

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA NA FABRICAÇÃO DE  
BLOCOS DE CONCRETO**

**Leandro Henrique Benittez**

São Carlos

2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ACIARIA NA FABRICAÇÃO DE  
BLOCOS DE CONCRETO**

**Leandro Henrique Benittez**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil

**Área de Concentração:** Construção Civil

**Orientador:** Prof. Dr. José da Costa Marques Neto

**Coorientadora:** Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

São Carlos

2020



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

---

**Folha de Aprovação**

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Leandro Henrique Benitez, realizada em 29/04/2020:

---

Prof. Dr. Jose da Costa Marques Neto  
UFSCar

---

Prof. Dr. Javier Mazañegos Pablos  
USP

---

Prof. Dr. Almir Sales  
UFSCar

*Aos meus pais e minha esposa,  
meus maiores incentivadores.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Gratidão à Deus, mentor de todas as coisas, responsável por tornar realidade mais essa importante etapa de minha vida.

Aos meus pais, Luiz e Zilda Maria, por acreditarem em mim, por serem exemplo de honestidade, trabalho e resiliência, e por terem me ensinado, que um sonho realizado é consequência de muita dedicação. Obrigado por serem meu porto seguro, amo-os incondicionalmente.

De forma especial à Lívia, minha esposa, principal incentivadora dessa conquista, que viveu comigo cada momento deste desafio, sempre me ajudando nos momentos difíceis. Seu apoio foi fundamental em muitas etapas deste trabalho. Obrigado, meu amor, por ser sempre minha melhor companhia.

A todos os demais familiares que oraram e torceram por mim, obrigado pelo apoio.

Ao meu orientador professor José da Costa Marques Neto pela oportunidade de trabalharmos juntos no Mestrado, pela parceria frente aos desafios, pela confiança na minha capacidade em realizar um trabalho com um tema tão atual e relevante.

Agradeço em especial minha coorientadora professora Fernanda Giannotti da Silva Ferreira por contribuir expressivamente com este trabalho, pela competência e dedicação ao me coorientar. As parcerias realizadas com IPT e Apodi, só foram possíveis devido aos seus contatos e influências. Obrigado pela confiança, pelas inúmeras reuniões e principalmente pela tranquilidade a mim transmitidas durante todo o processo.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, nas pessoas de Fabiano, Karol, Rafael e Lucas pela parceria nos ensaios laboratoriais, além da transmissão de conhecimento através das reuniões e artigos escritos em parceria.

A cimenteira Apodi, através do Mário, pela parceria e doação do cimento e escória de aciaria utilizados na pesquisa, além da cooperação na elaboração de artigos. Ao Jonas, também Apodi, pela disponibilidade em nos apresentar e acompanhar na visita realizada à fábrica da Apodi em Quixeré CE.

A CONCRETIZE Blocos e Pisos de Concreto, onde os blocos foram fabricados, pela disponibilidade de seus funcionários e abertura total de suas instalações.

Aos técnicos dos laboratórios LMC e LSE da UFSCar, José Roberto e Ricardo, além do Fábio, aluno de IC, pela grande contribuição nos ensaios dos agregados e dos blocos.

Agradeço aos membros da banca de qualificação e defesa desta dissertação, por se disporem a discutir o trabalho em profundidade, este auxílio foi de fundamental importância.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, agradeço pelo apoio e troca de conhecimento.

Aos demais amigos que trago da infância, da faculdade e das obras. Obrigado por estarem presentes, mesmo que distantes, e por trazerem mais alegria à minha vida.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv/UFSCar) por todo o suporte durante o mestrado.

A todos, que direta ou indiretamente, contribuíram com a elaboração deste trabalho.

## RESUMO

BENITTEZ, Leandro Henrique. **Utilização de escória de aciaria na fabricação de blocos de concreto**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

Neste trabalho é estudada a viabilidade técnica de blocos de concreto sem função estrutural, quando utilizada escória de aciaria BSSF em sua fabricação. Em 2019 a produção de aço brasileira foi de 32,46 milhões de toneladas e a mundial de 1,87 bilhões de toneladas e de escória de aciaria de 4,54 e 262 milhões de toneladas, respectivamente. A incorporação deste resíduo da indústria siderúrgica, nos blocos de concreto, contribuem de maneira sustentável para a destinação final de um passivo ambiental. Foram realizadas substituições parciais de 20, 40, 60, 80% dos agregados naturais por artificial na produção dos blocos. Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados e aglomerante. Os blocos de concreto foram fabricados em uma indústria de artefatos de cimento para se obter resultados em escala, com realidade industrial. Em seguida, os blocos foram ensaiados quanto à análise dimensional, absorção de água, área líquida e resistência à compressão aos 28 dias de idade. Os resultados mostraram que é viável tecnicamente a incorporação de escória de aciaria BSSF em blocos de concreto, uma vez que todos os blocos produzidos atenderam aos requisitos normativos. Destaca-se que os blocos com a substituição de 60% de agregados foram os que apresentaram os melhores resultados.

**Palavras-chave:** Bloco de concreto, escória de aciaria, resíduo sólido industrial, agregado artificial, sustentabilidade.

## ABSTRACT

BENITTEZ, Leandro Henrique. **Use of steel slag in the manufacture of concrete blocks**. 103 p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Federal University of São Carlos, São Carlos, 2020.

In this work, the technical feasibility of concrete blocks without structural function is studied, when using BSSF steel slag in its manufacture. In 2019, Brazilian steel production was 32.46 million tons and the world steel 1.87 billion tons and steel slag of 4.54 and 262 million tons, respectively. The incorporation of this waste from the steel industry, in concrete blocks, contributes in a sustainable way to the final destination of an environmental liability. Partial substitutions of 20, 40, 60, 80% of the natural aggregates were made by artificial in the production of the blocks. Initially, tests were carried out to characterize the aggregates and binder. The concrete blocks were manufactured in a cement artifact industry to obtain results at scale, with industrial reality. Then, the blocks were tested for dimensional analysis, water absorption, liquid area and resistance to compression at 28 days of age. The results showed that it is technically feasible to incorporate BSSF steel slag into concrete blocks, since all the blocks produced met the normative requirements. It is noteworthy that the blocks with the replacement of 60% of aggregates were the ones that presented the best results.

**Keywords:** Concrete block, steel slag, industrial solid waste, artificial aggregate, sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aplicações da escória de aciaria.....	19
Figura 2: Processo simplificado de produção de aço.....	22
Figura 3: Produção de aço por conversor LD.....	23
Figura 4: Produção de aço por arco elétrico.....	24
Figura 5: Escória líquida sendo basculada.....	25
Figura 6: Resfriamento da escória.....	26
Figura 7: Britagem e peneiramento da escória.....	27
Figura 8: Beneficiamento escória de aciaria processo BSSF.....	28
Figura 9: Bloco vazado de concreto simples.....	39
Figura 10: Mísulas.....	41
Figura 11: Modelo de baia de agregados.....	43
Figura 12: Misturador Planetário.....	43
Figura 13: Esteira transportadora de concreto.....	44
Figura 14: Máquinas vibroprensa. a) Hidráulica, b) Pneumática, c) Manual.....	45
Figura 15: Molde bloco 09x19x39.....	45
Figura 16: Escova rotativa.....	46
Figura 17: a) Carro garfo, b) Pinça.....	47
Figura 18: Câmara de cura.....	47
Figura 19: Organograma do programa experimental.....	50
Figura 20: Cimento da pesquisa.....	52
Figura 21: Agregados naturais. a) Areia natural; b) Pó de pedra; c) Pedrisco; d) Detalhe areia; e) Detalhe pó de pedra; f) Detalhe pedrisco.....	53
Figura 22: Escória de aciaria BSSF. a) Embalada em Big Bag; b) Amostra.....	54
Figura 23: Ensaio de granulometria: a) Quarteamento; b) Pesagem da amostra; c) Misturador mecânico para agregados miúdos; d) Frações retidas nas peneiras.....	56
Figura 24: Ensaio Massa Unitária: a) Recipiente com agregado; b) Pesagem do recipiente mais agregado.....	57
Figura 25: Ensaio Teor de Materiais Pulverulentos: a) Passagem pela peneira; b) Primeira e última lavagem.....	58
Figura 26: Ensaio Massa Específica agregado miúdo: a) Saturação do material; b) Obtenção da condição SSS; c) Cone íntegro; d) Cone desmoronado; e) Pesagem da amostra; f) Pesagem do conjunto.....	60
Figura 27: Ensaio massa específica agregado gráudo: a) Lavagem do material; b) Retirada da umidade superficial c) Aferição da massa submersa.....	61

Figura 28: Ensaio de absorção de água: a) Estufa; b) Pesagem do material seco.....	62
Figura 29: Bloco sem função estrutural 14x19x39 .....	64
Figura 30: Comparativo granulométrico .....	65
Figura 31: Baias dos agregados. a) Visão geral; b) Pó de pedra; c) Areia; d) Pedrisco .....	67
Figura 32: Cimento. a) Ensacado utilizado pela Concretize; b) Apodi a granel utilizado na pesquisa .....	68
Figura 33: Dispositivos de controle de água e aditivo .....	68
Figura 34: Misturador. a) Visão geral; b) Dispositivo de adição de água e aditivo.....	69
Figura 35: Esteira transportadora de concreto .....	70
Figura 36: Máquina vibroprensa. a) Detalhe do molde em amarelo, b) Em operação, com escova cilíndrica e blocos fabricados .....	71
Figura 37: a) Transporte com carro garfo; b) Acomodação dos blocos .....	71
Figura 38: Processo de cura e estoque: a) Blocos acomodados lado a lado imediatamente após serem fabricados; b) e c) Blocos cobertos com lona plástica para cura; d) Blocos paletizados no estoque .....	72
Figura 39: Dimensões nos blocos de concreto.....	73
Figura 40: Dimensões dos furos .....	73
Figura 41: Ensaio análise dimensional: a) Altura; b) Largura; c) Espessura de parede.....	74
Figura 42: Preparo dos blocos: a) Secagem; b) Pesagem .....	74
Figura 43: Ensaio de absorção de água: a) Saturação; b) Drenagem; c) Remoção da água superficial.....	75
Figura 44: Pesagem com balança hidrostática.....	76
Figura 45: Capeamento do bloco: a) Pasta de cimento; b) Blocos capeados.....	77
Figura 46: Ensaio de resistência à compressão: a) Início da prensagem; b) Face frontal e esquerda; c) Face frontal e direita.....	77
Figura 47: Apresentação do Teste de Tukey .....	79
Figura 48: Curva granulométrica areia natural .....	80
Figura 49: Curva granulométrica pó de pedra .....	81
Figura 50: Curva granulométrica pedrisco .....	82
Figura 51: Curva granulométrica escória de aciaria BSSF .....	83
Figura 52: Difratoograma de raios X da escória.....	86
Figura 53: Resultados obtidos x NBR 6136 (ABNT, 2016).....	94
Figura 54: Resultados obtidos x NBR 6136 (ABNT, 2016).....	94
Figura 55: Gráfico resistência à compressão x absorção de água .....	95
Figura 56: Gráfico massa dos blocos x resistência à compressão .....	96
Figura 57: Acabamento dos blocos.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção Mundial de Aço Bruto (Unid. 10 <sup>6</sup> t.) .....	18
Tabela 2: Composição química da escória de aciaria LD e elétrica .....	29
Tabela 3: Propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria LD e elétrica .....	29
Tabela 4: Características dos elementos e compostos químicos das escórias de aciaria antes e após a hidratação.....	30
Tabela 5: Parâmetros que influenciam na expansão da escória de aciaria.....	31
Tabela 6: Pesquisas envolvendo utilização de escória de aciaria na produção de concreto	33
Tabela 7: Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes .....	39
Tabela 8: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração ....	40
Tabela 9: Tamanho da amostra .....	42
Tabela 10: Traços unitários em volume .....	66
Tabela 11: Modelo de tabela do ANOVA do Excel.....	78
Tabela 12: Granulometria areia natural.....	80
Tabela 13: Granulometria pó de pedra .....	81
Tabela 14: Granulometria pedrisco .....	82
Tabela 15: Granulometria escória de aciaria BSSF .....	83
Tabela 16: Propriedades dos agregados naturais e artificial .....	84
Tabela 17: Resultado dos ensaios químicos na escória.....	85
Tabela 18: Resultado da análise por DRX da escória .....	86
Tabela 19: Ensaios físicos aglomerante.....	87
Tabela 20: Ensaios mecânicos aglomerante.....	87
Tabela 21: Resultado análise dimensional.....	88
Tabela 22: Resultado absorção e área líquida com 28 dias .....	89
Tabela 23: ANOVA para absorção de água .....	90
Tabela 24: Resultado de equivalência e diferença significativa para absorção de água .....	91
Tabela 25: Resultado de resistência à compressão aos 28 dias.....	91
Tabela 26: ANOVA para resistência à compressão .....	92
Tabela 27: Resultado de equivalência e diferença significativa para resistência à compressão .....	92
Tabela 28: Massa dos blocos .....	93

## LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADB	Adiblock
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
ASTM	<i>American Standard of Testing Materials</i>
BE	Bloco Empresa
BOF	Forno de oxigênio
BS20	Bloco Substituição de 20%
BS40	Bloco Substituição de 40%
BS60	Bloco Substituição de 60%
BS80	Bloco Substituição de 80%
BSE	Bloco Sugestão Empacotado
BSSF	<i>Baosteel's Slag Short Flow / fluxo curto de escória da Baosteel</i>
C <sub>2</sub> S	Belita
Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita
CaCO <sub>3</sub>	Calcita/ Aragonita
CaCO <sub>3</sub> .MgCO <sub>3</sub>	Dolomita
CaO	Cal
CaO livre	Cal livre
CE	Ceará
CO <sub>2</sub>	Anidrido carbônico
CP II F	Cimento Portland composto com material carbonático
CP II Z	Cimento Portland composto com material pozolânico
CP V ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Cromo III
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
D.	Diâmetro
D <sub>máx</sub>	Diâmetro máximo
DS	Diferença significativa
EQ	Equivalente
Fe(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Ferro
Fe <sup>0</sup>	Ferro metálico
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
Fe <sub>M</sub>	Ferro metálico
FeO	Wustita
FeO(OH)	Goetita
FRX	Fluorescência de raios X
g	Grama
g/cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cúbico
gl	Grau de liberdade
GOF	<i>Goodness of Fitting</i>
H0	Hipótese nula

H1	Hipótese alternativa
hp	<i>Horse power</i> / cavalo vapor
ICDD	<i>International Center for Diffraction Data</i>
ICSD	<i>International Center for Structure Data</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
kg/l	Quilograma por litro
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
LD	Linz Donawitz
LMC	Laboratório de Materiais e Componentes
LSE	Laboratório de Sistemas Estruturais
MF	Módulo de Finura
Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita
MgO	Periclásio
ml	Mililitros
mm	Milímetros
mm/m	Milímetros por metro
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrados
MnO	Óxido de Manganês
MPa	Mega Pascal
NM	Norma Mercosul
OH	Siemens Martin
oneway	Fator único
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Óxido de fósforo
S	Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Anidrido silícico
SP	São Paulo
SSS	Saturado Superfície Seca
α	Nível de significância

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
1.1.1	Geral.....	20
1.1.2	Específicos.....	20
<b>1.2</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3</b>	<b>QUESTÃO DE PESQUISA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>ESCÓRIA DE ACIARIA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA .....</b>	<b>28</b>
2.2.1	Composição química e mineralógica.....	28
2.2.2	Propriedades físicas e mecânicas.....	29
2.2.3	Expansibilidade da escória de aciaria.....	29
<b>2.3</b>	<b>ESCÓRIA UTILIZADA COMO AGREGADO NO CONCRETO .....</b>	<b>31</b>
2.3.1	Análise das pesquisas.....	37
<b>2.4</b>	<b>IMPORTÂNCIA DO USO DE AGREGADO RECICLADO .....</b>	<b>38</b>
<b>2.5</b>	<b>BLOCOS DE CONCRETO.....</b>	<b>38</b>
2.5.1	Linha, família, elemento predominante e elementos complementares ...	40
2.5.2	Requisitos físico-mecânico.....	40
2.5.3	Dimensão dos furos e mísulas .....	41
2.5.4	Inspeção .....	41
2.5.5	Ensaios .....	42
2.5.6	Instalações e equipamentos.....	42
<b>2.6</b>	<b>BLOCOS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>51</b>
3.1.1	Cimento PORTLAND .....	51
3.1.2	Agregados naturais .....	52
3.1.3	Agregado artificial .....	53
3.1.4	Água .....	54
3.1.5	Aditivo .....	54
<b>3.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....</b>	<b>55</b>

3.2.1	Granulometria .....	55
3.2.2	Massa unitária e volume de vazios.....	56
3.2.3	Teor de materiais pulverulentos .....	57
3.2.4	Massa específica .....	58
3.2.5	Absorção de água .....	61
3.2.6	Análises química e mineralógica na escória.....	62
<b>3.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE.....</b>	<b>63</b>
<b>3.4</b>	<b>FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO .....</b>	<b>63</b>
3.4.1	Definição do traço .....	64
<b>3.5</b>	<b>GESTÃO DA PRODUÇÃO DOS BLOCOS.....</b>	<b>66</b>
3.5.1	Insumos .....	66
3.5.2	Preparo do concreto.....	69
3.5.3	Transporte.....	69
3.5.4	Moldagem dos blocos .....	70
3.5.5	Transporte dos blocos.....	71
3.5.6	Processo de cura, paletização e estoque .....	72
<b>3.6</b>	<b>ENSAIOS DOS BLOCOS .....</b>	<b>72</b>
3.6.1	Análise dimensional .....	72
3.6.2	Absorção de água e área líquida.....	74
3.6.3	Resistência à compressão .....	76
<b>3.7</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....</b>	<b>78</b>
3.7.1	ANOVA .....	78
3.7.2	Teste de Tukey .....	79
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....</b>	<b>80</b>
4.1.1	Análise granulométrica.....	80
4.1.2	Demais propriedades .....	84
4.1.3	Análises química e mineralógica na escória.....	84
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE.....</b>	<b>86</b>
<b>4.3</b>	<b>ENSAIOS DOS BLOCOS .....</b>	<b>87</b>
4.3.1	Análise dimensional .....	87
4.3.2	Absorção de água e área líquida.....	89
4.3.3	Resistência à compressão .....	91

4.4	MASSA DOS BLOCOS .....	93
4.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	93
5.	<i>CONCLUSÕES</i> .....	97
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	98
	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	99

# 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil se destaca como maior consumidor de recursos naturais e maior gerador de resíduos. O crescimento do consumo é proporcional ao avanço e desenvolvimento da população mundial. A preocupação ambiental tornou-se um assunto altamente discutido, principalmente por pesquisadores, e várias alternativas estão sendo colocadas em pauta para a mitigação do efeito causado pelo crescente consumo. A indústria siderúrgica está inserida nesse contexto. Embora não fabrique apenas para o setor de construção civil, boa parte de sua produção é destinada para este fim.

A construção civil, por ser grande consumidora de agregados, passou a procurar materiais alternativos utilizando resíduos do próprio setor e de outras indústrias, tornando-se uma grande usina recicladora. Dessa forma o setor contribui para diminuição do impacto ambiental e, conseqüentemente, para o menor consumo de materiais naturais (FARIA, 2007). Segundo John (2000), cerca de 50% dos recursos naturais consumidos no mundo são utilizados da indústria da construção civil.

Com o avanço da concorrência dos mercados e novas práticas de gestão empresarial, as empresas precisam se atentar cada vez mais para as questões de desperdício de materiais, gerenciamento ineficiente de processos internos de produção e, mais recentemente, a emissão e controle de seus resíduos. Um grande avanço industrial, é introduzir o processo de reciclagem dentro da própria indústria ou em outros setores, como é feito na fabricação de aço em que os resíduos gerados, tais como cinzas e escórias são aproveitados pelas indústrias da construção civil (PAGNUSSAT, 2004).

O conceito de cadeia de abastecimento verde, que é a transformação de resíduos em recursos, está sendo implementada de maneira mais agressiva nos parques industriais de todo o mundo, afim de realizar uma economia circular (LI *et al.*, 2015). A escória de aciaria, por ser gerada em grande quantidade, pelas indústrias siderúrgicas, é considerada um recurso verde.

Para cada tonelada de aço bruto produzido, são gerados cerca de 140 kg de escória de aciaria (IBS, 2006). A produção brasileira no ano de 2016 e 2017 foi de 31,3 e 34,4 milhões de toneladas respectivamente, que mostra um crescimento de 9,8% nesse período. Portanto apenas nesses dois anos foram gerados 9,2 milhões de toneladas de escória de aciaria. Nesse biênio a indústria siderúrgica brasileira teve uma representatividade de 2,1% da produção mundial de aço bruto, ocupando o 9º lugar no ranking mundial, liderado pela China. A produção mundial nesse biênio foi de 3,1 bilhões de toneladas de aço bruto e de 434 milhões

de toneladas de escória de aciaria (AÇO BRASIL, 2018). Em 2019 a produção de aço brasileira foi de 32,46 milhões de toneladas e a mundial de 1,87 bilhões de toneladas e de escória de aciaria de 4,54 e 262 milhões de toneladas, respectivamente (AÇO BRASIL, 2020). Na Tabela 1 é apresentada a produção mundial de aço bruto de 2015 a 2017.

Tabela 1: Produção Mundial de Aço Bruto (Unid. 10<sup>6</sup>t.)

País	2015	2016	2017	2016/2015	2017/2016
<b>China</b>	803,8	786,9	831,7	-2,1%	5,7%
<b>Japão</b>	105,1	104,8	104,7	-0,3%	-0,1%
<b>Índia</b>	89,0	95,5	101,4	7,3%	6,2%
<b>EUA</b>	78,8	78,5	81,6	-0,4%	3,9%
<b>Rússia</b>	70,9	70,5	71,3	-0,6%	1,1%
<b>Coréia do Sul</b>	69,7	68,6	71,0	-1,6%	3,5%
<b>Alemanha</b>	42,7	42,1	43,3	-1,4%	2,9%
<b>Turquia</b>	31,5	33,2	37,5	5,4%	13,0%
<b>Brasil</b>	33,3	31,3	34,4	-6,0%	9,9%
<b>Itália</b>	22,0	23,4	24,1	6,4%	3,0%
<b>Ucrânia</b>	23,0	24,2	22,7	5,2%	-6,2%
<b>Formosa</b>	21,4	21,8	22,4	1,9%	2,8%
<b>Irã</b>	16,1	17,9	21,2	11,2%	18,4%
<b>México</b>	18,2	18,8	19,9	3,3%	5,9%
<b>França</b>	15,0	14,4	15,5	-4,0%	7,6%
<b>Outros</b>	179,5	155,3	171,2	-13,5%	10,2%
<b>TOTAL</b>	1620,0	1587,2	1673,9	2,0%	5,5%

Fonte: WORLDSTEEL / ALACERO / AÇO BRASIL

A escória de alto-forno gerada como subproduto na fabricação do aço é utilizada na indústria cimenteira para produção do cimento a mais de 100 anos. A partir do ano de 1862, surgiram os primeiros relatos dessa utilização, quando Eugene Langen moeu escórias básicas e as misturou com cal hidratada, demonstrando que esse material superava os sistemas que utilizava apenas a cal como ligante. Embora não alcançasse as qualidades do cimento Portland, foi uma grande descoberta (LIMA, 1999 *apud* FARIA, 2007). Já a escória de aciaria tem sua utilização limitada na construção civil, não possuindo destinação bem definida e muitas vezes sendo acumuladas nos pátios de estocagem (RAPOSO, 2005).

Para que a escória possa ser utilizada na construção civil, ela deve passar por uma estabilização de, no mínimo, seis meses para se tornar menos reativa quimicamente (SILVA, 2011). Atualmente, existe um processo de resfriamento da escória, conhecido como BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*/fluxo curto de escória da *Baosteel*) desenvolvido pela empresa chinesa *Baosteel Metal Company*, que resfria e estabiliza rapidamente a escória. A grande

diferença nesse processo é a forma e o tempo de resfriamento, uma vez que em poucos minutos produz uma escória de aciaria estabilizada e granulada (WORDSTEEL ASSOCIATION, 2010; ENERGY, 2015).

Em torno de 44% das escórias de aciaria, após serem estabilizadas, são reaproveitadas em obra de infra-estrutura rodoviária, estabilização de bases e sub-bases, lastro de ferrovias e outros. O restante, representando 56% da geração desse resíduo, é estocado nos pátios de siderurgias causando um grande passivo ambiental (BALTAZAR, 2001). As principais utilizações da escória de aciaria são vistas na Figura 1.

Figura 1: Aplicações da escória de aciaria



Fonte: PENA (2004)

Em países como EUA, Grã-Bretanha, Alemanha, França, Polônia, Japão e Rússia a escória de aciaria é utilizada, individualmente ou combinada, como agregado em revestimentos asfálticos. O resultado é bastante satisfatório, uma vez que esses revestimentos tem capacidade de suporte de tráfego pesado (SILVA e MENDONÇA, 2001).

A utilização da escória de aciaria em obras de infra-estrutura rodoviária no Brasil, teve início em 1986 com a execução de base e sub-base em uma rodovia de 100 km no estado do Espírito Santo (BALTAZAR, 2001).

Motivado pela preocupação ambiental referente à grande geração de resíduos pelas indústrias, em especial a siderúrgica, e a ampla utilização de blocos de concreto na construção civil, foi estudado nesse trabalho a potencialidade da substituição parcial de agregado natural por artificial, proveniente de escória de aciaria BSSF, na fabricação de blocos de concreto sem função estrutural (vedação).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 GERAL

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a viabilidade técnica de blocos de concreto sem função estrutural, fabricados com substituição parcial de agregados naturais por agregado artificial, proveniente de escória de aciaria BSSF.

### 1.1.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar teores de substituição de agregados naturais por agregado artificial (escória de aciaria BSSF) para produção dos blocos de concreto;
- Analisar a gestão da produção em escala dos blocos de concreto e descrever os processos produtivos;
- Avaliar os parâmetros relacionados à geometria, estabilidade dimensional, comportamento mecânico e absorção de água nos elementos fabricados com o resíduo estudado;
- Comparar os blocos fabricados com escória de aciaria BSSF com o bloco referência, em relação à diferença de massa.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Com o desenvolvimento das indústrias após a revolução industrial iniciada no século XIX, o homem percebe que o avanço convencional é insustentável, criando o paradoxo de como conciliar o “desenvolvimento tecnológico” com “desenvolvimento sustentável”. Para haver desenvolvimento, é necessário que as demandas da população sejam atendidas, porém se mostra bastante importante a busca de equilíbrio ecológico e ambiental (LYLE, 1994).

Uma alternativa para manutenção dos recursos naturais é a reciclagem, que diminui o efeito causado na geração de resíduos e contribui para menor exploração dos recursos naturais. Segundo Geyer (2001), muitas vezes os materiais reciclados possuem melhores resultados quanto à resistência e durabilidade comparados aos materiais convencionais.

O grande desafio global é a utilização de subprodutos industriais, o resíduo sólido industrial. Por esse motivo, a gestão eficaz desses subprodutos está ganhando mais importância. A escória de aciaria da produção do aço é um resíduo sólido industrial gerado em grandes quantidades (BAALAMURUGAN *et al.*, 2019).

Como a escória de aciaria ainda possui pouca utilização no mercado, muito provavelmente devido à carência de estudos e pesquisas, e por outro lado a construção civil

é uma indústria que consome muitos materiais e incorpora muito bem produtos reciclados, o aprofundamento da pesquisa nesse tema se mostra necessário, contribuindo para diminuição do descarte de escória de aciaria nos pátios das siderúrgicas, além de proporcionar a geração de valor agregado ao material. Ampliando a utilização desse resíduo, tem-se ainda a contribuição para economia de recursos naturais.

Neste trabalho, busca-se ampliar e difundir o conhecimento da utilização de escória de aciaria como agregado artificial em um dos principais insumos da construção civil, os blocos de concreto. Além de muito utilizados em quase todo tipo de obra, os blocos de concreto apresentam baixa dificuldade tecnológica para sua fabricação e possuem boa aceitação de incorporação de agregados reciclados.

Através da fabricação de blocos de concreto com agregado artificial e posterior realização de ensaios laboratoriais previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016), pretendeu-se validar o estudo com resultados dos ensaios que atendam a referida norma.

### **1.3 QUESTÃO DE PESQUISA**

A fabricação de blocos de concreto com utilização de agregado artificial, a partir de escória de aciaria BSSF, atende a viabilidade técnica de acordo com os requisitos previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016) quanto à análise dimensional, absorção, área líquida e resistência à compressão?

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é apresentado o resíduo estudado para substituição parcial dos agregados na fabricação dos blocos de concreto. Como ele é produzido, resfriado, beneficiado e armazenado; caracterização quanto sua composição química e mineralógica; propriedades físicas e mecânicas; escória de aciaria utilizada como agregado; definições de blocos de concreto; e blocos de concretos fabricados com agregados artificiais.

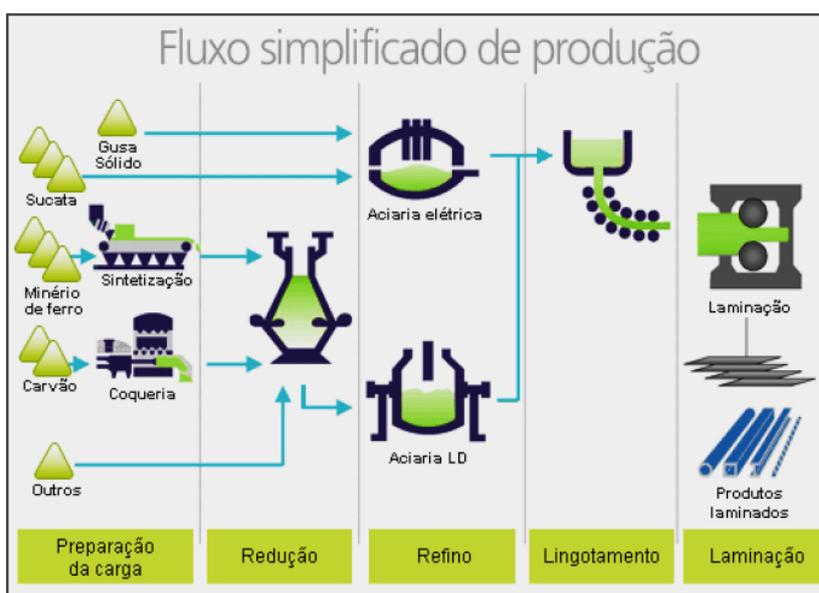
### **2.1 ESCÓRIA DE ACIARIA**

A escória de aciaria é um sub-produto resultante do processo de refino do ferro-gusa, levados a aciaria ainda em estado líquido e depositado em fornos a oxigênio ou elétricos, para queima de impurezas e adições. Ao término do processo de refino, o aço é separado da escória sobrenadante por diferença de densidade. Sua composição química e mineralógica é

formada principalmente por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e silicatos de cálcio, ferrita dicálcica, wustita de composição variável,  $\text{CaO}$  livre e  $\text{MgO}$  livre entre outras espécies, respectivamente, que variam em função dos processos de produção de aço, tipo de refino, matérias-primas, adições, sucatas e velocidade de resfriamento (CHOTOLI, 2006).

Basicamente o processo de fabricação do aço é constituído por cinco etapas, iniciando com a preparação da carga e finalizando com a laminação do aço para comercialização. Estas etapas são apresentadas pelo fluxograma simplificado na Figura 2.

Figura 2: Processo simplificado de produção de aço



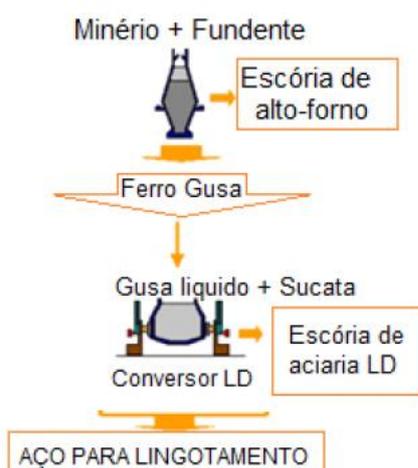
Fonte: Instituto Aço Brasil – IABr (2012)

Para se chegar no produto final aço, são utilizados basicamente minério de ferro e aço reciclado, que passam por vários processos de beneficiamento, onde diversos resíduos são gerados. Os principais rejeitos da indústria siderúrgica são: escória de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (GEYER, 2001). Segundo Faria (2007), as escórias correspondem a 60% da geração de resíduos do processo de beneficiamento do aço.

O aço pode ser produzido por três processos distintos onde são utilizados diferentes fornos de refino. O primeiro é o Siemens-Martin (OH) onde a matéria-prima é a sucata metálica, calcário e minério de ferro. Utiliza-se a injeção de oxigênio para a fusão e agitação do banho metálico. Este processo está em desuso devido à baixa produtividade. No Brasil, apenas 1,9% da produção de aço era feita por esse processo (SILVA, 2011). Atualmente esse processo foi substituído por outros tipos de fornos mais vantajosos e sua eliminação foi total.

Os outros dois processos, mais utilizados atualmente são: usina integrada e semi-integrada. A primeira opera em três fases básicas: redução, refino e laminação. Na redução, minério de ferro, carvão e cal são carregados no alto forno. Na parte inferior do alto forno, é injetado oxigênio a uma temperatura de 1.000 °C. O oxigênio esquentando o carvão que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro transformando-o de estado sólido para líquido, obtendo o chamado ferro gusa. O gusa é uma liga de ferro e carbono, com elevado teor de carbono, cerca de 3 a 6% (DIAS, 2020). Posteriormente é realizado o refino, onde transforma-se gusa líquido, com adição de sucata de ferro, em aço líquido, através do convertedor ou conversor LD, de onde se obtém também a escória de aciaria LD. As iniciais LD são das aciarias austríacas Linz e Donawitz que foram pioneiras mundiais na utilização industrial desse processo. Nesta etapa são removidos parte do carbono e impurezas contidos no gusa. A maior parte do aço líquido é solidificada em equipamento de lingotamento contínuo para produzir semi-acabados, lingotes e blocos. Estes vão para a última fase de produção, a laminação, onde são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados nos produtos siderúrgicos conhecidos no mercado, como por exemplo os vergalhões, essenciais para construção civil (IABR, 2016). No Brasil, quase 80% do aço é produzido através desse processo (SILVA, 2011). Na Figura 3 é ilustrado e apresentado o modelo esquemático da produção do aço na siderúrgica integrada.

Figura 3: Produção de aço por conversor LD

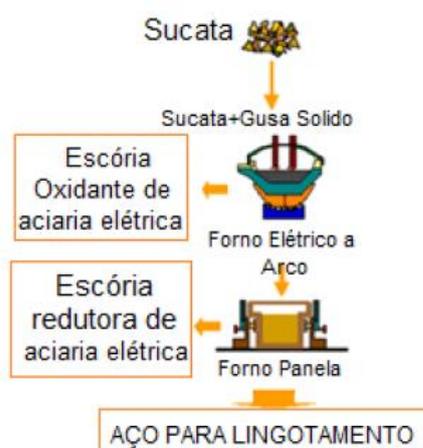


Fonte: Adaptado de MASUERO (2000)

A outra forma de fabricação do aço é através da usina semi-integrada, que opera com duas fases básicas: refino e laminação. A grande diferença dessa usina em relação à integrada, é que seu processo de produção já iniciasse com o ferro gusa, ou seja, não se faz a redução do minério de ferro. A matéria-prima utilizada é o ferro secundário, isto é, sucata

de aço e gusa sólido. Estes vão direto para o processo de refino em forno de arco elétrico onde é produzido o aço. Nessa técnica se obtém como resíduo a escória de aciaria elétrica. A partir daí as etapas são iguais as das usinas integradas com lingotamento e laminação. O Brasil utiliza quase 20% de usinas semi-integradas para produção de aço (SILVA, 2011). Na Figura 4 é ilustrado, de forma esquemática, o procedimento de fabricação do aço por arco elétrico.

Figura 4: Produção de aço por arco elétrico



Fonte: Adaptado de MASUERO (2000)

Como a produção do aço é classificada de acordo com o forno que é produzido, a escória também se distingue como escória de conversor LD, quando é produzida na usina integrada, e escória de forno elétrico produzida na usina semi-integrada (MASUERO, 2001).

A maneira mais comum de beneficiamento da escória, embora menos eficiente, é realizado da seguinte forma. Ainda em estado líquido, com temperatura de 1.400 a 1.700 °C, a escória é transportada para o pátio de escória, onde é basculada em baias para seu processamento e beneficiamento. Na Figura 5 é ilustrado o momento em que a escória é basculhada na baia das escórias.

Figura 5: Escória líquida sendo basculada



Fonte: Adaptado de MASUERO (2000)

Para ser beneficiada, a escória precisa ser resfriada. O método utilizado no resfriamento influencia diretamente nas características físicas distintas que o material vai apresentar.

O resfriamento pode ser ao ar, por pelletização ou brusco com água, descritos a seguir.

- **Resfriamento ao ar:** A escória é depositada no pátio de resfriamento até chegar à temperatura de 600 °C, nessa etapa ela se solidifica naturalmente na forma cristalina. Quando atinge a temperatura citada o resfriamento é acelerado com jatos de água de baixa vazão. Nesse processo de resfriamento as escórias apresentam maior densidade, resistência mecânica e maior coeficiente de atrito comparada às escórias de alto forno, além de apresentarem coloração cinza escuro. São bastante empregadas como agregados para rodovias por apresentarem boa resistência ao desgaste e ao polimento (GUMIERI, 2002).
- **Resfriamento por pelletização:** O processo é controlado com água ou vapor, de forma que a escória é resfriada rapidamente. O procedimento se dá através de um cilindro dentado giratório que recebe a escória líquida e utiliza jatos de água para resfriamento. A escória apresenta geralmente formato esférico e devido à incorporação de gases no resfriamento, forma estrutura alveolar no seu interior, a tornando menos densa se comparada à escória resfriada ao ar lentamente (GUMIERI, 2002).
- **Resfriamento brusco:** A escória líquida é resfriada por jatos de água de alta pressão e vazão. Utiliza-se 10 m<sup>3</sup> de água por tonelada de escória líquida. Por ser de forma brusca o resfriamento, a escória se solidifica de forma vítrea e apresenta estrutura

amorfa e são conhecidas como escórias granuladas. Possuem baixa densidade e apresentam a propriedade de endurecimento quando em contato com a água, ou seja, boas propriedades hidráulicas (GUMIERI, 2002).

Na Figura 6 é ilustrado o resfriamento por jatos de água.

Figura 6: Resfriamento da escória



Fonte: CST (2014)

As escórias de alto forno normalmente são resfriadas por pelotização e as escórias de aciaria por resfriamento ao ar (FARIA, 2007; IBS, 2000; GUMIERI, 2002).

Após ser resfriada, a escória sofre uma fragmentação de seus blocos através de um choque térmico, onde se obtém a escória bruta de aciaria, com granulometria de 0 a 500 mm (SILVA, 2011).

O processo de beneficiamento da escória de aciaria passa por uma esteira com eletroímã com intuito de recuperar material com fase metálica ainda presente na escória. O ferro recuperado é transportado por uma esteira para ser reutilizado na aciaria na produção de aço novamente (GEYER, 2001). O restante da escória com menor propriedade metálica é britada e peneirada, onde é separada, classificada e armazenada em pátios a céu aberto para serem curadas por tempo mínimo de 6 (seis) meses e então comercializada (FARIA, 2007). Na Figura 7 é apresentada a planta industrial de britagem interna da siderúrgica.

Figura 7: Britagem e peneiramento da escória

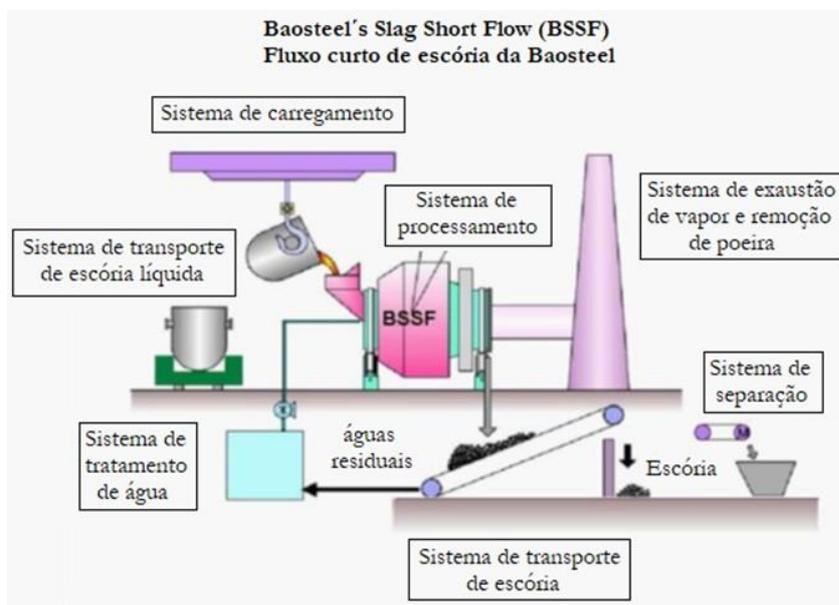


Fonte: ARCELOR MITTAL (2014)

Após processo de estabilização, a escória é comercializada e tem como principal utilização na construção civil, através de lastro de ferrovias, agregado para asfalto e matrizes de cimento (ARCELOR MITTAL, 2014).

A outra forma de resfriamento e beneficiamento da escória, mais atual, foi desenvolvida pela empresa chinesa *Baosteel Metal Company*. O processo é conhecido como BSSF, onde a escória é lançada, ainda em altas temperaturas, em um recipiente rotativo e através da ação combinada de força mecânica, por esferas de aço, e resfriamento, a escória é solidificada e triturada em pequenas partículas. Uma grande vantagem desse processo é que o metal residual não se mistura com a escória no momento do descarregamento, devido aos diferentes pontos de solidificação. O processo é bastante rápido com duração de três a cinco minutos e ainda reduz significativamente a quantidade de cal livre que não reagiu (SOUZA, 2016). Na Figura 8 são apresentados os processos de resfriamento e beneficiamento da escória através do método BSSF.

Figura 8: Beneficiamento escória de aciaria processo BSSF



Fonte: GUANGQIANG LI (2011)

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA

A escória de aciaria é um dos resíduos da produção do aço e é classificada segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo sólido não inerte, classe IIA, ou seja, não apresenta periculosidade para o uso e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Em seguida, são apresentadas as principais características do material em relação à composição química e mineralógica.

### 2.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A escória de aciaria, por ser resultante do processo de refino do aço é formada por ferro metálico, silicatos de cálcio, óxidos de magnésio e de cálcio e outros elementos químicos em menor escala. A escória de aciaria LD tem sua composição variada com o tipo de forno, matérias primas utilizadas e dos tipos de aço fabricados, porém são formadas em sua maior parte por óxidos de cálcio, silício e ferro. Já a escória de aciaria elétrica, que é o resíduo da produção do aço por forno de arco elétrico ou refino do aço na panela, possui menor quantidade de cal livre, em relação a gerada pelos conversores, e também se apresenta de maneira mais homogênea (FARIA, 2007; MOURA, 2000). Na Tabela 2 são apresentadas a composição química básica das escórias de aciaria LD e elétrica.

Tabela 2: Composição química da escória de aciaria LD e elétrica

	LD (%)	elétrica (%)
<b>CaO</b>	6-45	33
<b>SiO<sub>2</sub></b>	7-16	18
<b>MgO</b>	1-9	10
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1-4	6
<b>FeO</b>	8-30	30
<b>MnO</b>	3-7	5
<b>CaO livre</b>	0-8	-
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	1,6	-
<b>S</b>	0,13	-
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,35	-

Fonte: Adaptado de GUMIERI (2000) e GEYER *et al.* (1994)

A escória de aciaria apresenta bastante instabilidade volumétrica devido à grande presença de partículas de aço e ferro metálico, que ficam incorporadas à escória na etapa do sopro de oxigênio, esses elementos geram produtos de corrosão e oxidação. Parte do cal e magnésio, presentes na escória, se precipitam após oxidação do fósforo e do silício, no final do processo de refino. Por esse motivo a escória possui elevados teores de CaO e MgO reativos (MACHADO, 2000).

### 2.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

As principais propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria LD e elétrica estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria LD e elétrica

	Propriedades Físicas e Mecânicas	
	LD	Elétrica
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,35-3,70	3,2-3,6
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	2.070-2.110	1.600–1.900
Absorção de água (%)	10,5	< 3,0
Abrasão Los Angeles (ASTM C131)	< 20	20-25

Fonte: Adaptado MASUERO (2001), MANSO *et al.* (2006) e MALTEZ *et al.* (2017)

### 2.2.3 EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA DE ACIARIA

De acordo com Machado (2000), a escória de aciaria apresenta grande capacidade expansiva devido à elevada presença de óxido de cálcio livre (CaO) e de óxido de magnésio livre (MgO). O processo de produção em que a escória é gerada, interfere diretamente na

porcentagem dos elementos e compostos. Tanto a hidratação, como a carbonatação ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) e a oxidação ( $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ocasionam um aumento considerável do volume dos elementos em relação às dimensões originais, acarretando em uma expansão destrutiva. Através dos ensaios de teor de metais ferrosos ou por difração de raios-X, é possível avaliar a presença de  $\text{Fe}^0$ .

A utilização da escória de aciaria requer bastante cuidado devido principalmente à sua propriedade expansiva, porém, com a adoção de critérios com valores limites e parâmetros de classificação, pode ser empregada, uma vez que experimentos práticos demonstram instabilidade dimensional para alguns teores. A escória sujeita às condições de hidratação e carbonatação ao longo do tempo, por um período mínimo de 3 meses, alcança a estabilização através da formação de produtos estáveis (MACHADO, 2000).

A Tabela 4 apresenta as variações ocorridas nas escórias de aciaria antes e após a hidratação dos seus principais elementos e compostos constituintes.

Tabela 4: Características dos elementos e compostos químicos das escórias de aciaria antes e após a hidratação

Fórmula	Nome	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Massa Molar (g/mol)	Volume Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	Varição de volume (%)
					Em relação ao MgO
<b>MgO</b>	Perciclásio	3,58	40,31	11,26	-
<b>Mg(OH)<sub>2</sub></b>	Brucita	2,36	58,33	24,72	119,50
					Em relação ao CaO
<b>CaO</b>	Cal	3,38	56,08	16,59	-
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Portlandita	2,24	74,09	33,08	99,40
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Calcita	2,93	100,09	34,16	105,90
	Aragonita	2,71	100,09	36,93	122,60
<b>CaCO<sub>3</sub> · MgCO<sub>3</sub></b>	Dolomita	2,87	184,41	64,25	287,30
					Em relação ao Fe <sup>0</sup>
<b>Fe<sup>0</sup></b>	Ferro (metálico)	7,86	55,85	7,11	-
<b>FeO</b>	Wustita	5,70	71,85	12,61	77,40
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Hematita	5,24	159,69	30,48	328,70
<b>Fe(OH)<sub>2</sub></b>	Hidróxido de Ferro	3,40	89,86	26,43	271,17
<b>FeO(OH)</b>	Goetita	4,28	88,85	20,76	192,00

Fonte: WEAST (1971)

Na Tabela 5 são apresentados os principais parâmetros que influenciam na expansão das escórias de aciaria.

Tabela 5: Parâmetros que influenciam na expansão da escória de aciaria

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

Fonte: MACHADO (2000)

O fenômeno da expansão é influenciado pelos constituintes químicos existentes nas escórias de aciaria. O óxido de cálcio livre hidrata-se mais rapidamente, ou seja, em poucas semanas, já o óxido de magnésio livre hidrata-se mais lentamente, podendo levar anos, causando instabilidade volumétrica. Além da hidratação, a oxidação também contribui para a instabilidade volumétrica. Na Tabela 4, pode-se observar que a hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tem variação de volume molar de 328,7% em relação ao Fe<sup>o</sup>. Por fim a transformação alotrópica, que é a capacidade de um elemento químico formar diferentes substâncias simples, diferenciando entre si em estruturas cristalinas ou atômicas, também contribui diretamente na expansibilidade da escória de aciaria.

### 2.3 ESCÓRIA UTILIZADA COMO AGREGADO NO CONCRETO

Diversos trabalhos são realizados no Brasil e no mundo com a utilização de escória de aciaria como agregado ao concreto. Para ampliação do conhecimento, foi desenvolvida uma pesquisa bibliográfica relacionada a trabalhos realizados com a escória de aciaria estabilizada para produção de concreto, sendo na substituição de agregado ou aglomerante. Foram levantados teses, dissertações e artigos nacionais e internacionais, extraindo-se informações

específicas, tais como: tipo de escória utilizada, produto fabricado, granulometria do agregado/aglomerante artificial resultante do beneficiamento, teores de substituição ou adição, traços para produção do concreto de referência, aglomerante e aditivo utilizados, por fim os resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias.

Os resultados da pesquisa foram organizados na Tabela 6, em ordem cronológica, apresentadas a seguir. Pode-se observar que as pesquisas estão bem divididas quanto ao tipo de escória utilizada. Existem trabalhos utilizando a escória de aciaria LD e outros a escória de aciaria elétrica.

Existem duas tendências centrais. A primeira consiste na substituição do agregado natural pelo artificial, proveniente da escória, variando de cada autor a granulometria e teor de substituição empregados. Esta linha de pesquisa, busca corroborar com a diminuição da extração de recursos naturais, uma vez que são finitos, não renováveis e estão cada vez mais escassos.

A segunda tendência caminha para substituição, mesmo que parcial, do aglomerante, visando a redução da produção de cimento, e, conseqüentemente, contribuindo para diminuição da emissão de gases de efeito estufa e da extração de recursos naturais.

A principal preocupação dos trabalhos, onde a escória de aciaria é empregada, é a preservação dos recursos naturais não renováveis, a mitigação do impacto ambiental causado pelo acúmulo de resíduo armazenado nas aciarias e a redução da emissão de gases de efeito estufa, uma vez que comprovando a eficácia da substituição do agregado natural pelo proveniente da escória de aciaria e/ou substituição parcial de aglomerante por pó de escória no concreto, seu consumo aumentará exponencialmente.

A pesquisa realizada delimitou-se em alguns aspectos importantes, porém não únicos para o estudo da utilização de escória de aciaria como agregado ou aglomerante na produção de concretos.

Tabela 6: Pesquisas envolvendo utilização de escória de aciaria na produção de concreto

Autor da pesquisa	Geyer (2001)	Pagnussat (2004)		Faria (2007)
<b>Resíduo</b>	Escória de Aciaria Elétrica	Escória de Aciaria LD		Escória de Aciaria Elétrica
<b>Produto</b>	Concreto	Peças de Concreto para Pavimentação		Peças de Concreto para Pavimentação
<b>Granulometria</b>	Agregado miúdo (D <sub>máx</sub> = 2,4 mm, MF = 1,8)	Material pulverulento (Passante na peneira n. 200)	Agregado miúdo (D <sub>máx</sub> = 4,8 mm, MF = 3,70)	Agregado graúdo e miúdo (D. 2-4,8 mm)
<b>Teores de substituição</b>	0, 5, 35, 70 e 100% sobre a massa de cimento	0, 10, 30 e 50% sobre a massa de cimento	0, 10, 30 e 50% sobre a massa de areia	0, 50 e 100% sobre a massa de brita
<b>Traço de referência</b>	1 : 2,15 : 3,85 : 0,59 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 3,5 : 1,06 : 0,4 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 3,5 : 1,06 : 0,4 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 0,88 : 1,7 : 1,1 : 0,3 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Aditivo e Água) em massa
<b>Cimento</b>	CP V ARI	CP V ARI	CP V ARI	CP II F-32
<b>Aditivo</b>	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Superplastificante à base de melamina sulfonada
<b>Ensaio</b>	Resistência à compressão (NBR 7215:1982)	Resistência à compressão (NBR 9780:1987)	Resistência à compressão (NBR 9780:1987)	Resistência à compressão (NBR 5739:1994)
<b>Resultados (28 dias)</b>	Referência - 24,82 MPa	Referência - 26,05 MPa	Referência - 26,05 MPa	Referência - 45,20 MPa
	Melhor resultado: Substituição de 5% de finos (passante na peneira 200) - 37,28 MPa	Melhor resultado: Substituição de 10% - 24,66 MPa	Melhor resultado: Substituição de 50% - 20,44 MPa	Melhor resultado: Substituição de 100% - 56,02 MPa
	Pior resultado: Substituição de 70% - 3,31 MPa	Pior resultado: Substituição de 50% - 13,27 MPa	Pior resultado: Substituição de 30% - 17,48 MPa	Pior resultado: Substituição de 50% - 52,84 MPa

Fonte: Autor (2020)

Tabela 6: Pesquisas envolvendo utilização de escória de aciaria na produção de concreto  
(continuação)

<b>Autor da pesquisa</b>	<b>Silva (2011)</b>	<b>Cardoso e Dias (2014)</b>	<b>Santos (2014)</b>	<b>Anastasiou <i>et al.</i> (2014)</b>
<b>Resíduo</b>	Escória de Aciaria Elétrica e Escória de Aciaria LD	Escória de Aciaria	Escória de Aciaria Elétrica	Escória de Aciaria Elétrica
<b>Produto</b>	Peças de Concreto para Pavimentação	Peças de Concreto para Pavimentação	Bloco estrutural de concreto	Concreto
<b>Granulometria</b>	Agregados graúdo e miúdo (D. 0-8 mm)	Agregado miúdo (D <sub>máx</sub> = 0,59 mm)	Agregados graúdo (D <sub>máx</sub> = 19 mm, MF = 6,31) e Agregado miúdo (D <sub>máx</sub> = 9,5 mm, MF = 3,82)	Agregado graúdo (D. 4-8 mm e D. 8-16 mm)
<b>Teores de substituição</b>	0 e 100% sobre os agregados	0, 25, 50, 75 e 100% sobre a massa de areia	0 e 100% sobre os agregados	0 e 100% sobre o agregado
<b>Traço de referência</b>	1 : 3,78 : 1,73 : 0,42 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 2,83 : 3,33 : 0,75 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Aditivo e Água) em massa	1 : 12,42 : 2,03 : 0,50 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 3 : 0,50 (Cimento, Agregado miúdo e Água) em massa
<b>Cimento</b>	CP V ARI	CP III - 40 - RS	CP V ARI	CEM I 42,5 N
<b>Aditivo</b>	Nenhum	Nenhum	Nenhum	Nenhum
<b>Ensaio</b>	Resistência à compressão (NBR 9780:1987)	Resistência à compressão (NBR 5739:1994)	Resistência à compressão (NBR 6136:1907)	Resistência à compressão (EN 12390-3)
<b>Resultados (28 dias)</b>	Referência (56 dias) - 52,01 MPa	Referência - 15,95 MPa	Referência - 11,13 MPa	Referência - 41,70 MPa
	Substituição de 100% (56 dias) - 52,23 MPa	Melhor resultado: Substituição de 75% - 15,53 MPa  Pior resultado: Substituição de 100% - 12,90 MPa	Substituição de 100% - 13,08 MPa	Substituição de 100% - 48,20 MPa

Fonte: Autor (2020)

Tabela 6: Pesquisas envolvendo utilização de escória de aciaria na produção de concreto  
(continuação)

Autor da pesquisa	Pacheco (2017)	Anastasiou <i>et al.</i> (2017)		
<b>Resíduo</b>	Escória de Aciaria LD	Escória de Aciaria Elétrica		
<b>Produto</b>	Argamassa	Pavimento de Concreto Industrial	Concreto Pesado	Peças de Pavimentação Permeáveis
<b>Granulometria</b>	Agregado miúdo (Peneira 0,075 mm)	Agregado graúdo (D. 4-8 mm e D. 8-16 mm)	Agregado graúdo (D. 0-7 mm) e Agregado miúdo (D. 0-2mm)	Agregado graúdo (D. 5-12 mm) e Agregado miúdo (D. 0-5mm)
<b>Teores de substituição</b>	0, 6, 10, 20, 34% sobre o cimento	0 e 100% sobre os agregados		
<b>Traço de referência</b>	1 : 3 : 0,48 (Cimento, Agregado miúdo e Água) em massa	1:2,20:2,69:0,5:0,15:0,005 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Água, Fibras de Aço e Aditivo) em massa	1:3,09:3,78:0,4:0,0045 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Água e Aditivo) em massa	1:5,23:0,34:0,004 (Cimento, Agregado graúdo, Água e Aditivo) em massa
<b>Cimento</b>	CP V ARI	CEM I 42,5		
<b>Aditivo</b>	Nenhum	Plastificante		
<b>Ensaio</b>	Resistência à compressão (NBR 7215:1996)	Resistência à compressão (EN 12390-3)	Resistência à compressão (EN 12390-3)	Resistência à compressão (EN 12390-3)
<b>Resultados (28 dias)</b>	Referência - 47,00 MPa	Referência - 39,00 MPa	Referência - 47,00 MPa	Referência - 14,30 MPa
	Melhor resultado: Substituição de 10% - 43,80 MPa	Substituição de 100% - 52,90 MPa	Substituição de 100% - 51,80 MPa	Substituição de 100% - 14,30 MPa
	Pior resultado: Substituição de 34% - 28,70 MPa			

Fonte: Autor (2020)

Tabela 6: Pesquisas envolvendo utilização de escória de aciaria na produção de concreto  
(continuação)

Autor da pesquisa	Guo <i>et al.</i> (2018)	Rubio-Cintas <i>et al.</i> (2019)	Guo <i>et al.</i> (2019)	
<b>Resíduo</b>	Escória de Aciaria	Escória de Aciaria Elétrica	Escória de Aciaria LD	
<b>Produto</b>	Concreto	Concreto	Concreto normal e de alta resistência	
<b>Granulometria</b>	Agregado miúdo (MF = 3,00)	Material pulverulento (Passante na peneira n. 200)	Agregado miúdo (D <sub>máx</sub> = 2 mm)	
<b>Teores de substituição</b>	0, 10, 20, 30 e 40% sobre a areia	0, 5, 10 e 15% de adição	0, 10, 20, 30, 40, 60, 80 e 100% sobre a areia	
<b>Traço de referência</b>	1 : 1,85 : 3,36 : 0,59 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	1 : 3,13 : 3,13 : 0,5 : 3,9 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Água e Aditivo) em massa	Concreto normal 1 : 1,85 : 3,36 : 0,59 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo e Água) em massa	Concreto de alta resistência 1:0,98:1,75:0,35:2,94 (Cimento, Agregado miúdo, Agregado graúdo, Água e Aditivo) em massa
<b>Cimento</b>	CEM I 42,5 N	CEM I 52,5 R	CP I	
<b>Aditivo</b>	Nenhum	Aditivo superplastificante Glenium ACE-324, da BASF	Nenhum	Superplastificante à base de policarboxilato de alto rendimento
<b>Ensaio</b>	Resistência à compressão (GBT 14902)	Resistência à compressão (UNE-EN 12390-3)	Resistência à compressão (GBT 14902)	
<b>Resultados (28 dias)</b>	Referência - 30,01 MPa	Referência - 39,10 MPa	Referência: 30,76 MPa	Referência: 70,33 MPa
	Melhor resultado: Substituição de 20% - 38,61 MPa	Melhor resultado: Adição de 15% - 51,60 MPa	Melhor resultado: Substituição de 80% - 35,07 MPa	Melhor resultado: Substituição de 100% - 74,23 MPa
	Pior resultado: Substituição de 40% - 32,44 MPa	Pior resultado: Adição de 10% - 40,20 MPa	Pior resultado: Substituição de 60% - 29,52 MPa	Pior resultado: Substituição de 10% - 64,17 MPa

Fonte: Autor (2020)

### 2.3.1 ANÁLISE DAS PESQUISAS

Primeiramente, analisando-se os resultados dos autores que utilizaram a escória de aciaria em substituição/adição ao aglomerante, nota-se que o melhor resultado encontrado para substituição foi de Geyer (2001), com teor de substituição de 5%, onde houve um incremento de 50% na resistência à compressão do concreto. Substituições acima de 10%, apresentam efeito deletério quanto à resistência à compressão, na ordem de 5 a 7% comparadas ao concreto referência, fabricado sem substituição ou adição de escória. Segundo o autor, o principal motivo do ganho de resistência se deu pela contribuição da escória como filer no concreto, aumentando a pozolanicidade. O pior resultado apresentado foi obtido por Geyer (2001), quando substituiu 70% do aglomerante por escória de aciaria e, nesse teor, o concreto apresentou uma perda de 87% na resistência à compressão, comparado ao concreto referência. Quando Rubio-Cintas *et al.* (2019) fizeram apenas a adição de 15% de escória em pó, em relação a massa de cimento, obtiveram um excelente resultado no ensaio de resistência à compressão, com aumento de 32% da resistência em relação ao concreto referência. Segundo os autores, o ganho de resistência ocorreu pela diminuição de microfissuras, pois o pó de escória de aciaria, assume a função de nano partículas que preenche os vazios da matriz de cimento.

Analisando-se os trabalhos em que a escória de aciaria foi adicionada ao concreto em substituição ao agregado natural, os resultados não são unânimes. Quando o produto fabricado foi peças de concreto para pavimentação, Pagnussat (2004) substituiu 50% dos agregados naturais por agregados artificiais, provenientes da escória de aciaria, e obteve prejuízo de 21% na resistência à compressão, enquanto que Faria (2007), substituindo a mesma quantidade, apresentou ganho de 17% na resistência à compressão. Esse fator está diretamente ligado ao equipamento utilizado para produção das peças de concreto para pavimentação, além de vários fatores como: o tipo de aglomerante utilizado, adição de aditivo, relação a/c e outros. Os autores que fabricaram apenas o concreto convencional, obtiveram resultados mais semelhantes entre eles, destacando-se Guo *et al.* (2018), que substituíram 20% do agregado miúdo pelo agregado de escória e obtiveram um ganho de resistência à compressão de 28,6%. Anastasiou *et al.* (2014) e Anastasiou *et al.* (2017) substituíram 100% dos agregados e 100% do agregado graúdo somente e, nessa ordem, obtiveram ganho de resistência à compressão de 15,6 e 10%, respectivamente, comparados ao concreto referência. Santos (2014) fabricou bloco estrutural de concreto com substituição de 100% dos agregados naturais pelos artificiais, provenientes da escória de aciaria, e obteve 17,5% de ganho de resistência à compressão em relação ao bloco referência.

Após análise das pesquisas, percebe-se a importância de se estudar ainda mais a escória de aciaria, pois é um material que tem grande potencial na construção civil, destacando-se o ganho ambiental quando utilizado na produção de concreto, produto mais

consumido no mundo, depois da água. A normalização da utilização de escória de aciaria para produção de concreto, se faz necessária para estabelecer requisitos e parâmetros a serem atendidos. Infelizmente atualmente existe um déficit de normas em relação ao uso de agregados reciclados. Esse fato faz com que haja pouco interesse nesses produtos.

#### **2.4 IMPORTÂNCIA DO USO DE AGREGADO RECICLADO**

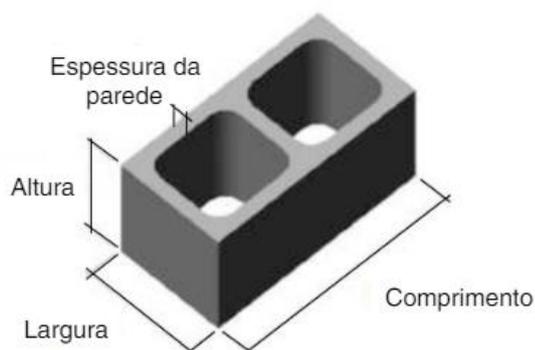
Como a construção civil é a maior indústria consumidora de matérias-primas do mundo, tem por sua vez a tarefa de utilizar agregados reciclados em substituição ao natural. O concreto, material industrial mais consumido mundialmente, é composto por matérias-primas não renováveis, embora ainda abundantes no planeta, são finitas (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011).

Uma grande vantagem da utilização de agregado reciclado, além do ganho ambiental, é a economia gerada no canteiro de obra, pois normalmente os agregados reciclados possuem preços muito inferiores dos agregados naturais (SANTOS, 2012). Yanik (2016) aponta que em um curto prazo de tempo, o pó produzido a partir do agregado reciclado de concreto, cinza volante ou escória, irá superar o consumo atual de areia e pedrisco naturais. Já é uma realidade em grandes centros urbanos a utilização de areia reciclada, sendo uma tendência seu aumento de consumo, já que as jazidas naturais estão cada vez mais distantes do ponto de utilização e, portanto, é mais viável a produção de agregado reciclado do que o transporte do agregado natural.

#### **2.5 BLOCOS DE CONCRETO**

Os blocos de concreto são componentes da alvenaria, com ou sem função estrutural e normalizados pelas ABNT NBR 6136 e ABNT NBR 12118. São vazados nas faces superior e inferior e possuem área líquida igual ou inferior a 75 % da área bruta. São produzidos por equipamentos manuais, pneumáticos ou hidráulicos através da vibro compactação e extrusão imediata (ABNT NBR 6136:2016 e FERNANDES, 2015). Na Figura 9 o bloco é apresentado.

Figura 9: Bloco vazado de concreto simples



Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), os blocos são produzidos a partir do concreto constituído de cimento Portland, agregados e água. A dimensão máxima característica do agregado deve ser inferior a metade da menor espessura da parede do bloco. Aditivos podem ser utilizados desde que o produto final atenda aos requisitos físico-mecânico descritos na norma. Os blocos devem ser fabricados e curados por processos que garantam a compactação e homogeneidade. Não podem apresentar trincas e devem ter arestas vivas. São definidos por classes, conforme Tabela 7.

Tabela 7: Designação por classe, largura dos blocos e espessura mínima das paredes

Classe	Largura nominal mm	Paredes longitudinais mm	Paredes transversais	
			Paredes mm	Espessura equivalente mm/m
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	15	113

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

### 2.5.1 LINHA, FAMÍLIA, ELEMENTO PREDOMINANTE E ELEMENTOS COMPLEMENTARES

Os blocos de concreto são divididos por Linha, Família, Elemento Predominante e Elementos Complementares. A divisão por Linha determina as dimensões da largura e comprimento da peça predominante da Família dos blocos. A Linha mais conhecida e utilizada no Brasil é a 15x40, onde os blocos apresentam largura de 14 cm, altura de 19 cm e comprimento de 39 cm. A Família é formada por diferentes blocos da mesma linha com a mesma largura. Dentro da Família, existe o Elemento Predominante e Elementos Complementares. O Primeiro é quem determina o comprimento de uma linha e é utilizado para os ensaios de qualidade. Já os Elementos Complementares são os outros membros da Família e são utilizados para facilitar o emprego do Elemento Principal. São os meio blocos, canaletas, bloco 34, bloco 54, compensadores, entre outros (FERNANDES, 2015).

### 2.5.2 REQUISITOS FÍSICO-MECÂNICO

Quanto aos requisitos físico-mecânico, que garantem a qualidade dos blocos de concreto, a NBR 6136 (ABNT, 2016) determina os limites de resistência, absorção e retração linear por secagem, conforme Tabela 8.

Tabela 8: Requisitos para resistência característica à compressão, absorção e retração

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial <sup>a</sup> MPa	Absorção %				Retração <sup>d</sup> %
			Agregado normal <sup>b</sup>		Agregado leve <sup>c</sup>		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$fbk \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$			
	B	$4,0 \leq fbk < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
Com ou sem função estrutural	C	$fbk \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

<sup>a</sup> Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.  
<sup>b</sup> Blocos fabricados com agregado normal (ver definição na ABNT NBR 9935).  
<sup>c</sup> Blocos fabricados com agregado leve (ver definição na ABNT NBR 9935).  
<sup>d</sup> Ensaio facultativo.

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

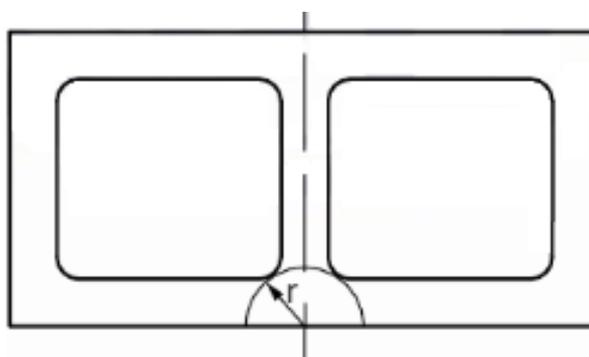
Conforme NBR 6136 (ABNT, 2016), para utilização de blocos de concreto abaixo do nível do solo, é necessário utilizar blocos Classe A. O bloco Classe C com função estrutural, de 90 mm de largura, pode ser empregado em construções de até um pavimento. O bloco de 115 mm de largura, Classe C estrutural, pode ser empregado em construções de até dois

pavimentos. O bloco Classe C estrutural, com larguras de 140 e 190 mm, podem ser utilizados em construções de até cinco pavimentos. Os blocos de 65 mm de largura só podem ser utilizados para alvenaria sem função estrutural.

### 2.5.3 DIMENSÃO DOS FUROS E MÍSULAS

A menor dimensão dos furos, para as classes A e B devem ser maior ou igual a 70 mm para blocos de 140 mm e maior ou igual a 110 mm para blocos de 190 mm. Os blocos classe A e B devem ter mísulas com raio mínimo de 40 mm e os classe C, raio mínimo de 20 mm. Na Figura 10 é exemplificado de onde deve ser medido o raio (NBR 6136:2016).

Figura 10: Mísulas



Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

### 2.5.4 INSPEÇÃO

Para inspeção dos blocos, o fabricante deve informar os lotes de fabricação que obrigatoriamente devem ser fabricados sob as mesmas condições e com os mesmos materiais. Informar ainda a data de fabricação, identificar o lote, a resistência característica à compressão, as dimensões nominais e a classe à qual pertence. O lote deve ter no máximo quarenta mil unidades. A amostragem colhida para os ensaios deve atender a as quantidades previstas na Tabela 9.

Tabela 9: Tamanho da amostra

Quantidade de blocos do lote	Quantidade de blocos da amostra		Quantidade mínima de blocos para ensaio dimensional e resistência à compressão axial		Quantidade de blocos para ensaios de absorção e área líquida
	Prova	Contraprova	Critério estabelecido em 6.5.1	Critério estabelecido em 6.5.2	
Até 5.000	7 ou 9	7 ou 9	6	4	3
5.001 a 10.000	8 ou 11	8 ou 11	8	5	3
Acima de 10.000	9 ou 13	9 ou 13	10	6	3

Fonte: NBR 6136 (ABNT, 2016)

### **2.5.5 ENSAIOS**

Os ensaios a serem executados estão previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016) e são eles: resistência à compressão; análise dimensional, absorção e área líquida; e retração linear por secagem. Os ensaios são detalhados programa experimental.

### **2.5.6 INSTALAÇÕES E EQUIPAMENTOS**

Existem diversos tipos e modelos de máquinas para produção de blocos de concreto. Desde máquinas manuais até máquinas vibro-prensas hidráulicas automáticas. As primeiras, apresentam uma produção baixa e grande consume de cimento na mistura, uma vez que possuem pouca energia de compactação. As máquinas hidráulicas possuem uma capacidade grande de produção diária e baixo consume de cimento, na ordem de 4 a 5 % do peso do produto. O baixo consumo de cimento é compensado pela grande energia de vibração e compactação do concreto (FERNANDES, 2015).

As instalações mínimas para uma indústria de blocos deve ser: baias de agregados; misturador; esteira de concreto; máquina vibroprensa; moldes ou fôrmas, escova rotativa; carro garfo ou pinça; e câmara de cura. A seguir, as instalações são apresentadas separadamente.

#### **a) Baias de agregados**

As baias de agregados são separações físicas construídas para separar e proteger os agregados, afim de que não se misturem ou sejam contaminados por outros materiais, assim mantendo as características originais do agregado. As dimensões das baias e capacidade de armazenamento, dependem da capacidade de produção da indústria e da disponibilidade e

localização do fornecedor dos agregados (FERNANDES, 2015). Na Figura 11 é apresentada um modelo de baia.

Figura 11: Modelo de baia de agregados



Fonte: Disponível em <<https://www.portaldoconcreto.com.br/agregados>> Acesso em 12/02/2020.

### **b) Misturador**

O concreto utilizado para fabricação de blocos de concreto tem consistência semi-seco, ou “farofa”, como é chamado popularmente. É preciso um bom equipamento, que possua grande energia para homogeneizar os materiais, para se produzir uma boa mistura. Os misturadores mais indicados são os biplanetários e os de eixo horizontal helicoidal (FERNANDES, 2015). Na Figura 12 é apresentado um misturador planetário.

Figura 12: Misturador Planetário



Fonte: Disponível em <<http://www.vibrafort.com.br/misturador-concreto.html>>. Acesso em 18/07/2019.

### **c) Esteira de concreto**

A esteira de concreto transporta o concreto pronto para a máquina vibroprensa. Normalmente inclinada, recebe o concreto do misturador e o leva até o silo na parte superior da máquina vibroprensa. O ponto de descarga no silo da máquina, deve ser centralizado e apresentar defletores para evitar a formação de pirâmide e segregação da mistura (FERNANDES, 2015). Na Figura 13 é ilustrada uma esteira transportadora.

Figura 13: Esteira transportadora de concreto

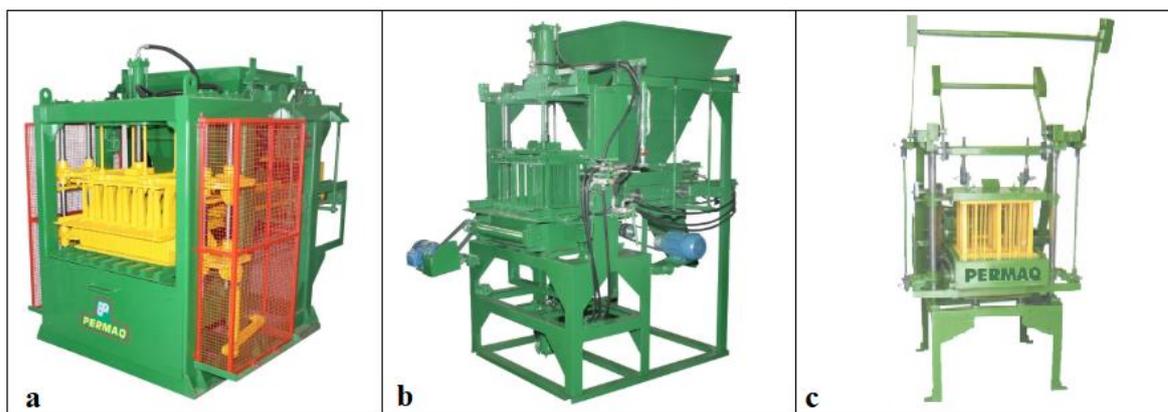


Fonte: Disponível em < <https://mcmquinas.ind.br/esteira-transportadora-de-concreto/>> Acesso em 18/07/2019.

### **d) Máquina vibroprensa**

As melhores máquinas vibroprensa no mercado são as hidráulicas, que possuem bomba e pistões a óleo. O sistema de prensagem é sincronizado com o de vibração, de modo que o concreto, dentro dos moldes ou fôrmas, são bem compactados e assim apresentam grande resistência à compressão. As máquinas apresentam centrais programáveis, de modo que todos os processos da fabricação são constantes e garantem a uniformização dos produtos. Existem também as máquinas vibroprensa pneumáticas, onde os pistões são movidos a ar comprimido. Estes equipamentos são mais ágeis na produção, produzindo mais ciclos por dia, porém possuem menor energia de compactação, exigindo um maior consumo de cimento para fabricação de blocos com qualidade requerida na norma. Por fim, existem máquinas manuais que produzem blocos quase que artesanalmente. Pela falta de energia de prensagem, o consumo de cimento é elevado e inviabiliza a produção de blocos estruturais. Normalmente produzem blocos Classe C, que requer menor resistência (FERNANDES, 2015). Na figura 14, são apresentadas os três tipos de máquinas.

Figura 14: Máquinas vibroprensa. a) Hidráulica, b) Pneumática, c) Manual



Fonte: Disponível em < <http://www.permaq.com.br/maquina/blocos/maquinas-hidraulicas>> Acesso em 18/07/2019.

### e) Moldes ou fôrmas

Os moldes normalmente são fabricados com chapas de aço 1045 e podem apresentar tratamento de endurecimento como têmpera ou cementação. Quanto maior for sua dureza, maior será a durabilidade e capacidade de produção de blocos ao longo do tempo. A precisão de suas dimensões que proporcionam a qualidades dos blocos fabricados. São responsáveis pela modelagem do produto, como largura, comprimento, altura, espessura das paredes, mísulas, entre outros. Cada modelo de produto tem sua fôrma específica (FERNANDES, 2015). Na Figura 15 é apresentada o molde do bloco 09x19x39.

Figura 15: Molde bloco 09x19x39



Fonte: Disponível em < <https://vibraforma.com.br/maquina-de-blocos-maquina-para-blocos-maquinas-para-fazer-blocos/formas-matriz-para-maquina-de-blocos/>> Acesso em 18/07/2019.

### **f) Escova rotativa**

A escova rotativa tem a função de limpeza das arestas na parte superior dos blocos, retirando concreto solto que possa ter caído sobre os blocos enquanto estava na máquina vibroprensa. A escova rotativa é fabricada normalmente com cerdas de nylon e suas pontas devem ser limpas sempre que houver acúmulo de concreto aderido (FERNANDES, 2015). Na Figura 16 é ilustrada a escova rotativa.

Figura 16: Escova rotativa



Fonte: Disponível em < <https://www.agostiniindustrial.com.br/produtos/16/esteiras-extratoras>> Acesso em 18/07/2019.

### **g) Carro garfo ou pinça**

O carro garfo é utilizado para retirada das tábuas da esteira e transporte até a área de cura. Pouco utilizado em grandes indústrias pois não faz o empilhamento das tábuas e devido à grande produção, seria necessário grande espaço físico para acondicionamento dos blocos. Dependendo da condição do terreno, o carro garfo pode danificar os blocos por conta dos solavancos do transporte. São utilizados em fábricas de pequeno e médio porte. A pinça é bastante utilizada em grandes indústrias e tem a função de retirar as tábuas da esteira e acondiciona-las em prateleiras, onde é feito o empilhamento. Dessa forma, economizando espaço e ganhando agilidade. Com a utilização da pinça, o risco de fissuração dos blocos diminui, na fase de transporte (FERNANDES, 2015). Na Figura 17 são ilustrados em (a) Carro garfo, e (b) Pinça.

Figura 17: a) Carro garfo, b) Pinça



Fonte: Disponível em < <https://vibrablocos.com.br/carrinho-para-blocos/>> e < <https://www.sahara.com.br/>> Acesso em 18/07/2019.

#### ***h) Câmara de cura***

A câmara de cura é um ambiente fechado, onde os blocos são colocados imediatamente após sua fabricação. O pé direito da câmara deve ser o menor possível para manter o calor do teto próximo aos blocos. A cobertura não precisa ser de laje, podendo ser de telhas metálicas, preferencialmente pintadas de preto na parte externa, para absorção do calor do sol. Suas paredes internas devem ser impermeabilizadas para evitar que absorvam umidade dos blocos. Suas dimensões devem ser suficientes para acomodação de 1/5 a 1/3 da produção diária da máquina vibroprensa, portanto são necessárias 4 câmaras por máquina (FERNANDES, 2015). Na Figura 18 é apresentada uma câmara de cura.

Figura 18: Câmara de cura



Fonte: Disponível em < <http://www.tecpre.com.br/premoldados/>> Acesso em 18/07/2019.

A seguir, são apresentadas algumas particularidades do concreto seco, utilizado na fabricação dos blocos de concreto e também a importância da utilização de agregados reciclados.

## **2.6 BLOCOS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS**

Apesar da grande quantidade de fábricas de blocos de concreto, observa-se com muita frequência produtos de baixa qualidade e custos relativamente altos. Esse fato está relacionado à falta de conhecimento mais preciso dos fatores relacionados à produção dos blocos, afetando suas características. Um aspecto muito importante é a otimização de traços, sempre considerando-se os equipamentos de produção disponíveis. Não raro, produtores tentam alcançar resistências definidas em projetos simplesmente pela adição de cimento ao produto, resultando no aumento de custo final sem que necessariamente se melhore a qualidade do bloco. Ao contrário, podem ser prejudicadas propriedades como a retração e a absorção de água, além de gerarem aumento da variabilidade (FERNANDES, 2015).

Os blocos de concreto são fabricados com concreto seco, que aumenta a dificuldade de pesquisadores, pois existem diferenças deste tipo de concreto para o fluido, mais pesquisado e conhecido pela comunidade científica.

A Lei de Abrams, que estabelece que a resistência à compressão é proporcional à relação  $a/c$ , não é válida para os concretos secos. A Lei de Lyse, que estabelece que a quantidade de água a ser empregada em um concreto com um determinado grupo de materiais para obter certa trabalhabilidade independe do traço de concreto, mas sim do fator água/materiais secos, também não é válida para concretos secos. A resistência à compressão é influenciada pela vibração e prensagem no momento da fabricação. Os fatores determinantes para a absorção de água são os materiais componentes e a prensagem na fabricação e não o fator  $a/c$ . A quantidade de água não é dosada em função da quantidade de cimento e sim por umidade, em relação a todos os materiais constituintes. A quantidade de água na produção de blocos deve ser a maior possível, pois quanto maior for a umidade no concreto, melhor serão suas propriedades. A umidade ótima é obtida, quando se tem o melhor fator de adensamento e assim maior massa da peça fabricada. Essa umidade do concreto normalmente é limitada ao uso da máquina vibroprensa, pois quando muito elevada os blocos aderem aos moldes da vibroprensa dificultando a sua desforma. Quando a umidade do concreto é muito baixa os blocos tendem a quebrar no transporte devido à falta de coesão do material (FERNANDES, 2015).

Segundo Fernandes (2015), os agregados reciclados, provenientes de concreto e argamassas, conhecidos como resíduo cinza da construção civil, apresentam melhores

resultados quando utilizados na fabricação de blocos de concreto, se comparados à produção de concreto plástico para concreto armado, devido aos aspectos a seguir:

- Blocos podem ser produzidos com concretos de baixas resistências. Por exemplo, um bloco de 6 MPa tem uma resistência equivalente a um corpo de prova de 10 MPa, valor inferior aos concretos usualmente utilizados em estruturas de concreto armado;
- Concretos produzidos com agregados reciclados da construção civil possuem cerca de 50% mais retração que os concretos com agregados naturais, provocando um aumento de tensão em alguns elementos. Na utilização em blocos de concreto com esses agregados reciclados, o acréscimo de tensão é minimizado, pois além das argamassas de assentamento que reduzem a tensão, estes também possuem uma redução no módulo de deformação para 80%, se comparados com o módulo do bloco com agregados naturais. Contudo, há uma redução no acréscimo de tensões de 50% para 20%;
- A quantidade de agregados utilizados na produção de blocos de concreto é maior se comparado aos concretos convencionais, com traços em volume de 1:20, por exemplo. A resistência à compressão é menor, sendo  $\geq 3$  MPa, para bloco sem função estrutural. Isso implica em maior quantidade de material reciclado a ser utilizado para cada kg de cimento.

Existem algumas pesquisas específicas quanto à utilização de agregados reciclados de Resíduos da Construção Civil - RCC, para fabricação de blocos. Sousa *et al.* (2002) substituíram 30, 40 e 50% dos agregados naturais por agregados reciclados, de RCC, para a produção de blocos de concreto 09x19x39cm e analisaram a resistência à compressão, absorção por imersão e massa específica. Para substituições de 30 e 50% os resultados não foram satisfatórios, não atendendo a norma utilizada, NBR 7173 (ABNT, 1982). Porém quando substituíram 40% dos agregados naturais por agregados reciclados, obtiveram melhores resultados e atendimento a norma na resistência à compressão e absorção de água por imersão. Quanto a massa específica, foi apenas 4% menor que a do bloco referência, fabricado apenas com agregados naturais.

Sousa (2002) fabricou blocos e corpos de prova cilíndricos de concreto com agregados reciclados de RCC e avaliou parâmetros como umidade de moldagem, massa específica, absorção de água por imersão e resistência à compressão. Quando substituiu 20% de agregado natural gráudo por agregado reciclado, obteve igualdade de massa específica e resistência à compressão, comparados aos referências, e valores admissíveis pela norma, para absorção de água.

Contudo, ainda existem poucas pesquisas com utilização de agregados reciclados para produção de blocos de concreto. A maior parte dos trabalhos focam na produção de concreto convencional ou ainda peças de concreto para pavimentação.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

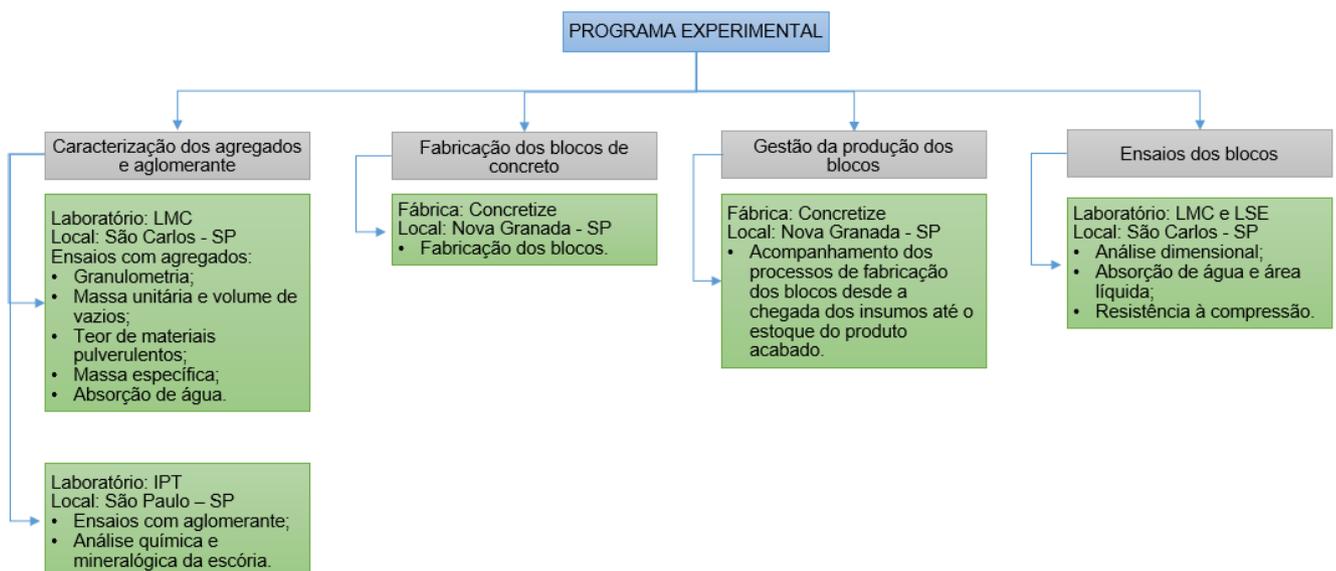
A metodologia foi dividida em quatro etapas, sendo a primeira a caracterização dos agregados e aglomerante em laboratório; segunda etapa, fabricação dos blocos em uma indústria de artefatos de cimento, buscando aproximação máxima da realidade industrial; terceira, análise da gestão da fabricação dos blocos, com descrição dos processos produtivos; quarta e última etapa realização dos ensaios dos blocos.

De maneira geral, o programa experimental engloba as seguintes etapas:

- 1) Caracterização dos agregados e aglomerante;
- 2) Fabricação dos blocos de concreto;
- 3) Gestão da produção dos blocos;
- 4) Ensaios dos blocos.

Através do organograma na Figura 19 o programa experimental pode ser melhor compreendido.

Figura 19: Organograma do programa experimental



Inicialmente foi realizada a caracterização dos agregados utilizados na pesquisa no Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. A caracterização do cimento CP V ARI e os ensaios para análise química e mineralógica da escória foram realizadas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT.

A segunda etapa da pesquisa ocorreu em uma indústria de artefatos de cimento a *Concretize Blocos e Pisos de Concreto*, situada no município de Nova Granada - SP, onde os blocos com substituição parcial de agregados naturais por artificial, proveniente da escória de aciaria BSSF, foram fabricados. O intuito da fabricação dos blocos de concreto em uma indústria ao invés de laboratório, se dá pelo fato da tentativa de máxima aproximação da produção industrial real, ou seja, produção em escala.

Terceiro passo, foi o acompanhamento da fabricação dos blocos onde foi possível fazer o estudo da gestão do processo produtivo desde o início, dessa forma tornando claro o entendimento de cada etapa da confecção de um bloco de concreto.

Por fim foram realizados os ensaios de análise dimensional, absorção de água, área líquida e resistência à compressão, previstos pela NBR 12118 (ABNT, 2013), para atender aos requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016). Os ensaios foram realizados no LMC e no LSE da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar.

### **3.1 MATERIAIS**

Segundo Fernandes (2015), para fabricação de blocos de concreto com qualidade, além de bons equipamentos, instalações e acessórios, é importante o conhecimento detalhado de cada material empregado na produção do concreto. Contudo, os insumos utilizados na pesquisa são apresentados a seguir.

#### **3.1.1 CIMENTO PORTLAND**

O cimento utilizado foi o CP V ARI, embalado e transportado em Big Bag, fornecido pelo parceiro na pesquisa *Apodi*, fabricado em Quixeré - CE e enviado até a fábrica de blocos *Concretize* em Nova Granada - SP. O cimento foi acondicionado em tambores de 200 litros com sílica gel, para evitar o contato com a umidade, posteriormente fechado e coberto com encerado para prolongar sua vida útil. Na Figura 20 é ilustrada o armazenamento do cimento.

Figura 20: Cimento da pesquisa



Fonte: Autor (2020)

De acordo com Fernandes (2015), os cimentos mais indicados para fabricação de blocos de concreto e peças de concreto para pavimentação, são os tipos CP II (composto) F ou Z e o CP V ARI, pois apresentam maior resistência nas primeiras idades, devido as suas composições com elevado teor de clínquer + gesso. Assim, proporcionam, em menor prazo, o manuseio das peças diminuindo o índice de quebras na paletização. De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) o cimento CP II-F deve possuir de 75 a 89% de clínquer + sulfatos de cálcio e o CP II-Z de 71 a 94% de clínquer + sulfatos de cálcio além de 6 a 14% de material pozzolânico. Já o cimento CP V ARI deve possuir de 90 a 100% de clínquer + sulfatos de cálcio. Tanto o cimento CP II quanto o CP V possuem pouca adição de filer (CP II-F de 11 a 25%, CP II-Z de 0 a 15% e CP V de 0 a 10%). O cimento CP V ARI deve possuir resistência de 14 MPa a 1 dia, 24 MPa aos 3 dias e 34 MPa aos 7 dias de idade.

### **3.1.2 AGREGADOS NATURAIS**

#### **a) Areia natural**

A areia natural utilizada na pesquisa é de origem quartzosa, oriunda do *Porto de Areia Marimondo* situado à margem direita do Rio Grande no município de Fronteira - MG. A *Concretize* utiliza esse material normalmente em sua produção diária. Essa areia, classificada como agregado miúdo, foi utilizado tanto na produção do bloco referência quanto no bloco com substituições. As amostras foram coletadas para caracterização em laboratório, de acordo com NM 26 (ABNT, 2001) e NM 27 (ABNT, 2000). Após a coleta das amostras, o material foi coberto por lona plástica até sua utilização. Na Figura 21 é apresentada a areia.

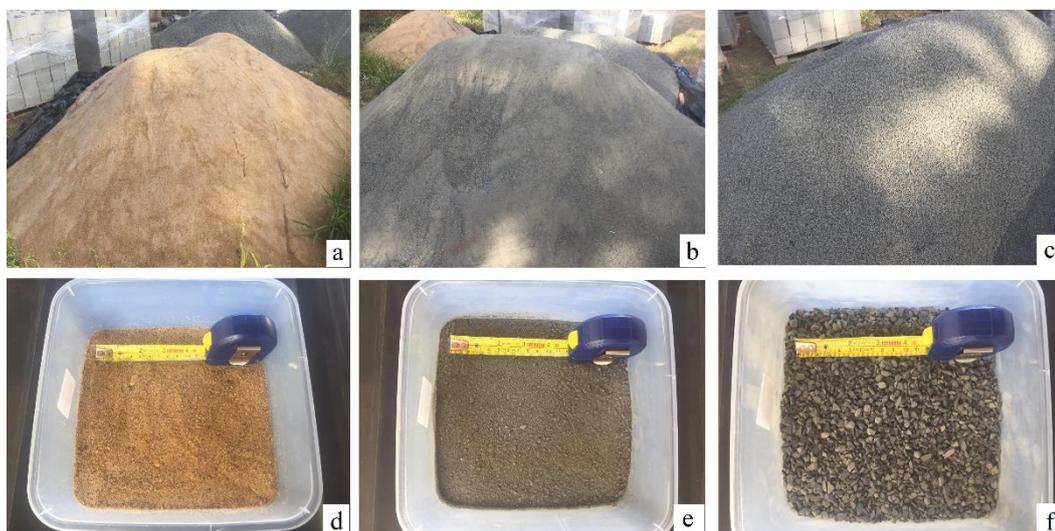
### b) Pó de pedra

O pó de pedra, como é popularmente conhecido, é uma areia industrial originária do processo de britagem de rocha basáltica. O material foi adquirido na *Pedreira Constroeste*, localizada à margem esquerda do Rio Grande no município de Icém - SP. Esse material também é utilizado na produção diária da fábrica e foi empregado na fabricação do bloco referência e bloco com substituições. O pó de pedra também é classificado como agregado miúdo. A coleta das amostras seguiu as orientações da NM 26 (ABNT, 2001) e NM 27 (ABNT, 2000). Após a coleta das amostras o material foi coberto por lona plástica até sua utilização. Na Figura 21 é apresentado o material.

### c) Pedrisco

O agregado graúdo utilizado tanto na pesquisa quanto no dia a dia da *Concretize* é o pedrisco de dimensão máxima ( $D_{máx}$ ) igual a 6,3 mm, de origem basáltica. Esse material foi adquirido na *Pedreira Constroeste* de Icém - SP. Como os demais materiais, a coleta das amostras seguiu as orientações da NM 26 (ABNT, 2001) e NM 27 (ABNT, 2000). Após a coleta das amostras o material também foi coberto por lona plástica até sua utilização, na fabricação dos blocos da pesquisa. Na Figura 21 o pedrisco é apresentado.

Figura 21: Agregados naturais. a) Areia natural; b) Pó de pedra; c) Pedrisco; d) Detalhe areia; e) Detalhe pó de pedra; f) Detalhe pedrisco



Fonte: Autor (2020)

### 3.1.3 AGREGADO ARTIFICIAL

O agregado artificial utilizado foi a escória de aciaria BSSF. Sua origem é da *Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP*, situada nos municípios de Caucaia e São Gonçalo do

Amarantes - CE. A CSP nos anos de 2018 e 2019, produziu 2,9 e 2,8 milhões de toneladas de placas de aço, respectivamente. A taxa de geração de escória BSSF dessa usina varia de 90 a 110 kg/ton de aço do forno de oxigênio (BOF). O material foi enviado para a *Concretize* embalado em Big Bag. A escória foi fornecida pela cimenteira *Apodi*, parceira na pesquisa. Foi coletada amostras dos dois Big Bags e ensaiadas em laboratório para caracterização do material. Os Big Bags foram acondicionados em paletes e cobertos com lona plástica até a fabricação dos blocos. Na Figura 22 é possível observar a escória.

Figura 22: Escória de aciaria BSSF. a) Embalada em Big Bag; b) Amostra



Fonte: Autor (2020)

#### 3.1.4 ÁGUA

A água utilizada no amassamento do concreto foi fornecida pela rede pública municipal, administrada pela *Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp*, que garante a qualidade no fornecimento.

#### 3.1.5 ADITIVO

O aditivo empregado na produção de artefatos pela *Concretize* é o ADB-PLASTICIZER PREMIUM. Composto químico, isento de cloretos, utilizado como aditivo biodegradável plastificante para blocos de concreto, para outras peças classificadas como artefatos de cimento e pré-fabricados de concreto seco. Dentre suas principais vantagens destaca-se o aumento da impermeabilidade, facilitação da desforma, aumento da resistência das peças, melhora na aparência das peças e redução do risco de fissuras. Apresenta aspecto líquido transparente incolor, com pH igual a 8 e densidade de 1,00 kg/l. O consumo indicado pelo fabricante é de 50 a 100 ml para cada 50 kg de cimento.

## **3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

As amostras dos agregados areia natural, pó de pedra, pedrisco e escória de aciaria, foram encaminhadas para o Laboratório de Materiais e Componentes – LMC da UFSCar onde foram realizados os ensaios para caracterização dos mesmos, descritos a seguir. Amostras do mesmo lote da escória de aciaria, foram enviadas para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, onde foram realizadas análises química e mineralógica da escória.

### **3.2.1 GRANULOMETRIA**

Para a realização do ensaio de granulometria, primeiramente é necessário separar a fração graúda da miúda. São realizados dois ensaios para cada agregado e seguidas às prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os parâmetros de aceitação e classificação dos agregados fornecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Com os resultados do peneiramento montou-se uma tabela de distribuição granulométrica e traçou-se a curva de distribuição granulométrica.

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram: agitador mecânico de peneiras com controle de vibração e temporizador, balança de precisão, estufa com termostato, escovas com cerdas de náilon e peneiras da série normal e intermediária.

Para cada agregado miúdo, foram ensaiadas duas amostras de 500 g. Para o pedrisco, foram separadas duas amostras de 1 kg e, por fim, duas amostras de 2 kg para o ensaio da escória de aciaria, de acordo com as massas mínimas por amostra descrita na NBR NM 248 (ABNT, 2003). Na Figura 23 são ilustradas as etapas do ensaio.

Figura 23: Ensaio de granulometria: a) Quarteamento; b) Pesagem da amostra; c) Misturador mecânico para agregados miúdos; d) Frações retidas nas peneiras



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.2 MASSA UNITÁRIA E VOLUME DE VAZIOS

Para o cálculo da massa unitária e volume de vazios, foi utilizada a norma NBR NM 45 (ABNT, 2006) para agregados graúdos e miúdos.

O ensaio consiste em preencher um recipiente de volume pré-estabelecido com agregado de duas maneiras: a) apenas despejando, de forma homogênea, o material até o preenchimento total do recipiente; e b) inserindo o material por camadas, no total de três, e no final de cada uma compactar com utilização de haste metálica. Após o preenchimento do recipiente, a massa é aferida e por meio da Equação 3.1 e Equação 3.2, calcula-se o valor da massa unitária do agregado no estado solto e compactado, além do volume de vazios contido no material.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = massa unitária média do agregado (kg/m<sup>3</sup>).

$m_{ar}$  = massa do recipiente mais o agregado (kg);

$m_r$  = massa do recipiente vazio (kg);

$V$  = volume do recipiente ( $m^3$ ).

$$E_v = \frac{100 [(d_1 \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \rho_w} \quad (3.2)$$

Onde:

$E_v$  = índice de volume de vazios no agregado (%);

$d_1$  = massa específica relativa do agregado seco calculada conforme normas NBR NM 52 e NBR NM 53 ( $kg/m^3$ );

$\rho_w$  = massa específica da água ( $kg/m^3$ );

$\rho_{ap}$  = massa unitária média do agregado ( $kg/m^3$ ).

Para realização do ensaio, é utilizado uma vez e meia o volume do recipiente do agregado seco. Na Figura 24 a realização do ensaio é ilustrada.

Figura 24: Ensaio Massa Unitária: a) Recipiente com agregado; b) Pesagem do recipiente mais agregado



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.3 TEOR DE MATERIAIS PULVERULENTOS

Para determinação do teor de materiais finos ou pulverulentos, foi coletada uma amostra do lote total e realizou-se o ensaio previsto na norma NBR NM 46 (ABNT, 2003).

O ensaio consiste na adição de água na amostra, promover a agitação e em seguida despejar sobre um par de peneiras de 1,18 mm e 0,075 mm. Esse procedimento é repetido até que a água saia limpa. Após lavada, a amostra é seca em estufa e pesada para obtenção

da massa final. O teor de material pulverulento é então calculado por meio da Equação 3.3, apresentada a seguir.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

$m$  = teor de material pulverulento (%);

$m_i$  = massa inicial da amostra seca (g);

$m_f$  = massa da amostra seca após lavagem (g).

Na Figura 25 são apresentadas imagens da realização do ensaio.

Figura 25: Ensaio Teor de Materiais Pulverulentos: a) Passagem pela peneira; b) Primeira e última lavagem



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.4 MASSA ESPECÍFICA

#### a) Agregado miúdo

A massa específica dos agregados miúdos foi determinada com base nas diretrizes fornecidas pela NBR NM 52 (ABNT, 2002). O ensaio consiste em saturar o material, cobrindo-o com água e deixando repousar por 24 horas. Em seguida as amostras foram estendidas sobre uma superfície plana para obtenção da condição Saturada Superfície Seca – SSS. Essa condição é verificada através do preenchimento do molde de tronco cônico, com aplicação suave de 25 golpes. Se, na retirada do molde, o material permanecer com seu formato, a condição ainda não foi atendida. O estado desejado é obtido quando ao retirar o molde, o material desmorona. Feito isso, é adicionado 500 g do agregado em um frasco de vidro com capacidade de 500 ml e adiciona-se água. O frasco é lavado a um banho com temperatura de

(21±2)°C, passada 1 hora, a água é completada e a massa do conjunto é medida. Após a pesagem, o material é levado para estufa e pesado novamente na condição seco.

Para o cálculo da massa específica, utiliza-se as Equações 3.4 e 3.5

$$d = \frac{m}{(m - V_a) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (3.4)$$

Onde:

$d$  = massa específica do agregado (g/cm<sup>3</sup>);

$m$  = massa da amostra seca em estufa (g);

$V$  = volume do frasco (cm<sup>3</sup>);

$V_a$  = volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>);

$m_s$  = massa da amostra na condição SSS (g);

$\rho_a$  = massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (3.5)$$

Onde:

$V_a$  = volume de água adicionado ao frasco (cm<sup>3</sup>);

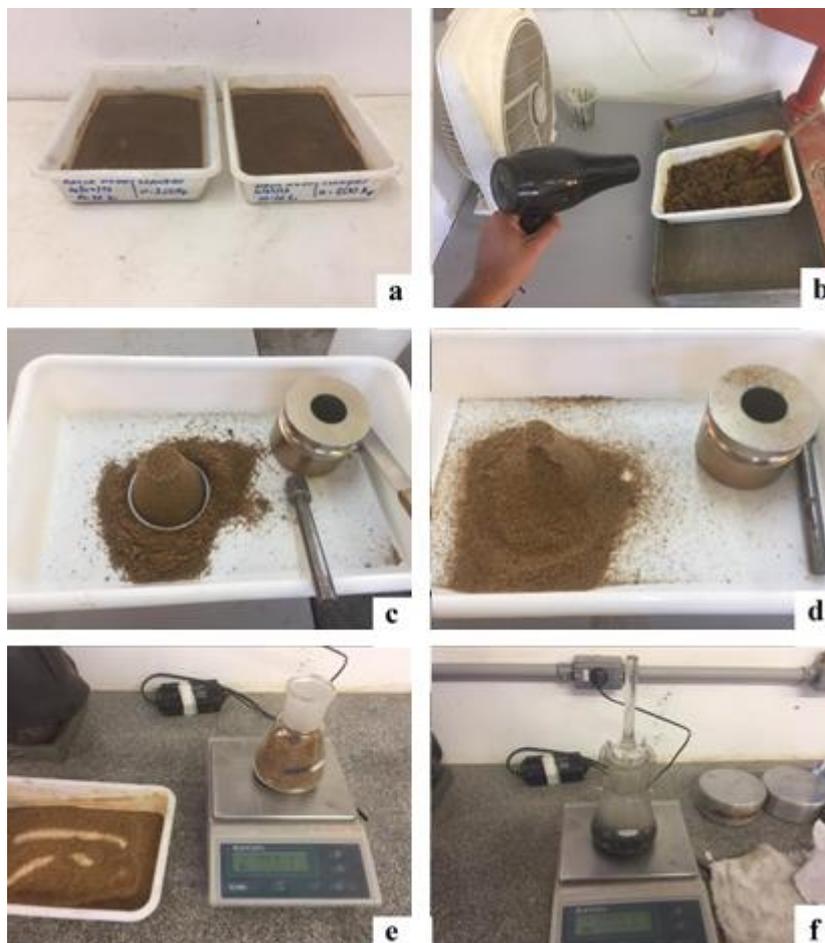
$m_1$  = massa do frasco + agregado (g);

$m_2$  = massa do conjunto (frasco + agregado + água) (g);

$\rho_a$  = massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

Na Figura 26 são apresentadas as etapas do ensaio.

Figura 26: Ensaio Massa Específica agregado miúdo: a) Saturação do material; b) Obtenção da condição SSS; c) Cone íntegro; d) Cone desmorronado; e) Pesagem da amostra; f) Pesagem do conjunto



Fonte: Autor (2020)

### ***b) Agregado graúdo***

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada com base nas diretrizes fornecidas pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). Para realização do ensaio, foi utilizado apenas o material retido na peneira 4,75 mm, que foi lavado e seco em estufa. As amostras foram submergidas em água por um período de 24 horas. Passado esse tempo, a umidade superficial do agregado é extraída através de um pano seco, até a obtenção da condição SSS. As massas são determinadas. Em seguida foram medidas as massas submersas das amostras, que posteriormente foram secas em estufa e pesadas novamente na condição seca.

Para determinação da massa específica dos agregados graúdos a Equação 3.6 é utilizada.

$$d = \frac{m}{m - m_a} \quad (3.6)$$

Onde:

$d$  = massa específica do agregado seco ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m$  = massa ao ar da amostra seca (g);

$m_a$  = massa da amostra submersa (g).

Na Figura 27 é ilustrada a realização do ensaio.

Figura 27: Ensaio massa específica agregado graúdo: a) Lavagem do material; b) Retirada da umidade superficial c) Aferição da massa submersa.



Fonte: Autor (2020)

Devido à grande presença de material fino na escória de aciaria, a determinação da massa específica foi realizada com base na NBR NM 52 (ABNT, 2002) para agregados miúdos, com a porção passante na peneira 4,75 mm, e para o material retido nessa mesma peneira, foi calculada a massa específica de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009). O valor considerado foi a média dos dois resultados.

### 3.2.5 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água dos agregados miúdos foi obtida seguindo a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001). Para os ensaios dos agregados, utiliza-se duas amostras secas, as submerge em água por 24 horas e em seguida as coloca sobre superfícies planas até a condição de SSS. Pesa-se as amostras nessa condição e através da Equação 3.7 a absorção é calculada.

$$A = \frac{m - m_a}{m} \times 100 \quad (3.7)$$

Onde:

$A$  = absorção de água (%);

$m_a$  = massa da amostra na condição SSS (g);

$m$  = massa da amostra seca em estufa (g).

Na Figura 28 é apresentada parte do ensaio.

Figura 28: Ensaio de absorção de água: a) Estufa; b) Pesagem do material seco



Fonte: Autor (2020)

### 3.2.6 ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA NA ESCÓRIA

Para as amostras de escória, foram realizados ensaios de perda ao fogo de acordo com a NBR NM 18 (ABNT, 2012) e análise química semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX), com base em diretrizes gerais da NBR 14656 (ABNT, 2001). Para isso utilizou-se espectrômetro de fluorescência de raios-X marca Panalytical modelo Minipal Cement, a partir de pastilhas fundidas em máquina de fusão marca Claisse modelo M4, utilizando-se fundentes à base de mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio marca MAXXIFLUX (66,67% de  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 32,83% de  $\text{LiBO}_2$  e 0,7% de  $\text{LiBr}$ ), com proporção de 0,6g de amostra e 6,75g de fundente. Óxido de cálcio livre ( $\text{CaO}$  livre) de acordo com a NBR NM 13 (ABNT, 2012), bem como óxido de Ferro II ( $\text{FeO}$ ) e ferro Metálico ( $\text{Fe}_M$ ) conforme diretrizes da ASTM E246:2010.

Já a análise mineralógica quantitativa por difração de raios X foi realizada num difratômetro de raios X marca Panalytical modelo EMPYREAN com detector PIXcel3D, operando na radiação  $K\alpha$  do cobre com 40kV – 40mA e varredura de  $2^\circ 2\theta/\text{min}$ . A identificação dos compostos foi executada por meio do software X-pert HighScore Plus [versão 4.8 (4.8.0.25518)] da Panalytical e padrões difratométricos e de estruturas fornecidos pelo banco de dados gratuito do COD (Crystallography Open Database) (atualizado em 2017) e, eventualmente, padrões difratométricos e de estruturas do ICDD (International Center for

Diffraction Data) e ICSD (International Center for Structure Data). Cabe ressaltar que o indicador estatístico utilizado para verificar os resultados do refinamento foi o GOF (*Goodness of Fitting*), além do gráfico das diferenças entre os difratogramas observados e calculados. A seguir, estão apresentados alguns dos parâmetros de refinamento utilizados em cada difratograma para obtenção dos percentuais das fases presentes, na respectiva ordem de aplicação: refinamento do fator escala; ajuste da linha base; refinamento da constante do difratômetro (Zero Shift); refinamento da cela unitária das fases maiores; refinamento da cela unitária das fases menores; refinamento do perfil de pico (para fases presentes com mais de 5%); refinamento da orientação preferencial (para compostos suscetíveis).

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE

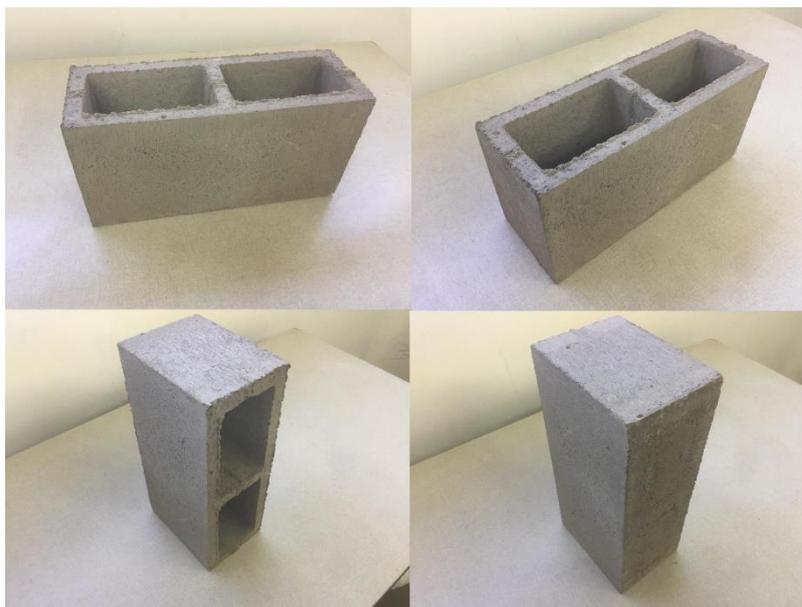
Foram enviadas amostras do aglomerante para o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, onde foram realizados os ensaios do cimento Portland CP V ARI, descritos a seguir.

Análises químicas de perda ao fogo, de acordo com NBR NM 18 (ABNT, 2012); determinação de óxidos principais por complexometria, de acordo com NBR NM 11-2 (ABNT, 2012) e NBR NM 22 (ABNT, 2012) para determinação de anidrido silícico ( $\text{SiO}_2$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ); determinação de anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) através da NBR NM 16 (ABNT, 2012); determinação de metais por espectrometria de absorção atômica, para identificação de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e óxido de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) de acordo com NBR 13810 (ABNT, 1997) e ASTM C114:2018; determinação de óxido de cálcio livre ( $\text{CaO}$  livre) pelo etileno glicol de acordo com NBR NM 13 (ABNT, 2012 – Errata 1, 2013); resíduo insolúvel de acordo com NBR NM 15 (ABNT, 2012); e por fim, determinação de dióxido de carbono por gasometria para identificação de anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ) de acordo com NBR NM 20 (ABNT, 2012).

### 3.4 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Os blocos de concreto utilizados na pesquisa foram produzidos em uma indústria de artefatos de cimento, onde foi utilizada uma máquina vibroprensa hidráulica. Os processos de fabricação foram os mesmos utilizados na fábrica. Os blocos fabricados foram sem função estrutural, classe C, com dimensões de 14x19x39 cm. Os blocos foram produzidos com fundo fechado e apenas a parte superior vazada, similar ao padrão de fabricação e comercialização de blocos de vedação da fábrica *Concretize*. Na Figura 29 é possível observar o bloco objeto de estudo da pesquisa.

Figura 29: Bloco sem função estrutural 14x19x39

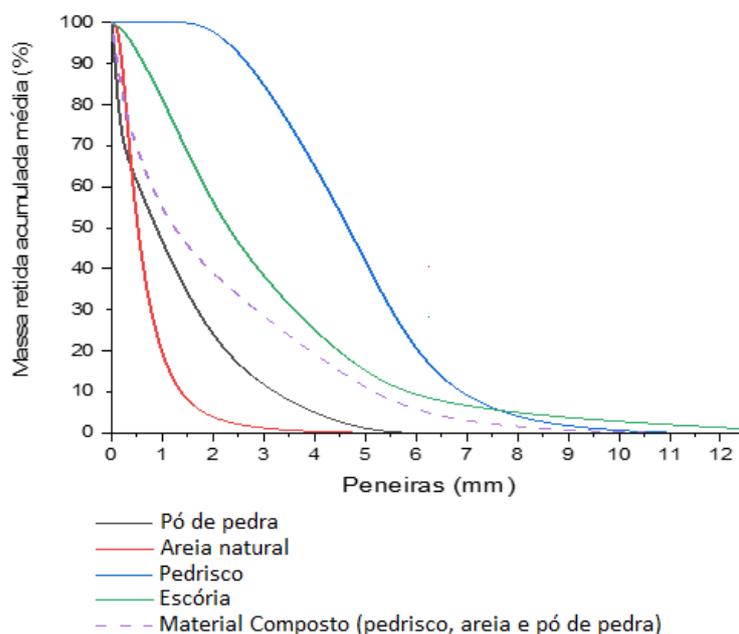


Fonte: Autor (2020)

### **3.4.1 DEFINIÇÃO DO TRAÇO**

Nesta etapa da pesquisa, foi realizada a definição dos traços a serem estudados. Para tanto, realizou-se em laboratório o empacotamento das partículas, através do ensaio de massa unitária, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), objetivando encontrar um traço com o menor índice de vazios (composição pedrisco/areia e posteriormente pedrisco+areia/pó de pedra). Esse traço empacotado, serviu de referência para as substituições propostas. Também foram fabricados blocos com o traço utilizado pela empresa a fim de comparação. Em um comparativo granulométrico, observou-se que escória de aciaria apresenta comportamento próximo ao traço empacotado encontrado, ou seja, praticamente a mesma quantidade de agregados graúdo e miúdo, conforme ilustrado na Figura 30. Portanto, optou-se por substituir o agregado graúdo e miúdo pela escória em condição natural.

Figura 30: Comparativo granulométrico



Fonte: Autor (2020)

Para todos os traços foi fixada a quantidade de água e aditivo, de modo que a única variável dos diferentes traços foi a substituição dos agregados naturais pelo artificial. Foram feitas as substituições de agregados graúdo e miúdo naturais por artificial proveniente da escória de aciaria BSSF, nas proporções de 20, 40, 60 e 80%. Tentou-se a substituição de 100%, porém os blocos quebravam assim que saíam do molde. O principal motivo foi a falta de coesão do concreto proporcionada pela falta de finos na mistura. A nomenclatura utilizada para cada bloco foi a seguinte:

- Bloco Empresa - BE
- Bloco Sugestão Empacotado - BSE
- Bloco Substituição de 20% - BS 20
- Bloco Substituição de 40% - BS 40
- Bloco Substituição de 60% - BS 60
- Bloco Substituição de 80% - BS 80

Os traços unitários, em volume, dos blocos de concreto estudados são apresentados na Tabela 10. A relação água cimento utilizada para todos traços foi de 1,25 e a quantidade de aditivo fixada em 50 ml. Para conversão do cimento de massa para volume, foi utilizada a massa unitária de 1,08 kg/dm<sup>3</sup> fornecida pelo fabricante Apodi.

Tabela 10: Traços unitários em volume

<i>Insumos</i>	<i>BE</i>	<i>BSE</i>	<i>BS 20</i>	<i>BS 40</i>	<i>BS 60</i>	<i>BS 80</i>
Cimento	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Pedrisco	4,32	3,29	2,65	1,94	1,30	0,65
Areia natural	4,32	2,38	1,89	1,46	0,97	0,49
Pó de pedra	4,32	7,29	5,83	4,37	2,92	1,46
Escória BSSF	-	-	2,59	5,18	7,78	10,37
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	118,21	116,62	117,52	118,44	119,37	120,32

Fonte: Autor (2020)

Os blocos foram produzidos na *Concretize*, onde foi utilizada uma máquina vibroprensa hidráulica e os processos de fabricação seguiram os passos normalmente utilizados na fábrica, inclusive o processo de cura. Os blocos fabricados foram do tipo sem função estrutural, classe C, com dimensões de 14x19x39 cm. Os blocos foram produzidos com o fundo fechado e apenas a parte superior vazada, similar ao padrão de fabricação e comercialização de blocos de vedação da *Concretize*.

### 3.5 GESTÃO DA PRODUÇÃO DOS BLOCOS

Como um dos objetivos do trabalho é o estudo da gestão dos processos, a seguir, são apresentadas as etapas de fabricação dos blocos na indústria, para melhor entendimento do processo como um todo. Deve ser observado, no entanto, que existem diversos tipos de equipamentos no mercado que produzem blocos de concreto. Os equipamentos utilizados tem grande influência no resultado final do produto.

#### 3.5.1 INSUMOS

Para produção dos blocos, são utilizados como matéria-prima os agregados naturais pedrisco, areia natural e pó de pedra. Estes são transportados até a indústria por caminhões basculantes e armazenados em baias distintas, para que não haja mistura ou contaminação dos materiais. A localização das baias, deve ser o mais próxima possível do local onde o concreto é preparado. A *Concretize* tem seu layout instalado em um galpão de 15x45 metros e as baias localizadas na parte externa posterior do prédio, pois dessa forma não impede a manobra dos veículos nem oferece obstáculo para que a caçamba do caminhão seja basculada na descarga dos materiais. Na Figura 31 as baias são ilustradas.

Figura 31: Baias dos agregados. a) Visão geral; b) Pó de pedra; c) Areia; d) Pedrisco



Fonte: Autor (2020)

A *Concretize* utiliza como aglomerante, Cimento Portland CP V ARI ensacado, com 40 kg a unidade, que é entregue paletizado, com 50 sacos por palete. O aglomerante também é armazenado o mais próximo possível do local onde o concreto é produzido, com intuito de que haja pouco deslocamento de seu local de estoque ao de utilização, assim poupando tempo e energia no momento da produção. Diferente do agregado, o cimento é armazenado dentro do galpão em ambiente coberto.

Para a pesquisa, foi utilizado cimento a granel fornecido pela parceira *Apodi*, que chegou até a indústria acondicionado em Big Bag. Foi transferido para tambores plásticos de 200 litros com sílica gel, para absorção de umidade, posteriormente fechado e lacrado com *stretch*, aberto apenas no momento da fabricação dos blocos. Na Figura 32, pode-se observar o estoque de cimento usual da fábrica e o cimento utilizado na pesquisa.

Figura 32: Cimento. a) Ensacado utilizado pela Concretize; b) Apodi a granel utilizado na pesquisa



Fonte: Autor (2020)

O aditivo utilizado é do tipo plastificante para artefatos de concreto, isento de cloretos, que tem a principal função a redução de água no amassamento, além de melhora no acabamento do bloco e auxílio no desmolde. O aditivo é armazenado em uma estrutura bem acima dos controles do misturador, de forma que através de um registro, o operador controla sua vazão, podendo fazer a medição da quantidade exata a ser usada no traço.

A água utilizada no amassamento é controlada através de um hidrômetro digital, que apresenta precisão de 0,005 e é aferido em litros. Na Figura 33 são apresentados os controles de água e aditivo.

Figura 33: Dispositivos de controle de água e aditivo



Fonte: Autor (2020)

### 3.5.2 PREPARO DO CONCRETO

O concreto é preparado em um misturador que é responsável pela homogeneização dos agregados, aglomerante, aditivo e água, que são inseridos, em quantidades corretas, de acordo com o traço definido para cada produto, bem como para a resistência final desejada do bloco. Após partida do misturador, é adicionado sequencialmente pedrisco, areia natural e pó de pedra, todos agregados do concreto. Em seguida é adicionado cimento e finalmente água de amassamento, juntamente com aditivo. Os materiais são misturados no equipamento até apresentarem aparência homogênea. Este processo leva em torno de 3 minutos. Em seguida, é aberta uma saída inferior do misturador, por onde o concreto é descarregado, por gravidade, na esteira inclinada. Na Figura 34 é apresentado o misturador utilizado na *Concretize*.

Figura 34: Misturador. a) Visão geral; b) Dispositivo de adição de água e aditivo



Fonte: Autor (2020)

Nesta etapa foram substituídos agregados naturais pelo artificial, provenientes da escória de aciaria BSSF, de acordo com a Tabela 13.

### 3.5.3 TRANSPORTE

Após seu preparo, o concreto é transportado do misturador até a máquina vibroprensa, que é responsável pela moldagem, compactação e extrusão dos blocos. O transporte é feito através de uma esteira inclinada, Figura 35, que recebe o concreto da parte inferior do misturador e o transporta até o silo de concreto na parte superior da máquina vibroprensa.

Figura 35: Esteira transportadora de concreto



Fonte: Autor (2020)

#### **3.5.4 MOLDAGEM DOS BLOCOS**

Os blocos de concreto foram moldados por uma máquina vibroprensa hidráulica que tem como princípio a prensam do concreto com alta carga de peso, cerca de 6 toneladas, ao mesmo tempo que utiliza a vibração do molde, dois vibradores movidos por dois motores de 5 hp cada, para proporcionar melhor adensamento do material. O tipo do bloco a ser fabricado, é alterado de acordo com o molde acoplado na máquina, que por sua vez tem função de moldar o concreto que será vibrado e prensado. A *Concretize* utiliza uma máquina vibroprensa hidráulica da marca *Permaq* modelo MBHD 4.

Os blocos são confeccionados sobre tábuas retangulares de compensado naval, que são removidos da máquina por uma esteira horizontal transportadora. Ao entrar na esteira, os blocos passam pelo último processo da fabricação, que é a remoção das arestas, realizada por uma escova cilíndrica, que faz movimento de rotação em relação ao seu eixo central. Na Figura 36 (a) é possível observar o molde, de cor amarela, acoplada na máquina vibroprensa, de cor verde; em (b), é mostrada a escova cilíndrica responsável pela remoção das arestas dos blocos.

Figura 36: Máquina vibroprensa. a) Detalhe do molde em amarelo, b) Em operação, com escova cilíndrica e blocos fabricados



Fonte: Autor (2020)

### 3.5.5 TRANSPORTE DOS BLOCOS

Os blocos são retirados da máquina por carros garfo que fazem o transporte dos blocos recém fabricados para a área de cura, onde as chapas com os blocos são organizadas lado a lado. Na Figura 37 são ilustrados o transporte e a acomodação dos blocos.

Figura 37: a) Transporte com carro garfo; b) Acomodação dos blocos



Fonte: Autor (2020)

### 3.5.6 PROCESSO DE CURA, PALETIZAÇÃO E ESTOQUE

O processo de cura inicia-se com o cobrimento dos blocos com lona plástica. A utilização da lona tem função de conservação da umidade e temperatura, ou seja, faz com que os blocos não percam umidade para o ambiente e também proporciona um sistema fechado com temperatura mais elevada, uma vez que a reação do cimento é exotérmica e libera calor. O processo de cura leva aproximadamente 12 horas e após esse período a lona é retirada e os blocos paletizados e encaminhados para área externa compondo o estoque da empresa. Na Figura 38 são apresentadas as etapas descritas.

Figura 38: Processo de cura e estoque: a) Blocos acomodados lado a lado imediatamente após serem fabricados; b) e c) Blocos cobertos com lona plástica para cura; d) Blocos paletizados no estoque



Fonte: Autor (2020)

## 3.6 ENSAIOS DOS BLOCOS

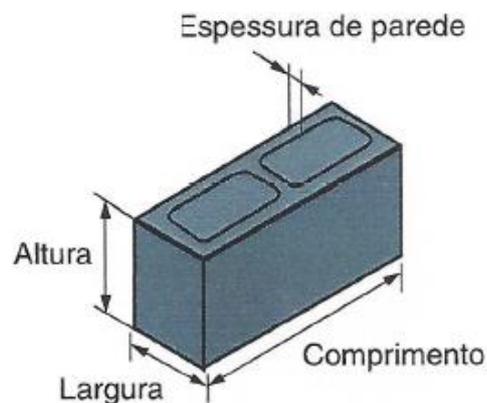
Os ensaios dos blocos foram realizados com 28 dias da data de fabricação com objetivo de atender aos requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016), com metodologia da NBR 12118 (ABNT, 2013) métodos de ensaio.

### 3.6.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

Conforme previsto na norma é utilizado paquímetro metálico calibrado com resolução mínima de 0,05 mm e comprimento adequado às dimensões do bloco. Para cada dimensão do corpo de prova, largura, comprimento e altura, são realizadas três determinações em

pontos distintos. Para determinação da espessura de parede, são realizadas duas medições em cada parede longitudinal e uma em cada parede transversal, tomadas na face de menor espessura da parede. A espessura mínima das paredes deve ser a média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito, separadas em longitudinal e transversal. Na Figura 39 são ilustradas as dimensões avaliadas dos blocos.

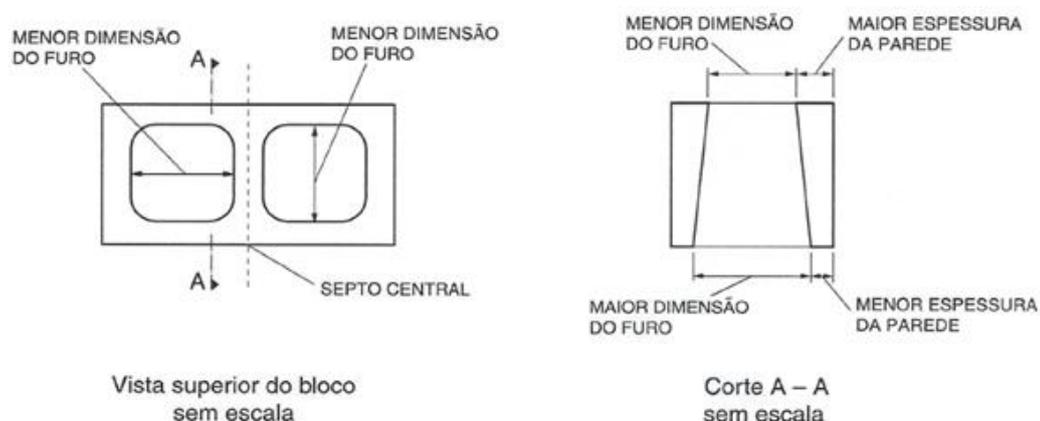
Figura 39: Dimensões nos blocos de concreto



Fonte: NBR 12118 (ABNT, 2013)

Para as dimensões do furo, são realizadas duas medições no centro aproximado de cada furo do bloco, sendo uma na direção longitudinal e outra na transversal do bloco, tomadas na face de maior espessura da parede. Na Figura 40 as dimensões dos furos são ilustradas.

Figura 40: Dimensões dos furos



Fonte: NBR 12118 (ABNT, 2013)

Na Figura 41 é possível observar parte do ensaio de análise dimensional.

Figura 41: Ensaio análise dimensional: a) Altura; b) Largura; c) Espessura de parede



Fonte: Autor (2020)

### 3.6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÁREA LÍQUIDA

Para determinação da absorção de água foram utilizados os seguintes equipamentos: balança com dispositivo de pesagem hidrostática, com resolução mínima de 10g e capacidade mínima de 20.000g; estufa com capacidade de manter a temperatura no intervalo de  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ ; e termômetro para medição da variação da temperatura da água no tanque de imersão com resolução mínima de  $1^\circ\text{C}$ .

O ensaio consiste em secar os corpos de prova na estufa na temperatura de  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  por 24 horas. Fazer uma pesagem para determinação da massa. Retornar os corpos de prova para estufa por mais 2 horas, sendo que o tempo da pesagem não ultrapasse 10 minutos. Fazer novas pesagens a cada 2 horas, voltando os corpos de prova para estufa após cada aferição da massa, até que em duas determinações sucessivas a massa do corpo de prova não registre diferença de massa superior a 0,5% em relação ao valor anterior. Essa medição final é a massa seca  $m_1$ . Na Figura 42 é possível observar a pesagem e secagem dos blocos para o ensaio.

Figura 42: Preparo dos blocos: a) Secagem; b) Pesagem



Fonte: Autor (2020)

A segunda etapa do ensaio consiste em saturar os corpos de prova. Após terem sido resfriados naturalmente até a temperatura ambiente, imergi-los em água a temperatura de  $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ , mantendo-os imersos por 24 horas. Passado esse tempo, os corpos de prova são retirados do tanque de imersão e drenados sobre uma tela de abertura de malha igual ou superior a 9,5 mm, por 60 segundos. Com um pano úmido remove-se a água superficial visível e então é aferida a massa. A massa saturada é  $m_2$ . Na Figura 43 observa-se as etapas do ensaio.

Figura 43: Ensaio de absorção de água: a) Saturação; b) Drenagem; c) Remoção da água superficial



Fonte: Autor (2020)

O valor da absorção de água é encontrado aplicando Equação 3.8.

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (3.8)$$

Onde:

$a$  = absorção total (%);

$m_1$  = massa do corpo de prova seco em estufa (g);

$m_2$  = massa do corpo de prova saturado (g).

A área líquida é determinada quando as seções paralelas à seção de trabalho puderem ser admitidas iguais e constantes. O valor de cada dimensão do corpo de prova é o resultado da média de pelo menos três determinações executadas. Para se chegar à massa aparente, é realizada a pesagem com balança hidrostática após as 24 horas de imersão em água do ensaio de absorção de água. A medição deve ser feita com o corpo de prova ainda imerso. O valor encontrado é determinado massa aparente  $m_3$ . Na Figura 44 pode-se observar a pesagem do bloco submerso.

Figura 44: Pesagem com balança hidrostática



Fonte: Autor (2020)

O valor da área líquida é encontrado aplicando a Equação 3.9.

$$A_{liq} = \frac{m_2 - m_3}{h \times \gamma} \times 1000 \quad (3.9)$$

Onde:

$A_{liq}$  = área líquida (mm<sup>2</sup>);

$m_2$  = massa do corpo de prova saturado (g);

$m_3$  = massa aparente do corpo de prova (g);

$h$  = altura média do corpo de prova, medida na direção perpendicular à seção de trabalho (mm);

$\gamma$  = massa específica da água utilizada no ensaio (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para o ensaio de resistência à compressão foi utilizada uma prensa que atenda aos requisitos da ISO 7500-1 (2018). Quanto ao preparo dos corpos de prova para o ensaio, a norma recomenda que as faces de trabalho do bloco deverão ser regularizadas por meio de retífica ou através de capeamento e deverão estar no ambiente do ensaio com 72 horas de antecedência. A opção adotada foi pelo capeamento, conforme ilustrado na Figura 45.

Figura 45: Capeamento do bloco: a) Pasta de cimento; b) Blocos capeados



Fonte: Autor (2020)

A umidade relativa dos blocos deve ser verificada conforme previsto na norma, e para blocos com resistência característica especificada superior ou igual a 8 MPa, o teor de umidade relativa média deve ser de  $(40 \pm 20)\%$ ; e para blocos com resistência característica especificada inferior a 8 MPa, o teor de umidade relativa média deve ser de  $(25 \pm 15)\%$ . Caso as umidades relativas médias dos blocos no momento do ensaio for superior ao especificado e havendo atendimento da resistência característica estimada dos blocos, o ensaio deve ser considerado. Se a resistência não for atendida, o ensaio deve ser desconsiderado. Porém se a umidade relativa média dos blocos, no momento do ensaio, for inferior ao especificado, o ensaio deve ser desconsiderado.

A área bruta do corpo de prova deve ser calculada como o valor médio das dimensões totais da seção de trabalho do corpo de prova, sem desconto das áreas dos furos ou reentrâncias.

Na Figura 46 são apresentadas algumas fotos da realização do ensaio.

Figura 46: Ensaio de resistência à compressão: a) Início da prensagem; b) Face frontal e esquerda; c) Face frontal e direita



Fonte: Autor (2020)

A classificação e avaliação da conformidade do resultado da amostra, de acordo com a classe do bloco, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2016).

### 3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de absorção de água e resistência à compressão foram avaliados estatisticamente segundo a Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey.

#### 3.7.1 ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA) é um conjunto de técnicas estatísticas que permite comparar três ou mais tratamentos (amostras) afirmando se existe ou não uma diferença significativa entre elas. A análise tem início com o estabelecimento de duas hipóteses iniciais:  $H_0$  (hipótese nula) que afirma a igualdade entre as médias ( $\mu_A = \mu_B = \mu_C$ ) e  $H_1$  (hipótese alternativa) que supõe a existência de ao menos uma diferença entre elas ( $\mu_A \neq \mu_B$  ou  $\mu_A \neq \mu_C$  ou  $\mu_B \neq \mu_C$ ). Todo o procedimento é realizado com base na hipótese nula. A aceitação ou rejeição de  $H_0$  depende do valor F obtido. Caso “F” seja maior que o “F crítico” a hipótese nula é rejeitada, se o contrário ocorrer, aceita-se  $H_0$ . O teste estatístico ANOVA realizado nesta pesquisa foi o de fator único ou “oneway”. Apenas uma única fonte de variação entre as amostras foi considerada. A significância adotada foi de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), ou seja, a análise foi realizada segundo uma confiança de 95% ( $1 - \alpha$ ). Para realização do ANOVA, contou-se com o auxílio do software Microsoft Excel, o qual forneceu os resultados tal como disposto na Tabela 11.

Tabela 11: Modelo de tabela do ANOVA do Excel

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos						
Dentro dos grupos						
Total						

Fonte: Autor (2020).

Onde:

SQ= Soma dos quadrados dos tratamentos;

gl = Graus de liberdade;

MQ = Média quadrática dos tratamentos;

F = Valor calculado segundo o teste;

valor-P = Maior valor de significância (se valor-P <  $\alpha$ , rejeita-se  $H_0$ );  
 F crítico = Valor de referência para a significância adotada (tabelado).

### 3.7.2 TESTE DE TUKEY

Ao se constatar diferença significativa no grupo de amostras avaliado, tornou-se necessário conhecer quais amostras diferiam entre si. Para isso, utilizou-se o Teste de Tukey, o qual consiste em um teste de hipóteses, assim como o ANOVA. Contudo, este avalia apenas duas amostras por vez. A hipótese nula e alternativa passam então a ser  $H_0$  ( $\mu_A = \mu_B$ ) e  $H_a$  ( $\mu_A \neq \mu_B$ ). O Teste de Tukey analisa as amostras aos pares, ou seja, de duas a duas. Foi realizado através do software estatístico Past, utilizando-se uma significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) e os resultados para cada combinação foram disponibilizados. Onde a célula aparece vermelha, significa que há variância nessa combinação.

Para a avaliação dos diferentes percentuais de substituição estudados nesta pesquisa foram realizadas 6 combinações. Estas podem ser melhor observadas na Figura 47.

Figura 47: Apresentação do Teste de Tukey

Tukey's pairwise comparisons: Q \ p(same)						
	A	B	C	D	E	F
A		0,8434	0,07951	0,6896	0,3218	0,0002435
B	1,667		0,5716	0,9997	0,9419	0,0001367
C	4,005	2,338		0,7444	0,9742	0,0001342
D	2,069	0,4016	1,937		0,9885	0,0001351
E	2,949	1,282	1,056	0,8802		0,0001343
F	7,554	9,221	11,56	9,622	10,5	

Fonte: Autor (2020).

Após a realização do Teste de Tukey em cada combinação, atribuiu-se as siglas EQ para aquelas onde as médias foram consideradas equivalentes ( $H_0$  aceita) e DS para as combinações onde diferenças significativas foram verificadas ( $H_0$  rejeitada).

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados e aglomerante, bem como os ensaios propostos nos blocos fabricados.

## 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

### 4.1.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

As curvas granulométricas foram traçadas a partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os limites aceitáveis e limites ótimos de utilização propostos pela NBR 7211 (ABNT,2009). A seguir são apresentados os resultados de cada material.

#### a) Areia natural

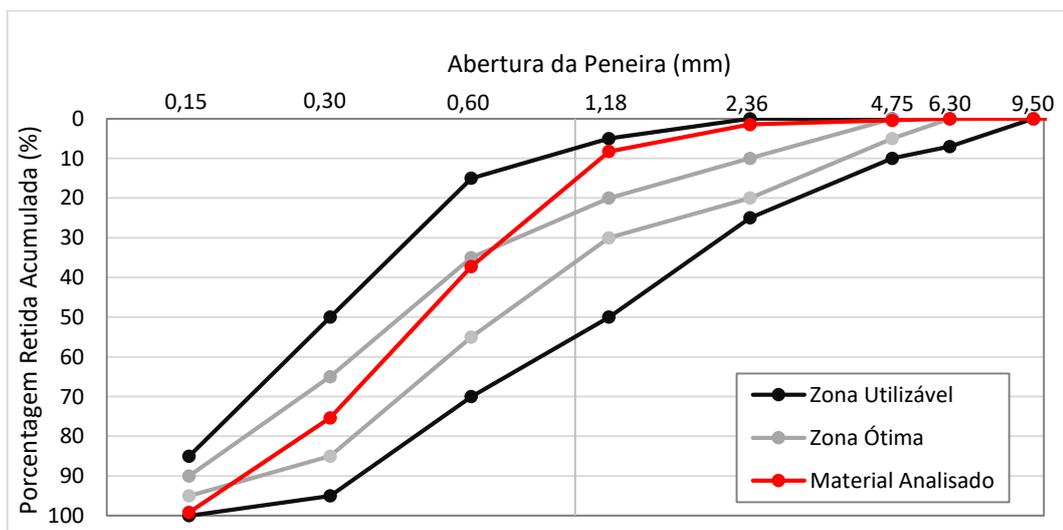
A curva granulométrica e resultados do ensaio apresentados na Tabela 12 e Figura 48.

Tabela 12: Granulometria areia natural

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	0	0
2,36	1	1
1,18	7	8
0,60	29	37
0,30	38	75
0,15	24	99
Fundo	1	100
D. máx.	2,36	
Mod. fin.	2,22	

Fonte: Autor (2020)

Figura 48: Curva granulométrica areia natural



Fonte: Autor (2020).

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), o módulo de finura da zona ótima para agregado miúdo varia de 2,20 a 2,90. Desse modo, a areia utilizada na pesquisa atende aos requisitos para sua utilização em concreto.

### **b) Pó de pedra**

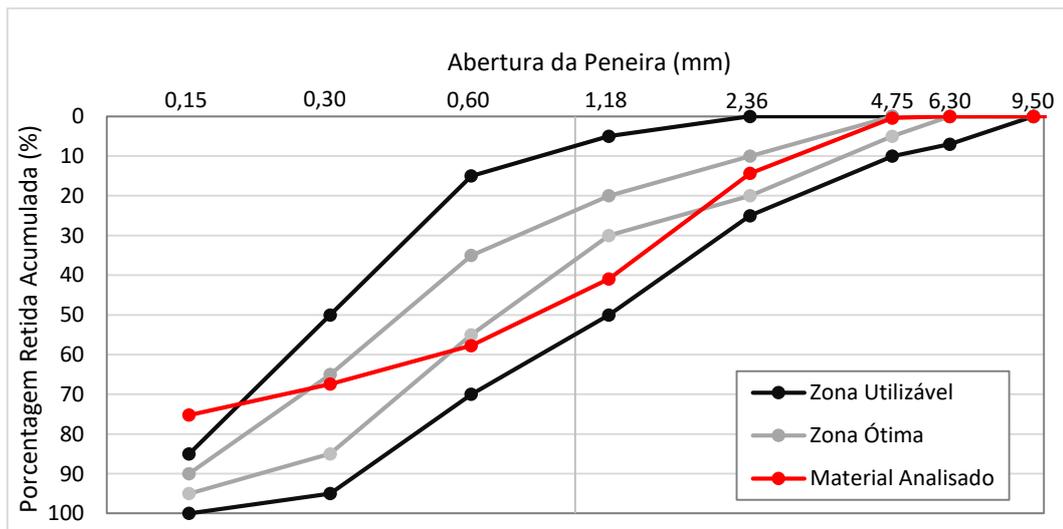
A curva granulométrica e resultados do ensaio são apresentados na Tabela 13 e Figura 49.

Tabela 13: Granulometria pó de pedra

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
4,75	0	0
2,36	14	14
1,18	27	41
0,60	17	58
0,30	10	67
0,15	8	75
Fundo	25	100
D. máx.	4,75	
Mod. Fin.	2,22	

Fonte: Autor (2020)

Figura 49: Curva granulométrica pó de pedra



Fonte: Autor (2020)

O pó de pedra utilizado também atende aos requisitos da NBR 7211 (ABNT, 2009) onde seu módulo de finura fica na zona ótima de utilização.

### c) Pedrisco

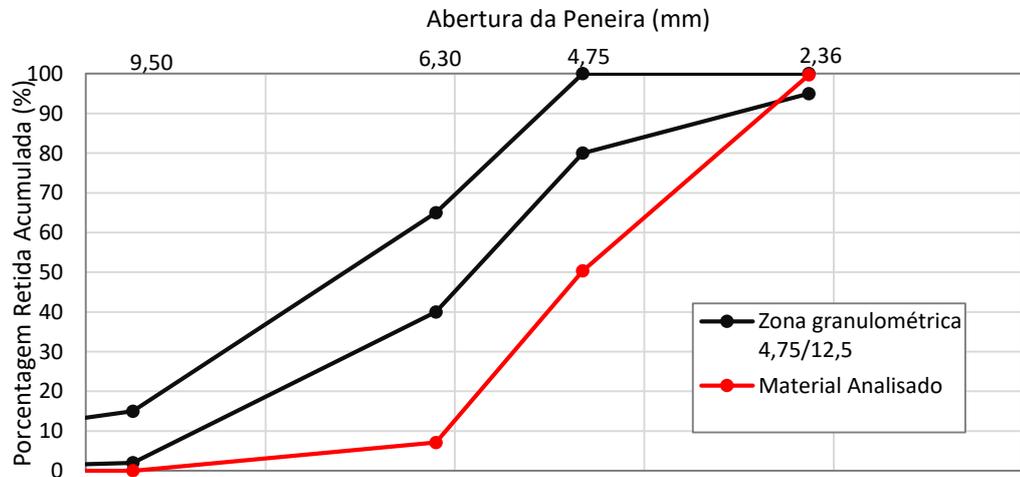
A curva granulométrica e resultados do ensaio apresentados na Tabela 14 e Figura 50.

Tabela 14: Granulometria pedrisco

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
12,50	0	0
9,50	0	0
6,30	7	7
4,75	43	50
2,36	49	100
1,18	0	100
Fundo	0	100
D. máx.	6,30	
Mod. fin.	5,50	

Fonte: Autor (2020)

Figura 50: Curva granulométrica pedrisco



Fonte: Autor (2020)

A curva granulométrica do pedrisco ficou abaixo do limite da faixa 4,75/12,5, porém, é empregado em blocos de concreto pois de acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016) o diâmetro máximo do agregado utilizado, não deve ser maior que a metade da menor dimensão de parede do bloco, ou seja, para bloco sem função estrutural, com parede de 18 mm, o diâmetro máximo do agregado utilizado, deve ser 9 mm. Comercialmente tem-se pedrisco 6,3 e 9,5 mm, portanto o pedrisco utilizado foi de 6,3 mm de diâmetro máximo.

**d) Escória de aciaria BSSF**

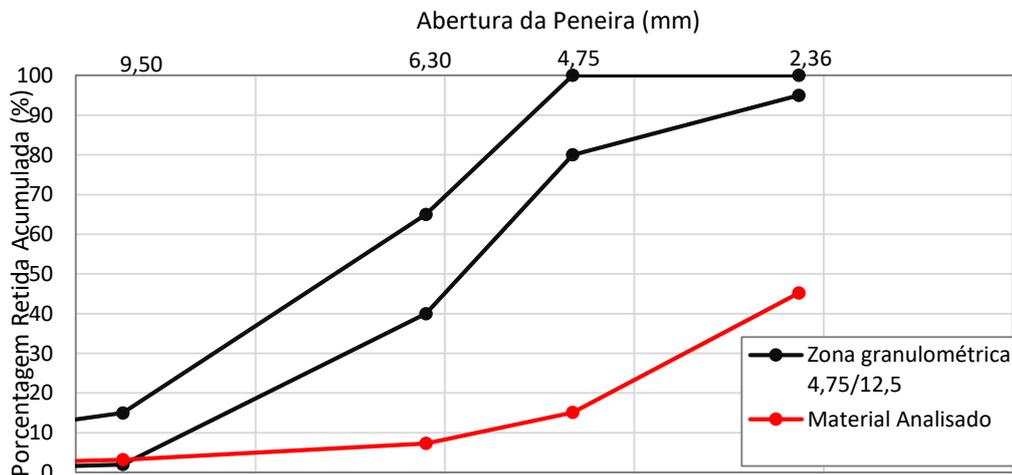
A curva granulométrica e resultados do ensaio apresentados na Tabela 15 e Figura 51.

Tabela 15: Granulometria escória de aciaria BSSF

Abertura da peneira (mm)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
12,50	1	1
9,50	2	3
6,30	4	7
4,75	8	15
2,36	30	45
1,18	32	77
0,60	13	91
0,30	7	97
0,15	2	99
Fundo	1	100
D. máx.	9,50	
Mod. fin.	4,35	

Fonte: Autor (2020)

Figura 51: Curva granulométrica escória de aciaria BSSF



Fonte: Autor (2020)

O ensaio de granulometria revelou que a escória de aciaria apresenta uma curva granulométrica bem distribuída, porém fora dos limites da zona granulométrica de 4,75/12,5 de agredado graúdo.

#### 4.1.2 **DEMAIS PROPRIEDADES**

Os resultados obtidos nos ensaios de umidade total, massa unitária, absorção de água, massa específica e teor de material pulverulento para os agregados naturais e artificial, são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Propriedades dos agregados naturais e artificial

<b>PROPRIEDADE AVALIADA</b>		<b>AREIA MÉDIA</b>	<b>PÓ DE PEDRA</b>	<b>PEDRISCO</b>	<b>ESCÓRIA DE ACIARIA</b>
Teor de umidade total (%)		3,90	2,11	0,91	1,75
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Estado solto	1480,18	1809,41	1618,14	2079,31
	Estado compactado	1576,61	1960,57	1687,24	2128,02
Volume de vazios (%)	Estado solto	42,18	29,46	47,29	38,84
	Estado compactado	38,41	23,56	45,04	37,41
Absorção de água (%)		6,03	4,17	1,70	2,58
Massa específica aparente no estado seco (g/cm <sup>3</sup> )		2,62	2,65	3,02	3,41
Massa específica na condição SSS (g/cm <sup>3</sup> )		2,64	2,77	2,92	3,50
Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )		2,66	3,01	2,87	3,74
Teor de material pulverulento (%)		0,11	21,25	-	1,74

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) o limite de material pulverulento para agregados miúdos deve ser de até 5%, para concretos protegidos do desgaste superficial, e para agregados graúdos de até 1%. Com os ensaios já realizados, observa-se que a areia utilizada atende aos requisitos normativos. Já a escória de aciaria, supera o limite com teor de 1,74%, ou seja, excede em 0,74% do limite normativo.

#### 4.1.3 **ANÁLISES QUÍMICA E MINERALÓGICA NA ESCÓRIA**

Os resultados da análise química e das determinações na escória são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Resultado dos ensaios químicos na escória

Determinações	Resultados, em %
Perda ao fogo (PF)	-0,5 Nota 1
Óxido de cálcio (CaO)	37,3
Ferro total (Fe)	27,2
Óxido de ferro II (FeO)	21,0
Óxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Nota 2	14,6
Anidrido silícico (SiO <sub>2</sub> )	13,2
Óxido de magnésio (MgO)	6,6
Óxido de manganês (MnO)	3,5
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,8
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,4
Óxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,4
Óxido de titânio (TiO <sub>2</sub> )	0,6
Ferro metálico (Fe <sub>M</sub> )	0,6
Óxido de vanádio (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,2
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,1
Óxido de cromo (Cr <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,1
Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> )	0,1
Óxido de estrôncio (SrO)	< 0,1
Óxido de cobre (CuO)	< 0,1

Nota 1: O valor de perda ao fogo negativo, possivelmente devido a fenômenos de óxido-redução que ocorrem no ensaio de perda ao fogo, inerentes ao material ensaiado.

Nota 2: A determinação do óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) foi obtida por estequiometria com a seguinte equação:  

$$Fe_2O_3 = ((\text{Ferro total (Fe)} - (\text{Óxido de ferro II (FeO)} \times 0,78) - \text{Ferro metálico (Fe}_M)) \times 1,43.$$

Fonte: IPT (2020)

Com o resultado da análise química, observa-se que mais de um quarto da escória é composta por ferro total, que contribui para que a escória de aciaria seja mais densa que os demais agregados.

Na Tabela 18, são apresentados os resultados da análise mineralógica qualitativa por difração de raios X.

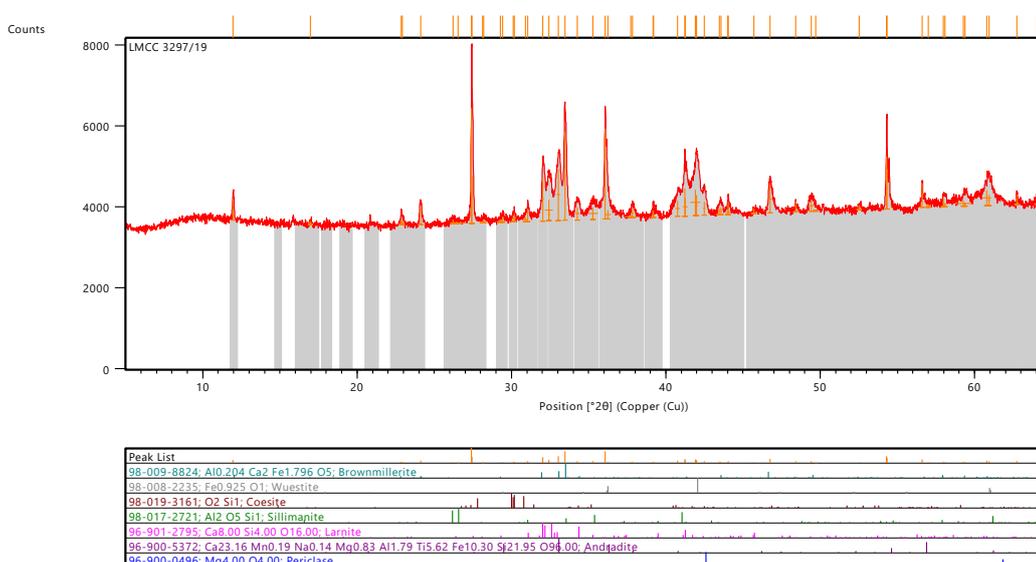
Tabela 18: Resultado da análise por DRX da escória

Fórmula molecular	Fichas de estruturas (código)	Compostos ou fases mineralógicas
$Al_{0,204}Ca_2Fe_{1,796}O_5$	98-009-8824	Brownmillerita
$Fe_{0,925}O$	98-008-2235	Wuestita
$SiO_2$	98-019-3161	Coesita
$Al_2SiO_5$	98-017-2721	Sillimanita
$Ca_8Si_4O_{16}$	96-901-2795	Larnita
$Ca_{23,16}Mn_{0,19}Na_{0,14}Mg_{0,83}Al_{1,79}Ti_{5,62}$ $Fe_{10,30}Si_{21,95}O_{96}$	96-900-5372	Andradita
$MgO$	96-900-0496	Periclásio

Fonte: IPT (2020)

Na Figura 52, é apresentado o difratograma do ensaio DRX.

Figura 52: Difratograma de raios X da escória



Fonte: IPT (2020)

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO AGLOMERANTE

Foram realizados ensaios físicos e mecânicos com o aglomerante cimento Portland CP V ARI, utilizado na pesquisa. Na Tabela 19 são apresentados os ensaios físicos.

Tabela 19: Ensaio físicos aglomerante

Identificação	Ensaio	Resultados
CP V ARI	Índice de finura por meio de peneira 75µm (%)	1,1
	Pasta de consistência normal (% massa de cimento)	28,5
	Início de pega	02h20min
	Fim de pega	03h15min
	Expansibilidade a quente (mm)	0,5
	Expansibilidade a frio (mm)	1,0
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,09
	Finura pelo método de permeabilidade Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5480

Fonte: IPT (2020)

Os resultados dos ensaios mecânicos são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Ensaio mecânicos aglomerante

Identificação	Resultados de resistência à compressão (MPa) (NBR 7215)						
	Idades (dias)	Corpo de Prova n.º				Média	DRM (%)
		1	2	3	4		
CP V ARI	1	26,0	25,3	24,6	25,9	25,5	3,5
	3	34,7	35,0	35,9	37,1	35,7	3,9
	7	42,9	38,5	39,7	40,7	40,5	5,9
	28	48,4	48,0	47,3	48,6	48,1	1,7

Fonte: IPT (2020)

O cimento ensaiado apresenta bons resultados em relação aos parâmetros previstos na NBR 16697 (ABNT, 2018) de requisitos para cimento Portland.

### 4.3 ENSAIOS DOS BLOCOS

Os ensaios dos blocos foram realizados com 28 dias da data de fabricação e os resultados verificados com os requisitos da NBR 6136 (ABNT, 2016), de acordo com os métodos de ensaio da NBR 12118 (ABNT, 2013). Os ensaios realizados foram: análise dimensional; absorção e área líquida; e resistência à compressão axial. Foi realizada análise estatística ANOVA para observar se existia variância entre os resultados e Teste de Tukey para identificar quais resultados tinham diferença significativa.

#### 4.3.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

Os resultados do ensaio de análise dimensional foram organizados na Tabela 21.

Tabela 21: Resultado análise dimensional

Tipo de bloco	CP	Dimensões (mm)			Eeq (mm/m)	Ab (mm <sup>2</sup> )	ei (mm)	Dimensões parede (mm)		Dimensões furos (mm)	
		Largura	Altura	Comprimento				Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
BE	1	143	190	393	202	56097	24	24	26	162	94
	2	143	190	393	201	56042	24	24	26	163	94
	3	143	190	393	188	56116	25	25	25	162	94
	4	142	187	394	188	55694	25	25	25	159	92
	5	142	188	393	187	55776	25	25	25	160	93
	6	142	187	393	184	55809	24	24	24	159	94
BSE	1	142	190	393	199	55771	25	25	26	161	94
	2	143	190	393	187	56093	25	25	25	161	94
	3	141	189	393	188	55588	25	25	25	162	94
	4	141	188	394	182	55547	24	24	24	160	92
	5	141	188	393	183	55302	24	24	24	160	93
	6	142	188	393	188	55713	24	24	25	160	94
BS 20	1	140	190	394	192	55109	24	24	25	160	94
	2	140	190	393	191	55250	24	24	25	160	94
	3	141	190	393	196	55502	25	25	26	161	93
	4	142	188	394	187	55915	25	25	25	160	94
	5	140	188	393	184	55140	24	24	24	160	94
	6	141	188	393	186	55573	24	24	24	160	93
BS 40	1	142	188	394	189	56057	24	24	25	160	94
	2	143	190	394	186	56349	25	25	25	161	94
	3	142	189	393	188	55932	24	24	25	158	93
	4	142	189	394	186	55928	24	24	24	159	93
	5	142	187	393	179	55873	24	24	23	160	95
	6	143	187	393	184	56082	24	24	24	158	94
BS 60	1	141	189	394	187	55601	24	24	25	161	94
	2	142	189	393	195	55933	24	24	26	161	94
	3	141	189	393	195	55661	24	24	26	160	93
	4	141	189	394	188	55449	24	24	25	159	94
	5	142	189	393	191	55836	25	25	25	159	94
	6	141	188	393	186	55330	24	24	24	161	93
BS 80	1	142	188	394	193	55932	25	25	25	160	92
	2	141	189	394	187	55651	23	23	25	161	94
	3	143	189	393	181	56076	25	25	24	161	93
	4	142	190	394	184	55873	25	25	24	160	93
	5	141	189	393	183	55420	24	24	24	159	93
	6	143	188	393	184	56247	25	25	24	160	94

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), as tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos são de  $\pm 2$  mm para largura e  $\pm 3$  mm para altura e comprimento. Portanto os blocos ensaiados atendem aos requisitos normativos.

Em relação a espessura da parede, tanto longitudinal quanto transversal tem tolerância de  $- 1,0$  mm. Os blocos ensaiados apresentam em média, espessura de parede de 24 mm, sendo que para o bloco sem função estrutural classe C, a espessura de parede tanto transversal como longitudinal, é mínima de 18 mm. Portanto atende ao requisito da norma e supera a espessura mínima em 6 mm na média.

Quanto a espessura equivalente, a referida norma apresenta como valor mínimo 135 mm/m, e os blocos ensaiados apresentam em média 188 mm/m, portanto superando o mínimo exigido.

#### 4.3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÁREA LÍQUIDA

Os resultados dos ensaios de absorção e área líquida, estão apresentado na Tabela 22.

Tabela 22: Resultado absorção e área líquida com 28 dias

Tipo de bloco	Absorção	Absorção média am (%)	Desvio padrão %	Área líquida Aliq (mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (mm <sup>2</sup> )
	a (%)				
BE	6,2	5,8	0,4	28187,0	260,8
	5,5				
	5,7				
BSE	6,4	6,3	0,2	28245,1	473,6
	6,4				
	6,1				
BS 20	5,7	5,5	0,5	28255,4	425,5
	5,8				
	4,9				
BS 40	5,7	5,6	0,1	28027,6	190,8
	5,6				
	5,5				
BS 60	5,0	5,1	0,1	27588,2	285,1
	5,2				
	5,1				
BS 80	4,8	4,7	0,1	27893,7	470,9
	4,8				
	4,6				

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016), para blocos sem função estrutural classe C, a absorção deve ser individualmente menor que 11% e em média menor que 10%. Portanto os resultados de absorção encontrados satisfazem os requisitos normativos.

Foi realizada análise estatística dos resultados do ensaio de absorção de água para identificar se houve variância entre eles. Na Tabela 23 é possível observar a ANOVA de fator único.

Tabela 23: ANOVA para absorção de água

ANOVA: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
BE	3	17,45063	5,816877	0,125729
BSE	3	18,86234	6,287447	0,037122
BS 20	3	16,41205	5,470684	0,279798
BS 40	3	16,80711	5,602372	0,005124
BS 60	3	15,32663	5,108878	0,006453
BS 80	3	14,23393	4,744643	0,013134

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,365615	5	0,873123	11,20924	0,000345	3,105875
Dentro dos grupos	0,934718	12	0,077893			
Total	5,300332	17				

Fonte: Autor (2020)

O “F” encontrado é maior que “F crítico”, portanto foi demonstrado que existe variância entre os resultados. Para identificar quais valores são equivalentes e quais apresentam diferença significativa entre si, foi realizado o Teste de Tukey.

De acordo com o Teste de Tukey, as células coloridas identificam quais resultados apresentam diferença significativa. Para melhor compreensão, foi elaborada a Tabela 24, onde “EQ” significa que os resultados são equivalente e “DS” significa que os resultados apresentam diferença significativa entre si.

Tabela 24: Resultado de equivalência e diferença significativa para absorção de água

	BE	BSE	BS 20	BS 40	BS 60	BS 80
BE		EQ	EQ	EQ	EQ	DS
BSE			DS	EQ	DS	DS
BS 20				EQ	EQ	EQ
BS 40					EQ	DS
BS 60						EQ
BS 80						

Fonte: Autor (2020)

### 4.3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados para os ensaios de resistência à compressão estão organizados na Tabela 25.

Tabela 25: Resultado de resistência à compressão aos 28 dias

Corpo de prova n°	Resistência à compressão (MPa)					
	BE	BSE	BS 20	BS 40	BS 60	BS 80
1	5,27	5,60	5,99	4,63	6,20	3,35
2	5,89	6,37	7,28	6,14	6,81	3,79
3	6,05	6,60	7,34	6,34	6,96	3,29
4	6,19	6,65	7,36	7,36	7,13	4,30
5	6,60	6,95	7,53	7,75	7,21	3,89
6	6,60	7,46	8,38	8,14	7,65	4,25
<b>Média amostral</b>	6,10	6,61	7,31	6,73	6,99	3,81
<b>Desvio padrão</b>	0,50	0,62	0,77	1,29	0,48	0,43
<b>fbk (MPa)*</b>	<b>5,11</b>	<b>5,37</b>	<b>5,33</b>	<b>5,93</b>	<b>6,05</b>	<b>3,85</b>

\*Resistência característica à compressão

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a NBR 6136 (ABNT, 2016) para o bloco estudado, a resistência à compressão axial característica dos blocos de concreto sem função estrutural, classe C, deve ser maior ou igual a 3 MPa aos 28 dias, portanto todas as substituições atendem a esse requisito normativo.

Foi realizada análise estatística dos resultados do ensaio de resistência à compressão para identificar se houve variância entre eles. Na Tabela 26 é possível observar a ANOVA de fator único.

Tabela 26: ANOVA para resistência à compressão

ANOVA: fator único

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
5,27	5	31,33	6,266	0,10423
5,6	5	34,03	6,806	0,17633
5,99	5	37,89	7,578	0,20962
4,63	5	35,73	7,146	0,76508
6,2	5	35,76	7,152	0,10142
3,35	5	19,52	3,904	0,16668

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	44,44231	5	8,888461	35,00864	2,87E-10	2,620654
Dentro dos grupos	6,09344	24	0,253893			
Total	50,53575	29				

Fonte: Autor (2020)

De acordo com a análise estatística ANOVA, foi constatada diferença significativa entre as médias das resistências à compressão para os diferentes percentuais de substituição, uma vez que o valor de “F” obtido foi maior que “F crítico”. Para identificar quais valores são equivalentes e quais apresentam diferença significativa entre si, foi realizado o Teste de Tukey.

De acordo com o Teste de Tukey, foram encontrados resultados que apresentam diferença significativa entre si. Na Tabela 27 é melhor ilustrado os pontos de equivalência e de diferenças significativas.

Tabela 27: Resultado de equivalência e diferença significativa para resistência à compressão

	<b>BE</b>	<b>BSE</b>	<b>BS 20</b>	<b>BS 40</b>	<b>BS 60</b>	<b>BS 80</b>
<b>BE</b>		EQ	EQ	EQ	EQ	<b>DS</b>
<b>BSE</b>			EQ	EQ	EQ	<b>DS</b>
<b>BS 20</b>				EQ	EQ	<b>DS</b>
<b>BS 40</b>					EQ	<b>DS</b>
<b>BS 60</b>						<b>DS</b>
<b>BS 80</b>						

EQ - Equivalente

**DS** - Diferença significativa

Fonte: Autor (2020)

#### 4.4 MASSA DOS BLOCOS

As massas dos blocos, secos em estufa, foram aferidas, para comparativo do ganho de massa dos blocos em razão das substituições de agregados naturais por artificial, uma vez que a escória de aciaria é mais densa que os demais agregados naturais utilizados na fabricação do bloco de concreto. Há uma relação direta no percentual de substituição com o ganho de massa dos blocos. Na Tabela 28 os dados são apresentados.

Tabela 28: Massa dos blocos

<b>Tipo de bloco</b>	<b>Massa seca média (g)</b>	<b>Desvio padrão (g)</b>
BE	12255	97
BSE	12550	189
BS 20	13270	188
BS 40	13504	110
BS 60	13678	33
BS 80	13683	209

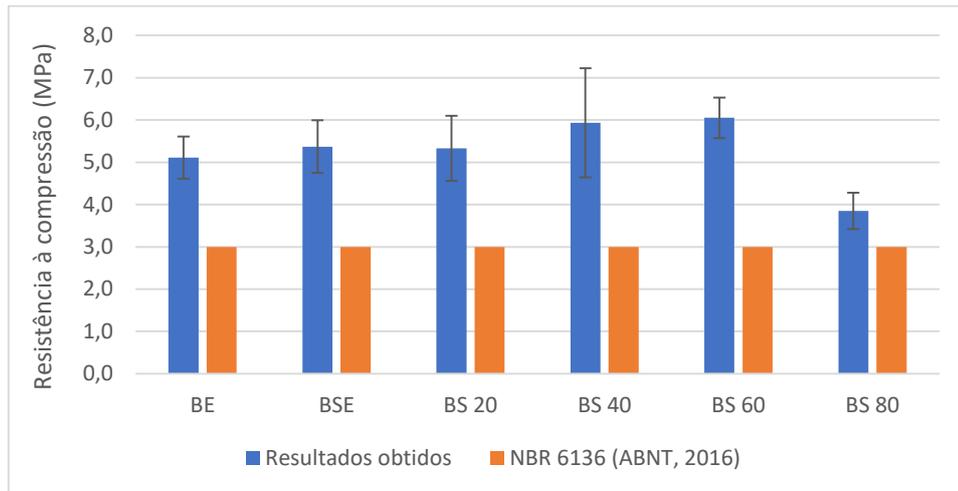
Fonte: Autor (2020)

#### 4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a viabilidade técnica de blocos de concreto sem função estrutural, fabricados com substituição parcial de agregados naturais por artificial, proveniente de escória de aciaria BSSF. Os resultados foram satisfatórios, uma vez que mesmo na porcentagem máxima possível de substituição, ou seja 80%, os blocos atenderam aos requisitos normativos.

Em relação a resistência à compressão os resultados foram superiores o que preconiza a norma, ou seja,  $\geq 3,0$  MPa. Vale destacar que na substituição de 60%, se obteve o melhor resultado, sendo 12,7% maior que no bloco BSE (referência), fabricado com agregados naturais. Para o BS40, foi obtido um desvio padrão elevado, consequência dos resultados isolados de 4,63 MPa para menor resistência e 8,14 MPa para maior. Na Figura 53, é possível observar o explanado.

Figura 53: Resultados obtidos x NBR 6136 (ABNT, 2016)

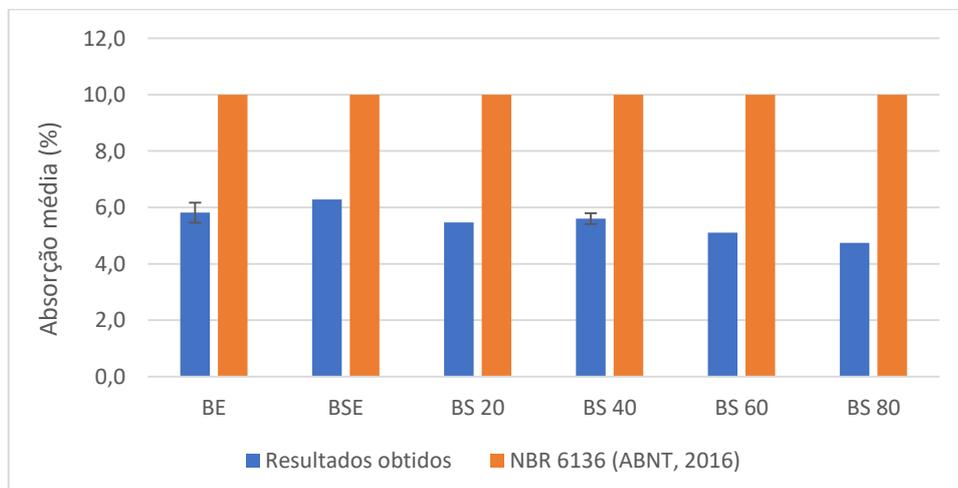


Fonte: Autor (2020)

Na análise estatística realizada para resistência à compressão, através do método ANOVA, foi comprovado que há variância nos resultados. Portanto, foi realizado o Teste de Tukey para identificar a variação. Os blocos com substituição de 80%, apresentaram diferença significativa comparado aos demais. Todos os outros demonstraram resultados equivalentes entre si.

Em relação a absorção de água, todas as substituições também atenderam aos requisitos normativos, ou seja, absorção individual  $\leq 11\%$  e absorção média  $\leq 10\%$ , destacando-se o bloco de maior resistência BS60, que obteve absorção 19% menor que o bloco referência BSE e 51% da absorção média permitida por norma. Na Figura 54 observa-se a comparação dos resultados obtidos com os requisitos normativos. O desvio padrão dos blocos BSE, BS20, BS60 e BS80 foram muito baixos de forma não ser possível a visualização no gráfico.

Figura 54: Resultados obtidos x NBR 6136 (ABNT, 2016)

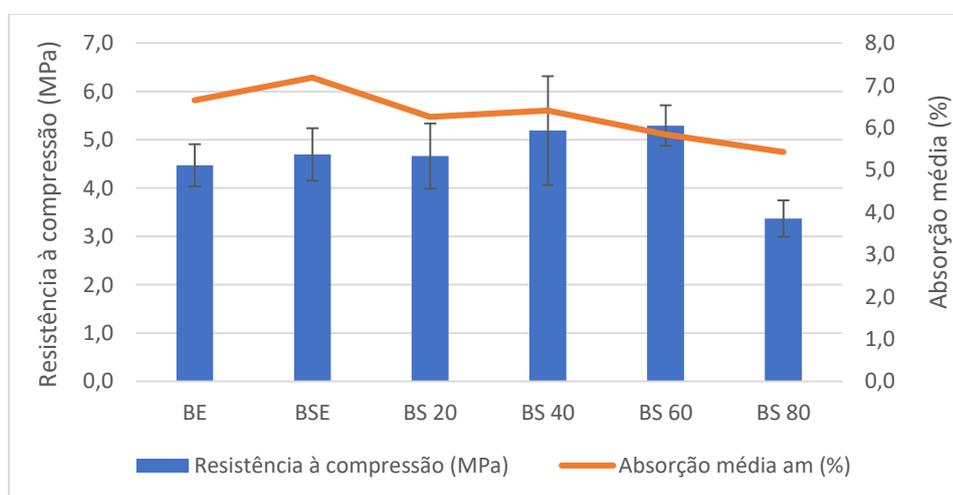


Fonte: Autor (2020)

Na análise estatística realizada para absorção de água, através do método ANOVA, foi comprovado que há variância nos resultados. Portanto, foi realizado o Teste de Tukey para identificar a variação. Comparados aos pares, os blocos que apresentaram diferença significativa, foram: BE e BS80; BSE e BS20; BSE e BS60; BSE e BS80; BS40 e BS80. Todas as demais combinações apresentaram equivalência nos resultados.

Analisando a resistência à compressão juntamente com a absorção de água, observa-se como o ganho de resistência é inversamente proporcional a absorção. Houve o aumento da resistência até a substituição de 60%, nível mais alto, e daí por diante uma queda na resistência do bloco. Na Figura 55 os resultados em conjunto são apresentados

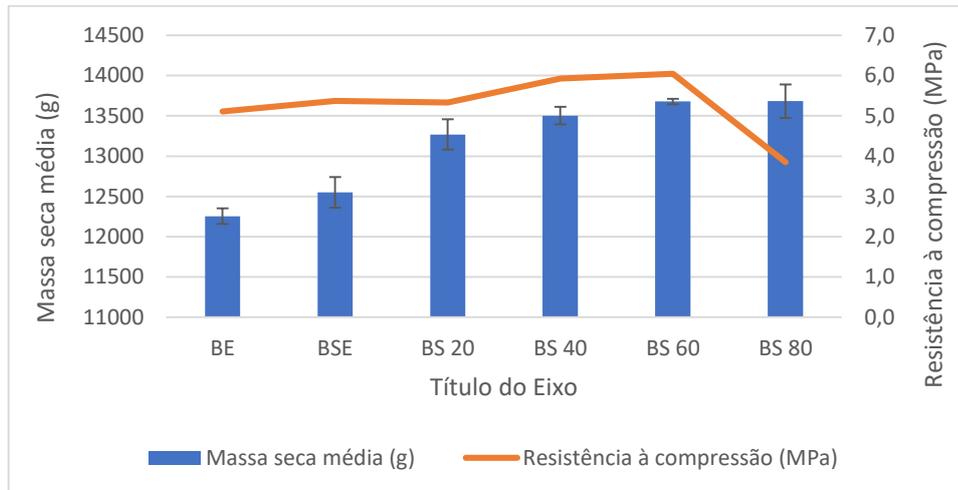
Figura 55: Gráfico resistência à compressão x absorção de água



Fonte: Autor (2020)

No comparativo de ganho de massa e resistência à compressão, pode-se observar o ganho de massa dos blocos conforme há o aumento do teor de substituição de agregado natural por artificial. A resistência à compressão também aumenta em relação ao teor de substituição até o máximo de 60%. Para a substituição de 80%, nota-se uma queda brusca na resistência à compressão, mesmo o bloco tendo maior massa em relação aos demais. A principal causa dessa queda na resistência se dá pelo fato do bloco BS80 apresentar problemas no empacotamento, principalmente pela falta de finos, que não proporciona ao bloco boa coesão e intertravamento das partículas, em relação aos demais blocos. Na Figura 56 observa-se a correlação da massa dos blocos com a resistência à compressão.

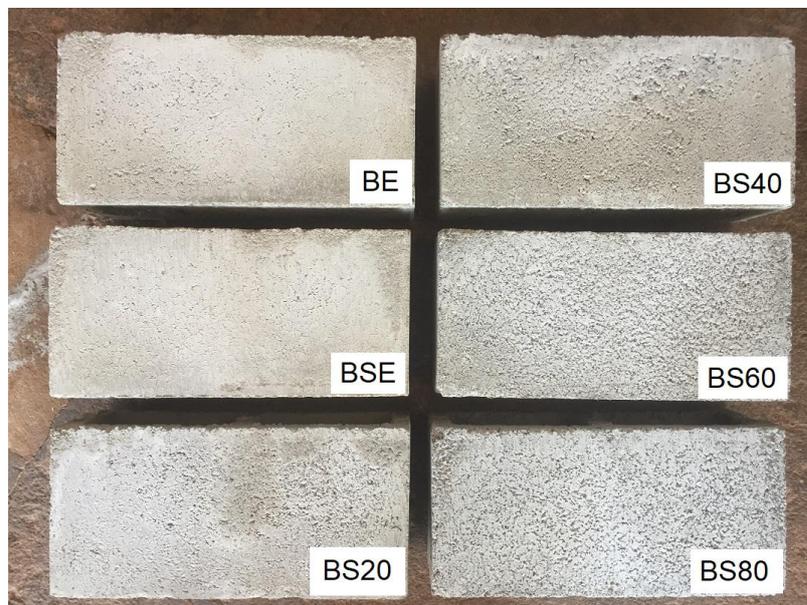
Figura 56: Gráfico massa dos blocos x resistência à compressão



Fonte: Autor (2020)

No momento da fabricação, o bloco BS80 se manteve coeso, porém menos que os demais, apresentando superfície bastante rugosa e menor intertravamento das partículas. Na Figura 57 é possível observar a diferença no acabamento dos blocos, sendo o BSE mais liso e os com substituição, mais rugosos.

Figura 57: Acabamento dos blocos



Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados são semelhantes aos obtidos por SANTOS *et al.* (2014) que produziu bloco de concreto com substituição total de agregados naturais por artificiais, proveniente de escória de aciaria elétrica. Em seu estudo o bloco de escória apresentou

absorção de água de 4,1% e resistência à compressão de 13,08 MPa, enquanto que o bloco natural apontou absorção de água de 7,9% e resistência de 11,13 MPa, ambos aos 28 dias. Portanto, o bloco com escória apresentou menor absorção de água e maior resistência à compressão, assim como os blocos fabricados na presente pesquisa.

## 5. CONCLUSÕES

O estado da arte relacionado às pesquisas de utilização de escória de aciaria estabilizada para produção de concretos em geral, apresentado neste trabalho, mostra que ainda existem lacunas de conhecimento, inclusive com poucos trabalhos relacionados a blocos de concreto para alvenaria com escória de aciaria. A partir do presente estudo, as *questões de pesquisa* foram respondidas.

*A fabricação de blocos de concreto com utilização de agregado artificial, a partir de escória de aciaria BSSF, atende aos requisitos previstos na NBR 6136 (ABNT, 2016) quanto à resistência à compressão, análise dimensional, absorção e área líquida?*

Sim, os blocos fabricados com substituições parciais de agregado natural por artificial, proveniente de escória de aciaria BSSF, atendem aos requisitos normativos, sendo que na substituição de 60%, supera em 102% a resistência à compressão mínima exigida em norma.

Destaca-se também as demais conclusões:

- A produção de bloco de concreto, sem função estrutural, com escória de aciaria BSSF se mostrou viável tecnicamente;
- Os teores de substituição de agregados naturais por artificiais (escória de aciaria BSSF) foram determinados e os melhores resultados para absorção de água e resistência à compressão ocorreu com teor de substituição de 60%;
- O trabalho de gestão dos processos de fabricação dos blocos de concreto foi importante para entender como o bloco é fabricado. Com esse entendimento, é possível sugerir soluções para o ganho de produtividade, redução de desperdícios e melhoria na eficiência da fábrica como um todo;
- Os blocos com escória não apresentaram diferenças dimensionais dos blocos naturais, dentro das condições estudadas e sem avaliação de durabilidade;

- Embora a escória seja mais densa que os agregados naturais, o bloco que apresentou melhor desempenho (BS60), é 9% mais denso que o bloco referência, porém 12,7% mais resistente;
- Os blocos de concreto, fabricados com escória de aciaria BSSF no teor de até 80% em substituição aos agregados naturais, atenderam aos requisitos normativos para blocos sem função estrutural.

A aparência dos blocos com escória, não foi objeto do estudo, porém com ajuste do traço, é possível melhorar o acabamento, ter ganho de resistência, redução da absorção, e com isso, uma possível economia de cimento por m<sup>3</sup> de concreto.

Apesar dos resultados obtidos, na idade estudada, mostrarem que a aplicação da escória de aciaria estabilizada como substituta de parte do agregado natural em blocos de concreto é promissora, cabe comentar que é necessário avançar no estudo, envolvendo a avaliação da durabilidade e desempenho dos blocos de concreto, de forma a possibilitar a produção de forma comercial com a utilização desse agregado artificial, contribuindo, assim, para preservação do meio ambiente através da redução de um passivo ambiental nos pátios de estocagem de resíduos e menor exploração de recursos naturais.

## **5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Como proposta de continuidade do estudo desenvolvido, afim de abordar alguns pontos não estudados nesse trabalho, sugere-se:

- Estudo da durabilidade e desempenho dos blocos produzidos com escória de aciaria;
- Análise econômica para produção de blocos de concreto com escória de aciaria, incluindo viabilidade financeira entre diminuição do custo na produção versus aumento de custo na entrega (frete), uma vez que o bloco com escória apresenta maior densidade em relação ao bloco apenas com agregados naturais;
- Ajuste do empacotamento com modelos matemáticos, afim de solucionar o problema da falta de finos, para melhorar o acabamento e resistência à compressão dos blocos com altos teores de substituição de escória;
- Ajuste de traço do concreto, visando a economia de cimento, uma vez que a resistência à compressão do bloco com 60% de agregado artificial apresentou resistência bem acima da exigida na norma.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN STANDARD OF TESTING MATERIALS. **ASTM E246:2010**. Métodos de teste padrão para determinação de ferro em minérios de ferro e materiais relacionados por titrimetria de dicromato. West Conshohocken, PA, 2010, 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 11-2:2012**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria. Rio de Janeiro, 2012. 17p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 13:2012 (Errata 1:2013)**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012, 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 15:2012**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012, 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 16:2012**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012, 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18:2012**. Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012, 4p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 20:2012**. Cimento Portland e suas matérias-primas – Análise química – Determinação de dióxido de carbono por gasometria. Rio de Janeiro, 2012, 15p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 22:2012**. Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012, 18p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30:2016**. Materiais de referência - Termos e definições selecionados. Rio de Janeiro, 2016, 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45:2006**. Agregados – Determinação de massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46:2003**. Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003, 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52:2009**. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009, 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53:2009**. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009, 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248:2003**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 13p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136:2016**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:2009**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 12p.

\_\_\_\_\_**NBR 7215:2019.** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019, 12p.

\_\_\_\_\_**NBR 10004:2004.** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

\_\_\_\_\_**NBR 12118:2013.** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 14p.

\_\_\_\_\_**NBR 13810:1997.** Água - Determinação de metais - Método de espectrometria de absorção atômica por chama. Rio de Janeiro, 1997, 4p.

\_\_\_\_\_**NBR 14656:2001 (Confirmada em 2019).** Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001, 6p.

\_\_\_\_\_**NBR 16697:2018.** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12p.

AMARAL, L.; VÁSQUEZ E. Uso de escórias de aciaria de forno elétrico como agregados para concreto. In: **V Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**. IBRACON, São Paulo. Set. 2002. 247-256.

ANASTASIOU, E.; GEORGIADIS, K.; STEFANIDOU, M. Utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. In: **Construction and Building Materials 50**, 2014, 154–161.

ANASTASIOU, E.; LIAPIS, A.; PAPACHRISTOFOROU, M. Life Cycle Assessment of Concrete Products for Special Applications Containing EAF Slag. In: **Procedia Environmental Sciences 38**, 2017, 469–476.

ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. In: **Concreto, Ciência e Tecnologia**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Editor Geraldo C. Isaia, v. 2. 1731-1767.

BAALAMURUGAN, J.; GANESH KUMAR, V.; CHANDRASEKARAN, S.; BALASUNDAR, S.; VENKATRAMAN, B.; PADMAPRIYA, R.; BUPESH, V. K. Utilização de escória de aço por fornalha de indução em concreto como agregado graúdo para blindagem de radiação gama. In: **Jornal de Materiais Perigosos**. Ed. 369. p. 561-568. 2019.

BALTAZAR, R. P. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação**. 2001. 93 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2001.

CARDOSO A. V. M.; DIAS, F. M. A utilização de escória de aciaria para manufatura de blocos de pavimentação. In: **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Cuiabá, MT, Brasil, 2014.

CHOTOLI, F. F. **Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio: estudo em escala laboratorial**. 2006. 170p. (Dissertação) Mestrado Profissional em Habitação: Planejamento e Tecnologia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, Brasil.

DIAS, Diogo Lopes. **Produção do ferro gusa**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/producao-ferro-gusa.htm>. Acesso em 15 de março de 2020.

ENERGY, 2015. **Conservação de energia e proteção ambiental**. Companhia de Engenharia e Tecnologia da Baosteel Ltda. Disponível em: [http://bsee.baosteel.com/english/tech5\\_6.htm](http://bsee.baosteel.com/english/tech5_6.htm). Acesso em: 15 de maio de 2019.

FARIA, R. A. F. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas e da durabilidade de concretos com escória de aciaria elétrica (EAF) como agregado graúdo**. 2007. 146 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

FERNANDES, I. D. **Blocos e Pavers Produção e Controle de Qualidade**. 6 ed. Ribeirão Preto – SP. 2015. 200 p.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade do uso de escórias de aciaria como adição ao concreto**. Porto Alegre. 2001. 170 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

GUMIERI, A. G. **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos**. 2002. 226 p. Tese (doutorado) – Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

GUO, Y.; XIE, J.; ZHENG, W.; LI, J. Effects of steel slag as fine aggregate on static and impact behaviours of Concrete. In: **Construction and Building Materials** **192**, 2018, 194–201.

GUO, Y.; XIE, J.; ZHAO, J.; ZUO, K. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal and high-strength concrete. In: **Construction and Building Materials** **204**, 2019, 41-49.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IABR. **Aço**. 2016. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/noticias/9-assuntos/categ-comercio-exterior/478-metallurgia-e-siderurgia-2>> Acesso em: 15 dez de 2018.

INSTITUTO AÇO BRASIL - IABR. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2018. 84 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira 1999**. Rio de Janeiro, 2000. 100 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Anuário estatístico**. Brazil Steel Databook. Rio de Janeiro, 2006. 100 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição a metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 102p. São Paulo, 2000. Tese (livre docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JOHN, L. Pesquisa cria alternativa para reciclagem do rejeito de siderúrgicas. In: **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 07 de agosto de 2002. Ciência e Meio Ambiente. 2 p.

LI, J.; PAN, S. Y.; KIM, H.; LINN, J. H.; CHIANG, P. C. Building green supply chains in eco-industrial parks towards a green economy: Barriers and strategies. In: **Journal of Environmental Management**, 2015, 158-170.

LIMA, L. **Concreto com escórias de fornos elétricos como agregados: propriedades, durabilidade e comportamento ambiental**. 1999. 243 p. Tese (doutorado) – Engenharia, Universidade Politécnica de Catalunya. Barcelona, Espanha, 1999.

LYLE, J. T. **Regenerative Design for Sustainable Development**. Wiley, 1994.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. São Paulo, 2000. 135 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MALTEZ, N. G.; PAULINO, G. M.; JANUZZI, R. V.; CARNEIRO, L. A. S. Potencialidade do uso da escória de aciaria na produção de blocos de concreto para pavimentação. In: **69ª Reunião Anual da SBPC** - 16 a 22 de julho de 2017 - UFMG - Belo Horizonte/MG.

MASUERO, A. B. VILELA, A. C. DAL MOLIN, D. 2004. Emprego de escória de aciaria elétrica como adição a concretos. In: **SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS**, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. 19 p.

MASUERO, A. B. **Estabilidade das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264 p. Tese (doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

MOURA, W. A. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto**. Porto Alegre, 2000. 192 p. Tese (doutorado) – Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2000.

PACHECO, R. F. R. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer**. 2017. 297 p. Tese (doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação**. Porto Alegre, 2004. 148 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação**. 2004. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

RAPOSO, C. O. L. **Estudo experimental de compactação e expansão de uma escória de aciaria LD para uso em pavimentação**. 2005. 163 p. Dissertação (mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

RUBIO-CINTAS, M. D.; BARNETT, S. J.; PEREZ-GARCIA, F.; PARRON-RUBIO, M. E. Mechanical-strength characteristics of concrete made with stainless steel industry wastes as binders. In: **Construction and Building Materials** **204**, 2019, 675-683.

SANTOS, C. R. **Estudo da utilização de rejeitos de carvão na fabricação de blocos de concreto para pavimentação em substituição ao agregado miúdo natural**. 2012. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

SANTOS, D. H.; MARINHO, A. L. B.; BARROS, T. R.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F. Blocos de concreto produzidos com escória de aciaria para uso em alvenaria modular. 2014. In: **56º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014. 16 p.

SILVA, E. A.; MENDONÇA, R. L. Utilização da escória de aciaria em todas as camadas do pavimento. In: **Revista Engenharia Ciência e Tecnologia**. v. 4, n. 2, 7-20, 2001.

SILVA, M. J. **Elementos de concreto para pavimentação produzidos com agregados de escória de aciaria**. 2011. 130p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG. Belo Horizonte, 2011.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E.; SPOSTO, R. M. Blocos de concreto produzidos com agregados provenientes da reciclagem de resíduos gerados pela construção civil. In: **IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. 2002. Foz do Iguaçu. Anais... Paraná: Entac, 2002.

SOUZA, T. V. P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. 2016. 67p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais na Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

YANIK, K. **Report: global demand for aggregates to rise**. 2016. Disponível em: <<http://www.pitandquarry.com/report-global-demand-for-aggregates-to-rise/>>. Acesso em: 18 maio de 2019.