a discretização do comportamento do modelo é baseada nestas informações fornecidas pelo usuário ao software. Essas informações consistem em dados das propriedades físicas e mecânicas do modelo, sendo as principais exigências para esta fase do estudo, expressa abaixo.

- Dimensões;
- Massa Específica;
- Resistência à compressão;
- Resistência à tração;
- Coeficiente de Poisson;
- Módulo de Elasticidade.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO BLOCO

4.1.1 Aquisição de Imagens digitais

A Figura 22 apresenta a matriz dos blocos de concreto convencional BC e blocos de escória de aciaria BE.

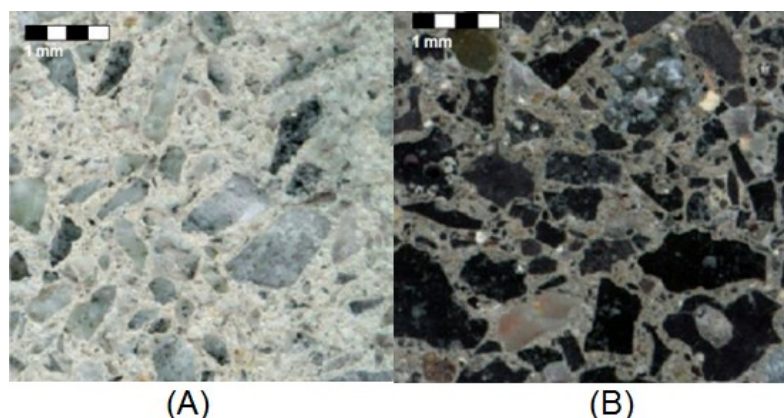


Figura 22 – (A) distribuição pasta agregado para matriz dos blocos de concreto convencional BC. (B) distribuição pasta agregado para matriz dos blocos de concreto convencional BE. Fonte: (SILVA, et al., 2010)

4.1.2 Dimensões

A geometria do modelo numérico do bloco foi construída com base nas dimensões médias obtidas via análise dimensional. A realização desse ensaio é regida pela NBR 12118 – 2006. São apresentados na Tabela 8 esses resultados para BC e BE em estado natural.

Tabela 8 - dimensões obtidas via análise dimensional dos blocos

Dimensões - Blocos			
Convencional (mm)			
	Largura	Altura	Comp.
BC 01	138.13	192.47	287.83
BC 02	138.7	193.27	288.83
BC 03	137.97	192.37	289.3
Média	138.27	192.7	288.65
Padrão	140	190	290
Erro (mm)	1.73	-2.7	1.35
Escória (mm)			
BE 01	138	190.09	288.1
BE 02	138.37	193.1	288.97
BE 03	138.37	192.8	288.33
Média	138.25	192	288.47
Padrão	140	190	290
Erro (mm)	1.75	-2	1.53
Normativo (mm)			
Padrão	140 (± 2)	190 (± 3)	290 (± 3)

Ainda segundo a NBR 12118 – 2006 a determinação das espessuras das paredes internas dos blocos é essencial para a caracterização dimensional. É apresentado na Figura 23 o ensaio de análise dimensional realizado nos blocos.

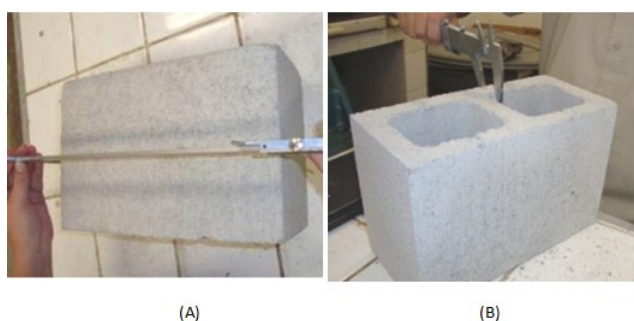


Figura 23 – (A) Análise dimensional do bloco: comprimento. (B) Espessura mínima das paredes: longitudinal.

A Figura 24 mostra o ensaio de análise dimensional sendo realizado nos blocos.

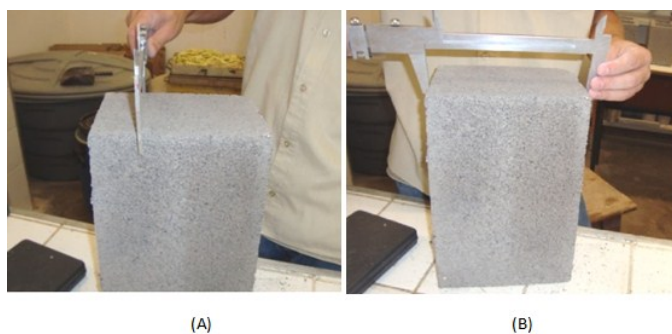


Figura 24 - A) Análise dimensional largura. B) Análise dimensional altura

São expressas na Tabela 9 as dimensões das paredes do bloco obtidas via análise dimensional, considerando os blocos, BC e BE, também em seu estado natural.

Tabela 9 – Dimensões mínimas da espessura (ϵ) da parede dos blocos - via análise dimensional

Espessura (ϵ) mínima da parede dos blocos		
Convencional (mm)		
	ϵ transversal da parede	ϵ longitudinal da parede
BC1	26.15	26.8
BC2	31.5	32.9
BC3	26.43	27.1
Média	28.05	28.93
Escória (mm)		
BE1	25.63	25.8
BE2	26.08	27.7
BE3	25.8	26.1
Média	25.83	26.53
Dimensão normativa mínima (mm)		
Padrão	25	25

Com base na Tabela 9 construiu-se a Figura 25 que, representa a espessura mínima das paredes dos blocos, segundo a NBR 12118 - 2006.

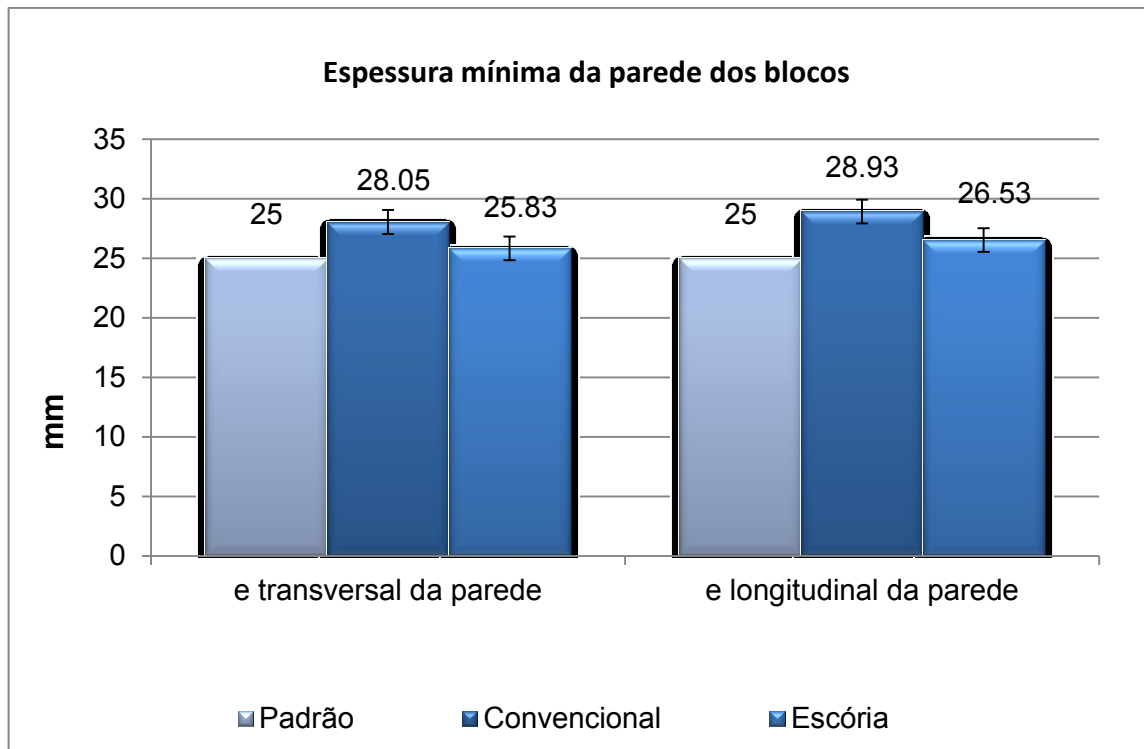


Figura 25 - Espessura mínima da parede dos blocos

Na Figura 26 é apresentado um esquema para facilitar o entendimento da disposição das dimensões médias obtidas no ensaio de análise dimensional.

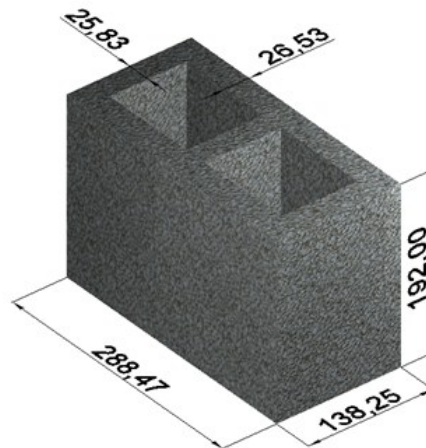


Figura 26 - Representação das dimensões essenciais para o modelo 3D

Tomando-se como base a análise dimensional realizada com os blocos de concreto e de escória construiu-se o gráfico, Figura 27, que apresenta o comparativo entre os resultados da análise dimensional e os valores prescritos na NBR 12118 – 2006, que estabelece valores dimensionais a serem respeitados na fabricação de blocos.

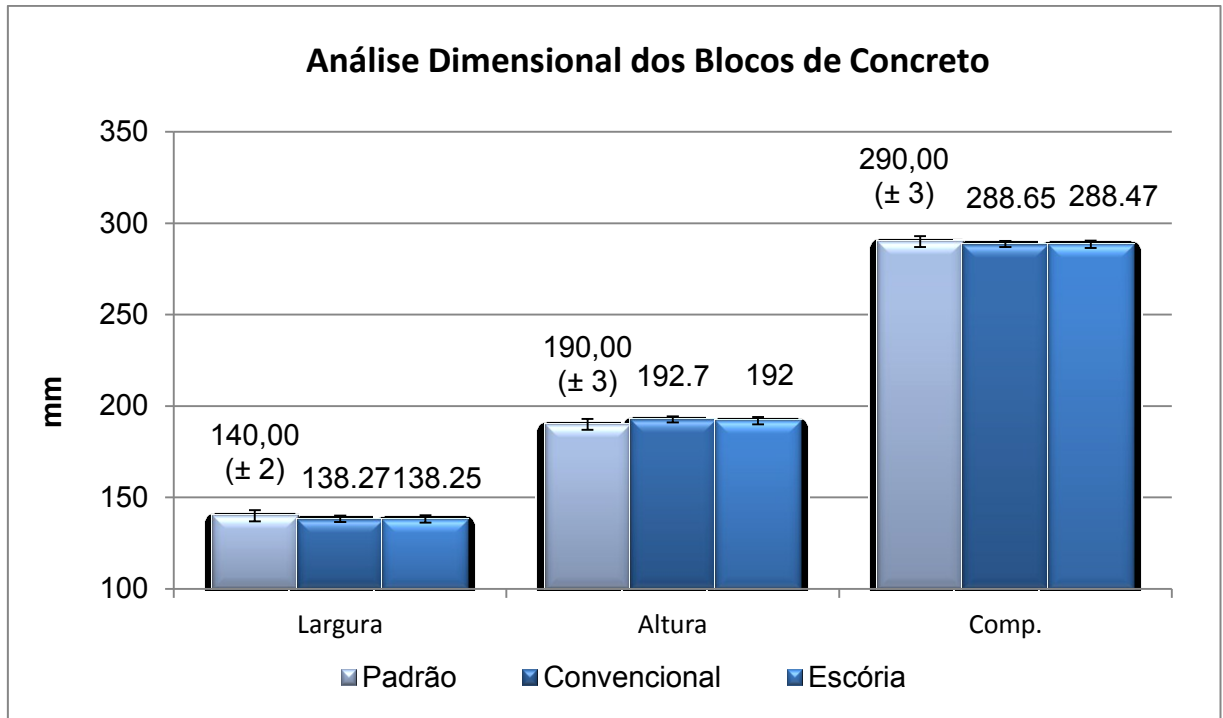


Figura 27 - Gráfico análise dimensional dos blocos

4.1.3 Massa específica

Na Tabela 10, fez-se um comparativo entre a massa específica dos blocos produzidos com escória (BE) e dos blocos naturais (BAN).

Tabela 10 - Dados coletados no ensaio de determinação da massa específica

	BE 1	BE 2	BE 3	Media	BC 1	BC 2	BC 3	Media
M.E natural (g/cm³)	2,54	2,50	2,80	2,61	2,33	2,36	2,41	2,37
M.E Seca (g/cm³)	2,46	2,42	2,70	2,53	2,29	2,33	2,36	2,33
M.E Saturada (g/cm³)	2,68	2,64	2,94	2,75	2,41	2,45	2,47	2,44

A Figura 28 foi construída com base nos valores experimentais expressos na Tabela 10.

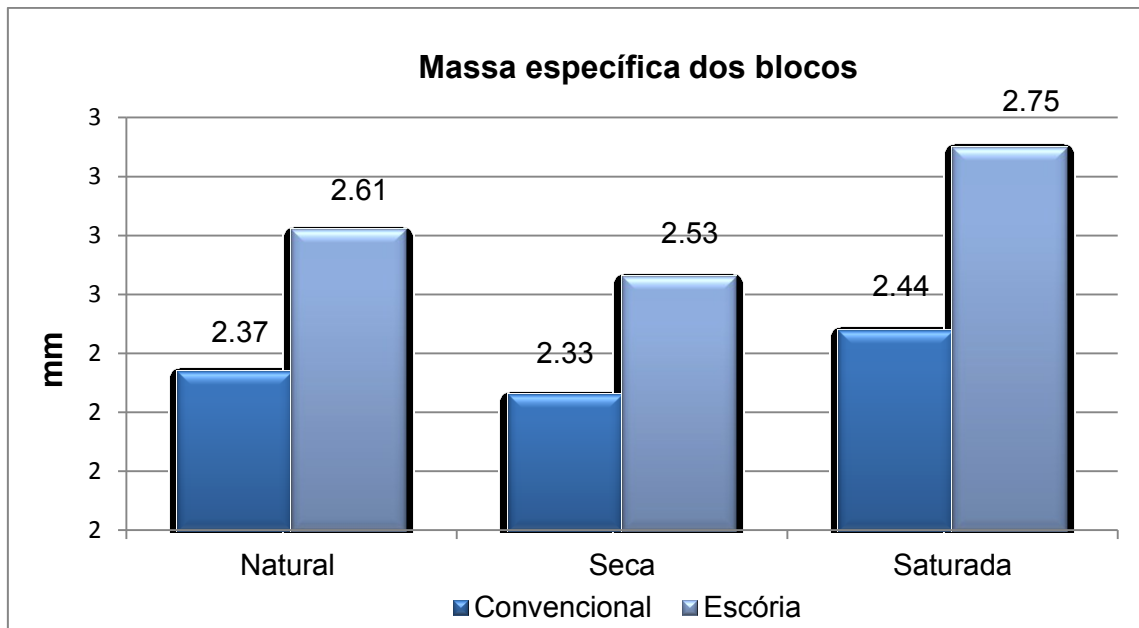


Figura 28 - Massa específica dos blocos

4.1.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 12118 – 2006. Fez-se o capeamento das faces superior e inferior do bloco com a finalidade de regularizar a superfície. A Figura 29 mostra o capeamento realizado nos blocos, antes do ensaio a compressão, e a realização do ensaio a compressão.



Figura 29 – A) Capeamento do bloco B) Ensaio de resistência a compressão

A Figura 30 mostra o bloco após o ensaio à compressão. É possível perceber as trincas oriundas do rompimento do bloco.



Figura 30 - Bloco após o rompimento

Os resultados obtidos no ensaio a compressão encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 - Resistência à compressão dos blocos de escória e de concreto

	14 dias			
BE	18.8	19.48	18.09	18.79
BC	12.21	11.4	14.45	12.69
	31 dias			
BE	13.12	12.41	13.83	13.12
BC	10.28	9.6	13.45	11.11

Em função de problemas técnicos operacionais relativos à reforma do laboratório de materiais – LMC, e funcionamento precário da prensa AROTEC, foram obtidos apenas resultados para idades de 14 e 31 dias para a resistência a compressão dos blocos. Assim, com base na Tabela 11, foi criada a Figura 31, mostrando a resistência à compressão dos blocos, BC e BE, em diferentes idades de cura.

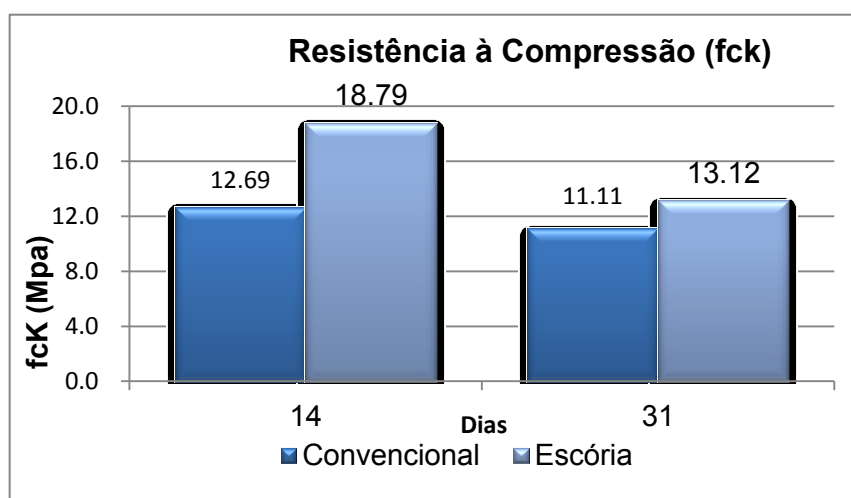


Figura 31 - Gráfico da resistência à compressão dos blocos

4.1.5 Resistência à tração

Outro comportamento importante a se determinar é a resistência à tração. Essa propriedade serve de base para a determinação da curva de ruptura do modelo a ser simulado. Com base na formulação proposta por CHEEMA e KLINGNER (1986), tem-se a resistência a tração, para a resistência a compressão 19 MPa, igual a 1,8 Mpa.

4.1.6 Módulo de elasticidade

Avaliaram-se diferentes trabalhos relacionados à Alvenaria Estrutural para determinar o módulo de Elasticidade que melhor caracterize o bloco em questão. A dificuldade maior em utilizar dados da literatura é que todos eles referem-se a blocos essencialmente de concreto. O bloco em questão é produzido utilizando-se como agregado, a escória de aciaria. Essa mudança é um fator que modifica as características físicas.

Conforme mostrado anteriormente, existem três equações que sugerem o Módulo de Elasticidade para o concreto. Nesse trabalho adotou-se a formulação do CEB-FIB (1990) por considerar a densidade como um fator importante para o Módulo de Elasticidade. Portanto, adotou-se a equação 2 expressa abaixo:

$$E_b = 0,0428 \cdot \sqrt{f_b} \cdot (W_b)^{1,5} \quad \text{Eq. 02}$$

Onde:

E_b = Módulo de Elasticidade do bloco (MPa)

f_b = resistência à compressão do bloco (MPa)

W_b = massa específica unitária do bloco (Kg/m^3)

Desse modo, o valor do módulo de elasticidade, considerado a massa específica seca e resistência aos 14 dias (maior carga de compressão obtida nos ensaios à compressão) do bloco de escória de aciaria, pode ser dado por **24,8 GPa**.

4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.2.1 Dados para a simulação

O carregamento adotado na simulação numérico foi adotado com base na maior carga de compressão obtida nos ensaios que, resultou em um acarregamento de 18,76 MPa em blocos aos 14 dias. Assim, considerou-se a resistência máxima a compressão de 19 MPa para a construção da envoltória de tensões de von Mises.

Já a resistência a tração, por falta de ensaio experimentais, foi obtida por formulação que correlacionaram os dados obtidos experimentalmente, resultando em uma resistência máxima de 1,8 Mpa.

Com o software ABAQUS, utilizou-se o modelo específico para concreto que, considera a fissuração como um fator relevante para a perda de resistência do modelo, sendo que, ela ocorre quando a tensão principal atinge a curva de ruptura da envoltória de tensões de von Mises. O modelo para os blocos de escórias foi criado com base nos dados apresentados na Tabela 12, para assim comparar com o modelo de bloco de concreto (BAN) apresenta do em ALI & PAGE (1988).

Tabela 12 - Propriedades dos blocos de escórias de aciaria utilizados na simulação numérica

Propriedade dos blocos	
Resistência a compressão	19,0 MPa
Resistência a Tração	1,8 MPa
Módulo de Elasticidade	24,8 GPa
Coeficiente de Poisson	0,16
Massa específica	2610 Kg/m ³

4.2.2 Diagrama tensão e deformação teórica

O diagrama tensão versus deformação, do bloco de escória, obtido pela simulação no software ABAQUS, é apresentado na Figura 32. Fez-se a comparação dos resultados dos blocos de concreto proposto por ALI & PAGE (1988) com os dos blocos de escória proposto por esse trabalho.

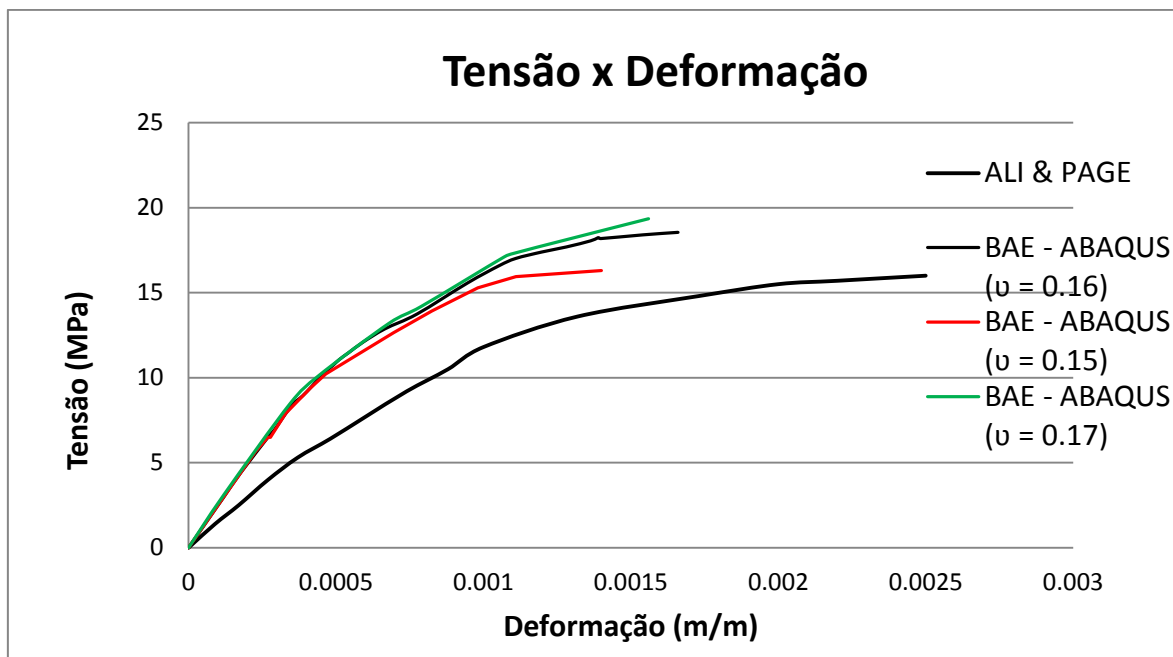


Figura 32 - Tensão de deformação do modelo numérico

Percebe-se pelos resultados encontrados na simulação que, o comportamento do bloco de escória de aciaria (BE), na Figura 32, apresenta comportamento mecânico semelhante ao bloco convencional de concreto de alvenaria estrutural, porém com deformações menores. Na curva tensão versus deformação, da Figura 32, a maior inclinação, referente aos blocos de escória, é explicada pelo seu maior módulo de elasticidade inicial (24,8 GPa), quando comparado com os blocos de concreto (14,7 GPa). A resistência à compressão dos blocos de escória de aciaria também se mostraram maior, sendo concordado pelos experimentos realizados com os blocos.

Fez-se modelagem numérica utilizando Coeficiente de Poisson iguais a 0,15, 0,16 e 0,17, a fim de, identificar o comportamento, quando essa propriedade varia, resultando nos respectivos gráficos, tensão versus deformação. Na Figura 32 são apresentados os resultados para os três valores.

4.2.3 Distribuição de tensão no bloco

O modelo numérico foi desenvolvido com a finalidade de estudar como as tensões se dissipam ao longo da estrutura do bloco, proporcionando tomadas de decisões com maior segurança. Na Figura 33 apresentam-se alguns elementos que compõe o bloco e serão mencionados adiante.

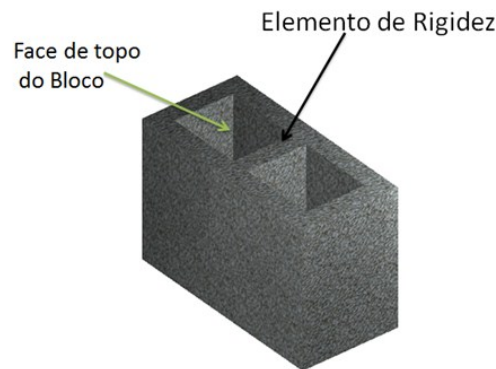


Figura 33 - Elemento da geometria do bloco

A Figura 34 mostra a distribuição das tensões, segundo a teoria de von Mises, essas são resultantes do carregamento vertical, de compressão, imposto na superfície de topo do bloco. Dessa forma, pode-se perceber que a tensão máxima é bem próxima da obtida no ensaio à compressão do bloco realizada experimentalmente no Laboratório de Construção Civil da Escola de Minas.

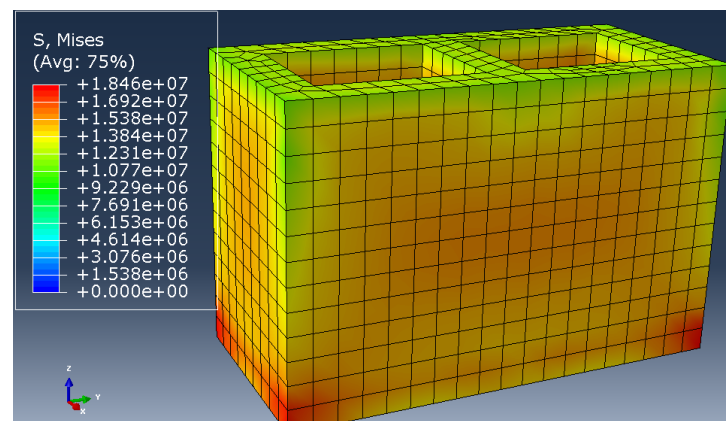


Figura 34 - Distribuição de tensões no modelo

A partir da Figura 34, é possível perceber que as maiores tensões se concentram na região central do bloco e na base. A primeira é explicada pela estrutura do bloco que apresenta maior rigidez na região central do bloco, decorrente do elemento de rigidez em seu interior. Já a segunda, ocorre devido à concentração de forças de atrito no contato entre bloco e a chapa da prensa, impedindo assim, o deslocamento dessas regiões e resultando em acúmulos de tensões.

A uniformidade da dissipação das tensões é muito importante para o desempenho estrutural dos blocos, pois ele deve absorver a energia decorrente dos esforços de compressão e dissipá-la. Na Figura 35 apresenta-se um corte transversal no

modelo, podendo, assim, perceber que de fato as tensões se dissipam por todo o corpo estrutural do bloco.

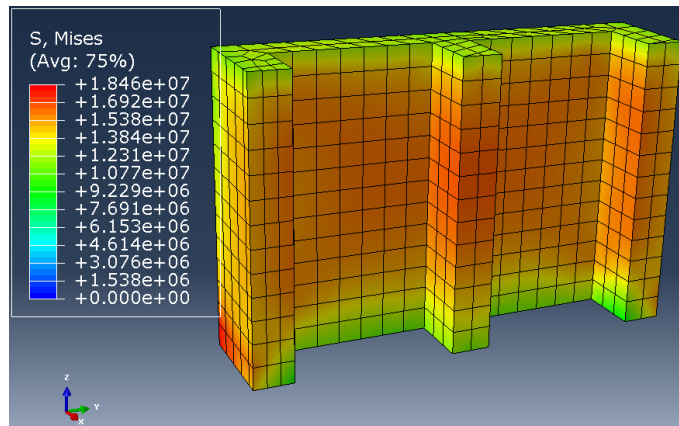


Figura 35 - distribuição interna de tensão no modelo

Outra característica relevante para o bloco é a capacidade de sofrer pequenas deformações sugerindo um comportamento frágil. Na Figura 36 percebe-se o comportamento quanto a deformações ao longo da estrutura do bloco, apresentando deformação máxima de 0,00180 m/m.

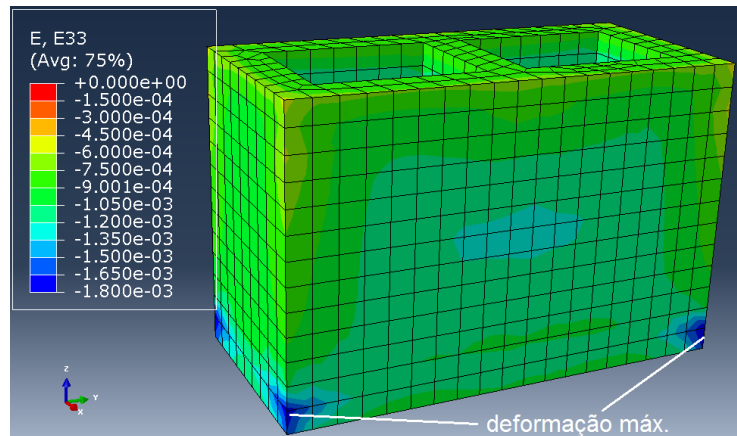


Figura 36 - Deformação máxima e mínima do modelo

Na Figura 37 podem-se perceber os deslocamentos verticais resultante do esforço de compressão uniaxial que o bloco foi submetido. O bloco de escória apresentou deslocamento máximo da face de topo de 0,0002312 m.

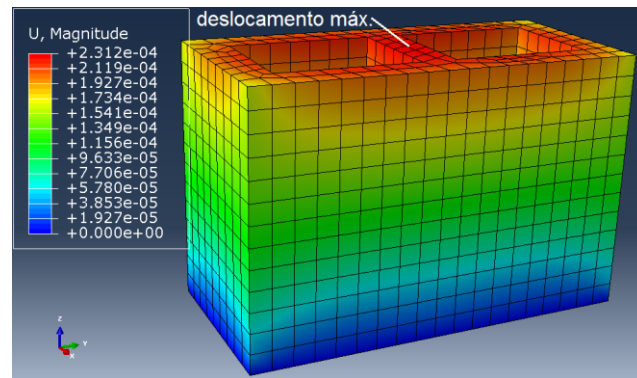


Figura 37 - Deslocamento vertical do modelo

5 CONCLUSÃO

A utilização da escória de aciaria como matéria prima para blocos torna-se viável, pois é uma nova alternativa para a reciclagem de resíduos sólidos de siderurgia que representam um passivo ambiental para as siderúrgicas.

As análises das propriedades físicas dos blocos de escória de aciaria mostraram excelentes resultados quando comparados aos blocos de concreto convencionais. Nesse trabalho e em SILVA (2010), foram realizados estudos que comprovam o comprimento das determinações normativas para blocos de alvenaria estrutural (NBR 12118 e NBR 6136).

Com relação à resistência aos esforços de compressão, principal propriedade dos blocos estruturais, os resultados experimentais mostraram-se animadores com a obtenção de resistências de 18,79 MPa aos 14 dias e 13,12 MPa aos 31 dias. As prescrições normativas foram atendidas e as resistências obtidas nos ensaios experimentais foram superiores, quando comparados as dos blocos em concreto convencional.

A formulação numérica representa um potencial para a determinação das propriedades mecânicas para os elementos produzidos com materiais não convencionais. Embora alguns parâmetros utilizados na simulação não sejam os mais apropriados, os resultados preliminares obtidos por meio de simulação numérica, apontam como alternativa a aplicação de escória de aciaria como agregados para a produção de blocos de alvenaria.

As propriedades do bloco de escória de aciaria atenderam aos requisitos normativos para a utilização em alvenaria estrutural. Em virtude dos benefícios que essa nova técnica de produção de bloco vem mostrando é que se propõe a sua utilização em construções de alvenaria estrutural.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento tensão x deformação de forma prática, utilizando-se extensômetros elétricos para a determinação do módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Posteriormente, calibração do modelo numérico com os dados coletados.
- Analisar o comportamento mecânico de um prisma utilizando os blocos de escória de aciaria unidos com argamassa, bem como, aplicando a escória como agregado.
- Analisar a associação dos blocos de escória de aciaria em conjunto com outras técnicas de construção estrutural, como núcleo rígido de edifícios em aço de múltiplos andares.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12118**. *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio*. Rio de Janeiro : s.n., 2007.

_____. **NBR 14724**. *Informação e documentação. Trabalhos acadêmicos - Apresentação*. Rio de Janeiro : s.n., 2002.

_____. **NBR 6136**. *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural*. Rio de Janeiro : s.n., 1994
ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - 1994. **NBR 6136**. *Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural*. Rio de Janeiro : s.n., 1994.

ABREU, J. C. e CARNEIRO, F. A. 1994. Emprego de escória siderúrgica integradas na Engenharia Civil. Escória Siderúrgicas: caracterização e aplicação para a Industria da Construção Civil. Volta Redonda - RJ : 25º Seminário de redução e materias-primas resídups na siderúrgica, 1994. Vols. Anais... p.363 - 381.

ALI, S. e PAGE, A.W. 1988. Finite element model for masonry subjected to concentrated loads. s.l. : Journal of Strutural Engineering, v. 144, 1988.

ANDOLFATO, RODRIGO PIERNA, CAMACHO, JEFFERSON SIDNEY e BRITO, GILBERTO ANTONIO DE. 2004. *Extensometria Básica*. Ilha Solteira : UNESP/NEPAE, 2004.

ARAUJO, A.L. 1997. Manual de Siderúrgia - Produção. s.l. : Editora Arte & Ciência, 1997. v. 1.

BARBOSA, CLAUDIUS DE SOUZA. 2004. *Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações comas propriedades mecânicas do material constituinte*. São Carlos : EESC/USP, 2004.

BRICKA. BRICKA Alvenaria Estrutural. *Sistemas Construtivos Bricka*. [Online] <http://www.bricka.com.br/download.htm>.

BUFFONI, SALETE. *Notas de Aula da disciplina Resistência dos Materiais*. s.l. : Universidade Federal Fluminense.

CALLISTER, W. D. Jr. 2006. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Intradução*. Rio de Janeiro : LTC, 2006. 5º edição.

CAMACHO, JEFFERSON SIDNEY. 2006. *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural*. Ilha Solteira - SP : s.n., 2006.

CARVALHO, M. Rodrigo. 2006. Influência do Padrão de Argamassamento na Resistência à Compressão de Prismas e Mini Paredes de Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto. *Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.* 2006.

CASTELO BRANCO, V. T. F. 2004. Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título em mestre em Engenharia Civil. *Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escórias de aciaria como agregado.* Rio de Janeiro : Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

CHEEMA, T. S. e KLINGNER, R. E. 1986. Compressive Strength of concrete Mansory Prism. s.l. : American Concrete Institute - ACI Structural Journal, January, vol. 83(nº 1):88-97 de 1986.

CICOTTO, M. A, SILVA, M. A. C e CASCUDO, H. C. 1995. Argamassas de Revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. Boletim Técnico n 68 São Paulo : Instituto de Pesquisa Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

CINCOTTO, M. A, et. al. 1992. Caracterização da escória granulada de alto-forno e seu emprego como aglomerante e agregado. São Paulo : IPT, 1992.

CORRÊA, M. e RAMALHO, M. 2003. *Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural.* s.l. : PINI, 2003.

ETW. Concrete Machinery. [Online] [Citado em: 19 de setembro de 2012.] <http://www.concretemachinery.com.pt/3c-simple-production-line.html>.

FILHO, AMÉRICO CAMPOS. 2003. *Fundamentos da Análise de estruturas de concreto pelo método dos Elementos Finitos.* Rio Grande do Sul : s.n., 2003.

FRAÇA, MARCELA BRUNA BRAGA. 2008. Estudo da aplicabilidade da argamassa produzida a partir da reciclagem de resíduos sólidos de siderurgia em obras de Engenharia. Belo Horizonte : Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2008.

FUNG, Y. C. 1965. Foundations os Solid Mechanics. New Jersey - U.S.A : Prentice-Hall, 1965.

GALLEGOS, HECTOR. 1989. Albeñileria Estructural. Peru : Pontificia Universidade Católica, 1989.

GRANTE. 2004. *Apostila de Extensometria.* Florianópolis : GRANTE - GRUPO DE ANÁLSE E PROJETO MECAÂNICO, 2004.

GreenMetals. 2011. Green Metals. *GreenMetals.* [Online] 2011. [Citado em: 15 de outubro de 2012.] GreenMetals.

GUELLO, GUSTAVO DE ASSIS. 2002. Simulação Computacional de estruturas por meio da Mecânica do Dano. São Paulo : Univerisade de São Paulo, 2002.

HOGNESTAND, EIVIND. 1951. A Study of combined Bending and axial load in reinforced Concrete Members. Urbana : University of Illinois, 1951. Vol. 49.

JR., PRUDÊNCIO. 1994. Alvenaria Estrutural. *Notas de aula, curso de graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Caarina.* 1994.

JÚNIOR, EULER BARRETO. Extensômetria - Manual Prético.

Kalil, Silvia Maria Baptista. *Alvenaria Estrutural.*

LOURENÇO, PAULO JOSÉ BRANDÃO BARBOSA. 1996. *Computational Strategies for masonry structures.* Porto : Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

—. **1996.** *Computational Strategies for Mansory Structures.* Porto : s.n., 1996.

MACHADO, A. T. 2000. Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. *Estudo Comparativo dos Métodos de Ensaio para a Avaliação da Expansibilidade das Escórias de Aciaria.* São Paulo : s.n., 2000.

MARTINS, JAIME FLORENCIO. 2010. Notas de Aula - Resistência dos Materiais. Ouro Preto : Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

MASUERO, A. B., VILELA, A. C. e DAL MOLIN, D. 2004. Emprego de Escória de Aciaria Elétrica como adição a concretos. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

MATA, RODRIGO CARVALHO DA. 2006. *Influência do Padrão de Argamassamento na Resistência à Compressão de Prismas e Mini-Paredes de Alvenaria Estrutural de Bloco de Concreto.* Florianópolis : UFSC, 2006.

Maxwell. [Online] PUC - Rio. [Citado em: 21 de setembro de 2012.] http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/9239/9239_3.PDF.

Maxwell. S.d. Material Composito. *Maxwell - PUC.* [Online] S.d. [Citado em: 21 de Stembro de 2012.] http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/9239/9239_3.PDF.

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

MENDONÇA, R. L. 2006. O uso adequado da escória de aciaria em pavemntos. s.l. : Kaeme Empreendimentos e Consultoria, 2006.

MOHAMAD, G. 1998. Comportamento Mecânico na Ruptura de Prismas de Blocos de Concreto à Compressão. *Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.* 1998.

MOHAMAD, GIHAD. 2007. Mecanismo de ruptura da alvenaria de blocos à compressão. s.l. : Escola de Engenharia - Univerisade do Minho, 2007.

MOURÃO, M. B. e GENTILE, E. F. 2007. Visão do processos siderúrgico. *Introdução à Siderurgia.* São Paulo : ABM, 2007.

MUSGROVE, J e FLETCHER, B. 1987. *Sir Banister Fletcher's, A history of architecture.* New York : Butterworths, 1987.

MUSGROVE, J. e FLETCHER, B. Sir Banister Flecher's. 1989. *A History of Architecture.* London : Butterworths, 1989.

NASCIMENTO, J.F e Lange, L.C. 2005. Escória de Aciaria, alternativa economica e ambientalmente adequada para obras de pavimentação e conservação rodoviária. 2005.

PELEIRO, SOUZANA CAMPANA. 2002. *Contribuição à modelagem numérica de Alvenaria Estrutural.* São Carlos : EESC/USP, 2002.

PELETEIRO, SOUZANA CAMPANA. 2002. Contribuição à modelagem numérica de Alvenria Estrutural. *Tese Apresentada a Escola de Engenharia de São Paulo.* São Carlos : USP, 2002.

PELETEIRO, SUZANA CAMPANA. 2002. *Contribuições à Modelagem Numérica de Alvenaria Estrutural.* São Carlos : s.n., 2002.

PETRUCCI, ELÁDIO G. R. 1998. *Materiais de Construção.* São Paulo : Globo, 1998.

PIMENTA, W.B. 2010. <http://www.webartigos.com>. *webartigos.* [Online] 5 de Maio de 2010. [Citado em: 21 de Abril de 2011.] <http://www.webartigos.com/articles/37259/1/Historia-do-Aco/pagina1.html#ixzz1LCqgWUnl>.

PINHEIRO, LIBÂNIO M., et al. 2010. *Estruturas de Concreto.* 2010.

PRUDÊNCIO, L.R., OLIVEIRA, A.L e BEDIN, C.A. 2002. *Alvenaria Estrutural de Blocos de Concreto.* Florianopolis : Pallotti, 2002.

SABBATINI, F.H. 1984. O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílico-calcária. *Dissertação (Mestrado).* São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.

SANTOS, CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA. 2011. *Análise de Blocos estruturais de concreto utilizando a técnica de ultrassom.* Belo Horizonte : UFMG, 2011.

SENSORES, EXCEL. *Manual Técnico - Preparação da Superfície e colagem do extensômetro na peça.* Umbú : s.n.

— *. Manual Técnico - Tamanho e forma geométrica dos extensômetros.* Embú : s.n.

SILVA, Kerry Aline. 2010. Blocos de Concreto com Escória de Aciaria para Aplicação em Alvenaria Estrutural. *Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção Civil como requisito parcial para a aprovação na disciplina Projeto de Fim de Curso.* 2010, p. 95.

SILVA, KERRY ALINE DA e PEIXOTO, RICARDO ANDRÉ FIOROTTI. 2010. Blocos de Concreto com escória de aciaria para a aplicação em Alvenaria Estrutural. *Trabalho de Conclusão de Curso.* Belo Horizonte : s.n., 2010.

SILVA, NARCISO GONÇALVES DA. 2006. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. *Dissertação (Mestrado).* Curitiba : Universidade Federal do Paraná, 2006.

SILVA, SAMUEL. 2009. Notas de Aula - Introdução ao Método dos elementos Finitos. Foz do Iguaçu : Centro de Engenharia e Ciências Exatas - CECE, 2009.

USUDA, FÁBIO. 2004. Engenharia Civil Técnicas construtivas - Alvenaria Estrutural. Sorocaba - SP : s.n., 2004.

— **. 2004.** Técnicas Construtivas Especiais - Alvenaria Estrutural. Sorocaba : s.n., 2004.