



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

Ana Carolina de Paula Matias

Utilização de escórias de aciaria em argamassas sustentáveis para revestimento
de alvenarias

Ouro Preto

2018

Ana Carolina de Paula Matias

Utilização de escórias de aciaria em argamassas sustentáveis para revestimento de alvenarias

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

Área de concentração: Materiais de Construção

Orientadores: Prof. D.Sc Ricardo Andre Fiorotti Peixoto

Prof. M.Sc. José Maria Franco de Carvalho

Ouro Preto

2018

M433u Matias, Ana Carolina de Paula .
Utilização de escórias de aciaria em argamassas sustentáveis para
revestimento de alvenarias [manuscrito] / Ana Carolina de Paula Matias. -
2018.

52f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto.
Coorientador: Prof. MSc. José Maria Franco de Carvalho.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Argamassa de Revestimento. 2. Escória de Aciaria. 3. Matrizes
Cimentícias Sustentáveis. 4. Agregado Reciclado. 5. Tecnologia de Materiais.
I. Peixoto, Ricardo André Fiorotti . II. Carvalho, José Maria Franco de. III.
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

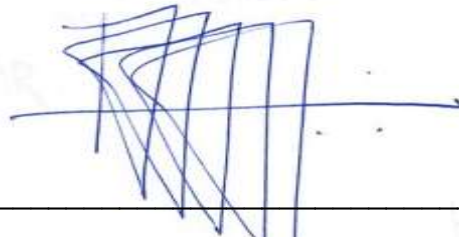
Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

CDU: 624

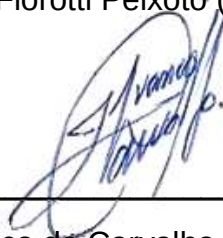
Ana Carolina de Paula Matias

Utilização de escórias de aciaria em argamassas sustentáveis para revestimento de alvenarias

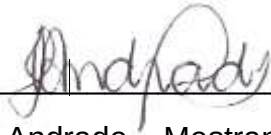
Monografia de conclusão de curso para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto, defendida e aprovada em 16 de julho de 2018, pela banca examinadora constituída pelos professores:



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



Prof. José Maria Franco de Carvalho (M.Sc.) – Orientador – UFOP



Humberto Dias de Andrade – Mestrando PROPEC - UFOP

RESUMO

A indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais não renováveis, mas também grande consumidora de materiais reciclados. A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais têm levado à pesquisa de novos materiais e à incorporação de resíduos como matérias-primas alternativas para produção de matrizes cimentícias. O aço é um material que sempre esteve associado ao conceito de economia circular: redução, reutilização, remanufatura e reciclagem de materiais e produtos, trazendo como benefícios o uso consciente de matérias-primas, eficiência na gestão de resíduos, redução de emissões, além de inovações e empregos. Segundo o Relatório de Sustentabilidade de 2016, do Instituto Aço Brasil, o processo siderúrgico gera materiais residuais, chamados de resíduos ou coprodutos, como por exemplo a escória de aciaria. Considerando de um lado, geradores de rejeitos e de outro, potenciais consumidores, este trabalho propõe a produção de argamassas para revestimento de alvenarias produzidas integralmente com escória de aciaria. Essas escórias possuem elevados teores de ferro metálico, que são deletérios a durabilidade de matrizes de cimento Portland, mas que configuram recursos valiosos para a siderurgia, justificando o reprocessamento destes materiais e recuperação dessa fração. A fração não metálica consiste de agregados com características físicas e mecânicas adequadas para produção de matrizes cimentícias. Foram produzidas argamassas de revestimento com agregados obtidos da fração não metálica das escórias de aciaria e traços de referência produzidos com areia natural de rio. As argamassas foram analisadas nos estados fresco e endurecido. Um aditivo incorporador de ar foi utilizado para melhorar as propriedades reológicas. Os resultados indicaram viabilidade técnica para produção de argamassas com escórias de aciaria pós-processadas.

Palavras-chave: Argamassa de Revestimento, Escória de Aciaria, Matrizes Cimentícias Sustentáveis, Agregado Reciclado, Tecnologia de Materiais.

ABSTRACT

The construction industry is one of the largest consumers of non-renewable natural resources, but also a major consumer of recycled materials. Concern about the environment and the scarcity of natural resources have led to the research of new materials and the incorporation of waste as alternative raw materials for the production of cement-based composites. Steel is a material that has always been associated with the concept of circular economy: reduction, reuse, remanufacturing and recycling of materials and products, bringing the benefits of conscious use of raw materials, efficiency in waste management, reduction of emissions, and innovations and jobs. According to the 2016 Sustainability Report of the Aço Brasil Institute, the steelmaking process generates waste materials, called residues or by-products, such as steel slag. Considering, on the one hand, waste generators, and on the other hand, potential consumers, this work proposes the production of mortars for masonry coating produced entirely with steel slag. These slags have high levels of metallic iron, which are deleterious to the durability of Portland cement matrices, but which constitute valuable resources for the steel industry, justifying the reprocessing of these materials and recovery of that fraction. The nonmetallic fraction consists of aggregates with physical and mechanical characteristics suitable for the production of cementitious materials. Coating mortars were produced with aggregates obtained from the non-metallic fraction of the steel slag. Reference mortars with natural river sand were also produced, as testimony. The mortars were analyzed in the fresh and hardened states. An air entraining admixture was used to increase the rheological properties. The results indicated technical feasibility for the production of mortars with post-processed steel slag.

Key words: Coating Mortar; Steel slag; Sustainable Cementing Matrices; Recycled Aggregate; Materials Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das argamassas (PETRUCCI, 1980).....	4
Figura 2 - Diferentes revestimentos de parede (CARASEK, 2010).....	7
Figura 3. Fatores que exercem influência na aderência de argamassa sobre bases porosas (Adaptado de Carasek, 2010)	10
Figura 4 - Sistema de recuperação de metálicos.....	17
Figura 5 - Processo de quarteamento.....	17
Figura 6 - Faixas granulométricas adotadas para produção das areias	18
Figura 7 - Determinação da massa específica.....	20
Figura 8 - Materiais utilizados	22
Figura 9 - Argamassadeira e argamassa produzida	23
Figura 10 - Determinação do Índice de Consistência. (a) Argamassa de escória; (b) Moldagem do corpo de prova tronco cônico; (c) Medida do abatimento do corpo de prova.	24
Figura 11 - Corpos de prova prismáticos 40x40x160mm. (a) Moldagem; (b) CPs após 03 (três) dias de cura.	25
Figura 12 - Procedimento para ensaio de massa específica (densidade de massa)	26
Figura 13 - Ensaio de adesão inicial. (a) lançamento da argamassa. (b) Material aderido ao substrato e "rebote".....	27
Figura 14 - Procedimento para ensaio de retenção de água	28
Figura 15 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	29
Figura 16 - Ensaio de Resistência à Compressão	30
Figura 17 - CPs 5cmx10cm	31
Figura 18 - Massa unitária e massa específica das amostras	34
Figura 19- Argamassas produzidas com areia de escória, evidenciando boa coesão e trabalhabilidade.	36

Figura 20 - Massa específica (Densidade de Massa)	38
Figura 21 - Resultados – Ensaio de Adesão Inicial.....	41
Figura 22 - Retenção de água das argamassas	42
Figura 23 - Resistência à Flexão	44
Figura 24 - Resistência à Compressão.....	45
Figura 25 - Absorção e Índice de vazios	46
Figura 26 - Massa específica real	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco (Adaptado de Carasek, 2010).	9
Tabela 2 – Nomenclatura utilizada.....	19
Tabela 3- Nomenclatura e traços utilizados	21
Tabela 4 - Dimensão máxima característica e módulo de finura das areias	33
Tabela 5 - Resultado de FRX.....	32

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AIA – Aditivo incorporador de ar

BS – *British Standard*

CP – Corpo-de-prova

DMC – Dimensão máxima característica

EA – Escória de Aciaria

FRX – Fluorescência de raio-x

LAS – Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio

MF – Módulo de finura

NBR – Norma Brasileira

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE SIGLAS	VI
SUMÁRIO	VII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Argamassas.....	3
2.1.1 Classificação das argamassas.....	4
2.1.2 Argamassas de revestimento.....	6
2.1.3 Propriedades essenciais para argamassas.....	8
2.2 Agregados para a construção civil.....	11
2.2.1 Agregados convencionais	11
2.2.2 Agregados reciclados.....	11
2.3 Aditivos para argamassas	13
3 METODOLOGIA.....	14
3.1 Materiais	14
3.2 Caracterização física das escórias de aciaria.....	16

3.2.1	Separação magnética e gravimétrica das amostras	16
3.2.2	Segregação segundo frações granulométricas	17
3.2.3	Massa Específica	19
3.2.4	Massa Unitária	20
3.3	Caracterização química	21
3.4	Produção das argamassas	21
3.5	Caracterização das Argamassas no Estado Fresco	25
3.5.1	Trabalhabilidade, Plasticidade, Exsudação, Coesão e Tixotropia...	25
3.5.2	Massa específica	25
3.5.3	Adesão Inicial	26
3.5.4	Retenção de água	27
3.6	Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido	29
3.6.1	Resistência à Tração na Flexão	29
3.6.2	Resistência à Compressão	30
3.6.3	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	31
4	RESULTADOS e DISCUSSÕES	32
4.1	Caracterização Física das escórias de aciaria	32
4.1.1	Separação magnética e gravimétrica das amostras	32
4.1.2	Segregação segundo frações granulométricas	33
4.1.3	Massa Específica e Massa Unitária	34
4.2	Caracterização química	32
4.3	Caracterização das Argamassas no Estado Fresco	35
4.3.1	Trabalhabilidade, Plasticidade, Exsudação, Coesão e Tixotropia...	35
4.3.2	Massa específica	37

4.3.3	Adesão Inicial	39
4.3.4	Retenção de água	42
4.4	Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido	43
4.4.1	Resistência à Tração na Flexão	43
4.4.2	Resistência à Compressão	44
4.4.3	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica 45	
5	CONCLUSÃO	49
6	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A partir do desenvolvimento tecnológico, cresce o número de indústrias e, consequentemente, o volume de resíduos sólidos oriundos dos processos industriais. Em decorrência disso, grande parte destes resíduos tem destino inadequado, podendo ficar expostos ao ambiente. No setor siderúrgico, por exemplo, o total de subprodutos e resíduos gerados no Brasil no biênio 2015-2016 foi de 19,8 milhões de toneladas (594 kg / t de aço bruto), dos quais 28% foram de escória de aciaria (EA). Ou seja, foram gerados, aproximadamente, 5,5 milhões de toneladas de EA, dos quais 16% (880 mil toneladas) foram destinados para estoque ou disposição final (IABR, 2016).

Frente a esta realidade, faz-se necessário desenvolver métodos de gestão dos resíduos sólidos industriais. Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de utilizar estes resíduos como matéria-prima para produção de material utilizável (GEYER 2001; SOUZA, 2007; SILVA, 2011; TOFFOLO, 2015). A reciclagem dos resíduos industriais através de estudos capazes de detectar sua potencialidade e viabilizar sua seleção preliminar é encarada hoje como atividade que pode contribuir para diversificação dos produtos, diminuição dos custos, além de resultar em “novas” matérias-primas para uma série de setores.

Sabe-se também que o consumo de matérias-primas não renováveis, fundamentais para os processos da construção civil, cresce em ritmo acelerado. O setor construtivo demanda uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos pode modificar o perfil dos rios, além de possibilitar problemas ambientais como modificação em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica.

Além disso, seu mercado é essencialmente regional, pois o frete impacta no preço final do produto. Diante deste fato, as mineradoras especializadas na produção de agregados para construção civil ficam localizadas próximas aos grandes centros consumidores de seus produtos. O que gera conflitos com as comunidades do entorno (SILVA, 2012). Outro aspecto a ser considerado é a possibilidade de escassez gerada pela alta demanda dos grandes centros, fazendo com que os agregados tenham que

ser trazidos de lugares mais afastados, aumentando o valor final do produto e o impacto ambiental causado por esse transporte a longas distâncias.

Frente à demanda de recursos naturais e sabendo-se que o desenvolvimento tecnológico da indústria da construção civil requer novas tecnologias eficientes, competitivas e de baixo custo, a adoção de materiais sustentáveis surge como alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável. Estudos realizados incorporando escórias de aciaria como agregados em matrizes cimentícias têm se tornado um atrativo ambiental e econômico visto que pode representar redução de volume para os depósitos de rejeito e minimizar a utilização de agregados naturais não renováveis.

Portanto, visando difundir o uso de materiais sustentáveis de base tecnológica, produzidos a partir da reciclagem de resíduos sólidos da indústria siderúrgica, o presente trabalho propõe a investigação das propriedades de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de escória de aciaria.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar as propriedades de argamassas de revestimento produzidas com escórias de aciaria, e sua aplicabilidade, sob aspectos técnicos, construtivos, ambientais, de produtividade, entre outros.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades mecânicas das argamassas sustentáveis produzidas com escórias de aciaria comparativamente às argamassas produzidas convencionalmente a partir de materiais naturais em condições de laboratório.
- Avaliar as propriedades de interesse no estado fresco para aplicação em argamassas de revestimento;
- Investigar, com base nas propriedades mecânicas e de trabalhabilidade, o traço ótimo para aplicação de argamassa para revestimento de alvenarias, bem

como a concentração ótima de Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio (LAS) como agente incorporador de ar.

- Submeter as escórias a ciclos de separação magnética a fim de se recuperar a fração metálica presente nas amostras.
- Criar um procedimento operacional padrão (POP) para a quantificação da adesão inicial das argamassas, devido à ausência de normatização brasileira para execução de tal ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argamassas

Argamassas são materiais de construção, com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo conter ainda aditivos e adições minerais (CARASEK, 2010).

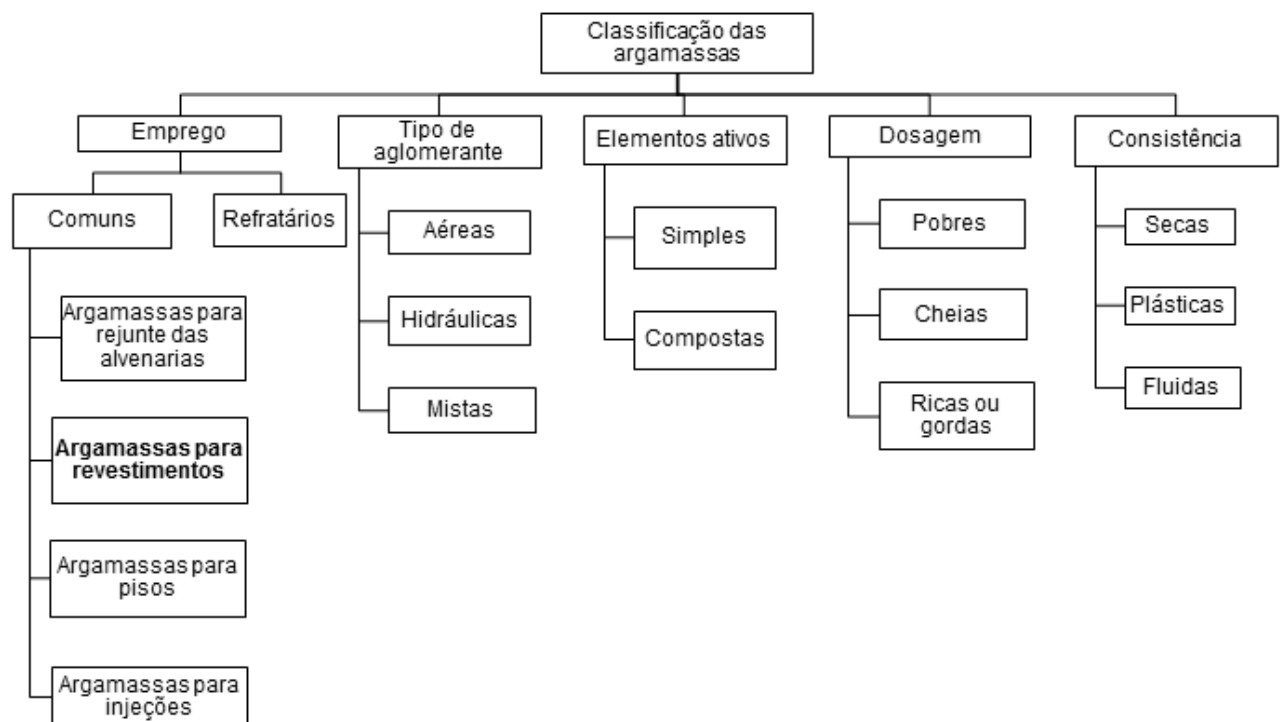
As argamassas são materiais amplamente empregados na construção civil, sendo seus principais usos no assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimento (emboço, reboco ou revestimento de camada única de paredes e tetos); além de contrapisos e assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra.

Os primeiros registros do emprego de argamassa como material de construção datam da pré-história, há cerca de 11.000 anos. E estas eram à base de cal e areia. Entretanto, com os avanços das técnicas de construção, novos materiais foram produzidos. As argamassas modernas possuem em sua composição também o cimento Portland e, frequentemente, aditivos para melhorar algumas propriedades como incorporação de ar, trabalhabilidade, retenção de água, dentre outros. No final do século XIX surgiram, na Europa e nos Estados Unidos, as argamassas industrializadas – misturas prontas para as quais, na obra, é necessário apenas a adição de água; as quais são muito empregadas atualmente também no Brasil (CARASEK, 2010).

2.1.1 Classificação das argamassas

As argamassas recebem diversos tipos de classificações conforme sua aplicação ou constituição e são produzidas de acordo com exigências específicas para cada uso. Petrucci (1980) criou uma classificação, ilustrada na Figura 1 a seguir, para as argamassas.

Figura 1 - Classificação das argamassas (PETRUCCI, 1980)



Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas podem ser classificadas conforme as características e propriedades que apresentam, determinadas pelos métodos de ensaio especificados nas Tabelas 1 a 7, extraídas desta norma.

Tabela 1 — Resistência à compressão

Classe	Resistência à compressão MPa	Método de ensaio
P1	≤ 2,0	ABNT NBR 13279
P2	1,5 a 3,0	
P3	2,5 a 4,5	
P4	4,0 a 6,5	
P5	5,5 a 9,0	
P6	> 8,0	

Tabela 2 — Densidade de massa aparente no estado endurecido

Classe	Densidade de massa aparente no estado endurecido kg/m³	Método de ensaio
M1	≤ 1 200	ABNT NBR 13280
M2	1 000 a 1 400	
M3	1 200 a 1 600	
M4	1 400 a 1 800	
M5	1 600 a 2 000	
M6	> 1 800	

Tabela 3 — Resistência à tração na flexão

Classe	Resistência à tração na flexão MPa	Método de ensaio
R1	≤ 1,5	ABNT NBR 13279
R2	1,0 a 2,0	
R3	1,5 a 2,7	
R4	2,0 a 3,5	
R5	2,7 a 4,5	
R6	> 3,5	

Tabela 4 — Coeficiente de capilaridade

Classe	Coeficiente de capilaridade g/dm².min ^{1/2}	Método de ensaio
C1	≤ 1,5	ABNT NBR 15259
C2	1,0 a 2,5	
C3	2,0 a 4,0	
C4	3,0 a 7,0	
C5	5,0 a 12,0	
C6	> 10,0	

Tabela 5 — Densidade de massa no estado fresco

Classe	Densidade de massa no estado fresco kg/m ³	Método de ensaio
D1	≤ 1 400	ABNT NBR 13278
D2	1 200 a 1 600	
D3	1 400 a 1 800	
D4	1 600 a 2 000	
D5	1 800 a 2 200	
D6	> 2 000	

Tabela 6 — Retenção de água

Classe	Retenção de água %	Método de ensaio
U1	≤ 78	ABNT NBR 13277
U2	72 a 85	
U3	80 a 90	
U4	86 a 94	
U5	91 a 97	
U6	95 a 100	

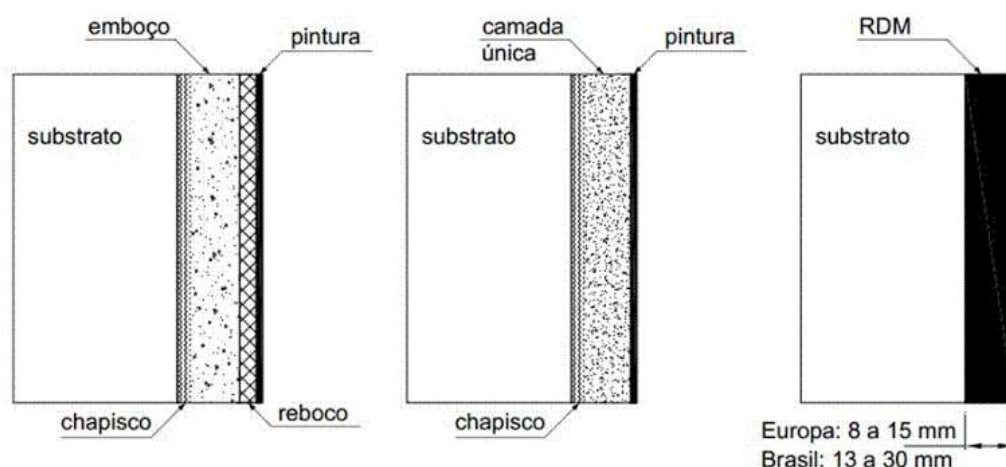
Tabela 7 — Resistência potencial de aderência à tração

Classe	Resistência potencial de aderência à tração MPa	Método de ensaio
A1	< 0,20	ABNT NBR 15258
A2	≥ 0,20	
A3	≥ 0,30	

2.1.2 Argamassas de revestimento

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes, muros e tetos. O revestimento de argamassa pode ser constituído por diversas camadas, cada uma com características e funções específicas, conforme ilustrado na Figura 2 e definidos, segundo Carasek (2010) a seguir.

Figura 2 - Diferentes revestimentos de parede (CARASEK, 2010)



- **Chapisco:** camada que serve de preparo para base. Pode ser aplicada de forma contínua ou descontínua, e tem a finalidade de uniformizar a superfície e melhorar a aderência do revestimento.
- **Emboço:** camada de revestimento, com função de regularizar a base. Permite que haja o recebimento de outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo (cerâmica, por exemplo).
- **Reboco:** camada de revestimento cuja função é cobrir o emboço e assim, proporcionar uma superfície que permita o recebimento de revestimento decorativo (pintura, por exemplo). Pode ser também o acabamento final.
- **Camada única:** revestimento de um só tipo de argamassa aplicado diretamente sobre a base e sobre a qual é aplicada uma camada decorativa, como a pintura, por exemplo. É também denominado “reboco paulista” ou “massa única”.
- **Revestimento decorativo monocamada (RDM):** revestimento aplicado em uma única camada que exerce simultaneamente a função de regularização e decorativa. É também denominada monocapa.

As principais funções de uma argamassa de revestimentos são:

- Proteger tanto a alvenaria, quanto a estrutura contra a ação do intemperismo (tratando-se de revestimentos externos);

- Participar da vedação dos edifícios, desempenhando funções como: isolamento térmico, acústico, estanqueidade à água e resistência ao desgaste e abalos superficiais;
- Servir como regularização da superfície e base para acabamentos decorativos, influenciando na estética da edificação.

2.1.3 Propriedades essenciais para argamassas

As argamassas devem possuir algumas características tanto em seu estado fresco, quanto no estado endurecido, a saber:

- a) *Trabalhabilidade*: é uma propriedade que deriva de várias combinações reológicas da argamassa, tais como: coesão, consistência, retenção de água e plasticidade. É importante para as condições de execução, mas também para o correto desempenho do revestimento. Deve-se ajustar o grau de trabalhabilidade desejado de acordo com o instrumento que será usado para a aplicação da argamassa, por exemplo, usando-se uma colher de pedreiro, argamassa projetada com auxílio de ar comprimido, etc.

Sabbatini (1984) define uma argamassa como sendo trabalhável quando esta atende as seguintes características: ao ser assentada distribui-se facilmente; não fica aderida à ferramenta ao ser aplicada; ao ser transportada não ocorre segregação e, principalmente, permanece plástica por tempo suficiente para finalização da operação.

- b) *Densidade de massa*: também denominada massa específica; mede a relação entre a massa e o volume do material. Uma argamassa mais leve e trabalhável, garante maior produtividade do operário, uma vez que seu esforço para manuseá-la é reduzido. Tal propriedade varia com o teor de ar incorporado e com a massa específica dos materiais componentes da argamassa, principalmente do agregado. A Tabela 1 apresenta a classificação das argamassas quanto à densidade (CARASEK, 2010).

Tabela 1 - Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco (Adaptado de Carasek, 2010).

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm ³)	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	1,40 ≤ A < 2,30	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	≥ 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

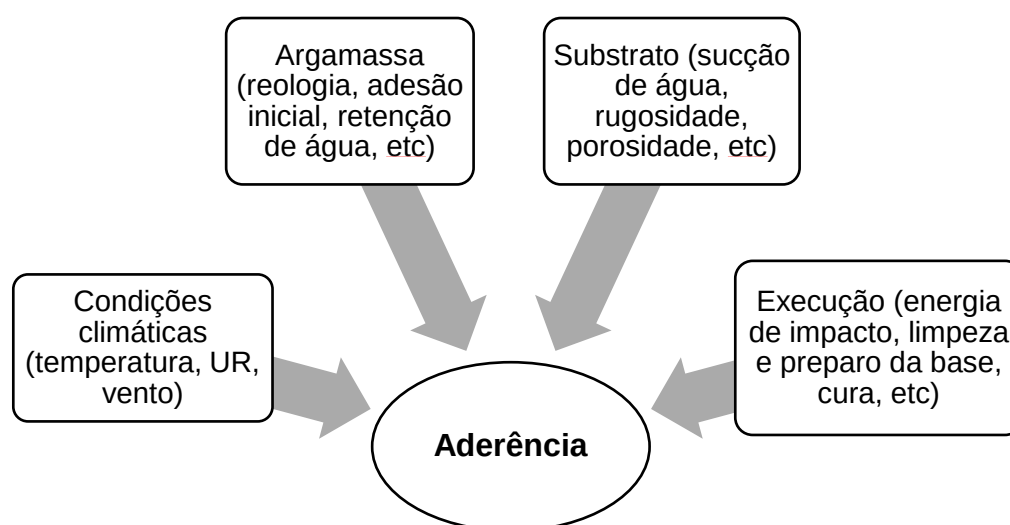
A densidade de massa das argamassas no estado fresco é determinada pelo método da NBR 13278 (ABNT, 2005) e representa a relação entre a massa e o volume do material, sendo expressa em g/cm³, com duas casas decimais.

- c) *Adesão inicial*: também chamada de “pegajosidade”; é a capacidade de união da argamassa a uma base, ainda no estado fresco. Está intimamente relacionada com as características reológicas da mesma, em especial com sua tensão superficial. A “molhagem” do substrato é favorecida pela redução da tensão superficial da argamassa, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e estabelecendo a adesão. Tal fenômeno possibilita maior contato físico da pasta com os agregados e também com a base, melhorando, portanto, a adesão inicial. A adição de cal à argamassa de cimento, aditivos incorporadores de ar e retentores de água contribuem para diminuição dessa tensão superficial (CARASEK, 2010). Segundo Carasek (2010), no Brasil, não existem métodos normalizados para avaliar a adesão inicial.
- d) *Retenção de água*: propriedade associada à capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando está sujeita à perda de água, seja por evaporação ou absorção de água pela base. Assim, essa propriedade é de extrema importância quando se tem substratos com alta sucção de água e construções sob condições climáticas desfavoráveis (alta temperatura, baixa umidade relativa e ventos fortes). A retenção de água tem influência também nas propriedades da argamassa no estado endurecido. Pois, as argamassas

dependem de adequada retenção de água para que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes aconteça de maneira apropriada. A NBR 13277 (ABNT, 2005) traz a metodologia para avaliação da retenção de água em argamassas.

- e) *Aderência*: a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido, basicamente, à penetração da argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação. Outra parcela, porém, menos significativa que contribui para a aderência, são as ligações do tipo *van der Waals*. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente do substrato, uma parcela da água de amassamento penetra pelos poros e cavidades do substrato. No interior dos poros, ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, que após algum tempo, serão responsáveis pela ancoragem da argamassa à base. Estudos microestruturais conduzidos por Carasek (1996), confirmaram que a aderência decorre do intertravamento, principalmente de etringita (um dos produtos de hidratação do cimento) no interior dos poros do substrato. Na Figura 3, são apresentados os principais fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.

Figura 3. Fatores que exercem influência na aderência de argamassa sobre bases porosas (Adaptado de Carasek, 2010)



- f) *Resistência mecânica*: é definida como a capacidade de resistir às solicitações de tração, compressão e cisalhamento. Segundo Rato (2006), a resistência mecânica de uma argamassa depende, majoritariamente de dois aspectos: o tipo de rede cristalina (relacionado ao tipo de ligante e a forma como se deu o endurecimento da pasta) e o tipo de estrutura porosa (dependente da quantidade, dimensão e forma dos poros; relacionado, portanto à compacidade da matriz). A normatização para obtenção da resistência mecânica à tração na flexão e compressão estão estabelecidos nas NBR 13279 (ABNT, 2005).

2.2 Agregados para a construção civil

2.2.1 Agregados convencionais

Segundo Mehta e Monteiro (2014), os agregados minerais naturais formam a classe mais importante de agregados para a produção de concreto de cimento Portland. O agregado pode se constituir de pedregulhos naturais ou de rocha britada. As rochas de origem carbonática, tal como o calcário, representam 2/3 dos agregados britados; arenito, granito, diorito, gabro e basalto compõem o restante (MEHTA, 2014).

Se antes os agregados eram tidos como materiais inertes, na atualidade já se sabe que algumas características dos agregados são importantes para a composição dos concretos e argamassas, incluindo: porosidade, forma e textura superficial, absorção de água, distribuição granulométrica, resistência à compressão, tipo de substâncias deletérias presentes, dentre outras (MEHTA, 2014).

Deseja-se que os agregados presentes numa matriz cimentícia garantam a resistência mecânica, elasticidade e durabilidade da mesma. Além de formarem uma estrutura de partículas capazes de resistir à ação de esforços aplicados, à abrasão, percolação de água e também à ação do tempo.

2.2.2 Agregados reciclados

A economia e a construção dependem de um fluxo constante de materiais: extração de matérias-primas, atividades fabris, transporte, montagem, manutenção e

desmontagem final. Diante disso, o emprego de agregados reciclados advindos de resíduos industriais e agrícolas, torna-se fundamental para continuidade desse fluxo de materiais, priorizando um desenvolvimento mais sustentável de todo processo.

Nesse sentido, os estudos na área de utilização de resíduos e subprodutos industriais foram intensificados no Brasil da década de 1990 em diante (CALMON, 2010). Dentre estes resíduos, destacam-se os resíduos e subprodutos metalúrgicos/siderúrgicos.

Quando se utiliza a EA, deve-se atentar à origem da mesma, bem como às variáveis envolvidas no seu processamento, como: o tipo de aciaria utilizada, o controle no processo de fabricação do aço, os procedimentos de processamento da escória após o resfriamento e sua estocagem, já que os mesmos interferem nas propriedades químicas, físicas e mineralógicas das escórias. Isso faz com que sejam obtidas variações consideráveis nas suas propriedades (SOUZA, 2007).

Logo, as propriedades físicas das escórias, como: granulometria, massas específica e unitária, variam de acordo com a maneira como são resfriadas, podendo existir grandes variações nas suas composições, mesmo sendo produzidas numa mesma siderúrgica. Se a escória é resfriada naturalmente ao ar, os óxidos que a compõe cristalizam, perdendo as características hidráulicas. Com isso, a mesma pode ser considerada inerte (GEYER, 2001).

Marino (2016) estudou as propriedades de agregados graúdos e miúdos feitos com escória de aciaria (EA). Analisando-se as inclusões metálicas, foram obtidos 1,33% de teor de metálicos para os agregados graúdos e 3,0% para os miúdos, sendo que, segundo Souza (2007), o limite recomendado é de 2,5%. A partir da análise granulométrica, Marino (2016) observou que a EA utilizada, para ambos agregados, estava dentro da zona ótima e com pouca variação em relação aos agregados naturais (areia fina para agregado miúdo e brita 0 para agregado graúdo). Foi verificada também a presença de materiais pulverulentos, obtendo 0,10% para os agregados graúdos de EA e 5,7% para os miúdos. Os valores limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005) são de 3 a 5% para agregados miúdos e 1% para graúdos. Com os dados obtidos nesses estudos, é possível afirmar que a EA pode ser utilizada tanto para agregado graúdo quanto para agregado miúdo, atendendo aos limites previstos na norma brasileira.

Silva (2011) estudou a utilização de EA como agregado para produção de elementos de concreto para pavimentação, e atestou, através de experimentos que (i) a absorção de água e o índice de vazios dos elementos foram inferiores aos dos elementos convencionais, o que é indicativo de maior durabilidade; (ii) os elementos com agregado de EA não apresentaram expansão significativa; (iii) a resistência à compressão simples após 56 foi equivalente à observada nos elementos convencionais; e (iv) a resistência à flexão dos elementos com agregado de EA foi superior à dos elementos convencionais.

Januzzi (2014) avaliou o uso de EA como agregados na produção de blocos estruturais pré-moldados, e observou que estes apresentaram comportamento mecânico satisfatório para utilização em alvenaria estrutural. Entretanto, os blocos apresentaram baixa deformabilidade e ruptura repentina com queda da resistência à compressão quando adotada uma argamassa pouco deformável feita com EA.

2.3 Aditivos para argamassas

Aditivos são produtos que adicionados em pequenas quantidades aos concretos e argamassas de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades (retenção de água, incorporação de ar, tempo de pega, etc) no sentido de melhor adequá-las à determinadas condições, NBR 1763 (ABNT, 1992).

Os aditivos são classificados de acordo com a função que desempenham em: incorporadores de ar, retentores de água, plastificantes, superplastificantes e retardadores ou aceleradores de pega.

Aditivos incorporadores de ar (AIA) são compostos por uma classe de substâncias chamadas surfactantes; denominação advinda de "*surface active agent*", ou seja, agente de atividade superficial, cuja principal função é diminuir a tensão superficial dos líquidos. Um AIA deve ser capaz de produzir um sistema de microbolhas de ar de diâmetro entre 50-300µm, estáveis e uniformemente dispersas na pasta de cimento (PAILLERE, 1995). Ainda, as bolhas de ar devem resistir à coalescência (ou seja, a união de bolhas adjacentes pela ruptura do filme lamelar que as separa) e não devem ter efeito prejudicial às reações de hidratação do cimento.

Existem inúmeros tipos de aditivos incorporadores de ar, porém estes são geralmente líquidos solúveis na água de amassamento. Os aditivos são classificados pela sua composição, sendo os principais tipos: sais de resinas de madeira (Vinsol), detergentes sintéticos, sais de ácidos graxos, sais de materiais proteicos e sais orgânicos de hidrocarbonetos sulfonados (MENDES, 2016).

Estudos realizados por Mendes (2016) apontam para o uso de AIA baseados em LAS (Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio) – surfactante biodegradável presente em detergentes lava-louças. Foi feita uma avaliação de desempenho do AIA proposto, analisando-se as propriedades de interesse para compostos de cimento Portland em seu estado fresco e endurecido, conforme normalização da ABNT. Notou-se que, o aumento da concentração de surfactantes, trouxe consigo o aumento do teor de ar incorporado da matriz, melhoria na sua trabalhabilidade, redução na sua massa específica e nos picos de temperatura na hidratação do cimento. Por outro lado, houve queda nas propriedades mecânicas e um ligeiro retardo no tempo de fim de pega. Ressalta-se ainda que o AIA baseado em LAS mostrou-se mais eficiente do que o AIA comercial em relação ao volume de ar incorporado e à estabilidade do sistema de poros formado. A partir da caracterização mecânica e física, foi possível verificar a eficácia do AIA proposto, bem como determinar sua faixa de dosagem ótima.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para produção das argamassas foram:

- Escória de aciaria;
- Areia natural de rio da região;
- Cimento CP-IV-32-RS;
- Cal hidratada;
- Aditivo incorporador de ar (LAS - detergente doméstico).

3.1.1 Escória de aciaria

A escória adotada no presente trabalho é proveniente de aciaria elétrica e foi enviada pela ROLTH DO BRASIL, com granulometria inferior a 2,36mm. O material foi identificado e acondicionado em recipientes hermeticamente fechados.

3.1.2 Areia natural de rio

A areia natural (AN) utilizada como agregado é composta basicamente por sílica, sendo de procedência do município de Ponte Nova, Minas Gerais.

Para garantir boa qualidade das argamassas experimentais e dos ensaios, a areia foi seca em estufa, em seguida processada e separada na faixa granulométrica de interesse para este trabalho. O material foi então armazenado em sacos plásticos hermeticamente fechados e identificados.

3.1.3 Cimento

O cimento adotado para produção das argamassas foi o CP-IV-32-RS, fabricado pela empresa Liz, de acordo com normatização prevista. Optou-se pela utilização deste tipo de cimento pela sua boa disponibilidade e custo acessível. Além disso, o teor de pozolanas contidos nesse tipo de cimento reduz as reações com agregados reativos, o que é benéfico quando se utiliza a EA como agregado. Destaca-se também seu baixo calor de hidratação, favorecendo manuseio e atividades realizadas para acabamentos de argamassas de revestimento.

3.1.4 Cal hidratada

Foi utilizada cal hidratada aditivada - CHI, MASSICAL, da indústria de calcinação ICAL, fabricada segundo normatização prevista. O produto é indicado para o preparo de argamassas e estabilização química de misturas de solo, e é composto por hidróxido de cálcio, magnésio e aditivos.

3.1.5 Aditivo incorporador de ar

Adotou-se como aditivo incorporador de ar empregado o detergente neutro, estudado e proposto por Mendes et al. (2017). Segundo a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, o produto é composto por uma associação de tensoativos aniônicos entre 6 e 10%, compreendendo LAS (CAS: 25155-30-0); Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Trietanolamina (CAS: 27323-41-7) e Lauril Éter Sulfato de Sódio (CAS:9004-82-4) (Química Amparo LTDA, 2011).

3.2 Caracterização física das escórias de aciaria

3.2.1 Separação magnética e gravimétrica das amostras

A verificação dos teores contidos de materiais metálicos se faz necessária para produção de matrizes cimentícias com propriedades de interesse para aplicação, bem como para durabilidade dos elementos construtivos produzidos a partir deste rejeito.

As amostras de EA foram processadas em sistema de recuperação de metálicos por tamboramento no Laboratório de Materiais de Construção Civil - Imc²/DECIV/EM/UFOP, em equipamento INBRAS (HFCC $\phi 12'' \times 12''$) com intensidade de campo 950 GAUSS e frequência de vibração de 60 HERTZ (Figura 4). Foram realizados 09 (nove) ciclos de recuperação para as amostras.

Figura 4 - Sistema de recuperação de metálicos



3.2.2 Segregação segundo frações granulométricas

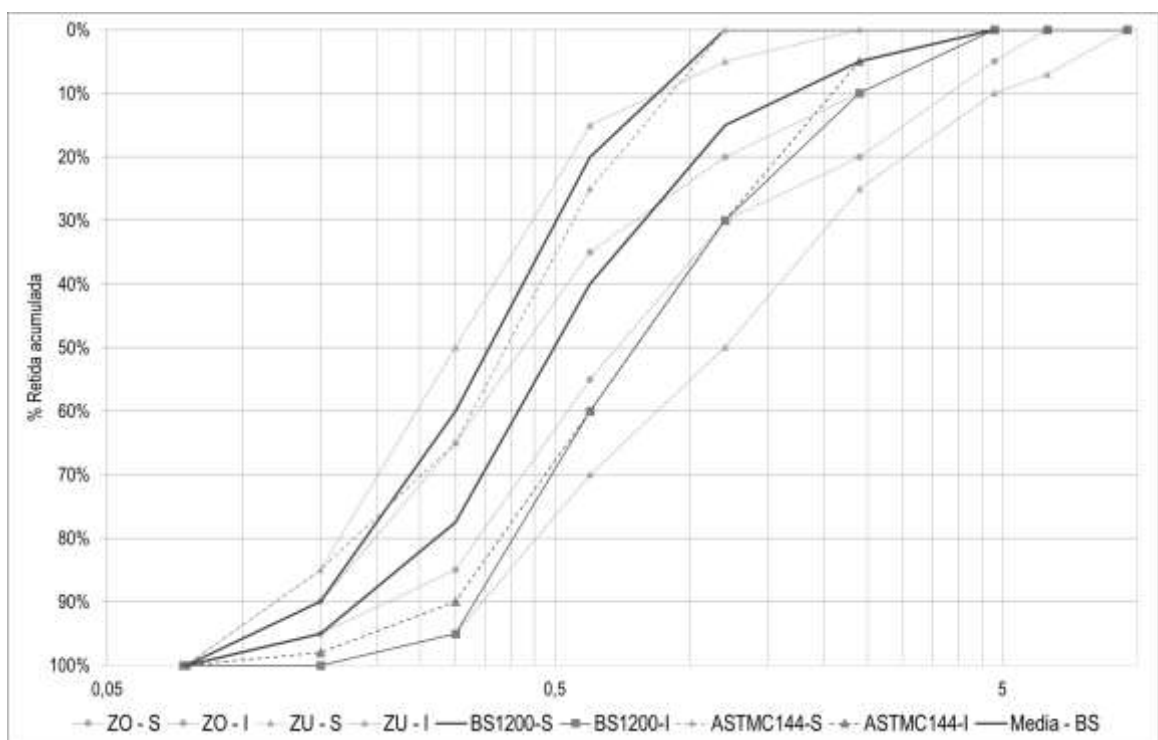
A distribuição granulométrica do agregado miúdo de escórias foi convenientemente projetada segundo tamanhos de partícula de interesse para obtenção de um agregado apto a compor argamassas com desempenho adequado. Esses materiais separados por peneiramento, passaram pelo processo de quarteamento a fim de se obter maior uniformidade de distribuição dos grãos na produção das areias, conforme apresentado à Figura 5.

Figura 5 - Processo de quarteamento



Os agregados desenvolvidos foram ajustados conforme parâmetros estabelecidos pela British Standards – BS 1200 (1976), considerando distribuição granulométrica mais adequada para produção de argamassas para revestimento e assentamento de alvenarias. As curvas utilizadas para as areias de escória foram projetadas de maneira a incluir percentual de finos que atuariam como ligantes, contribuindo para maior trabalhabilidade das argamassas no estado fresco. A Figura 6 apresenta os limites indicados pela normalização BS 1200 (1976); os limites máximos e mínimos aceitáveis bem como os limites ótimos preconizados pela NBR 7211 (ABNT,1987). As curvas para os agregados obtidos deste procedimento, areias de escória e areia de referência (natural de rio), também estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - Faixas granulométricas adotadas para produção das areias



ZO: Zona ótima; ZU: Zona Utilizável; S: Superior; I: Inferior (NBR 7211, ABNT 2005)

Para tornar mais fácil o entendimento das siglas das areias utilizadas ao longo deste trabalho, estas e a faixa granulométrica correspondente são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Nomenclatura utilizada

Tipo de areia	Sigla	Faixa granulométrica adotada
Areia de rio	AN	Média BS 1200
Areia de Escória	AEM	Média BS 1200
Areia de Escória	AES	Superior BS 1200

3.2.3 Massa Específica

A massa específica do agregado é definida como a relação entre a massa do agregado seco em estufa até a constância de massa e o volume do sólido, incluídos os poros impermeáveis. O procedimento para determinação da massa específica do agregado miúdo foi realizado utilizando frasco tipo Chapman, de acordo com o estabelecido pela NBR 9776 (ABNT, 1986).

O ensaio consiste em colocar água no frasco até marca de 200 cm³, deixando-o em repouso, para que a água aderida às faces internas escorra totalmente; em seguida introduzir, cuidadosamente, 500 g de agregado miúdo seco no frasco o qual deve ser devidamente agitado para eliminação das bolhas de ar. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

A massa específica do agregado miúdo é calculada segundo a Equação (1).

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (1)$$

Onde: L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

Salienta-se que duas determinações consecutivas feitas com amostras do mesmo agregado miúdo não devem diferir entre si de mais de 0,05 g/cm³.

A Figura 7 ilustra o procedimento descrito.

Figura 7 - Determinação da massa específica



3.2.4 Massa Unitária

A determinação da massa unitária (massa específica aparente) foi conduzida, em conformidade com prescrições estabelecidas na norma NBR NM45 (ABNT, 2006). A massa unitária pode ser definida como a relação entre a massa dos agregados, considerando os vazios entre eles, e o volume ocupado pelos mesmos.

Para a execução do ensaio é feita a preparação do dobro do material necessário para preencher o volume de um recipiente padrão sem que ocorra o seu adensamento. Para tal o material deve ser lançado a uma altura de 10 a 12 cm. Após o preenchimento, a superfície deve ser regularizada com o nível superior do recipiente de modo a retirar o excesso de material ou compensar as saliências e reentrâncias. Pesa-se então o conjunto recipiente+agregado. De posse da tara do recipiente, obtém-se a massa unitária do agregado dividindo a massa determinada pelo volume conhecido.

3.3 Caracterização química

Amostras de escória de aciaria foram submetidas a análise química por difração de raios X, em que se utilizou espectrômetro de fluorescência de raios-x *Epsilon 3-X Panalytical*, instrumentado com anodo de prata (Ag), excitação 50KV, corrente máxima 1mA, potência máxima 9W.

3.4 Produção das argamassas

Foram adotados dois traços (em volume) para a produção das argamassas: 1:1:6 e 1:0:6, constituídos por cimento (CP-IV 32 RS), cal hidratada e areia (AE, AN). Os traços produzidos foram aditivados com incorporador de ar à base de LAS (Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio) nas concentrações 0,15% e 0,20%. Os traços foram nomeados conforme o tipo de areia utilizado. Foram produzidos 05 (cinco) tipos diferentes de argamassas, conforme apresentado na Tabela 3.

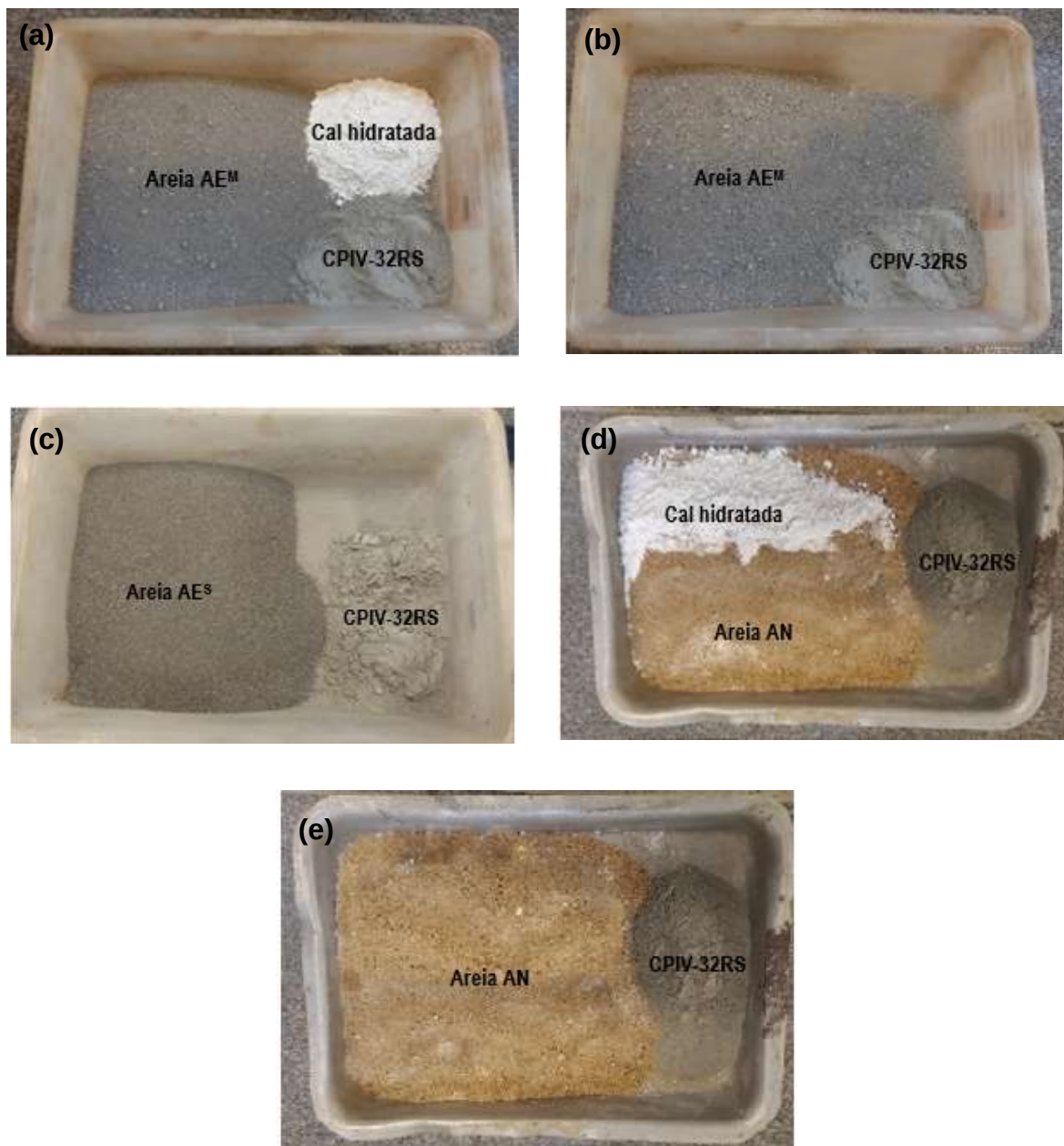
Tabela 3- Nomenclatura e traços utilizados

Tratamento	Cimento	Cal	(AN)	(AEM)	(AES)	[LAS]
A	1	1	-	6	-	0,15%
B	1	0	-	6	-	0,20%
C	1	0	-	-	6	0,20%
D	1	1	6	-	-	0,15%
E	1	0	6	-	-	0,20%

As argamassas foram produzidas com a mesma trabalhabilidade adequada para aplicação em revestimentos. Os materiais anidros (areia, cimento e cal) foram medidos em volume e homogeneizados antes da adição de água e aditivos. A Figura 8 ilustra a dosagem e proporcionamento. A mistura mecânica foi realizada em argamassadeira normatizada da marca Fortest® e modelo VC 370 com motor de 3/4 HP, em conformidade com as especificações da NBR 13276 (ABNT, 2005).

Figura 8 - Materiais utilizados

(a) Traço A; (b) Traço B; (c) Traço C; (d) Traço D; (e) Traço E



O preparo da argamassa obedeceu o seguinte protocolo: (a) colocação da água ou água + LAS na cuba da argamassadeira; (b) adição da mistura anidra na cuba dentro de um intervalo de tempo de 30s; (c) mistura mecânica (misturador planetário) por 1min em frequência baixa (62 ± 5 rpm); (d) mistura manual por no máximo 15s para

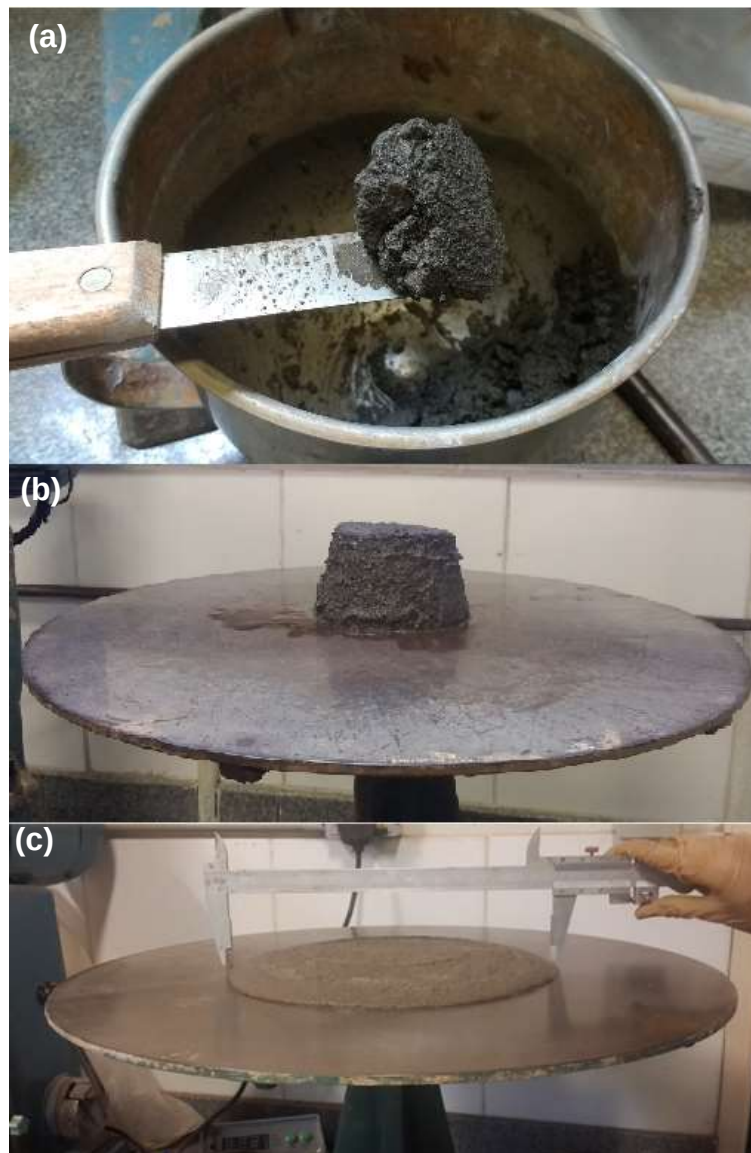
evitar acúmulo de água no fundo da cuba; (e) mistura mecânica por mais 30s em frequência alta (125 ± 10 rpm).

Figura 9 - Argamassadeira e argamassa produzida



A trabalhabilidade das argamassas foi determinada conforme prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2002). A técnica consiste da moldagem de uma porção de argamassa, que deve ser produzida com um determinado fator água/aglomerante, preenchendo-se um molde tronco cônico. Esse procedimento é realizado sobre uma mesa de fluxo, que deve ser submetida, em seguida, a 30 golpes em um intervalo de tempo de 30 segundos. O espalhamento é, então, medido utilizando-se um paquímetro em duas determinações diametralmente opostas. Neste trabalho o espalhamento foi fixado em $260\text{mm} \pm 5\text{mm}$. A Figura 10 ilustra os procedimentos adotados para a moldagem e determinação do espalhamento.

Figura 10 - Determinação do Índice de Consistência. (a) Argamassa de escória; (b) Moldagem do corpo de prova tronco cônico; (c) Medida do abatimento do corpo de prova.



Após a determinação dos índices de consistência, foram moldados 03 (três) corpos de prova (CPs) prismáticos 40x40x160mm para cada tratamento proposto. Estes CPs foram devidamente identificados e acondicionados em câmara úmida, sendo desmoldados após 03 (três) dias de cura e retornados à câmara úmida até a idade 28 dias. Após o período de cura, os CPs seguiram para os ensaios de determinação da resistência à flexão e à compressão. O desempenho das

argamassas foi ainda monitorado, considerando a evolução da resistência à compressão após decorridos 56 dias.

Figura 11 - Corpos de prova prismáticos 40x40x160mm. (a) Moldagem; (b) CPs após 03 (três) dias de cura.



3.5 Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

3.5.1 Trabalhabilidade, Plasticidade, Exsudação, Coesão e Tixotropia

Para avaliação das propriedades da argamassa no estado fresco, considerando os parâmetros trabalhabilidade e plasticidade, utilizou-se da técnica para determinação do índice de consistência, no qual a abertura da argamassa na mesa de fluxo foi pré-fixada em $260\text{mm} \pm 5\text{mm}$, como explicitado anteriormente.

A avaliação das propriedades: coesão, exsudação e tixotropia foram determinadas qualitativamente a partir da observação do comportamento das argamassas produzidas.

3.5.2 Massa específica

A determinação da massa específica (ou densidade de massa) das argamassas no estado fresco, foi conduzida em conformidade com as prescrições normativas NBR 13278 (ABNT, 2005). Para tal, primeiramente, aferiu-se o recipiente para verificação de seu volume, que deve ser de cerca de 400 ml. As argamassas foram então preparadas de acordo com os tratamentos propostos, colocadas no molde e a massa do conjunto foi registrada. A massa específica é obtida correlacionando-se a massa da argamassa pelo volume do recipiente. A Figura 12 ilustra os procedimentos.

Figura 12 - Procedimento para ensaio de massa específica (densidade de massa)



3.5.3 Adesão Inicial

Devido à ausência de uma normatização própria para realização desse ensaio, foi desenvolvido neste trabalho, um procedimento que consiste na determinação da adesão inicial da argamassa de revestimento fresca. Este protocolo foi tomado como procedimento operacional padrão (POP) no Laboratório de Materiais de Construção Civil – Imc²/DECIV/EM/UFOP.

Para execução desta técnica, procedeu-se da seguinte forma: (a) pesagem do conjunto argamassa+cuba (tendo-se conhecida a tara da cuba); (b) lançamento da argamassa, com auxílio de colher de pedreiro (tamanho 8) sobre um substrato padrão (previamente molhado), a uma distância de 30 cm. O lançamento é feito com movimentos de punho, em sentido ascendente, conforme indicado na Figura 13.

O material não aderido ao substrato, denominado “rebote”, também deve ser pesado.

Figura 13 - Ensaio de adesão inicial. (a) lançamento da argamassa. (b) Material aderido ao substrato e "rebote".



De posse da massa de argamassa antes do lançamento e da massa da argamassa do "rebote", calcular a adesão inicial utilizando-se a Equação 2.

$$\text{Adesão inicial: } \left(1 - \frac{\text{"rebote"}}{\text{material lançado}}\right) * 100 \quad (2)$$

A adesão inicial é determinada, portanto, pela porcentagem de material que ficou aderido no substrato padrão.

3.5.4 Retenção de água

A determinação da retenção de água para as argamassas no estado fresco foi conduzida seguindo prescrições da norma NBR 13277 (ABNT, 1995).

Para realização do ensaio foi utilizado um molde cilíndrico de aço, de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, um conjunto de 12 papéis-filtro, gaze, peso de 2kg constituído de cilindro maciço de metal e uma placa circular de aço de 110 mm de diâmetro e 5 mm de espessura. Inicialmente foram registradas as massas do molde vazio (M_m) e do conjunto de papéis-filtro secos (M_{se}). A argamassa previamente preparada foi introduzida no molde, e registrou-se a massa desse conjunto argamassa/molde (M_{ma}). Sobre a superfície da argamassa foram colocadas duas gazes, o conjunto de papel-filtro e a placa rígida, aplicando centralizadamente o peso de 2 kg. Imediatamente foi acionado o cronômetro e, após dois minutos, retirou-se o peso de 2 kg e a placa rígida, registrando a massa do conjunto de papéis-filtro molhados (M_f). O aparato utilizado é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Procedimento para ensaio de retenção de água



Os resultados de retenção de água das argamassas colantes foram calculados pela Equação (3) a seguir.

$$R_a = \left[1 - \frac{(M_f - M_{se})}{AF(M_{ma} - M_m)} \right] * 100 \quad (3)$$

Sendo:

$$AF = \left(\frac{M_w}{M + M_w} \right) \quad (4)$$

Onde: M_w é a massa total de água acrescida à mistura, em gramas;

M é a massa de argamassa industrializada ou a soma das massas dos componentes anidros no caso de argamassa de obra, em gramas;

AF é o fator água/argamassa fresca;

M_f é a massa do conjunto de discos molhados de papel-filtro, em gramas;

M_{se} é a massa do conjunto de discos secos, em gramas;

M_{ma} é a massa do molde com argamassa, em gramas;

M_m é a massa do molde vazio, em gramas.

3.6 Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido

3.6.1 Resistência à Tração na Flexão

O ensaio para a determinação da resistência à tração na flexão foi conduzido conforme prescrições normativas estabelecidas pela NBR13279 (ABNT, 2005). Para cada tipo de tratamento foram rompidos 3 corpos de prova aos 28 dias de idade. Utilizou-se prensa EMIC, modelo DL 20000, célula de carga de capacidade de 20 KN, que permite maior sensibilidade na aplicação de cargas e obtenção dos resultados. O ensaio consiste em aplicar um carregamento constante de 50 ± 10 N/s no centro dos corpos de prova bi-apoiados com espaçamento de 10 cm entre os apoios. A Figura 15 ilustra a execução do ensaio.

Figura 15 - Ensaio de Resistência à Tração na Flexão



A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação (4).

$$R_f = \frac{1,5 * F_f * L}{40^3} \quad (2)$$

Onde: R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascais (MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons (N);

L é a distância entre os suportes, em milímetros (mm).

40^3 = volume do corpo de prova (mm^3)

3.6.2 Resistência à Compressão

O ensaio para a determinação da resistência à compressão foi conduzido segundo prescrições normativas estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005). O ensaio consiste romper por compressão simples as metades dos corpos de prova prismáticos rompidos nos ensaios de tração na flexão, devidamente posicionados em dispositivo para aplicação de carga. Para cada tratamento (dosagem para argamassa) foram rompidos 3 corpos de prova, com idades de 28 dias e 56 dias. Utilizou-se prensa EMIC, modelo DL 20000, com célula de carga de capacidade de 200 KN. A Figura 16 ilustra a execução do ensaio.

Figura 16 - Ensaio de Resistência à Compressão



A resistência à compressão pode ser calculada pela Equação (5) apresentada a seguir.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3)$$

Onde: R_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F_c é a carga máxima aplicada em newtons (N);

1600 é a área da seção considerada quadrada (mm²).

3.6.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram executados de acordo com prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram utilizados 03 (três) corpos de prova de cada tratamento para cada determinação. Para o ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos de dimensões Ø5cmx10cm, mostrados na Figura 17.

Figura 17 - CPs 5cmx10cm



O protocolo adotado para execução do ensaio consiste em: (a) determinação da massa dos corpos de prova ao ar; (b) acondicionamento em estufa à temperatura de (105 ± 5) °C por 72h; (c) pesagem dos CPs; (d) imersão dos CPS em água à temperatura ambiente por 72h (saturação); (e) colocação dos CPs em um recipiente

de água que deve ser progressivamente levado à ebulição (ação da água quente deve durar 5h); (f) resfriamento da água até a temperatura de cerca de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$; (g) remoção dos CPs da água; (h) secagem superficial; (i) nova pesagem; (j) determinação da massa imersa em balança hidrostática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização química

Os resultados obtidos pela técnica de FRX para a EA (Tabela 5), apontaram altos teores de: CaO (49,1%), Fe₂O₃ (24,1%) e SiO₂ (14,3%).

Tabela 4 – Composição química da amostra de EA obtida por FRX

Óxidos	CaO	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Cl
EA	49,1	14,3	0,5	24,1	1,6	3,3	2,9	0,4	3,4	0,1	-	-

Tais resultados estão em concordância com os obtidos por outros autores que estudaram materiais semelhantes (TOFFOLO, 2015; SOUZA, 2015; POLESE, 2007). Destaca-se o fato de a presença de altos teores de Fe₂O₃ e outros óxidos metálicos influenciar diretamente no aumento da massa específica do agregado e da argamassa produzida a partir do mesmo.

4.2 Processamento e Caracterização Física

4.2.1 Separação magnética e gravimétrica das amostras

O processamento das amostras de EA indicou presença de materiais metálicos (magnéticos) nas amostras, cujo resultado foi de 9,7% em relação a todo material beneficiado.

A recuperação destes teores de ferro metálico contidos na escória, chamado de sucata metálica, se faz importante para a reinserção desta no processo siderúrgico contribuindo para a redução dos custos de produção, relativamente ao consumo de energia (GONÇALVES, 2015).

Além do benefício econômico, a remoção da fração metálica presente nas EA contribui para a durabilidade das matrizes cimentícias, visto que teores elevados de ferro metálico são deletérios às mesmas.

Vale ressaltar que nem todo material metálico presente nas amostras é magnético, uma vez que parte do ferro presente se encontra em forma de óxido; não sendo recuperado, portanto, por este processo de beneficiamento. O resultado depende também da eficiência de recuperação do equipamento utilizado.

4.2.2 Segregação segundo frações granulométricas

Os valores para dimensão máxima característica (DMC) e módulo de finura (MF) obtidos para a areia natural e para as areias de escória, e faixas padronizadas pela normalização apresentam-se à Tabela 5, a seguir.

Tabela 5 - Dimensão máxima característica e módulo de finura das areias

	AEM	AN	AES
Módulo de finura	2,33	2,33	1,7
DMC (mm)	2,4	2,4	0,6

Zona utilizável inferior: $1,55 \leq MF < 2,20$; Zona ótima: $2,20 \leq MF < 2,90$ e Zona utilizável superior: $2,90 \leq MF < 3,50$ (Limites conforme NBR 7211, ABNT 2005)

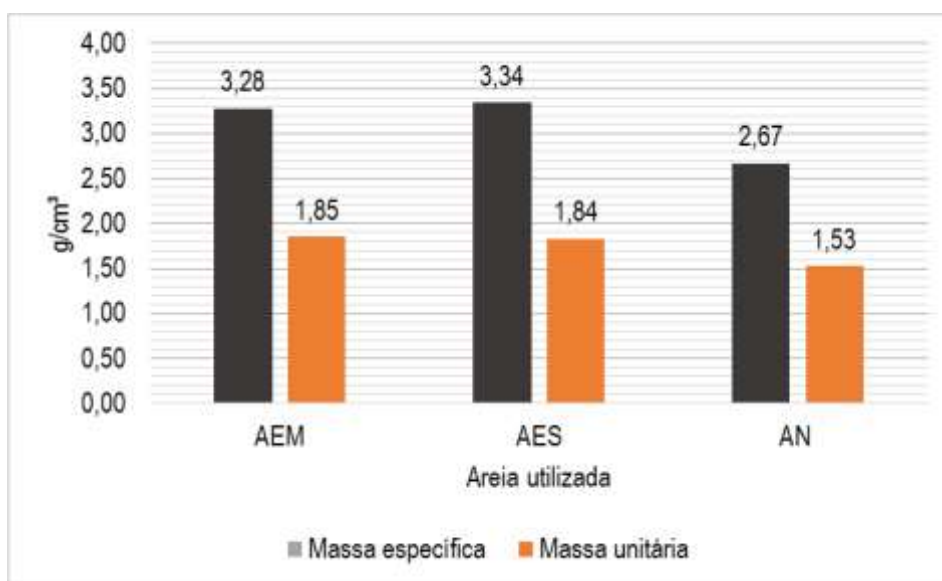
As areias padrão produzidas, de acordo com a faixa central entre as curvas de limite superior e inferior da BS 1200 (1976), denominadas por AN e AEM, apresentaram módulo de finura (MF) correspondente à zona ótima de utilização para agregados miúdos segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005). Já a areia de granulometria mais fina, denominada AES, possui MF correspondente ao da zona utilizável inferior. Todas as areias são, portanto, aplicáveis como agregado miúdo.

4.2.3 Massa Específica e Massa Unitária

As massas específica e unitária para as areias de escória (AEM e AES) e para areia natural (AN) foram determinadas de forma paramétrica. Os resultados têm por objetivo estabelecer padrão comparativo entre os agregados obtidos do processamento da escória e aqueles convencionalmente utilizados na produção de argamassas. O resultado para massa unitária é especialmente importante para produção de argamassas em que se estabelecem parâmetros de dosagem por volume, enquanto aqueles obtidos para massa específica dizem respeito a aplicabilidade do material como elemento construtivo, relativamente a qualidade das misturas no estado fresco e endurecido, produtividade dos operadores dentre outros parâmetros de interesse. Podendo-se estimar a densidade da argamassa a ser produzida, escolhendo-se material mais ou menos denso.

A Figura 18 indica os resultados obtidos para massa unitária e massa específica para areias de escória e areia natural.

Figura 18 - Massa unitária e massa específica das amostras



Os valores elevados para as massas específicas das areias produzidas a partir de EA se deve, principalmente aos altos teores de Fe_2O_3 e outros óxidos metálicos contidos nas amostras, conforme observado nos resultados de FRX (Tabela 6). A mesma justificativa é válida para os valores obtidos para massa unitária das areias de

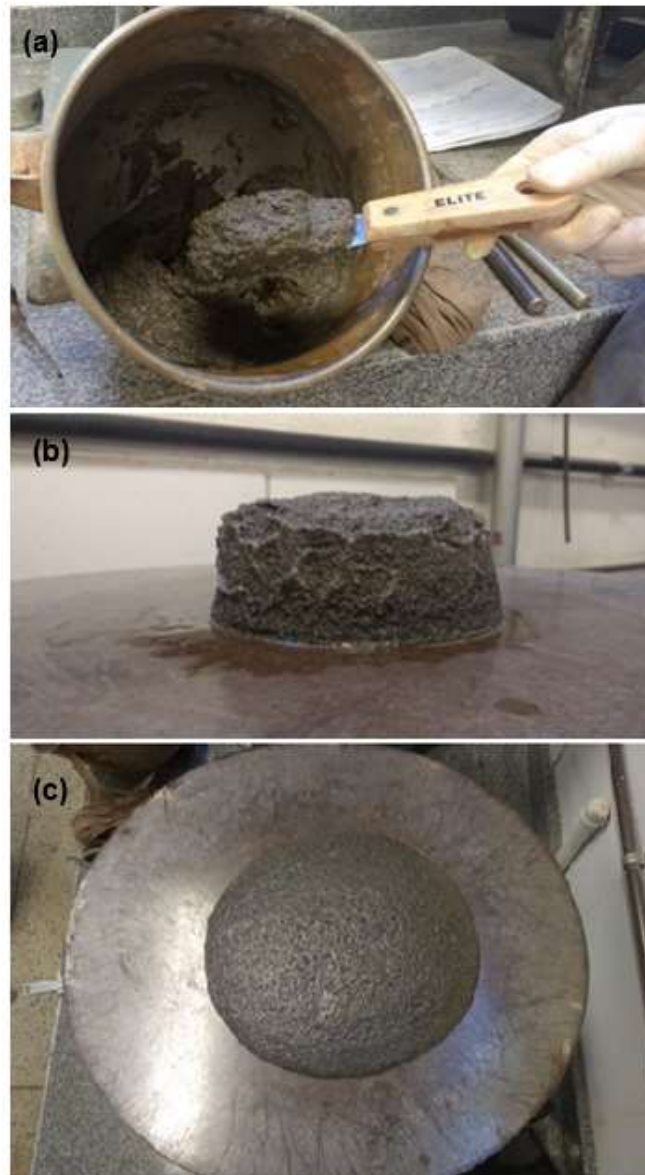
escória serem maiores que para a areia natural; e são compatíveis com aqueles obtidos por Toffolo (2015) e Polese (2007).

4.3 Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

4.3.1 Trabalhabilidade, Plasticidade, Exsudação, Coesão e Tixotropia

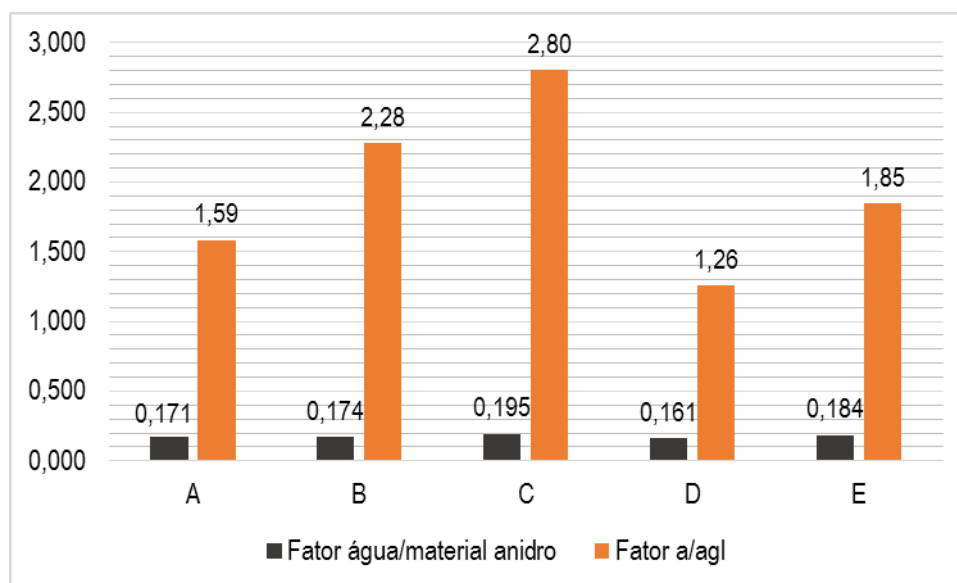
Conforme ilustrado à Figura 19(a), as argamassas apresentaram coesão adequada, o que pode ser confirmado pela boa distribuição das fases constituintes, definida pela capacidade desta argamassa fresca em manter seus materiais componentes homogêneos sem segregação ou exsudação. A Figura 19(b) reforça boa coesão das argamassas, onde não se percebe fuga de água da matriz, o que indica não haver ocorrência de exsudação em nenhum dos tratamentos produzidos. Ainda em relação à Figura 19(c) que ilustra propriedades tixotrópicas, observou-se que as argamassas produzidas exigiram baixa energia para que se produzissem alterações em sua forma, e depois destas alterações de forma, as argamassas mantiveram-se estáveis mesmo sob ação da gravidade, fator muito importante para aplicabilidade das argamassas obtidas como produto.

Figura 19- Argamassas produzidas com areia de escória, evidenciando boa coesão e trabalhabilidade.



Foram considerados como aglomerantes, o cimento Portland e a cal hidratada utilizados nas dosagens das argamassas. Os fatores água/aglomerante obtidos para os tratamentos (A), (B), (C), (D) e (E) propostos, apresentam-se à Figura 20.

Figura 20 - Fatores água/material anidro e água/aglomerantes obtidos

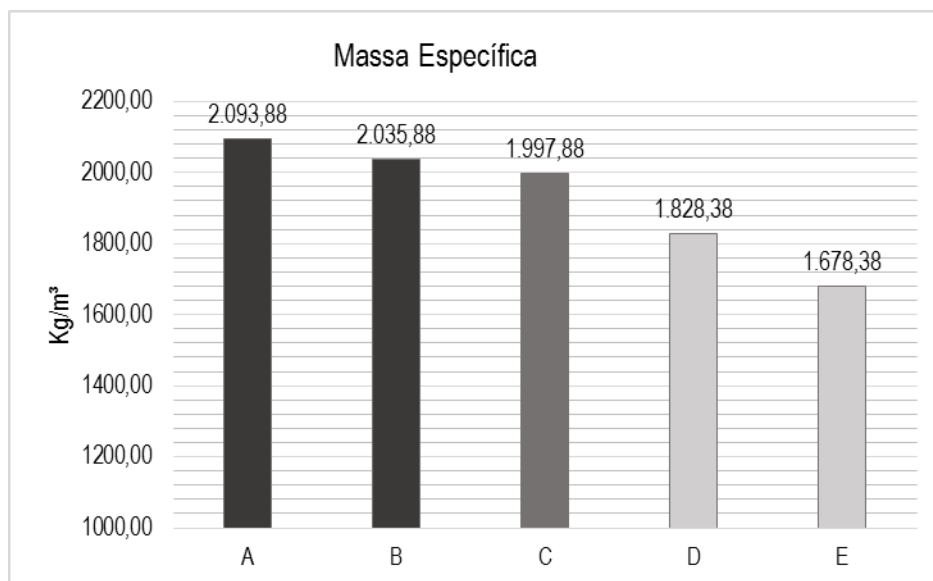


4.3.2 Massa específica

Quanto menor a massa específica (densidade de massa), mais leve será argamassa e a mesma ainda terá capacidade de manter por mais tempo as propriedades de trabalhabilidade, o que pode significar redução do esforço do operário quando da sua aplicação, resultando em um aumento de produtividade. Por isso, sugeriu-se a utilização do LAS nas argamassas produzidas – para incorporação de ar e consequente melhora na trabalhabilidade.

O resultado para o ensaio de massa específica no estado fresco, realizado de acordo com as prescrições da norma NBR 13278 (ABNT, 2005), podem ser visualizados na Figura 21.

Figura 21 - Massa específica (Densidade de Massa)



Tratamentos: **A:** 1:1:6 (AEM); **B:** 1:0:6 (AEM); **C:** 1:0:6 (AES); **D:** 1:1:6 (AN); **E:** 1:0:6 (AN)

Os resultados obtidos indicam que a massa específica reduz com aumento do teor de LAS. Essa redução se deve a incorporação de ar induzida pelo aditivo. Como evidenciado pelas argamassas de tratamento D e E, produzidas com agregado AN, contendo 0,15% e 0,20% de LAS, respectivamente. O mesmo ocorre ao se comparar as argamassas produzidas com agregado AEM (Tratamentos A e B). Além disso, a adição de cal influenciou aumento da massa específica no estado fresco das argamassas, provavelmente devido ao maior empacotamento promovido pelos finos.

Observou-se também uma elevada massa específica para argamassa de tratamento C. Tal fato pode estar relacionado ao melhor empacotamento da matriz pela melhor distribuição dos grãos de menor granulometria, bem como algum efeito filler.

Segundo a classificação proposta por Carasek (2010), todas as argamassas produzidas apresentam densidade de massa normal.

Segundo os limites estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas que receberam os tratamentos A e B são classificadas como D6; as de tratamentos C e D como D5 e a de tratamento E como D4.

4.3.3 Adesão Inicial

O ensaio de adesão inicial avaliou a quantidade de argamassa aderida ao substrato padrão para cada tratamento, segundo metodologia proposta.

A adesão inicial garante às argamassas, estabilidade quando lançadas contra o substrato, garantindo adequada união ao substrato após o seu lançamento. Esta propriedade é fortemente influenciada pela plasticidade, coesão e tixotropia das argamassas, mas também diretamente dependente das condições do substrato em que é aplicada (absorção inicial e rugosidade).

Para o tratamento (A), traço 1:1:6 – cimento, cal, areia de escória AEM e 0,15% LAS, observou-se boa adesão inicial ao substrato, cerca de 88% (Figura 21-A).

Para o tratamento (B), traço 1:0:6 – cimento, areia de escória AEM e 0,20% LAS, obteve-se adesão inicial de cerca de 82%. (Figura 21-B).

Comparando tratamentos (A) e (B), percebe-se maior rebote para o tratamento (B), mesmo com maior concentração de LAS. A ausência da cal e maior teor de água representado pelo fator (a/agl), contribuíram para alterações na reologia que influenciaram a adesão inicial. Além do fato da adesão inicial ser prejudicada pela menor retenção de água, devido à ausência de cal.

Para o tratamento (C), traço 1:0:6 – cimento, areia de escória AES e 0,20% LAS, observou-se uma boa adesão inicial ao substrato, cerca de 90%, com pequeno rebote (Figura 21-C)

Embora o consumo de água (a/agl) para o tratamento (C) tenha sido superior aos tratamentos (A) e (B), o desempenho do tratamento (C) pode estar associado ao efeito da combinação de partículas finas e LAS. Uma maior superfície específica associada a dispersão controlada de bolhas de ar (ar incorporado) podem ter contribuído para um maior acúmulo de água, induzindo melhor adesão inicial, conforme evidenciado pela Figura 21 e pelo ensaio de retenção de água, apresentado na sequência.

Para o tratamento (D), traço 1:1:6 – cimento, cal, areia natural AN e 0,15% LAS, observou-se adesão inicial de cerca de 94%, conforme ilustrado à Figura 21-D.

A presença de cal hidratada nas argamassas influencia positivamente a reologia da matriz, garantindo boa adesão inicial, como observado também para o tratamento

(A). A cal hidratada contribui ainda para maior retenção de água e incremento da superfície específica da matriz, mesmo considerando que tratamento (D) possua fator (a/agl), inferior ao tratamento (A), fenômeno associado a morfologia dos grãos da AN.

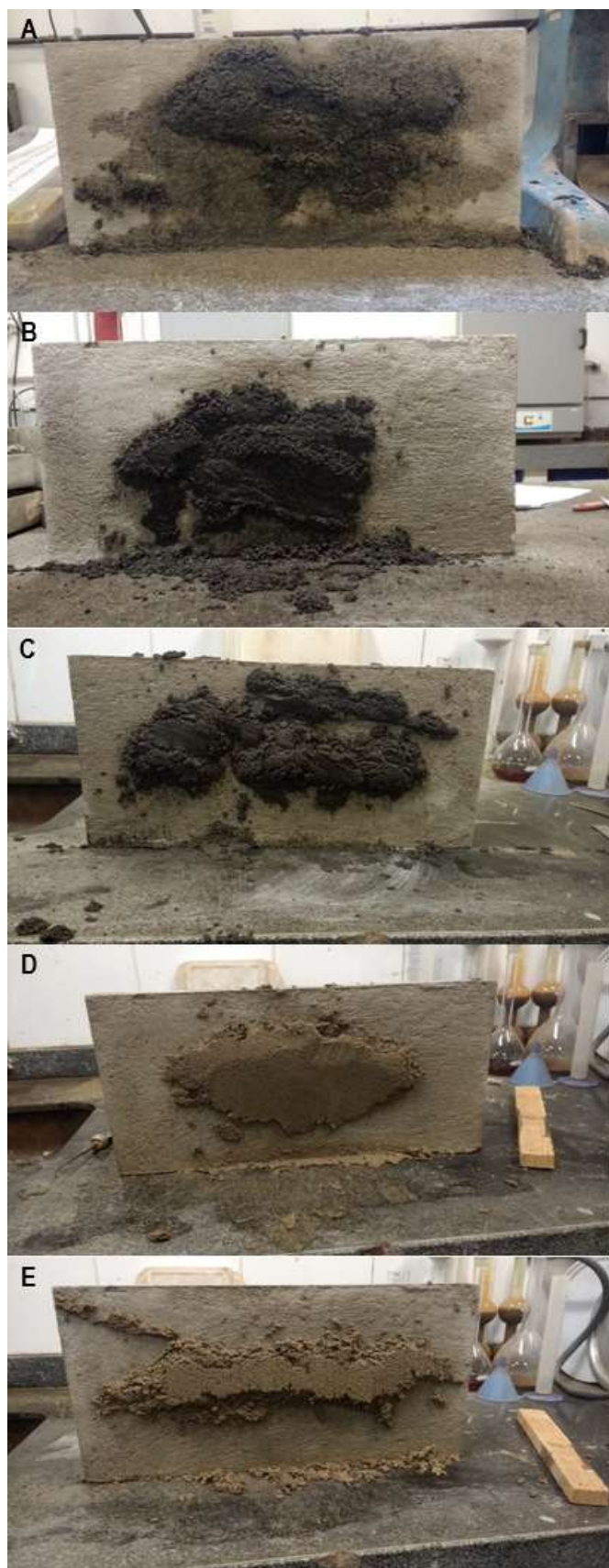
Para o tratamento (E), traço 1:0:6 – cimento, areia natural AN e 0,20% LAS, observou-se adesão inicial de cerca de 91%, conforme ilustrado na Figura 21-E.

Comparando tratamentos (D) e (E), percebe-se maior rebote para o tratamento (E), mesmo com maior concentração de LAS. A ausência da cal e maior teor de água representado pelo fator (a/agl), contribuíram negativamente para a reologia da matriz, prejudicando a adesão inicial.

As argamassas obtidas dos tratamentos (A) (traço 1:1:6 – cimento, cal, areia de escória AEM e 0,15% LAS) e (D) (traço 1:1:6 – cimento, cal, areia natural AN e 0,15% LAS) demonstraram desempenho semelhante para adesão inicial.

A argamassa sem adição de cal hidratada, obtida do tratamento (C) (traço 1:0:6 – cimento, areia de escória AE^S e 0,20% LAS) por possuir maior superfície específica associada a dosagem adequada de LAS exibiu melhor adesão inicial que argamassa obtida do tratamento (E) (traço 1:0:6 – cimento, areia natural AN e 0,20% LAS).

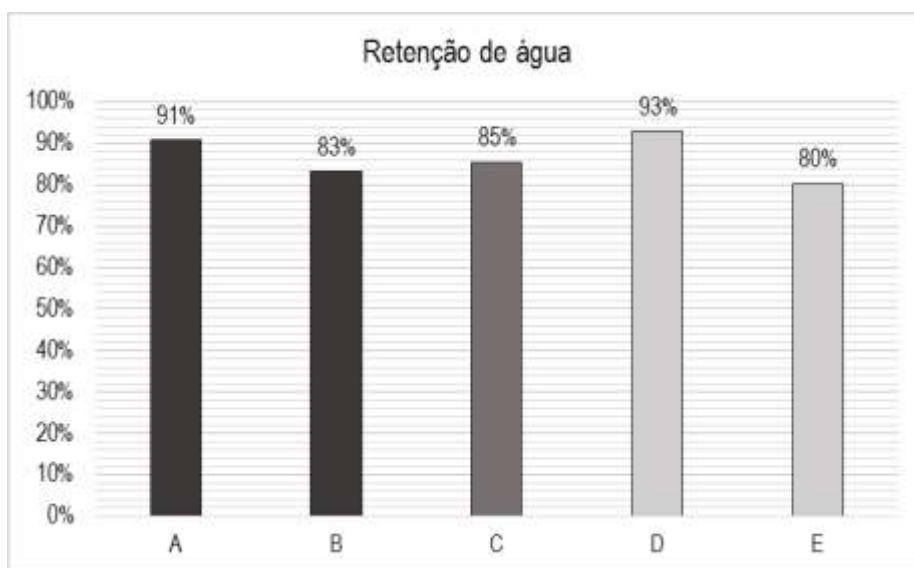
Figura 22 - Resultados – Ensaio de Adesão Inicial. (A) Tratamento A; (B) Tratamento B; (C) Tratamento C; (D) Tratamento D; (E) Tratamento E.



4.3.4 Retenção de água

A retenção de água é uma propriedade fundamental para desempenho adequado de argamassas, influenciando diretamente a aderência da argamassa ao substrato e contribuindo também para melhor hidratação do cimento. A quantidade de água retida pela argamassa produz maiores tensões de aderência, melhor desempenho produtivo e maior durabilidade, função da maior formação de produtos de hidratação que resultam de fato em ligações mais fortes entre revestimento e substrato (CARASEK, 2010).

Figura 23 - Retenção de água das argamassas



As argamassas com cal tiveram maior retenção de água. A maior incorporação de água pelas argamassas reduz o rebote quando do lançamento das argamassas de revestimento, aumentam a tensão de aderência entre argamassa e substrato e contribuem ainda para a redução dos efeitos de retração por secagem (CARASEK, 1996).

Destaca-se o fato de a argamassa produzida com areia de escória contendo maior teor de finos, sem adição de cal (Tratamento C - 1:0:6 AE^S), apresentar retenção de água superior aos demais traços também sem cal. Tal resultado é coerente, uma vez que a capacidade de retenção de água da argamassa está ligada, também, à superfície específica de seus constituintes. Pois quanto maior a finura, maior a área

específica e maior a capacidade de retenção. Além disso, por possuir uma textura superficial mais rugosa que os agregados naturais, a escória é mais susceptível à retenção de umidade (TOFFOLO, 2015).

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) as argamassas de tratamentos B, C e E (todas sem adição de cal) são classificadas como U3, e as com adição de cal – tratamentos A e D - são classificadas como U4.

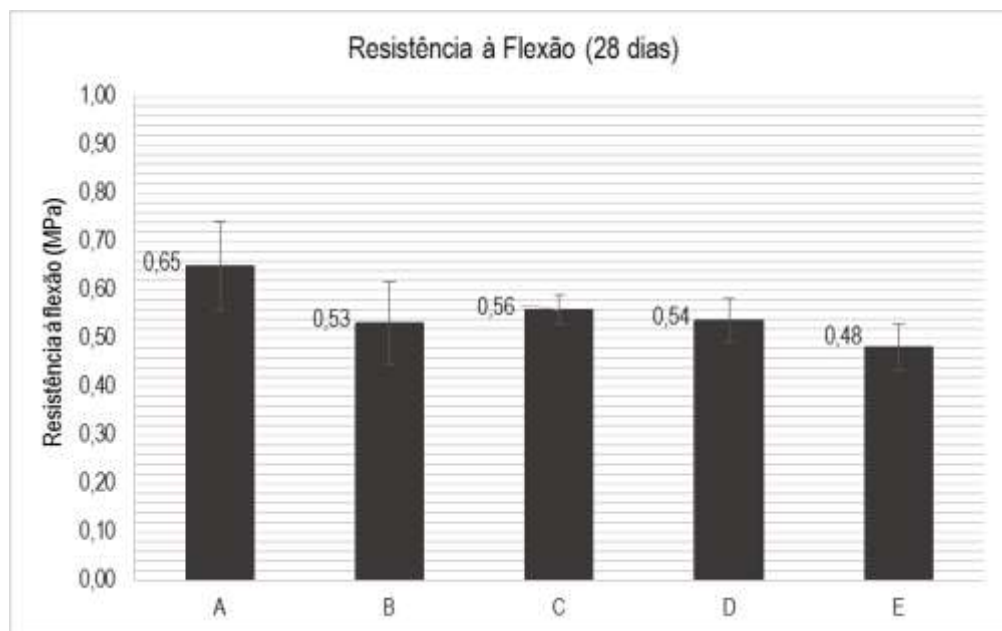
4.4 Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido

4.4.1 Resistência à Tração na Flexão

Os resultados obtidos, indicaram que para as argamassas de tratamentos B e E, cujo teor de LAS foi equivalente a 0,20%, a resistência à flexão foi inferior às de tratamento A e D, respectivamente, que foram dosados com teor 0,15%. Tal resultado pode ser justificado pelo aumento do teor de ar incorporado e do índice de vazios e, conseqüentemente, das descontinuidades da matriz; diminuindo, portanto, sua resistência mecânica.

O efeito filler também pode ser o responsável pela boa resistência à tração na flexão apresentada pela argamassa submetida ao tratamento C, ou seja, aquela cuja areia de escória possui maior teor de finos em sua composição, tornando a matriz mais compacta.

Figura 24 - Resistência à Flexão



Pela classificação estabelecida na NBR 13281 (ABNT, 2005), todas as argamassas são de classe R1 ($\leq 1,5$ MPa).

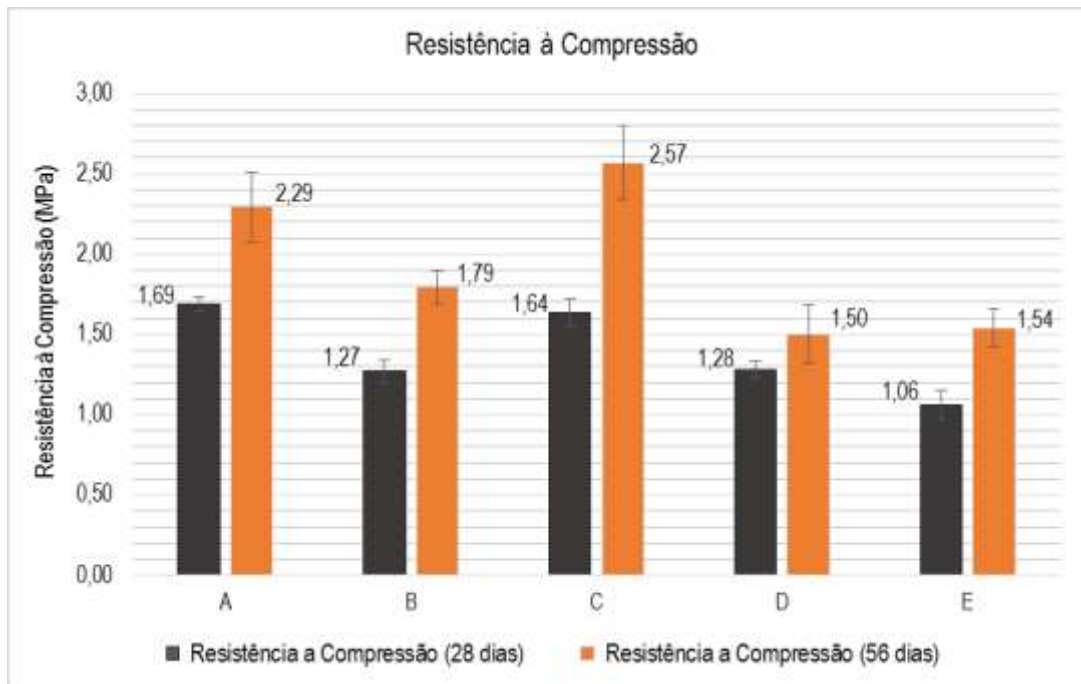
4.4.2 Resistência à Compressão

Os resultados obtidos, indicaram que para a argamassa de tratamento B e E, cujo teor de LAS foi equivalente a 0,20%, a resistência à compressão foi inferior às de tratamento A e D, que foram dosadas com teor de 0,15%. Tal decréscimo pode ser derivado do aumento da porosidade da matriz, como evidenciado pelo resultado do índice de vazios apresentado a seguir. Uma matriz menos íntegra possui menor resistência mecânica.

Novamente, o efeito filler também pode ser o responsável pela elevada resistência à compressão apresentada pela argamassa submetida ao tratamento C, ou seja, aquela cuja areia de escória possui maior teor de finos em sua composição. Compensando seu maior teor de LAS (0,20%).

Outro fato que merece destaque é o ganho percentual de cerca de 36% obtido pela argamassa de tratamento C. Tal resultado pode estar relacionado à atividade cimentante de longo prazo típico do C_2S (silicato dicálcico ou belita), cura autógena favorecida pelo formato dos grãos de EA ou mesmo atividade pozzolânica.

Figura 25 - Resistência à Compressão.

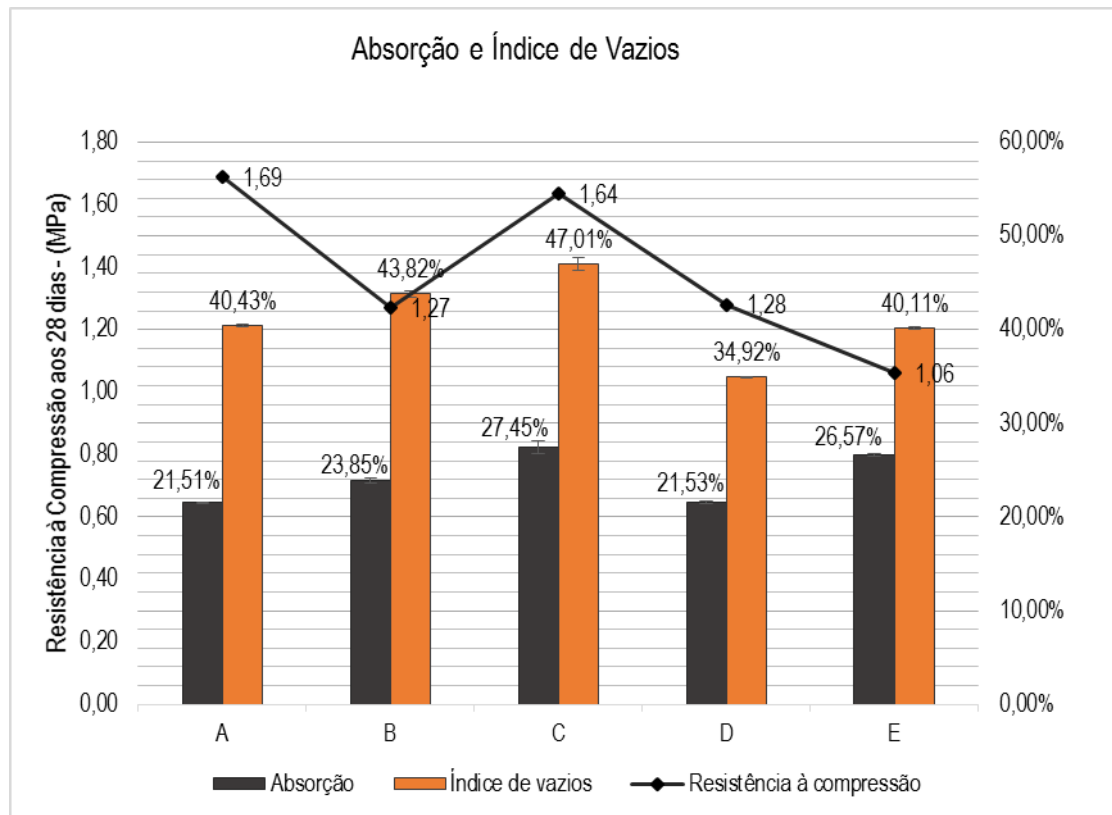


Conforme limites estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005) todas as argamassas são classificadas como P1 aos 28 dias de idade.

4.4.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Para argamassas produzidas com as areias AEM - tratamentos (A) e (B), com teores de LAS de 0,15% e 0,20%, respectivamente, a relação do índice de vazios e da absorção de água foi inversamente proporcional à resistência mecânica, como evidenciado na Figura 26.

Figura 26 - Absorção e Índice de vazios

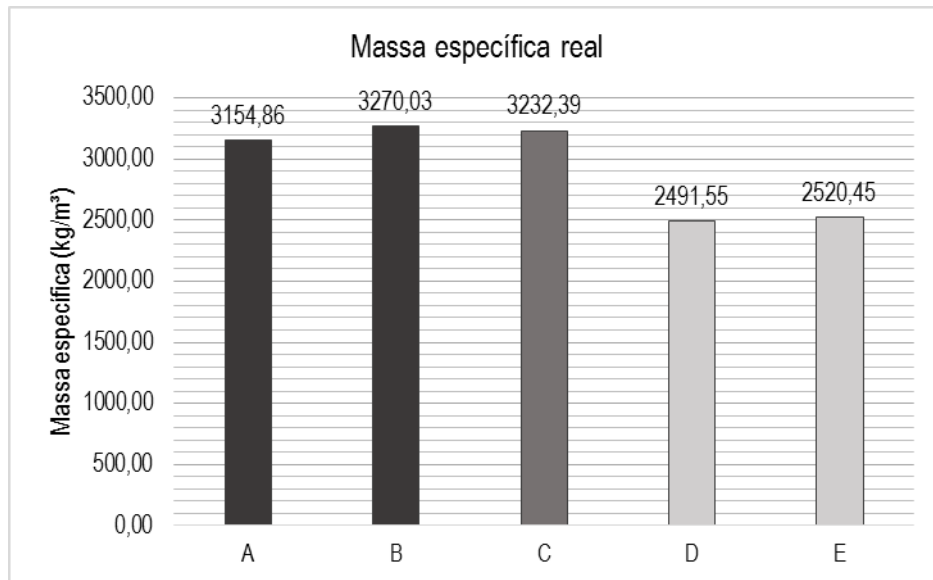


O mesmo acontece para as argamassas produzidas com areia natural, AN, tratamentos (D) e (E): quanto maior o teor de LAS, maior índice de vazios e absorção de água, e menor a resistência mecânica.

Entretanto, quando se analisa o traço 1:0:6 AES, tratamento (C), cuja absorção de água e índice de vazios foi superior aos demais, tal relação não pode ser aplicada. Acredita-se que isso se deva ao fato de a matriz ainda manter sua compacidade e que o índice de vazios e absorção de água se deva a pequenos poros dispersos na mesma, não prejudicando seu comportamento mecânico.

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos para massa específica real dos corpos de prova:

Figura 27 - Massa específica real



As argamassas produzidas com areia AN, apresentaram menores valores para massa específica real devido à menor massa específica da areia de rio, se comparada às areias de escória.

Para as argamassas produzidas com areia AN, ou seja, tratamentos (D) e (E), a argamassa contendo cal em sua composição (D), apresentou menor valor para massa específica (densidade de massa no estado endurecido). Tal fato é devido à incorporação de ar e consequente aumento dos vazios. Além do fato de a cal que é menos densa que a escória e a areia, influenciando na massa específica da argamassa.

A mesma justificativa pode ser aplicada para as argamassas de tratamentos (A) e (B), ambas produzidas com areia de escória AEM; em que a argamassa contendo cal, (A), apresentou menor massa específica.

A argamassa de tratamento (C), produzida com areia de escória AES, ou seja, aquela com maior porcentagem de finos, apresentou elevado valor para massa específica. Tal resultado pode ser justificado pelo fato de que os finos ocupam os vazios entre os grãos de areia, aumentando assim a compacidade do conjunto.

Todas as argamassas produzidas são classificadas como M6 de acordo com os limites estabelecidos na NBR 13281 (ABNT, 2005).

5 CONCLUSÃO

Os agregados produzidos com EA são aptos para a produção das argamassas de revestimento de alvenarias, Uma vez que os processos adotados neste trabalho se mostraram apropriados para produção dos agregados dentro dos limites preconizados pelas normas brasileiras.

Os teores relativamente elevados de Fe_2O_3 contidos na areia produzida a partir de EA, induziram a massas específicas no estado fresco das argamassas maiores que aquelas produzidas com agregado natural. Entretanto, os valores encontrados não diferem entre si em mais de 20%, se compararmos o maior e o menor dos valores obtidos. Tal fato pode ser devido à incorporação de ar provocada pela adição de LAS.

Argamassas com maiores teores de LAS apresentaram desempenho mecânico inferior comparativamente àquelas utilizando o mesmo agregado e menor teor de LAS.

A argamassa produzida com areia de escória na granulometria mais fina apresentou comportamento mecânico e propriedades no estado fresco superiores aos das argamassas produzidas sem adição de cal.

As argamassas com maior retenção de água apresentaram valores menores para massa específica real; comparando-se o mesmo tipo de agregado utilizado. Observou-se que o LAS atuou melhor em material finamente disperso e que a incorporação de ar provocada pelo mesmo não afetou a resistência mecânica das mesmas, provavelmente pela existência de pequenos poros não conectados dispersos pela matriz.

A substituição de agregados naturais por agregados produzidos a partir de escória de aciaria pré-processadas apresentou-se, portanto, como alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

ABNT. **NBR 1763** - Aditivos para concreto de Cimento Portland. Rio de Janeiro: Associação Brasileira De Normas Técnicas, 1992.

ABNT. **NBR 9776** - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ABNT. **NBR 13276** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 13277** - Arrgamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 13278** - Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da Densidade de Massa e do Teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 13279** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 13281** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 7211** - Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR NM 45** - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

ASTM. **ASTM C144-84** - Aggregate for masonry mortar. Filadélfia: [s.n.], 1987.

BS - BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 1200** - Sands for mortar for plain and reinforced brickwork, blockwork, blockwalling and masonry. Londres, 1976.

CALMON, J. L. Resíduos Industriais e Agrícolas. In: _____ **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010. p. 1712.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de Cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. São Paulo, 1996. p. 285.

CARASEK, H. Argamassas. In: _____ **Materiais de Construção Civil**. São Paulo: Ibracon, 2010.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto**. Porto Alegre. 2001.

GONÇALVES, D. R. R. **Análise da Viabilidade Econômica via simulação de Monte Carlo para Utilização da Escória de Aciaria como Agregado na Fabricação de Pré-fabricados para a Construção Civil - Ecoblocos**. Ouro Preto, 2015.

IABR. **Relatório de Sustentabilidade de 2016**. Rio de Janeiro. 2016.

JANUZZI, R. V. **Modelagem do comportamento mecânico de blocos e prismas produzidos com escória de aciaria elétrica para alvenaria estrutural**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 136. 2014.

MARINO, V. F. **Coeficiente de Conformação Superficial de Armaduras em Concreto Sustentável – Escória de Aciaria**. Ouro Preto. 2016.

MEHTA, P. K. M. P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª. ed. [S.l.]: Ibracon, 2014.

MENDES, J. C. Viabilidade técnica do uso de Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias. In: _____ **Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Ouro Preto, 2016. p. 97.

MENDES, J. C. et al. Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS – based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, 2017. 648-661.

PAILLERE, A. M. Application of Admixtures in Concrete. **RILEM**, Londres, n. 1, 1995.

PETRUCCI, E. **Materiais de Construção**. 5ª. ed. Porto Alegre: Globo, 1980.

POLESE, M. D. O. Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF. In: _____ **Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. [S.I.]: Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

RATO, V. N. **Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas**. Lisboa, 2006.

SABBATINI, F. **O processo construtivo de edifícios de alvenaria estrutural sílicocalcária**. São Paulo, 1984.

SANTOS, S. R. **Argamassas pré-doseadas para rebocos de edifícios recentes**. Lisboa, 2009.

SILVA, J. P. Agregados e Sustentabilidade. In: _____ **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM, 2012.

SILVA, M. J. D. **Elementos de Concreto para Pavimentação Produzidos com Agregados de Escória de Aciaria**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto, p. 130. 2011.

SOUZA, B. P. D. Aderência de Barras de Aço tipo CA em Concreto Sustentável. In: _____ **Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

SOUZA, E. B. D. O. E. **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Belo Horizonte. 2007.

TOFFOLO, R. V. M. Pavimentos Sustentáveis. In: _____ **Tese de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**. Ouro Preto, 2015. p. 107.