

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

JULIA INDUZZI BORGES
LAILA COZZER CAZER

**ANÁLISE DE ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO
DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

VITÓRIA
2023

JULIA INDUZZI BORGES

LAILA COZZER CAZER

**ANÁLISE DE ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO
DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ronaldo Pilar

VITÓRIA

2023

JULIA INDUZZI BORGES

LAILA COZZER CAZER

**ANÁLISE DE ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO COM INCORPORAÇÃO
DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Ronaldo Pilar

Dr. Ronaldo Pilar

Orientador

Dra. Rudiele Aparecida Schankoski

Avaliador interno

Eng^a. Laylla Vidotto de Mello

Avaliador externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por nossas vidas e pela vida daqueles que contribuíram para que chegássemos até aqui.

Às nossas famílias, principalmente aos nossos pais e irmãos, a quem tanto amamos e nos deram forças nessa caminhada.

À Universidade Federal do Espírito Santo por nos proporcionar um ensino gratuito e de qualidade.

Nossos sinceros agradecimentos ao nosso orientador, Prof. Dr. Ronaldo Pilar, pelo incentivo e pelos ensinamentos proporcionados durante todo o processo, além de todo o tempo concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradecemos também à Prof.^a Dr.^a Rudiele Aparecida Schankoski e Eng^a Laylla Vidotto de Mello por aceitarem prontamente nosso convite para compor a banca deste trabalho.

A todos os profissionais do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, por nos fornecerem todos os meios para que nos tornássemos engenheiros, e nos possibilitou conhecer tantas pessoas ao longo deste percurso.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC), Breno, Luana, Márcio e Henrique, por toda ajuda no desenvolvimento de nossa pesquisa, sempre dispostos a nos auxiliar no preparo e execução dos ensaios propostos.

À equipe do Nanotec da Universidade Federal de Santa Catarina pela disponibilização das análises dos resultados dos ensaios.

À ArcelorMittal Tubarão, especialmente ao Eng. Diego Corrêa Magalhães pelo fornecimento do resíduo utilizado e por todo apoio durante a pesquisa.

Aos nossos amigos que sempre estiveram presentes, pela amizade e companheirismo.

À todas as pessoas, que de alguma forma, se fizeram importantes e contribuíram para a execução deste trabalho.

Nosso muito obrigada!

RESUMO

A escória de aciaria LD é um resíduo proveniente de processos siderúrgicos, gerado em larga escala e sem destinação específica, com aplicações limitadas devido às suas propriedades expansivas que provêm da hidratação do CaO e MgO livres presentes. Na construção civil, as argamassas de alto desempenho sofrem do fenômeno da retração autógena durante o processo de hidratação por possuírem baixa relação água/cimento. Para analisar o uso desse co-produto como uma alternativa sustentável e aprimorando as propriedades das argamassas, esse projeto teve por objetivo estudar o comportamento de argamassas de alto desempenho com incorporação de escória de aciaria LD, analisando as propriedades no estado fresco e endurecido, especialmente em relação a trabalhabilidade, resistência à compressão e à retração autógena. Para isso, foram produzidas argamassas contendo 0, 5 e 10% de substituição de cimento por resíduo siderúrgico, com relações a/c de 0.3 e 0.4. O cimento foi dosado em laboratório, sem adições, sendo a proporção mantida em 94,5% de clínquer e 5,5% de gipsita para todos os traços estudados. Já para os traços com incorporações de escória, as relações foram de 95% de cimento para 5% de escória LD e 90% de cimento para 10% de escória LD. Com os resultados das análises, pode-se concluir que tratando-se da trabalhabilidade e da resistência à compressão, os resultados foram dentro do esperado, enquanto relacionado à retração, não foram obtidas variações significativas, o que comprova que para os teores determinados, a incorporação de escória não apresenta melhorias relevantes se tratando da retração, mas pode sim influenciar positivamente quanto à resistência à compressão e negativamente na trabalhabilidade.

Palavras-chave: Escória LD; argamassa de alto desempenho; retração, resistência à compressão; fluidez.

ABSTRACT

BOF slag is a residue from steelmaking processes, generated on a large scale and without specific destination, with limited applications due to its expansive properties that come from the hydration of the free CaO and MgO present. In civil construction, high performance mortars suffer from the phenomenon of autogenous shrinkage during the hydration process because they have a low water/cement ratio. To analyze the use of this co-product as a sustainable alternative and improving the properties of mortars, this project aimed to study the behavior of high performance mortars with incorporation of BOF slag, analyzing the properties in the fresh and hardened state, especially in relation to workability, compressive strength and autogenous shrinkage. For this, mortars were produced containing 0, 5 and 10% of cement replacement by steel waste, with w/c ratios of 0.3 and 0.4. The cement was measured in the laboratory, without additions, and the proportion was maintained at 94.5% of clinker and 5.5% of gypsum for all mixes studied. For the mixtures with incorporation of slag, the ratios were 95% cement to 5% BOF slag and 90% cement to 10% BOF slag. With the results of the analyses, it can be concluded that in terms of workability and compressive strength, the results were within expectations, while related to shrinkage, no significant variations were obtained, which proves that for the levels determined, the incorporation of slag does not present relevant improvements when it comes to shrinkage, but can positively influence the compressive strength and negatively influence workability.

Keywords: BOF slag; high-performance mortar; shrinkage, compressive strength; fluidity.

LISTA DE ABREVIATÖES

a/c - Relação água/cimento

ARGAD - Argamassa de Alto Desempenho

BOF - Basic Oxygen Furnace

CAD - Concreto de Alto Desempenho

CAR - Concreto de alta resistência

CP III - Cimento Portland de Alto Forno

CT - Centro Tecnológico

IAB - Instituto Aço Brasil

LD - Linz-Donawitz

LEMAC - Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção

Nanotec - Laboratório de Nanotecnologia da UFSC

NBR - Norma Brasileira

NM - Norma Mercosul

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Representação do fluxograma de uma usina integrada.
- Figura 2 - Fase do lingotamento contínuo na ArcelorMittal Tubarão.
- Figura 3 - Processo da aciaria no convertedor LD.
- Figura 4 - Carros torpedo, ArcelorMittal Tubarão.
- Figura 5 - Armazenamento de Escória LD bruta ArcelorMittal Tubarão.
- Figura 6 - Armazenamento da escória LD beneficiada ArcelorMittal Tubarão.
- Figura 7 - Escória de aciaria LD.
- Figura 8 - Ruptura de um pavimento rodoviário construído com adição de escória de aciaria LD em Ouro Branco/MG.
- Figura 9 - Utilização de Cimento Portland Comum (OPC) x utilização de escória LD como material cimentante.
- Figura 10 - Comparação da trabalhabilidade entre diversas misturas contendo escória LD e a referência.
- Figura 11 - Gráfico ilustrado que mostra a comparação entre o tempo de pega das diferentes misturas.
- Figura 12 - Gráfico comparativo da resistência à compressão entre composições contendo escória LD e a referência.
- Figura 13 - Moinho de mandíbula.
- Figura 14 - Moinho de bolas.
- Figura 15 - Peneira 150.
- Figura 16 - Material passante na peneira 150
- Figura 17 - Tonel de armazenamento do clínquer moído.
- Figura 18 - Clínquer moído após ser homogeneizado.
- Figura 19 - Armazenamento do clínquer em sacos de 5kg.
- Figura 20 - Moinho de argolas.
- Figura 21 - Gipsita moída após passar pela peneira 200.
- Figura 22 - Escória de Aciaria LD fornecida pela ArcelorMittal após passar pelo processo de moagem.
- Figura 23 - Areia após processo de secagem a 400°C na mufla
- Figura 24 - Fluxograma das etapas da pesquisa.
- Figura 25 - Permeabilímetro Blaine. (a) Recorte da norma com as marcações dos pontos 9 e 10; (b) Equipamento utilizado para as análises de finura Blaine.

Figura 26 - Massa específica. (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Realização do ensaio.

Figura 27 – Análise granulométrica. (a) Peneiras da série normal; (b) Amostras de areia para execução do ensaio.

Figura 28 – Índice de consistência. (a) Preenchimento do tronco de cone com argamassa; (b) Tronco de cone preenchido e nivelado.

Figura 29 - Medida do diâmetro do espalhamento da argamassa. (a) Medida do diâmetro 1; (b) Medida do diâmetro 2; (c) Medida do diâmetro 3.

Figura 30 - Molde do corpo de prova.

Figura 31 - Tanque de imersão dos corpos de prova.

Figura 32 - Dimensões das formas para moldagem dos corpos de prova.

Figura 33 - Manta líquida acrílica impermeabilizante

Figura 34 - Argamassa com impermeabilizante na bancada de retração

Figura 35 - Tabela A.1 do anexo A da norma ABNT NBR 16372.

Figura 36 - Curva granulométrica da areia.

Figura 37 - Gráfico de calorimetria elaborado com diferentes teores de gipsita incorporados no cimento.

Figura 38 – Abertura das argamassas autoadensáveis.

Figura 39 - Rompimento de um dos corpos de prova com escória LD.

Figura 40 - Gráfico de Resistência Mecânica à Compressão para os traços com relação água/aglomerante = 0,3.

Figura 41 - Gráfico de Resistência Mecânica à Compressão para os traços com relação água/aglomerante = 0,4.

Figura 42 – Gráfico de microdeformação dos prismas com o tempo.

Figura 43 - Microdeformação (retração) nas horas 154 e 155 com desvio padrão.

Figura 44 - Primeiras horas de leitura da bancada de retração.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD.....	24
Tabela 2 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD fornecidas pela ArcelorMittal.....	25
Tabela 3 - Demais parâmetros da composição química em porcentagem da escória de aciaria LD fornecidas pela ArcelorMittal.	25
Tabela 4 - Misturas realizadas e obtenção de resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias.....	40
Tabela 5 - Traços utilizados para a pesquisa com unidade em gramas.....	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	PROCESSO SIDERÚRGICO.....	17
3.2	ESCÓRIA DE ACIARIA LD	20
3.2.1	Origem.....	20
3.2.2	Caracterização química	22
3.2.3	Caracterização física e morfológica.....	25
3.2.4	Classificação ambiental	27
3.2.5	Expansibilidade da escória de aciaria LD.....	27
3.2.5.1	Expansibilidade devido ao Óxido de Cálcio	28
3.2.5.2	Expansibilidade devido ao Óxido de Magnésio.....	29
3.2.5.3	Expansibilidade devido a outros fatores.....	31
3.3	ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO	33
3.3.1	Propriedades no estado fresco.....	34
3.3.1.1	Trabalhabilidade, manutenção da trabalhabilidade e tempo de pega 34	
3.3.2	Propriedades no estado endurecido	35
3.3.2.1	Resistência mecânica à compressão.....	35
3.3.2.2	O processo de retração autógena.....	36
3.4	ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR	37
3.4.1	Propriedades no estado fresco.....	40
3.4.1.1	Trabalhabilidade.....	40
3.4.1.2	Tempo de pega	42

3.4.2	Propriedades no estado endurecido	43
3.4.2.1	Resistência mecânica à compressão	43
4	METODOLOGIA	45
4.1	MATERIAIS	45
4.1.1	Cimento	45
4.1.3	Escória de aciaria LD.....	50
4.1.4	Agregado miúdo	50
4.1.5	Aditivo	51
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	52
4.2.1	Etapa I	52
4.2.1.1	Caracterização da escória de aciaria LD	53
4.2.1.1.1	Massa específica	53
4.2.1.1.2	Área Superficial.....	54
4.2.1.2	Caracterização do agregado miúdo	55
4.2.1.2.1	Massa específica	55
4.2.1.2.2	Análise granulométrica.....	57
4.2.1.3	Caracterização do clínquer	57
4.2.1.3.1	Massa específica	57
4.2.1.4	Caracterização da gipsita.....	58
4.2.1.4.1	Calorimetria.....	58
4.2.2	Etapa II	58
4.2.2.1	Índice de consistência.....	59
4.2.2.2	Resistência mecânica à compressão.....	60
4.2.2.3	Bancada de retração.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
5.1	ETAPA I	65
5.1.1	Caracterização da escória de aciaria LD	65

5.1.1.1	Massa específica	65
5.1.1.2	Índice de finura.....	65
5.1.2	Caracterização do agregado miúdo.....	66
5.1.2.1	Massa específica	66
5.1.2.2	Análise granulométrica.....	66
5.1.3	Caracterização do clínquer.....	67
5.1.3.1	Massa específica	67
5.1.4	Caracterização da gipsita	68
5.1.4.1	Calorimetria.....	68
5.2	ETAPA II	69
5.2.1	Índice de consistência	69
5.2.2	Resistência mecânica à compressão	70
5.2.3	Bancada de retração	73
6	CONCLUSÃO	78
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

A produção brasileira de aço bruto em 2022 somou 34 milhões de toneladas, de acordo com o Instituto Aço Brasil (IAB). As exportações atingiram 11,9 milhões de toneladas e as vendas internas foram de 20,3 milhões de toneladas neste mesmo ano.

Sendo o maior grupo siderúrgico do país, em 2022, a ArcelorMittal Brasil opera com capacidade instalada superior a 12,5 milhões de toneladas/ano, com plantas industriais em cinco estados. Na cidade Serra, no Espírito Santo, fica localizada a unidade de Tubarão, e embora a produção em grande escala do aço esteja próxima dos moradores da Grande Vitória, contribuindo financeiramente para o crescimento da cidade e geração de empregos, essa vantagem tem como consequência a produção de uma grande quantidade de resíduos siderúrgicos anualmente.

Os coprodutos gerados são variados e alguns já possuem destinação final sustentável, como é o caso da Escória de Alto Forno, aplicada na indústria de cimento. Por outro lado, mensalmente são geradas 95 kt da Escória de Aciaria LD a partir de minerais removidos com os fundentes no processo de refino de ferro gusa para geração do aço líquido. Esse coproduto não possui aplicação no mercado e será o alvo do presente estudo.

De acordo com Jiang et al. (2018) devido à alta demanda de produção de cimento e concreto em todo o mundo, as indústrias de cimento e concreto têm um interesse crescente em encontrar materiais alternativos para substituir o uso de recursos naturais. Assim, estudos são realizados constantemente para explorar a possibilidade de utilização de escórias de aço como materiais de cimento e concreto, dentre elas, a escória de aciaria do processo LD.

Se porventura a extração e o uso de materiais retirados na natureza não forem mitigados, é possível que se acarrete uma carência dessas matérias-primas, portanto, torna-se tão importante o estímulo para a modificação do uso de fontes convencionais para alternativas (MODRO, 2009).

Conforme Yildirim e Prezzi (2011) uma das formas de reduzir o uso de recursos naturais na engenharia civil é utilizando as escórias decorrentes da formação do aço, dentre elas, a de aciaria LD. Para que isso seja positivo, é essencial um bom

conhecimento do seu comportamento na presença de outros elementos reagentes, de modo que este coproduto possa ser bem aplicado.

Pelos estudos de Santos (2011), argamassas de alto desempenho (ARGAD) seguem o mesmo propósito do concreto de alto desempenho, sendo melhores que as convencionais, com melhor durabilidade, integridade, uniformidade e trabalhabilidade. No entanto, apesar das vantagens citadas, sabe-se que esse tipo de argamassa também sofre com o fenômeno da retração autógena, a qual ocorre durante o seu processo de hidratação, ocasionado por sua baixa relação água/aglomerante.

Dentre os estudos analisados sobre a retração, constatou-se uma possível viabilidade da adição da escória de aciaria LD como material cimentício suplementar na argamassa de alto desempenho, a qual é obtida por meio do emprego de adições minerais e aditivos plastificantes.

De modo a aproveitar os resíduos da indústria siderúrgica somado à melhoria das propriedades da argamassa de alto desempenho, surge o motivador do estudo da aplicabilidade da escória de aciaria LD como agente redutor de retração.

Segundo Martini (2015), este subproduto proveniente da conversão do ferro em aço possui comportamento expansivo devido aos seus componentes e, por isso, espera-se bons resultados quando aplicado na proporção correta, tendendo assim a redução da retração da argamassa através da expansão da escória.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da incorporação da escória LD nas propriedades dos estados fresco e endurecido de argamassas autoadensáveis de alto desempenho.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

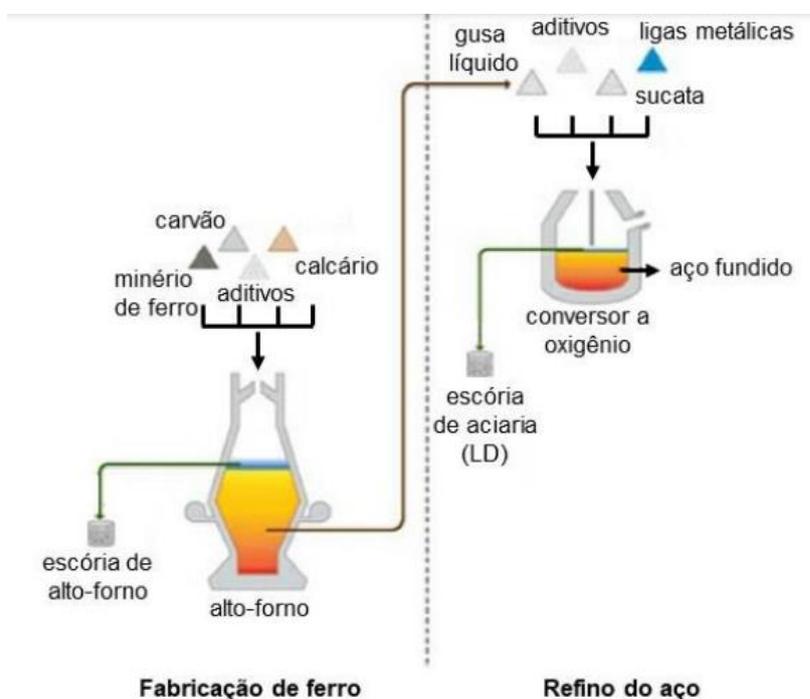
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes percentuais da escória de aciaria LD no comportamento expansivo e/ou no desenvolvimento da retração autógena de argamassas de alto desempenho;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes percentuais da escória de aciaria LD na resistência à compressão;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes percentuais da escória de aciaria LD no desempenho no estado fresco;
- Realizar ensaios de caracterização dos materiais empregados na pesquisa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO SIDERÚRGICO

As empresas siderúrgicas podem ser de dois tipos, sendo integradas ou semi-integradas. O presente trabalho tem como foco as usinas integradas (Figura 1), pois através de seus processos é que surgem o coproduto que será utilizado durante a pesquisa. As usinas integradas possuem como matéria-prima principal o minério de ferro, transformado em ferro gusa e posteriormente em aço na própria usina, por meio dos altos-fornos, da aciaria, seguida do lingotamento (MOURÃO, 2007).

Figura 1 - Representação do fluxograma de uma usina integrada.



Fonte: SOARES (2020).

Para que ocorra a produção do aço nas usinas integradas, são necessárias duas matérias primas principais: o carvão e o minério de ferro. O processo começa na coqueria, por meio do aquecimento do carvão de 1100 a 1300°, dando origem ao coque, o qual servirá de combustível na sinterização e nos altos fornos (ARCELOR MITTAL, 2022).

Na sinterização, através da aglomeração dos finos de minério de ferro, fundentes e algumas adições, o sinter é formado. Antes de ser enviado ao alto forno, o sinter passa pelo beneficiamento, que é constituído pelas etapas de resfriamento, britamento e peneiramento (IAB, 2022).

De acordo com dados divulgados pela ArcelorMittal, nos altos-fornos é onde ocorre o processo de transformação do minério de ferro (óxido de ferro) em ferro-gusa (ferro metálico) por meio da redução do minério com a junção de outros elementos, como pelotas, fundentes e sinter. Neste processo é usado um refratário especial que suporta altas temperaturas (maiores que 1200°C) durante a atividade do auto aquecimento. Desse modo, o produto final do alto forno é o ferro-gusa, que será encaminhado à aciaria por meio de carros torpedos, e como resíduo obtém-se a escória de alto forno, lama e gás de alto forno.

Para que o aço líquido seja formado é necessário que o ferro gusa passe por uma fase de refino nas aciarias a oxigênio, a fim de reduzir alguns elementos presentes no aço, como carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, de maneira a torná-lo de melhor qualidade. Os processos principais são a dessulfuração, caracterizada pela perda de enxofre, e a perda de carbono por meio de sopros de oxigênio, a qual ocorre no convertedor Linz-Donawitz (LD) (JUNIOR, 2013; IAB, 2022).

O aço líquido é tratado por processos complementares visando regularizar sua temperatura e composições químicas e físicas, de modo a permitir alto grau de pureza e qualidade.

Na última fase do processo denominada lingotamento contínuo (Figura 2), o aço líquido é transformado em produtos semi-acabados (placas), blocos e lingotes, através da solidificação do aço em moldes refrigerados. O aço líquido passa de maneira vertical nesses moldes, os quais são normalmente de cobre e abertos na base e no topo, retirando assim o calor do aço e o solidificando.

Em concordância com Morais (2020), o grande responsável pelo alto número de produção de aços semi-acabados de qualidade é o lingotamento contínuo de tarugos. Para que a casca sólida com espessura satisfatória seja criada nos primeiros momentos da formação dos produtos semi-acabados, na fase do resfriamento do material utilizando água gelada, é necessário que haja a etapa do resfriamento primário pela abertura do molde.

Figura 2 - Fase do lingotamento contínuo na ArcelorMittal Tubarão.



Fonte: Autoras (2022).

3.2 ESCÓRIA DE ACIARIA LD

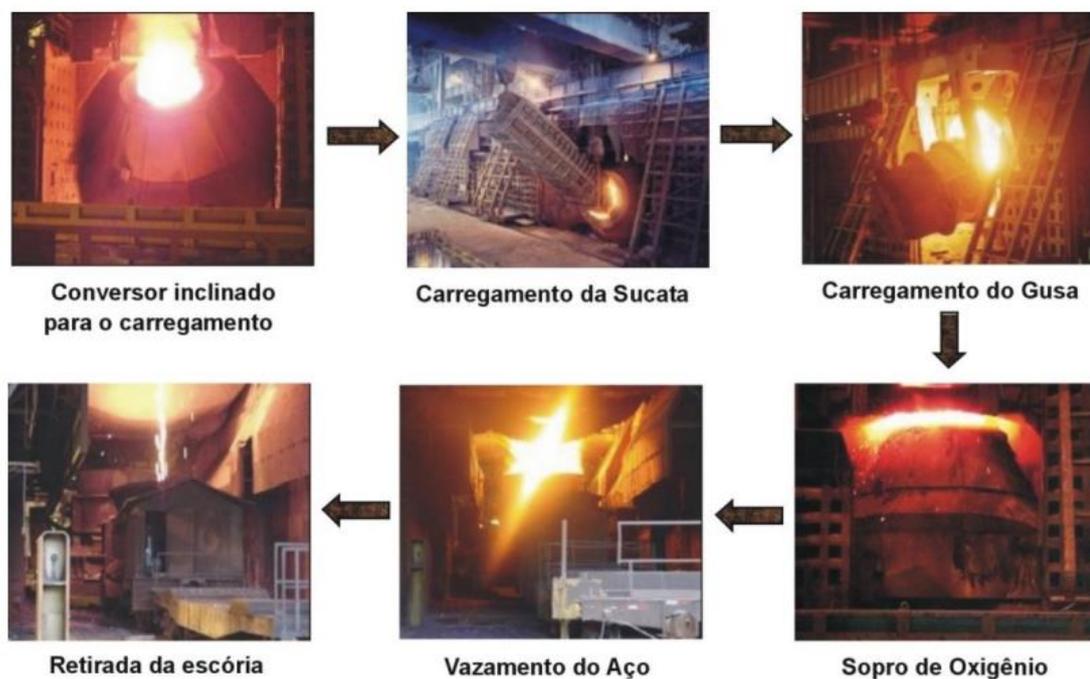
3.2.1 Origem

A escória de aciaria LD é um resíduo obtido por meio do processo produtivo do aço, durante o refino do ferro-gusa que ocorre na aciaria como mostrado na Figura 3. A sigla LD é originada dos nomes Linz e Donawitz, cidades austríacas que deram origem ao processo produtivo (GLOBALSLAG, 2011). O gusa recebe um sopro de oxigênio gasoso dentro de um convertedor denominado Linz-Donawitz, por aproximadamente vinte minutos, com o intuito da mitigação de carbono de 4% para 1%, além da oxidação de alguns elementos, como fósforo, silício, manganês e enxofre (MACHADO, 2000; BARBOSA, 2013; GONÇALVES, 2005).

O processo de convertedor Linz-Donawitz também é conhecido pela sigla em inglês BOF que significa *Basic Oxygen Furnace* (Forno Básico a Oxigênio), e o resíduo gerado é chamado de *slag* ou BOF *slag*, devido ao sopro de oxigênio puro durante o processo de refino.

A escória é proveniente dos minerais que se aglomeram com os fundentes durante o procedimento de conversão e se separa do aço por meio da flotação, a qual ocorre devido à diferença de densidade entre os elementos presentes. Dentre os fundentes que podem ser utilizados estão a cal calcítica, cal dolomítica, minério de ferro, fluorita, entre outros. Esse coproduto é então removido através de um movimento executado pelo convertedor, no qual sua rotação remove a escória sobrenadante, passando por um bico conversor e sendo despejada em um carro torpedo (Figura 4), para ser levada aos pátios de resíduos siderúrgicos e seguir com seu beneficiamento (GONÇALVES, 2005; MACHADO, 2000).

Figura 3 - Processo da aciaria no convertidor LD.



Fonte: MACHADO (2000).

Figura 4 - Carros torpedo, ArcelorMittal Tubarão.



Fonte: Autoras (2022).

Na Figura 5 pode ser observado o armazenamento da escória de aciaria LD sem beneficiamento e na Figura 6 a escória LD beneficiada nos pátios de estocagem de resíduos da ArcelorMittal Tubarão.

Figura 5 - Armazenamento de Escória LD bruta ArcelorMittal Tubarão.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 6 - Armazenamento da escória LD beneficiada ArcelorMittal Tubarão.



Fonte: Autoras (2022).

3.2.2 Caracterização química

As propriedades de um determinado elemento variam de acordo com a sua composição química, a qual, por sua vez, é obtida por meio do modo como o resíduo foi gerado. No caso da escória, o que determinará a sua composição são as reações químicas entre os escorificantes e os elementos de impureza removidos durante o refino do ferro gusa, podendo assim existir variações na composição da escória de acordo com as condições de operação e as especificações do aço produzido (GUMIERI, 2002; YILDIRIM; PREZZI, 2011).

Os principais constituintes químicos da escória de aciaria LD são CaO, FeO, MgO e SiO₂. Durante a conversão do ferro gusa em aço, uma porcentagem do ferro (Fe) no metal quente não pode ser recuperada no aço produzido. Logo, esse ferro oxidado é observado na composição química, com seu teor podendo chegar a 38%, dependendo da eficiência do forno (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

De acordo com Magalhães et al. (2015) as escórias de aciaria LD possuem em sua maior parte o composto CaO, sendo aproximadamente 40%. Além disso, as outras composições são por volta de 30% de FeO, 10% de SiO₂ e 7% de MgO. Por conta de a grande quantidade de óxidos presentes nesta escória serem básicos, a escória LD possui natureza alcalina.

Conforme Reddy et al. (2006) há uma relação entre o aumento do índice de basicidade e do teor de cal livre na escória, acarretando uma maior instabilidade volumétrica na hidratação. Portanto, mesmo se submetidas aos resfriamentos rápidos, as escórias ricas em CaO raramente se vitrificam.

O silício é um dos principais componentes para a formação da escória em questão, sendo um dos primeiros elementos a ser oxidado juntamente com o ferro, formando o composto FeO.SiO₂, denominado Faialita. Quando encontrado em baixas quantidades no processo, pode comprometer a oxidação de alguns elementos, como a cal, afetando na produção da escória (GONÇALVES, 2005).

O teor de sílica (SiO₂) varia de 7 a 18%, enquanto os teores de Al₂O₃ e MgO estão na faixa de 0,5 a 4% e 0,4 a 14%, respectivamente. Grandes quantidades de cal ou cal dolomítica são usadas durante o processo de conversão e, portanto, o teor de CaO dessa escória é tipicamente muito alto, podendo ser superior a 35% (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

De acordo com Campos (1985), a maioria dos óxidos presentes nas escórias LD, como o SiO₂, o FeO, Al₂O₃, MnO, entre outros, surgem devido à oxidação de elementos presentes no aço para melhora de sua qualidade. Já compostos como CaO e MgO surgem em decorrência dos fundentes inseridos para remoção de impurezas do aço e proteção do recobrimento refratário do conversor, como a cal e a dolomita. Elevadas quantidades desses elementos podem estar presentes na fase livre, pois devido à cinética, o cálcio e o magnésio não são completamente dissolvidos e se precipitam (GUMIERI, 2002)

A adição da cal tem como um dos seus objetivos a neutralização dos óxidos ácidos formados na oxidação, para evitar que o revestimento do forno seja danificado pela escória. Além disso, contribui na aceleração das reações nos processos de dessulfuração e desfosforação do gusa líquido (ZAGO, 2015).

Como já citado, o aço recebe um sopro de oxigênio dentro do convertedor por aproximadamente vinte minutos, a fim de reduzir o teor de carbono e oxidar alguns elementos. Ao iniciar o sopro, os teores de FeO e SiO₂ são altos e, na medida em que o CaO sólido adicionado se dissolve na escória líquida, os teores de CaO elevam (ZAGO, 2015; GONÇALVES, 2005). Durante a conversão, a cal pode não ser completamente dissolvida, de modo que o teor de cal livre pode ser superior a 12% (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos por diferentes pesquisadores para composição química da escória de aciaria LD. Os resultados são similares aos dados fornecidos pela ArcelorMittal apresentados nas Tabelas 2 e 3. Com base nisso, é possível ter uma boa percepção a respeito do percentual de cada um dos compostos químicos presentes na escória LD e sua relativa constância no processo produtivo do aço.

Tabela 1 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD.

	CaO	SiO₂	Al₂O₃	MnO	MgO	Fe₂O₃	FeO	Fe Total	P₂O₅
1	43,3	10,1	2,4	5,8	4,9	-	27,6	27,6	1,9
2	42-55	12-18	<3	<5	<3	-	-	14-20	<2
3	39,4	11,97	2,16	2,74	9,69	-	30,23	-	1
4	45,5	18,8	20,3	-	9,7	-	-	1,1	-
5	43,38	17,03	5,64	1,59	5,98	22,69	-	-	0,33
6	45,11	11,33	1,01	4,39	6,13	29,55	-	-	1,49
7	26,9	28,2	8,9	1,5	10,2	18,3	-	-	0,9

Fonte: (1) Amostra 2 - (GUMIERI, 2000); (2) (MOTZ E GEISELER, 2001); (3) (YILDIRIM E PREZZI, 2011); (4) MIX D - (TAVAKOLI ET AL., 2013); (5) (WANG, 2013); (6) (ZAGO, 2015); (7) (ZAGO, 2019).

Tabela 2 - Composição química em porcentagem da escória de aciaria LD fornecidas pela ArcelorMittal.

	CaO	MgO	SiO₂	Al₂O₃	Fe total
Resultados (%)	23 a 46	5 a 13	11 a 15	0,8 a 4	14 a 22

Fonte: ArcelorMittal Tubarão.

Tabela 3 - Demais parâmetros da composição química em porcentagem da escória de aciaria LD fornecidas pela ArcelorMittal.

Parâmetro	Resultado (%)
Na ₂ O	0,17
P ₂ O ₅	1,3
SO ₃	0,16
K ₂	<0,1
TiO ₂	0,36
SrO	0,1

Fonte: ArcelorMittal Tubarão.

3.2.3 Caracterização física e morfológica

A escória LD possui granulometrias distintas devido ao processo de britagem que não permite diâmetros bem definidos. Desse modo, após a escória ser transportada a um pátio de armazenagem, ela passa por um processo de resfriamento e beneficiamento, para padronização de sua granulometria, que pode ir de 0 a 75mm, sendo divididas em 3 grupos: de 0 a 19mm, de 19 a 32mm e de 32 a 75mm. Além disso, o coproduto não é solúvel em água, é inodoro, possui cor acinzentada e apresenta-se no estado sólido (Figura 7) (MAGALHÃES et al., 2015).

Figura 7 - Escória de aciaria LD.



Fonte: Palankar et al., (2016).

Conforme Proctor et al. (2002), o formato das escórias de aciaria é acentuadamente angular, além de possuir textura grossa que possibilita o intertravamento. Por possuir uma superfície porosa quando comparada a areia, por exemplo, esse coproduto é mais suscetível a retenção de umidade. Somado a isso, ao tratar da massa específica, é afirmado que a da escória é maior que a dos agregados naturais, com um índice moderado de absorção de água. A elevada massa específica tem relação direta com o alto teor de ferro contido nas escórias (GUMIERI, 2002). Diante dos fatores citados, é evidente que a presença de óxidos hidratáveis junto ao poder de retenção de água não é uma combinação satisfatória, ocasionando assim a instabilidade volumétrica da escória.

Estudos comparativos de aspectos da escória LD realizados por Barbosa (2013) em diversos estados brasileiros, tiveram como um dos parâmetros as características físicas. Os resultados mostraram que a distribuição granulométrica se assemelha, com variação de 0,2mm a 12mm. Com exceção de um exemplar, que obteve elevada presença de finos, de modo geral a escória se manteve com granulometria padronizada, apresentando resultados similares aos ponderados em britas de gnaisses.

3.2.4 Classificação ambiental

Além dos aspectos físicos e químicos, a caracterização de um resíduo envolve também o aspecto ambiental. A norma brasileira NBR 10004 (2004) estabelece os critérios para classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde do homem. De acordo com a norma citada, os resíduos podem ser classificados em Resíduos classe I - Perigosos e Resíduos classe II - Não perigosos, sendo os de Classe II subdivididos em A - Não inertes e B - Inertes.

A identificação dos constituintes a serem avaliados na caracterização do resíduo deve ser criteriosa e estabelecida de acordo com as matérias-primas, os insumos e o processo que lhe deu origem (NBR 10004, 2004).

A partir de resultados obtidos por um ensaio realizado em 2008 na escória de aciaria LD beneficiada da ArcelorMittal fornecido pela empresa, o coproduto foi caracterizado como Resíduo Classe II B - Não perigoso - Inerte. A classificação teve como base os resultados dos testes de toxicidade, indicando que apesar da presença de metais na massa bruta, o mesmo não é tóxico. Além disso, os resultados dos extratos lixiviados e solubilizados indicaram que os componentes do resíduo apresentam baixo potencial de migrar para o ambiente.

3.2.5 Expansibilidade da escória de aciaria LD

Compostos presentes na Escória de Aciaria LD conferem ao coproduto a habilidade de se expandir, podendo gerar trincas no artefato ou até mesmo fissurar. Os principais elementos ocasionadores dessas reações expansivas são o CaO e o MgO, os quais são volumetricamente instáveis, resultando nesta expansão muitas vezes indesejada. Estes compostos fazem com que sua utilização como agregado na produção de argamassas/concretos ou até mesmo sua aplicação no lastro ferroviário fique comprometida (FERNANDES, 2010).

Devido às reações de hidratação, o óxido de cálcio em seu estado livre é o responsável pela expansão em curto prazo. Já o óxido de magnésio, expande-se por um longo período de tempo devido a sua hidratação lenta (ROHDE, 2002).

De acordo com Zago (2015), Zago (2019), Jiang et al. (2018) e Guo et al. (2014), as reações de hidratação tanto do CaO quanto do MgO que permanecem na escória de aciaria LD ocorrem de maneira tardia. Isso torna-se um problema pois a hidratação ocorrerá quando o processo de endurecimento da pasta já estiver avançado, fazendo com que as reações ocorram em um ambiente “fechado”, podendo gerar fissuras na própria escória com o seu processo de expansão.

Na Figura 8 é possível identificar rupturas ocasionadas a um pavimento rodoviário que foi feito com adições de escória de aciaria LD, comprovando o típico caráter expansivo.

Figura 8 - Ruptura de um pavimento rodoviário construído com adição de escória de aciaria LD em Ouro Branco/MG.



Fonte: GUMIERI (2002).

3.2.5.1 Expansibilidade devido ao Óxido de Cálcio

O CaO existente na composição da escória pode se apresentar na forma livre ou combinada na forma de silicatos ou em solução sólida. Quando presente na forma livre, desenvolve a expansão no material e alcança teores de até 10% do total de CaO (GUMIERI, 2002).

O óxido de cálcio livre (CaO) se hidrata quando entra em contato com a umidade, formando o hidróxido de cálcio e liberando energia (Equação 1). Essa reação acaba por ser uma das grandes responsáveis pela expansibilidade da escória

de aciaria LD, pois o $(Ca(OH)_2)$ possui um cristal interno de volume maior do que o do CaO , ocasionando a desagregação do material (FERNANDES, 2010).



Diversos fatores influenciam a expansão devido ao CaO , como o teor e o tipo de CaO , além da porosidade e tamanho dos grãos da escória (RAPOSO, 2005). Quanto maior a porosidade, maior a superfície exposta e conseqüentemente, mais rápida será a hidratação do CaO , causando maior expansibilidade e maior fissuração e desagregação das mesmas. Esse fator pode variar conforme o fluxo de gás liberado durante o resfriamento, o qual forma canais internos na escória (PENA, 2004). Considerando o tamanho dos grãos, uma menor granulometria possibilita uma hidratação mais rápida do CaO devido a exposição da superfície.

Devido ao caráter higroscópico da cal, a hidratação ocorre de forma rápida. O calor de hidratação é gerado na medida que a água penetra na superfície dos poros e então, são exercidas forças internas de expansão que provocam fraturas, levando a além do enfraquecimento, a desintegração do material. A expansibilidade é diretamente proporcional a quantidade de cal presente no material (GUMIERI, 2002; RAPOSO, 2005).

De acordo com Amaral (1999), a reatividade da cal livre também está vinculada à temperatura de fabricação. Quando submetida a temperaturas menores que $1000^\circ C$, a cal reage instantaneamente com a água, enquanto que, para temperaturas acima de $1000^\circ C$, é necessário um tempo maior para hidratação. Isso acontece devido a formação de cristais densos e compactos, que apresentam menor superfície específica para reagir com a água.

3.2.5.2 Expansibilidade devido ao Óxido de Magnésio

O óxido de magnésio (MgO) presente na composição da escória de aciaria LD é proveniente da utilização de dolomita no forno, com intuito de minimizar o desgaste do revestimento refratário, além do próprio material refratário desgastado, podendo

chegar a um teor total de até 10%. Esse composto pode estar presente na forma livre (periclásio), propício à expansão, e quimicamente combinado ou em solução sólida, em geral apresentando comportamento estável (ROHDE, 2002; GONÇALVES, 2005).

A dissolução incompleta da dolomita durante o refino é uma das formas com que o periclásio é formado. O composto é normalmente formado quando os teores de MgO total na escória superam 3%, pois a partir desta quantidade, a água não consegue mais solubilizar o MgO no processo de solidificação (GEYER, 2001). Visando reduzir esse impasse, a sugestão de alguns pesquisadores é a redução do tamanho do grão, facilitando assim a dissolução e a reação completa desse óxido (PENA, 2004).

Segundo Lea (1988), a instabilidade expansiva do periclásio deve-se ao tamanho dos cristais que vão se hidratar. Os menores se hidratam rapidamente, assim como os óxidos de cal livre, porém não chegam a causar pressões internas significativas. Por outro lado, os cristais maiores demoram mais tempo para se hidratar, sendo esses os responsáveis pela grande expansão.

O resultado da reação expansiva de hidratação do MgO na forma de periclásio é a formação do hidróxido de magnésio, chamado de brucita (Equação 2), apresentando uma variação de volume de 119,5% em relação ao MgO (SBRIGHI; BATTAGIN, 2002).



De acordo com Motz e Geiseler (2001), quando a escória LD entra em contato com a água, as fases minerais vão reagir com os hidróxidos, incluindo o de magnésio livre, gerando desintegração da escória e até mesmo perda de resistência.

Conforme Montgomery e Wang (1991), o óxido de magnésio se apresenta majoritariamente nas escórias de aciaria LD de maneira sólida contendo FeO e MnO, essas soluções são denominadas de magnésio-wustita.

Apesar do periclásio ser um dos grandes influenciadores da expansão da escória LD, este não é o maior agravante, já que suas reações expansivas ocorrem

lentamente ao longo dos anos. Isso acontece pois os cristais maiores formam-se devagar por resfriamento, podendo levar anos para que a expansão ocorra. Mesmo que as reações sejam tardias, o óxido de magnésio é um composto a se preocupar quanto a instabilidade volumétrica ocasionada, por não ser possível prever quando e com que intensidade irá ocorrer (CASTELO BRANCO, 2004; PEDROSA, 2010; ZAGO 2015).

De modo geral, as escórias geradas a partir de modernas tecnologias siderúrgicas possuem baixo teor de MgO. Porém, se no lugar da cal for utilizada dolomita como fundente, o teor de MgO livre aumenta, e em consequência a possibilidade de expansão volumétrica devido à hidratação do mesmo (YILDIRIM; PREZZI, 2011).

3.2.5.3 Expansibilidade devido a outros fatores

Além das reações com o CaO e MgO, a expansão das escórias de aciaria pode também estar relacionada com a oxidação e a corrosão do ferro metálico (Fe_0) presente em sua composição (GUMIERI, 2002).

No processo LD, durante o sopro de oxigênio ou durante o vazamento da escória, pequenas partículas metálicas, incorporadas, permanecem presentes na escória, mesmo após a separação magnética. Estas partículas são responsáveis pelo alto teor de ferro, que geralmente está presente nas escórias na forma de wustita, também sujeita a oxidação, transformando-se em compostos de maior volume (CRUZ et al., 1999).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), a expansibilidade da escória devido à presença de wustita (FeO) ocorre pela oxidação do ferro metálico em processo de corrosão, junto ao aumento de volume que, a depender do estado de oxidação, pode ser da ordem de 600% em relação ao metal original.

Realizando um comparativo entre as reações da cal livre e do óxido de magnésio é possível afirmar que a primeira, quando em contato com a água, hidrata-se de maneira rápida, fazendo com que as reações aconteçam em um pequeno espaço de tempo. Já na segunda, a expansão pode levar anos para fazer alguma diferença, já que as reações do periclásio em contato com a água ocorrem lentamente.

Tratando da expansão devido a oxidação e corrosão do ferro metálico, é evidente que esse também ocorre de maneira lenta, porém também pode acarretar em efeitos significativos.

Diante do exposto, fazer uma análise minuciosa dos agentes que provocam a expansão das escórias de aciaria é de fundamental importância, pois permite um maior entendimento do fenômeno, possibilitando a correta avaliação dos seus efeitos e da aplicação adequada do resíduo.

3.3 ARGAMASSAS DE ALTO DESEMPENHO

O uso de argamassas e concretos de alto desempenho começaram a ser explorados no exterior por volta da década de 70 com a busca da elaboração de artefatos mais duráveis, que tornaram as estruturas mais conservadas e reduziram a necessidade de custos com amparo em construções. Além disso, o uso de concretos de alto desempenho (CAD) passou a ser tornar importante para o seu emprego em construções maiores e mais esbeltas, de forma que os concretos convencionais exigiam maior número de pilares para sustentação (CASTRO, 2007).

O alto desempenho não é uma base revolucionária para pastas, argamassas e concretos, como era considerada há 10 anos, mas sim, uma evolução de algumas propriedades fazendo o uso de praticamente as mesmas matérias-primas, porém com algumas adições e aditivos. Apesar de ser facilmente possível confundir alto desempenho com alta resistência, este não é o princípio deste tipo de concreto e argamassa, afinal, um concreto de alto desempenho não necessariamente precisa ter alta resistência. Por alto desempenho entende-se que a pasta/argamassa/concreto deve possuir boa trabalhabilidade, baixa permeabilidade, alto módulo de elasticidade, durabilidade, integridade, uniformidade, entre outras características, não apenas relacionadas à resistência mecânica. (TUTIKIAN et al., 2011).

Para obtenção de um alto desempenho é necessário que haja redução da granulometria do agregado graúdo, para adquirir maior compacidade, diminuição da relação água cimento (a/c) para obtenção de maior resistência, uso de aditivo plastificante ou superplastificante para auxiliar na redução da relação a/c , além da utilização de adições minerais para apuramento dos poros e melhoramento das ligações químicas entre as partículas. (TUTIKIAN et al., 2011).

3.3.1 Propriedades no estado fresco

3.3.1.1 Trabalhabilidade, manutenção da trabalhabilidade e tempo de pega

De acordo com Sabbatini (1984), a trabalhabilidade é uma propriedade oriunda a partir da combinação de diversas características reológicas da argamassa, como a plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade.

O termo trabalhabilidade representa muitas características do concreto fresco que são difíceis de medir quantitativamente (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

Qualitativamente, é dito que uma argamassa é trabalhável quando se espalha facilmente, não gruda na ferramenta de trabalho ao ser aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica por tempo suficiente para que a aplicação seja concluída (SABBATINI, 1984).

Desse modo, pode-se correlacionar a trabalhabilidade com a consistência da argamassa (SABBATINI, 1984), definida como uma medida da umidade da mistura de concreto, que é comumente avaliada em termos de abatimento, ou seja, quanto mais úmida a mistura, maior o abatimento (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

Dentre os fatores que influenciam na consistência da argamassa, é importante citar a relação água/aglomerante, a relação aglomerante/areia, granulometria da areia, bem como a natureza e qualidade do aglomerante. (SABBATINI, 1984).

O cimento Portland não é um material cimentante, mas sim adquire a propriedade adesiva quando misturado com água. Isso ocorre porque a reação química do cimento com a água, denominada hidratação do cimento, produz produtos que possuem características de pega e endurecimento (MEHTA E MONTEIRO, 2006).

É relevante citar ainda, conforme esses autores, que a quantidade de calor liberado pode ajudar ou atrapalhar o processo. Se por um lado a reação inicial deve ser lenta o suficiente para permitir que o concreto seja despejado no local, por outro, após a colocação do concreto, o endurecimento rápido é frequentemente desejável. Sendo assim, conhecer a velocidade de reação é importante porque determina o tempo de pega e endurecimento.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), um elevado teor de cimento, geralmente em argamassas e concretos de alto desempenho acabam por prejudicar

a trabalhabilidade da mistura. Através do uso de aditivos redutores de água é possível realizar a manutenção da trabalhabilidade sem que haja a adição de mais de água na mistura, o que reduziria a resistência.

A fim de modificar a característica de pega e endurecimento da pasta de cimento influenciando a taxa de hidratação do cimento, são utilizados aditivos químicos, por exemplo.

3.3.2 Propriedades no estado endurecido

3.3.2.1 Resistência mecânica à compressão

A resistência à compressão é de extrema importância para avaliar o desempenho de uma argamassa ou de um concreto, pois é através dela que será analisada quanto um o material conseguirá suportar de carga em uma edificação (CAMARGO E FERRARI, 2021).

Segundo Tutikian et al. (2011), concretos de alto desempenho (CAD) são facilmente confundidos com concretos de alta resistência (CAR), mas nem sempre o alto desempenho significa que a argamassa/concreto terão resistências muito altas, podem inclusive ter resistências de 35 MPa, com uma relação água/cimento de 0,4. Assim, apesar da maioria dos concretos de alto desempenho possuírem resistências elevadas, esse não é um requisito básico para sua constituição. A importância real relacionada à resistência mecânica à compressão para o alto desempenho, é que essa seja mais alta do que o padrão para determinadas aplicações.

Para concretos, é fato que a relação água/aglomerante e a resistência à compressão são inversamente proporcionais. Porém, para concretos de alto desempenho isso se torna complexo, uma vez que o elo mais fraco do concreto é transferido da pasta de cimento para o agregado graúdo, onde se romperá primeiro. Assim, em CAD's, chega um momento que para realizar o aumento da resistência mecânica à compressão, é necessário utilizar agregados graúdos mais resistentes, acabando por impactar no preço final do concreto. (AITCIN, 1998).

Conforme ensaios realizados por Santos (2011), obteve-se resultados comparativos entre a resistência à compressão axial de uma argamassa convencional

e uma ARGAD. Utilizando o mesmo traço e apenas com adições minerais, foi possível obter resistências mecânicas à compressão axial maiores para os rompimentos aos 7, 14 e 28 dias, quando comparada a argamassa convencional.

3.3.2.2 O processo de retração autógena

Com a finalidade de obter durabilidade superior aos concretos/argamassas convencionais, as recentes construções estão sendo executadas visando maiores resistências à compressão, havendo assim a necessidade da utilização de baixos valores de relação água/cimento, o que implica em uma grande preocupação com o fenômeno da retração autógena (PILAR, 2017).

De acordo com Tazawa et al. (2000), a retração autógena é a diminuição do volume do artefato decorrente dos processos da hidratação do cimento. Neste processo, durante a ocorrência das reações, há uma mitigação da quantidade de água, ou seja, da umidade dentro da pasta que está no processo de endurecimento.

A retração autógena é o encolhimento que ocorre no interior da mistura de cimento com água, que acontece na maioria das vezes em CAD's e ARGAD's por possuírem relação a/c menores que 0,4, o que faz com que a pasta de cimento possua baixa quantidade de água para executar as reações de hidratação do cimento. Essa retração efetua-se em um sistema fechado, ou seja, não há perda ou ganho de matéria para o ambiente, modificação da temperatura e nenhuma influência externa do meio. O encolhimento é realizado inteiramente por conta de um processo de auto dessecação que a pasta sofre, devido à falta de água para que as reações aconteçam (SILVA E DANTAS, 2002; MEHTA E MONTEIRO, 2006; PILAR, 2017).

Por conta da baixa relação água/aglomerante dos concretos de alto desempenho, a reserva de água para as reações de hidratação do cimento é pequena, ocasionando assim o fenômeno denominado retração autógena. Este fenômeno é danoso para a durabilidade e resistência do concreto de alto desempenho, principalmente nas primeiras idades, pois são provocadas microfissuras internas que trilham em um caminho preferencial de fragilidade ao receber uma carga muito elevada (CUSSON E REPETE, 2000).

Também chamada de autodessecação ou retração química, tem como causa a redução uniforme do teor de água dos poros durante a hidratação do cimento, que é muito significativa para concretos de relação água/aglomerante menor que 0,4 (TAZAWA et al., 1995).

A medição da retração autógena é de extrema importância para identificar e compreender as mudanças macroscópicas que ocorrerão na pasta de cimento, as quais iniciam durante o processo de hidratação, de maneira que seja possível evitar a fissuração (TAZAWA et al., 1995).

Realizando uma comparação entre concretos/argamassas convencionais e de alto desempenho, é possível afirmar que nos comuns, a retração pelo processo de secagem é a retração predominante na totalidade da pasta. Isso ocorre pois em um concreto/argamassa comum a secagem é muito rápida, já que estes são mais porosos e possuem relação água/aglomerante altas. Já em concretos/argamassas de alto desempenho, a retração autógena é a que predomina, pois a baixa quantidade de água presente é rapidamente drenada pelos poros finos, fazendo com que altas forças de tração comecem a agir sobre a pasta de maneira intensa, desenvolvendo fortemente a retração autógena (TAZAWA et al., 1995; AITCIN P. C., 2004).

Entretanto, de acordo com Neto (2008), a retração autógena nas primeiras idades (até os 7 dias) de um concreto pode vir a ser reduzida através do uso de aditivos redutores de retração, os quais conseguem aumentar a porosidade inicial e retardar o refinamento dos poros, evitando o que foi mencionado anteriormente.

3.4 ESCÓRIA DE ACIARIA LD COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

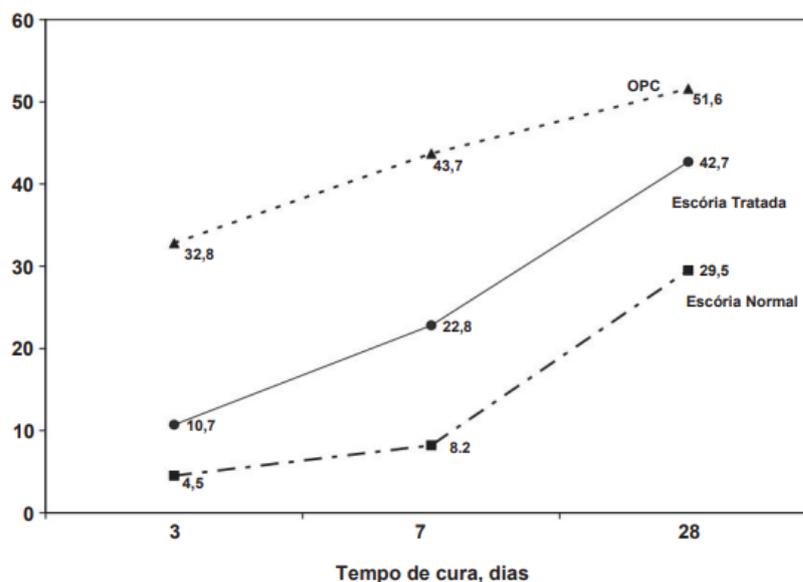
As escórias de aciaria são boas alternativas para serem aplicadas como materiais cimentantes, pois elas conseguem reduzir, na fabricação do cimento, o gasto de energia na necessidade da extração de clínquer (GUMIERI 2002).

Consoante ao estudo de Zago (2019), Gumieri (2002) e Yildirim, Prezzi (2011), a escória de aciaria LD como material cimentício, apesar de possuir a questão da expansibilidade, pode proporcionar altas resistências mecânicas ao material, considerando que sua morfologia possui uma superfície irregular e angular, além de uma aspereza. Isso permite um intertravamento entre a pasta de cimento e os agregados, ou seja, consegue garantir melhores propriedades mecânicas. Além disso, a escória LD possui altos teores de C3S e C2S, compostos responsáveis por conferir aos concretos e argamassas resistências a curto e a longo prazo, respectivamente.

Apesar de trazer boas características às argamassas e aos concretos no estado endurecido, a escória de aciaria LD não possui aplicabilidade consolidada como material cimentício suplementar por diversos motivos. Um deles é o fato de possuírem propriedades cimentícias pobres, o que provavelmente decorre de sua estrutura interna, ou seja, a alta densidade e os grandes cristais formados a partir das altas temperaturas a que as escórias são submetidas, além do processo lento de resfriamento. Assim, os teores de silicato de cálcio presentes possuem reatividade baixa, não conferindo à escória boas propriedades cimentantes. (LIZARAZO-MARRIADA et al., 2011; YI et al., 2012; JIANG et al., 2018).

Alguns autores apontam alternativas para melhoramento das propriedades de reatividade da escória LD, como Reddy et al. (2006), que trouxeram a tentativa de resfriar a escória de maneira rápida, evitando a formação de fases distintas. Foram obtidos bons resultados, conseguindo maiores resistências à compressão através deste processo que alterou a composição mineralógica das escórias LD. A Figura 9 apresenta os resultados comparativos entre a utilização de cimento Portland comum e escória de aciaria LD, mostrando melhor resistência obtida através do método de resfriamento rápido, que busca uma semelhança com o convencional.

Figura 9 - Utilização de Cimento Portland Comum (OPC) x utilização de escória LD como material cimentante.



Fonte: Reddy et al., (2016).

Outro fator que dificulta o uso das escórias de aciaria LD como material cimentício suplementar, é a presença de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ em sua composição, ocasionando expansibilidade. Para tentar mitigar essa instabilidade da escória, Montgomery e Wang (1991) trouxeram uma alternativa para utilização da escória como substituto parcial do cimento Portland na fabricação da pasta. A proposta dos autores foi combinar a escória LD com escória granulada de alto-forno e clínquer para a elaboração de um cimento à base clássica com adições minerais, sendo a escória granulada já consolidada no mercado como adição mineral na produção do CP III - cimento Portland de alto forno. Montgomery e Wang (1991) indicaram que a presença da escória granulada de alto-forno conseguiria absorver o óxido de cálcio livre presente nas escórias de aciaria LD, mitigando a instabilidade e gerando uma expectativa de boa resistência mecânica.

Montgomery e Wang (1991) utilizaram duas formas da escória de aciaria LD para os ensaios, a primeira recém retirada do aço e a segunda mais antiga, a qual foi exposta ao ar durante o período de um ano. Assim, os resultados obtidos pelos autores foram que, para as misturas com zero por cento de clínquer, as resistências à compressão acabavam por diminuir, já com a presença de 10% de clínquer foi possível obter bons resultados. No entanto, nas conclusões dos autores, nenhuma

das misturas se igualou à referência. A Tabela 4 mostra as porcentagens utilizadas para realização do experimento.

Tabela 4 - Misturas realizadas e obtenção de resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias.

Número da mistura	Proporção das misturas (%)				Resistência à compressão (MPa)		
	Escória LD	Escória Granulada de Alto-Forno	Clínquer	Gipsita	28 dias	60 dias	90 dias
1	45*	45	0	10	22,5	24,9	31,2
2	45 t	45	0	10	31	34,3	36,4
3	40,5*	40,5	10	9	34,5	38,7	35,7
4	40,5 t	40,5	10	9	26,5	35,9	38,7

Fonte: Montgomery e Wang (1991).

A partir de uma análise rápida das tabelas, é possível observar que as maiores resistências obtidas aos 90 dias, foram das misturas 2 e 4, as quais possuíam as escórias antigas expostas ao ar e a maior de todas, número 4, possuía uma porcentagem de clínquer.

Assim, por meio de estudos de aplicações da escória como material cimentício suplementar, alguns autores escreveram de maneira mais minuciosa propriedades no estado fresco e endurecido de pastas de cimento contendo essa adição mineral de resíduo siderúrgico.

3.4.1 Propriedades no estado fresco

3.4.1.1 Trabalhabilidade

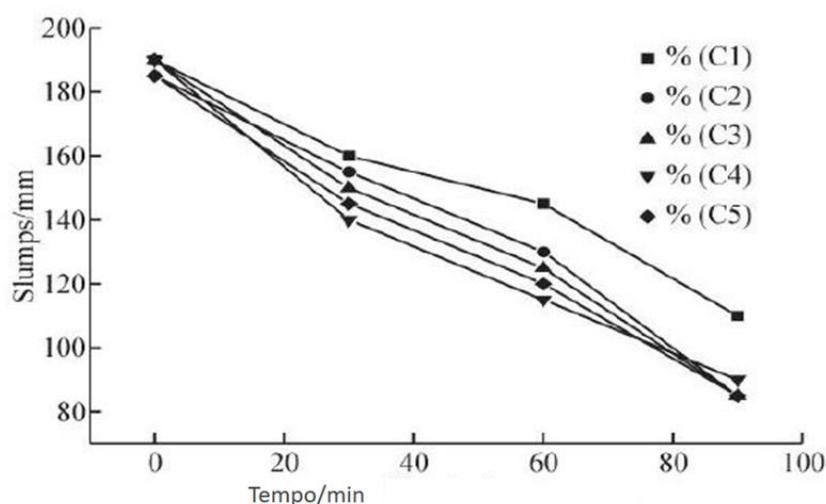
De acordo com testes realizados por Jiang et al. (2018) não houve segregação entre o cimento Portland convencional e a adição da escória como material cimentante complementar, ou seja, a presença da escória não deveria afetar a trabalhabilidade da pasta. Alguns autores como Wang et al. (2012) trazem resultados em que a trabalhabilidade melhora a partir da inserção da escória de aciaria LD na composição

do cimento. Jiang et al. (2018) também relata que, em caso de piora da trabalhabilidade, a introdução de maior quantidade de água na mistura pode solucionar o problema.

Entretanto, apesar de alguns trabalhos encontrarem resultados positivos, outros encontraram resultados opostos. Roslan et al. (2016) achou uma diminuição da trabalhabilidade através da realização de ensaios de slump-test. Quanto maior era a porcentagem de escória de aciaria LD inserida no cimento, menor eram os valores de slump obtidos. Isso provavelmente ocorre em decorrência da aspereza presente na superfície das escórias de aciaria, o que pode fazer com que parte da água fique retida nas partículas de escória, dificultando as reações de hidratação e reduzindo a trabalhabilidade.

Em concordância com os valores obtidos por Roslan et al. (2016), Guo et al. (2014) também atingiu respostas negativas quanto ao impacto da adição dessa escória na trabalhabilidade. A Figura 10 traz o gráfico elaborado por Guo et al. (2014) com os respectivos resultados do slump-test. Fica explícito através de uma análise que a trabalhabilidade da mistura C1, ausente de escória, é maior em comparação com as demais, que possuem diferentes porcentagens de escória de aciaria LD adicionadas.

Figura 10 - Comparação da trabalhabilidade entre diversas misturas contendo escória LD e a referência.



Fonte: Guo et al., (2014) - traduzido.

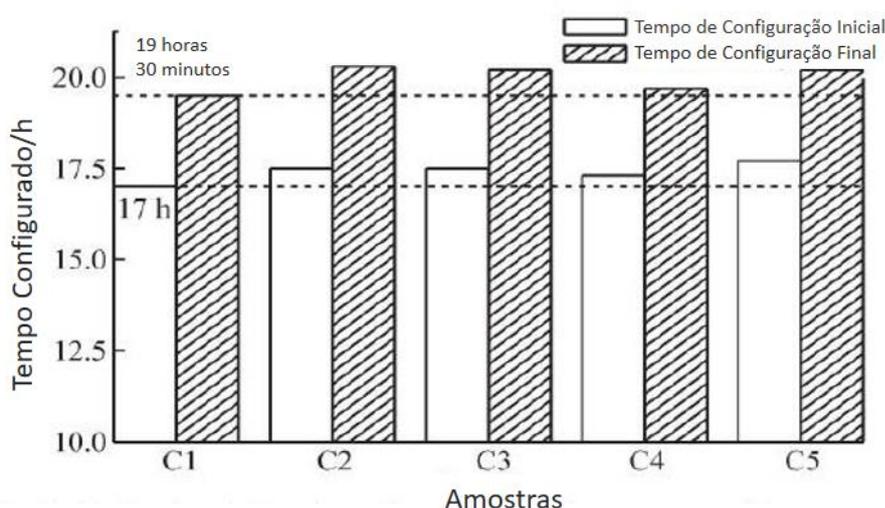
Apesar dos dados apresentados, é possível realizar uma manutenção da trabalhabilidade por meio do uso de aditivos que não alterem o processo de pega e nem outras características do concreto. A autora Toillier (2017), diz que os aditivos de manutenção da trabalhabilidade conseguem chegar ao abatimento necessário sem a necessidade de acrescentar mais água, tendo como exemplos o aditivo superplastificante do tipo II e Mid-Range, redutores de água.

3.4.1.2 Tempo de pega

Segundo o autor Guo et al. (2014) o tempo de pega a partir do uso de escória LD como material suplementar cimentante se torna maior pelas razões mencionadas a respeito da baixa reatividade que esse material possui, fazendo com que as reações de hidratação necessitem de mais tempo para iniciar e finalizar.

Guo et al. (2014) também realizou ensaios referentes ao tempo de pega das amostras e notou que de fato o tempo de pega inicial e final das amostras contendo uma porcentagem de escória foram maiores que os tempos da referência, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Gráfico ilustrado que mostra a comparação entre o tempo de pega das diferentes misturas.



Fonte: Guo et al., (2014) – traduzido.

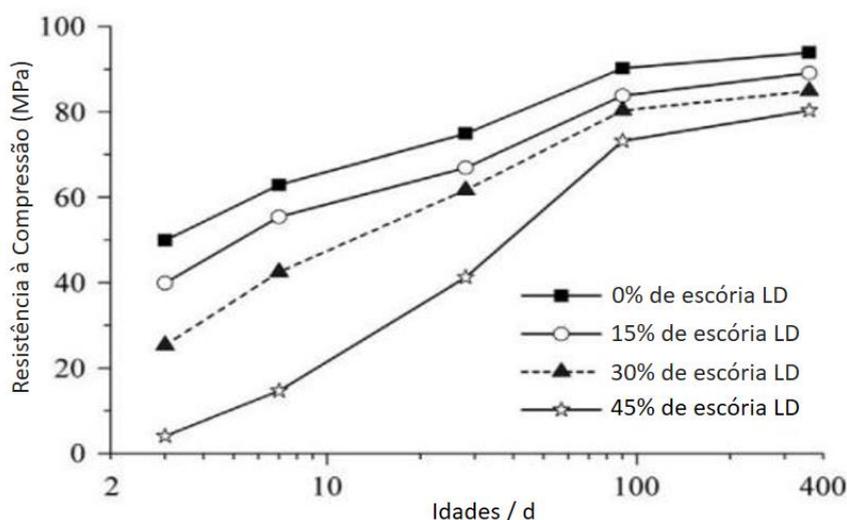
3.4.2 Propriedades no estado endurecido

3.4.2.1 Resistência mecânica à compressão

Diversos autores relatam que o uso da escória LD como material cimentício suplementar pode vir a causar a redução da resistência mecânica à compressão em relação às obtidas através do uso do cimento Portland convencional. As escórias LD possuem baixas quantidades reativas de C3S, além da presença de silicatos os quais são não-hidráulicos (GUMIERI, 2002; LIZARAZO-MARRIAGA et al., 2011; WANG et al., 2013).

Wang et al. (2013) realizaram testes utilizando escória LD como material cimentício suplementar ao cimento Portland e obtiveram resultados negativos em relação à resistência à compressão: quanto maior era a porcentagem de escória, menor a resistência, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Gráfico comparativo da resistência à compressão entre composições contendo escória LD e a referência.



Fonte: Wang et al., (2013) – traduzido.

A baixa resistência à compressão, principalmente nas idades iniciais, é decorrente de dois motivos: o primeiro é que o tempo de pega da escória LD é maior que em relação ao cimento e o segundo é que a escória afeta também a taxa de hidratação do cimento, ou seja, acaba por atrapalhar as reações entre o cimento e a

água. Entretanto, é possível que essa resistência aumente ao longo do tempo, sendo que quanto maior o teor de escória presente no aglomerante, maior é a inclinação da linha (Figura 12) (WANG et al., 2013).

A diminuição da resistência mecânica à compressão quando utilizaram escória LD como material cimentante também foi observada por Lizarazo-Marriaga et al. (2011). Segundo os autores, até 40% de escória de aciaria LD pode ser utilizada para substituir o cimento para aplicação em concretos e argamassas de baixa resistência, acima disso, o material acaba por não desenvolver boa resistência ao ser hidratado. Assim, os autores concluíram que a escória LD precisa ser ativada para exercer com vigor suas propriedades cimentícias hidráulica.

No entanto, apesar dos resultados negativos, também houve autores que obtiveram resistências positivas com o uso da escória de aciaria, como Roslan et al. (2016). Os autores relataram que inicialmente, em poucas idades, apenas a mistura contendo 5% de escória LD possuiu resultados negativos em relação à referência, já aos 90 dias de cura, todas as misturas contendo 5, 10 e 20% de escória de aciaria LD, no lugar do cimento, apresentaram resistências superiores comparadas com a referência, a qual possui 0% de escória. Os autores relataram também que a melhor resistência inicial obtida foi a que continha 10% de escória LD, porém, com o passar do tempo, as misturas com maiores porcentagens mostraram um melhor desempenho mecânico.

Logo, a partir dos estudos apresentados, conclui-se que a composição química das escórias LD são benéficas para adquirir altas resistências mecânicas, como, mencionado por Roslan et al. (2016) o fato de possuírem altos teores de óxidos de sílica e cálcio que são necessários na atividade pozolânica. Porém, em alguns casos, faz-se necessário a utilização de aditivos ativadores da escória, para que ela possa exercer suas propriedades cimentantes, de forma que consiga realizar adequadamente suas reações de hidratação (WANG et al., 2013; JIANG et al., 2018).

4 METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Neste capítulo são descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, apresentando o detalhamento de cada procedimento, as normas empregadas, o preparo das amostras e a caracterização dos materiais.

4.1.1 Cimento

Para esta pesquisa optou-se pela utilização de um cimento puro, proporcionado em laboratório, sem a incorporação de adições minerais presentes em cimentos disponíveis no mercado. Sendo assim, o efeito da incorporação da escória de aciaria LD nas argamassas de alto desempenho pôde ser analisado sem que os resultados sejam afetados pela ação de demais adições, por exemplo, fíler calcário, comumente empregado em todos os cimentos Portland comercializados atualmente.

Para a produção do cimento foi utilizado clínquer ainda pelotizado e de gipsita (sulfato de cálcio hemihidratado), sendo que esses materiais atendem todos os requisitos da norma ABNT NBR 16697:2018.

Inicialmente, o clínquer foi cominuído em um moinho do tipo mandíbula (Figura 13), em lotes de 2,5 kg, durante 2 horas e 15 minutos. Posteriormente, o clínquer foi peneirado na malha de 8 mm para em seguida, o material passante, ser novamente cominuído em um moinho de bolas (Figura 14). No moinho de bolas, foram moídos lotes de 5 kg, por um período de 4,5 horas. Por fim, todo o material foi peneirado na peneira 150 (Figura 15 e 16) e tomado como clínquer moído o material passante.

Figura 13 - Moinho de mandíbula.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 14 - Moinho de bolas.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 15 - Peneira 150.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 16 - Material passante na peneira 150



Fonte: Autoras (2022).

Durante todo processo de moagem, o material foi armazenado em um tonel (Figura 17) em uma sala climatizada a 23 ± 2 °C, contendo embalagens de sílica gel para impedir a umidade. Ao término de todo o processo, foi realizada a homogeneização do clínquer moído (Figura 18), por meio da movimentação do tonel. Posteriormente todo o material foi armazenado em sacolas plásticas, com porções de 5 kg (Figura 19).

Figura 17 - Tonel de armazenamento do clínquer moído.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 18 - Clínquer moído após ser homogeneizado.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 19 - Armazenamento do clínquer em sacos de 5kg.



Fonte: Autoras (2022).

A gipsita também passou por moinhos de mandíbula, na sequência o material foi levado para o moinho de argola (Figura 20), em lotes de 60 gramas por vez e moído por um período de dois minutos. Por fim, foi utilizado o material passante na peneira 200, conforme Figura 21.

Figura 20 - Moinho de argolas.



Fonte: Autoras (2022).

Figura 21 - Gipsita moída após passar pela peneira 200.



Fonte: Autoras (2022).

Após todo material ter sido preparado, o mesmo foi submetido ao ensaio de calorimetria no Laboratório de Nanotecnologia (Nanotec) localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Para a composição do cimento, as proporções incorporadas foram de 5,5% de gipsita e 94,5% de clínquer, valor encontrado para que haja melhor liberação de calor, conforme explicado no item 5.1.4.1.

4.1.3 Escória de aciaria LD

A escória de aciaria LD (Figura 22) foi fornecida pela ArcelorMittal Tubarão para a realização da pesquisa. A escória passou por um processo de moagem, por meio de um moinho de bolas, com carga abrasiva de 50kg, por 2h (7.440 ciclos), em lotes de 5 kg cada. Posteriormente, a escória moída foi peneirada na peneira 150, e usado o material passante.

Figura 22 - Escória de Aciaria LD fornecida pela ArcelorMittal após passar pelo processo de moagem.



Fonte: Autoras (2022).

4.1.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado para a produção das argamassas de alto desempenho foi uma areia quartzosa proveniente de cavas localizadas na região de Linhares – ES conforme (Figura 23). Antes de iniciar os ensaios, a areia passou por um processo de secagem a 400°C na mufla, e posteriormente foi peneirada na peneira de malha 2 mm.

Figura 23 - Areia após processo de secagem a 400°C na mufla



Fonte: Autoras (2022).

4.1.5 Aditivo

O aditivo utilizado foi um superplastificante de terceira geração à base de policarboxilato da GCP (Greice) Adva 458 UHPC. Conforme informações do fabricante, o aditivo possui massa específica de 1,075 a 1,115 g/cm³.

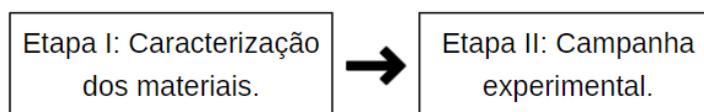
4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do seguinte trabalho consiste no programa experimental executado no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil (LEMAC), localizado no Centro Tecnológico (CT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em parceria com o Laboratório de Nanotecnologia (Nanotec) localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O objetivo do trabalho em questão é atingir a meta de obter porcentagens adequadas de incorporação de escória de aciaria LD em argamassas de alto desempenho, de maneira a substituir parcialmente os materiais cimentícios, melhorando suas características. Ademais, o propósito principal é a busca pela neutralização da retração autógena, ocasionada pelas baixas relações água/cimento para o alcance do alto desempenho, através da potencial expansibilidade das escórias LD. Para a elaboração da pesquisa, foi feita a avaliação do material funcionando isoladamente e seu comportamento como material cimentício suplementar, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.

A partir da definição da meta do estudo, foram estabelecidas duas etapas para o cumprimento das análises em questão e aquisição de resultados. Assim, o programa experimental foi dividido conforme fluxograma esquematizado na Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autoras (2022).

4.2.1 Etapa I

A primeira etapa consistiu no preparo dos materiais, através da seleção, moagem e peneiramento. Além disso, também a caracterização física, mineralógica e microestrutural por meio de ensaios específicos.

4.2.1.1 Caracterização da escória de aciaria LD

Com intuito de analisar o poder expansivo e assim removê-lo, o coproduto siderúrgico utilizado na pesquisa não foi submetido a nenhum tipo de beneficiamento, já que é justamente essa potencialidade o alvo do estudo. Considerando que a escória foi usada como substituta parcial do cimento, fez-se necessário um material mais fino, de forma a otimizar o processo de moagem. Portanto, a fração de escória LD fornecida pela ArcelorMittal para a pesquisa foi de 0 a 19 mm.

A moagem da escória LD foi executada conforme o item 4.2 e posteriormente foram realizados os ensaios de caracterização física da escória LD. A massa específica foi feita conforme a ABNT NBR 6458 (2016), em que, em um recipiente adequado, foi adicionado 200 ml de água, 65 gramas de escória LD moída homogênea (previamente peneirada). Assim, obteve-se um volume e por meio dele foi possível executar o cálculo da massa específica.

4.2.1.1.1 Massa específica

Realizou-se o ensaio de massa específica de acordo com a NM 23/2000, com recipiente adequado, em que foram adicionados 200ml de água e 60g de escória moída homogênea e peneirada na peneira 0,3mm de abertura. Após 30 min o ar contido foi expelido, o que fez a marcação ficar abaixo do mínimo. Assim, foram adicionados mais 5g de escória para que a medição fosse possível, totalizando 65g. A massa específica pôde ser calculada por meio da equação 3.

$$\text{Massa específica} = mV \times fc \quad (3)$$

Em que:

m = massa

V = Volume

fc = fator de correção.

4.2.1.1.2 Área Superficial

A finura do material foi determinada pelo Método de Blaine, também conhecido como método da permeabilidade ao ar, conforme a NBR 16372 (ABNT, 2015). Através das pesquisas de Wang, et al., (2013) e Lu et al., (2018) a finura da escória LD deve ser compreendida entre 400 e 600m²/kg para a obtenção de resultados satisfatórios do material como substituto ao cimento.

O princípio do ensaio Blaine é a determinação da finura de um material em formato de pó através da medição do tempo que o ar demora para atravessar a camada do material compactado. A quantidade dessa camada é obtida por meio do uso da equação 4.

$$m_1 = (1 - \varepsilon) \times \rho \times V \quad (4)$$

Em que:

m_1 = massa do material em gramas;

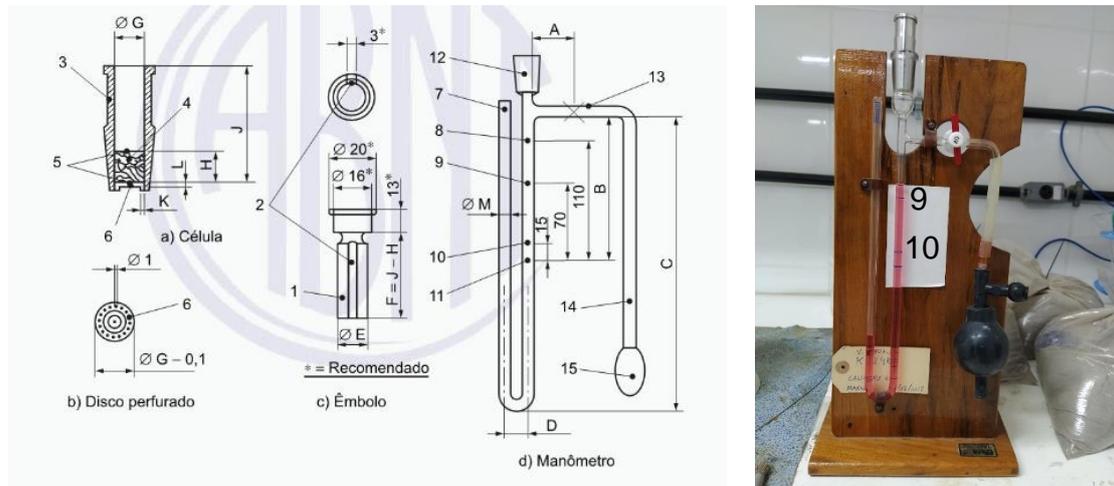
ε = porosidade da camada;

ρ = massa específica do material (g/cm³);

V = volume da camada compactada (cm³).

Após calculada essa massa, na execução do ensaio, foi obtido o tempo (t) o qual o líquido leva para alcançar a linha final da aparelhagem (Linha 9 até a 10), conforme a Figura 25.

Figura 25 - Permeabilímetro Blaine. (a) Recorte da norma com as marcações dos pontos 9 e 10; (b) Equipamento utilizado para as análises de finura Blaine.



(a)

(b)

Fonte: (a) ABNT NBR 16372; (b) Autoras (2022).

Por fim, foi calculada a permeabilidade pela equação 5.

$$S = K \times \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \times \sqrt{t}}{\rho \times (1-\varepsilon) \times \sqrt{0,1\eta}} \quad (5)$$

Em que:

S = Superfície específica (cm²/g);

K = Constante do aparelho;

η = Viscosidade do ar (pela temperatura);

ρ = massa específica;

ε = porosidade.

4.2.1.2 Caracterização do agregado miúdo

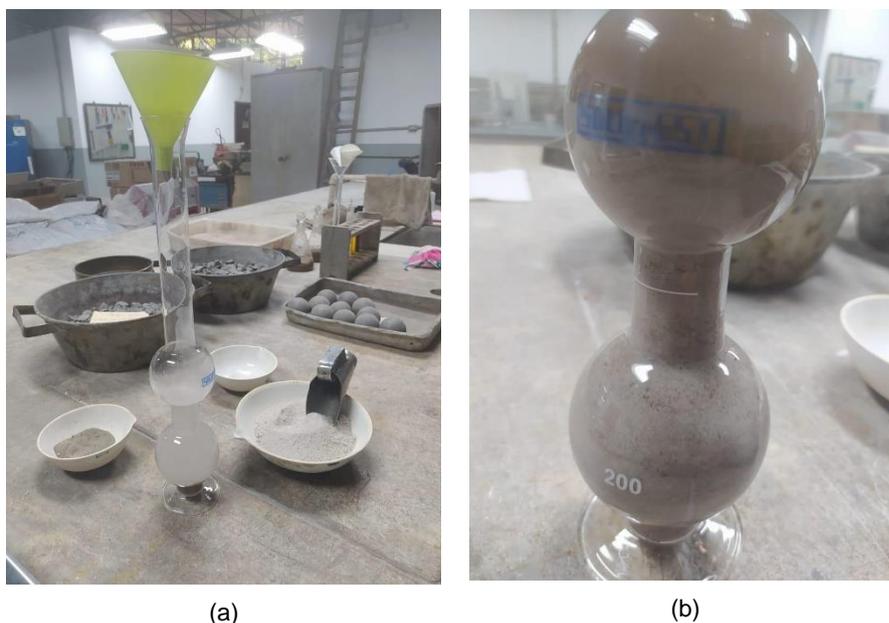
4.2.1.2.1 Massa específica

Para realização do ensaio da obtenção da massa específica foi seguido a NM 52. Em tal experimento foi utilizado uma amostra de 500 gramas e um frasco aferido

de 500 cm³ (Figura 26), de capacidade e um erro inferior a 0,15 cm³ a 20°C, a água inserida no frasco foi de 200 ml.

Para a remoção das bolhas de ar presentes no fundo do frasco, foram executados movimentos circulares e de leve agitação como sugerido pela norma. Por fim, a leitura foi da linha atingida no frasco pela amostra e a água foi feita e o prosseguimento foi o cálculo da massa específica.

Figura 26 - Massa específica. (a) Materiais utilizados no ensaio; (b) Realização do ensaio.



(a)

(b)

Fonte: Autoras (2022).

Para o cálculo da massa específica realizada, foi utilizada a equação 6.

$$d = \frac{500}{L-200} \quad (6)$$

Em que:

d = massa específica;

L = Leitura realizada no frasco.

4.2.1.2.2 Análise granulométrica

Para a realização do ensaio de análise granulométrica da areia, a qual foi utilizada para a produção das argamassas, foi aderida a NBR NM 248, sendo utilizadas as peneiras da série normal (Figura 27a).

O ensaio foi realizado duas vezes, utilizando-se duas amostras de 300g (Figura 27b) passando pelas peneiras 2 mm.

Figura 27 – Análise granulométrica. (a) Peneiras da série normal; (b) Amostras de areia para execução do ensaio.



(a)

(b)

Fonte: Autoras (2022).

4.2.1.3 Caracterização do clínquer

4.2.1.3.1 Massa específica

O ensaio de massa específica do clínquer seguiu o procedimento sugerido pela norma NM 23/2000 ABNT – “Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica”.

Realizou-se o ensaio de massa específica em um recipiente adequado, com adição de 200 ml de querosene e 60 g de clínquer homogêneo, o qual foi peneirado na peneira de número 150.

4.2.1.4 Caracterização da gipsita

4.2.1.4.1 Calorimetria

Para realização deste ensaio, uma pequena amostra do material foi enviada para o laboratório Laboratório de Nanotecnologia (Nanotec) localizado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), junto a amostra de clínquer. O ensaio de calorimetria da gipsita foi realizado seguindo o procedimento sugerido pela norma NBR C1679:2017, tendo como objetivo indicar a proporção ideal de clínquer e gipsita para que haja maior liberação de calor na mistura.

4.2.2 Etapa II

A segunda etapa consistiu na produção dos corpos de prova de argamassa de alto desempenho, além da análise de suas propriedades em estado fresco, realizando ensaios de verificação da trabalhabilidade e espalhamento, e também endurecido, com ensaios de resistência à compressão. Além disso, nesta etapa foi realizada a moldagem dos prismas na bancada, na qual foi fundamental para análise da retração.

Foram escolhidos dois traços de referência para as argamassas, sendo esses com relações água/aglomerante distintos, 0,3 e 0,4, sem a incorporação de escória, denominados REF30 e REF40, respectivamente. Para cada traço de referência, foram calculados outros dois com incorporação de 5% e 10% de escória de aciaria LD, em massa. No total foram produzidas seis argamassas, com volume de 1,8L cada, sendo os traços utilizados descritos na tabela 5.

Tabela 5 - Traços utilizados para a pesquisa com unidade em gramas.

	CLÍNQUER	GIPSITA	ESCÓRIA LD	AREIA	ÁGUA	ADITIVO
REF 30	1428,89	83,16	0	2268,08	453,62	8,5
A30-5	1357,45	79	80,82	2268,08	453,62	8,5
A30-10	1286	74,85	161,65	2268,08	453,62	8,5
REF 40	1318,16	76,72	0	2092,32	557,95	3,51
A40-5	1252,25	72,88	74,56	2092,32	557,95	3,51
A40-10	1186,34	69,05	149,12	2092,32	557,95	3,51

REF 30 - Referência com relação água/cimento igual a 0,3, sem escória LD;

A30-5 - Traço com relação água/cimento igual a 0,3, com 5% de escória LD e 95% de cimento;

A30-10 - Traço com relação água/cimento igual a 0,3, com 10% de escória LD e 90% de cimento;

REF 40 - Referência com relação água/cimento igual a 0,4 sem escória LD;

A40-5 - Traço com relação água/cimento igual a 0,4, com 5% de escória LD e 95% de cimento;

A40-10 - Traço com relação água/cimento igual a 0,4, com 10% de escória LD e 90% de cimento.

4.2.2.1 Índice de consistência

Os ensaios para análise de fluidez das argamassas foram executados com base na ABNT NBR 13276:2016. Os materiais utilizados foram uma mesa de superfície polida, molde metálico em formato de tronco de cone, espátula de aço, soquete e paquímetro.

Para determinação do índice de consistência, o molde de tronco de cone foi fixado no centro da mesa e em seguida, foi preenchido completamente com a argamassa (Figura 28a), de maneira a não exercer nenhuma pressão extra. Com o molde preenchido por completo, a superfície da foi nivelada com o auxílio de uma espátula (Figura 28b).

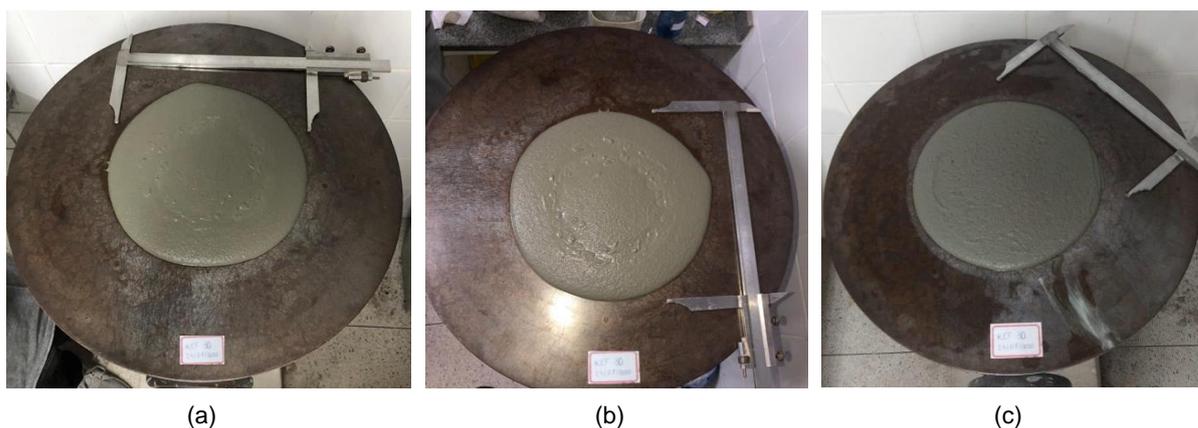
Figura 28 – Índice de consistência. (a) Preenchimento do tronco de cone com argamassa; (b) Tronco de cone preenchido e nivelado.



Fonte: Autoras (2022).

Por fim, o molde foi retirado e três medidas do diâmetro foram feitas ao redor do material fluído (Figura 29). Para a determinação final do índice de consistência foi feita a média das medidas efetuadas.

Figura 29 - Medida do diâmetro do espalhamento da argamassa. (a) Medida do diâmetro 1; (b) Medida do diâmetro 2; (c) Medida do diâmetro 3.



Fonte: Autoras (2022).

4.2.2.2 Resistência mecânica à compressão

Os corpos de prova de argamassa foram moldados seguindo a norma NBR 7215. Para moldagem dos corpos de prova, foram utilizados moldes de medidas de 5

cm x 10 cm (Figura 30), os quais antes de serem preenchidos, foram pincelados com óleo para auxiliar na desmoldagem.

Figura 30 - Molde do corpo de prova.



Fonte: Autoras (2022).

As argamassas foram preparadas com o uso de um misturador mecânico, e com auxílio de espátula e soquete metálico. Feita a mistura, as argamassas foram imediatamente inseridas nos moldes conforme a NBR 7215.

Após a moldagem, foram posicionadas placas de acrílico para cada um dos moldes, de forma a não perder umidade para o ambiente na mistura e por fim, os corpos de prova foram armazenados na câmara úmida até o dia seguinte, no qual foi realizado o desmolde e a imersão dos mesmos em água com cal (Figura 31).

Figura 31 - Tanque de imersão dos corpos de prova.



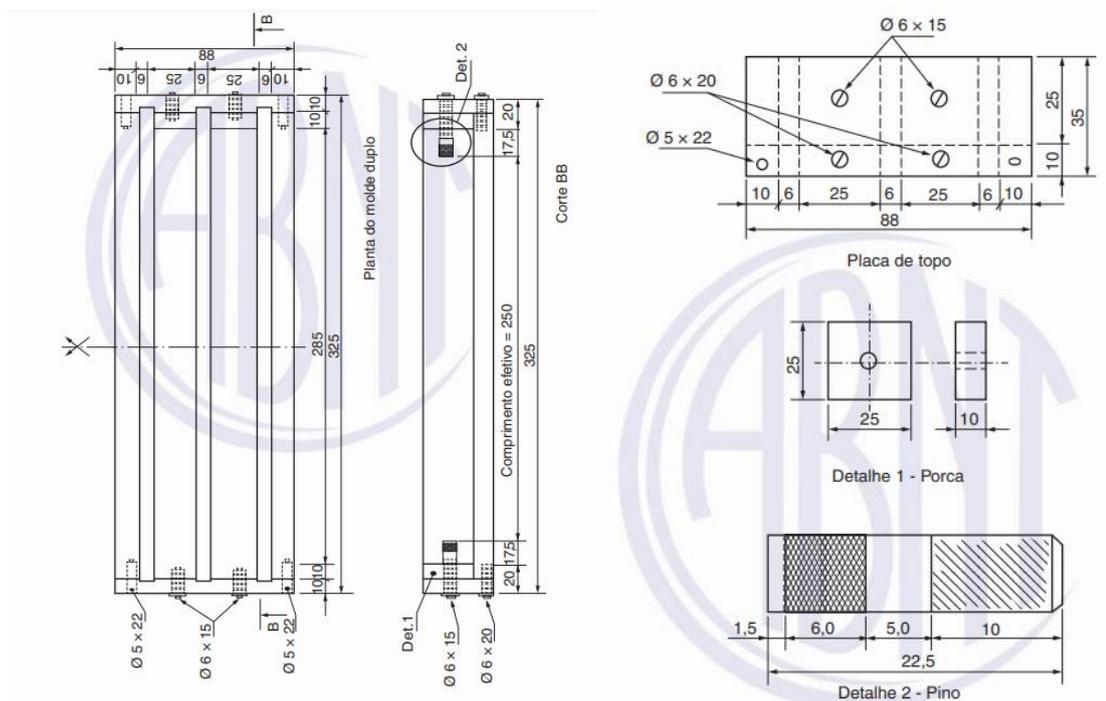
Fonte: Autoras (2022).

As propriedades dos corpos de prova de argamassa no estado endurecido foram analisadas através do ensaio de resistência à compressão. Para a realização desta análise, foi cumprido o procedimento previsto na norma ABNT NBR 13279 (1995). Foram moldados seis corpos de prova para cada idade de ruptura, sendo aos 7, 28 e 91 dias, totalizando 18 corpos de prova para cada um dos traços estabelecidos. Desse modo, foi possível obter um valor mais expressivo da resistência mecânica à compressão.

4.2.2.3 Bancada de retração

Visando entender o comportamento da argamassa com incorporação de escória, foi realizado o ensaio da bancada de retração conforme a norma C490/C490M:2017. Através da moldagem dos prismas de argamassa em uma bancada baseando-se a NBR 13583 (ABNT, 2014), foi analisada, por meio de transdutores de medição de deslocamento e de um programa computacional, a retração autógena das barras. Conforme a norma, os moldes precisam possuir aproximadamente 250 mm, como apresentado na Figura 32. Além disso, devem ser feitos de aço ou de algum material que resista quimicamente e fisicamente às argamassas/concretos. Para garantir a padronização do ensaio, a temperatura da sala de moldagem e dos materiais secos foram mantidas a $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ constantemente.

Figura 32 - Dimensões das formas para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autoras (2022).

Antes de receber a mistura de argamassa, foi feita a identificação por números na forma de maneira a não haver nenhum erro no registro dos valores correspondentes a cada corpo de prova. Para que os prismas ficassem livres para expandir, foi utilizada uma fina placa de isopor, com 10mm de espessura em todas as laterais da forma. Além disso, as juntas e linhas de contato foram bem vedadas através de sacolas de plástico. Por fim, os pinos foram posicionados cuidadosamente, de modo a não desregular a bancada.

Feita a montagem da bancada, a moldagem dos corpos de prova foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa. Para isso, a argamassadeira foi posicionada próxima a bancada, para que o tempo entre o preparo e a moldagem fosse o menor possível. A argamassa foi colocada nos moldes através do uso de uma espátula, em duas camadas adensadas com um soquete.

Para que não houvesse variação de umidade, a argamassa recebeu uma camada de manta líquida acrílica impermeabilizante (Figura 33) com o auxílio de um pincel, garantindo melhor vedação da mistura e resultados mais precisos, obtendo argamassas como mostrado na Figura 34.

Figura 33 - Manta líquida acrílica impermeabilizante



Fonte: Site da Leroy Merlin.

Figura 34 - Argamassa com impermeabilizante na bancada de retração



Fonte: Autoras (2022).

Através da pequena movimentação executada pelos pinos inseridos na argamassa, foi possível, por meio do aquisitor de dados, efetuar as leituras de retração da argamassa a cada segundo ao longo de aproximadamente sete dias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas caracterizações e nos ensaios descritos no programa experimental. Inicialmente são avaliados os resultados das caracterizações dos materiais, e, em seguida, dos ensaios realizados para obter os resultados de índice de consistência, resistência à compressão, além dos ensaios da bancada de retração.

5.1 ETAPA I

5.1.1 Caracterização da escória de aciaria LD

5.1.1.1 Massa específica

Como mencionado no item 4.2.1.1.1, que se trata da caracterização da escória, a massa inserida de amostra foi de 65 gramas. O volume atingido e lido no frasco Le Chatelier foi de 18,2 cm³. Utilizando um fator de correção de 0,9581, por meio da equação 3, foi possível obter um resultado de 3,42g/cm³ para a massa específica da escória de aciaria LD utilizada nesta pesquisa.

5.1.1.2 Índice de finura

Para a determinação do Blaine da escória LD, através da equação 4 foi determinada a massa de camada do material a ser inserido no ensaio, resultando 3,4g. Assim, utilizando a massa específica obtida anteriormente e o volume de 1,808 cm³ e variando a porosidade entre 0,5 a 0,45 foi possível adquirir o valor da massa. Utilizando a porosidade de 0,5 obteve-se uma massa de 3,09 gramas, entretanto a compactação ocorreu com muita facilidade. Já com a porosidade no valor de 0,4, a compactação foi adequada.

A partir deste valor o ensaio pôde ser iniciado utilizando o aparelho de Blaine completo. O tempo que o líquido vai da marcação de cima até embaixo foi de 409 segundos. Para a obtenção do valor de η (viscosidade do ar) foi utilizado a tabela A.1 do anexo A da norma ABNT NBR 16372 (Figura 35) por meio da temperatura de 24°C, de acordo com o exibido na equação 7.

Figura 35 - Tabela A.1 do anexo A da norma ABNT NBR 16372.

Temperatura °C	Massa específica do mercúrio, ρ_H g/cm ³	Viscosidade do ar Pa.s	$\sqrt{0,1\eta}$
18	13,55	0,000 017 98	0,001 341
19	13,55	0,000 018 03	0,001 343
20	13,55	0,000 018 08	0,001 345
21	13,55	0,000 018 13	0,001 346
22	13,54	0,000 018 18	0,001 348
23	13,54	0,000 018 23	0,001 350
24	13,54	0,000 018 28	0,001 352
25	13,54	0,000 018 32	0,001 354
26	13,53	0,000 018 37	0,001 355
27	13,53	0,000 018 42	0,001 357
28	13,53	0,000 018 47	0,001 359
29	13,53	0,000 018 52	0,001 361
30	13,52	0,000 018 57	0,001 363

NOTA Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear.

Fonte: ABNT NBR 16372.

$$\sqrt{0,1 \times \eta} = 0,001352 \quad (7)$$

O resultado encontrado foi de 5965,42 cm²/g, concluindo que a escória LD obteve um alto índice de finura, de forma a se assemelhar à finura do cimento.

5.1.2 Caracterização do agregado miúdo

5.1.2.1 Massa específica

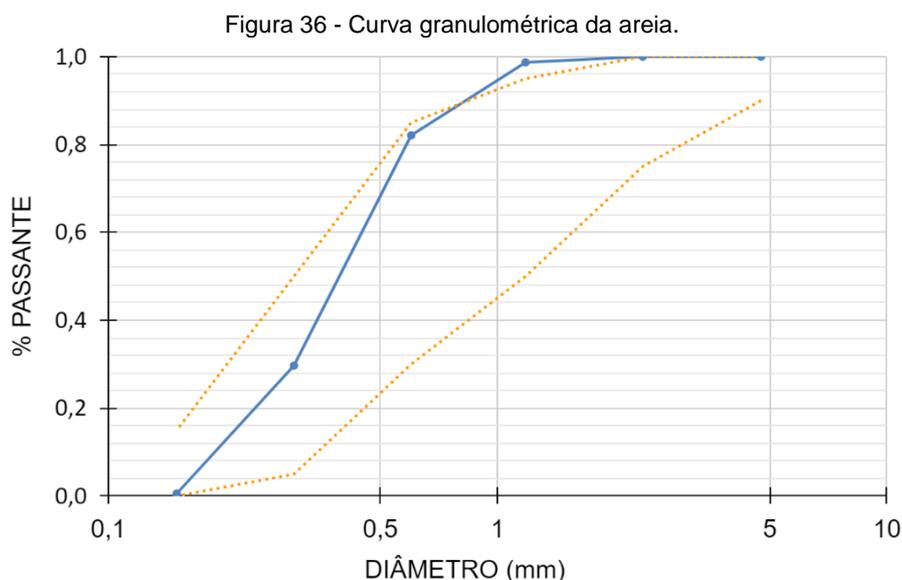
Após a finalização do ensaio foi realizada a leitura do menisco, resultando em V = 392 ml. Por meio da equação 6, obteve-se a massa específica aparente de 2,6 g/cm³.

5.1.2.2 Análise granulométrica

Os resultados mostraram-se satisfatórios, considerando que houve uma perda menor que 0,3% de amostra no ensaio e que a curva granulométrica ficou dentro da zona utilizável. Assim, foi possível obter o módulo de finura de cada uma das amostras, utilizando a equação 8.

$$\text{Módulo de finura} = \text{Soma \% Retida Acumulada}/100 \quad (8)$$

Por fim, a partir dos resultados, foi determinada a curva granulométrica para esta areia, como mostrada na Figura 36.



Fonte: Autoras (2022).

Pela NBR NM 248, a dimensão máxima característica é determinada através da porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5%. Ela equivale a abertura nominal, em milímetro da malha da peneira que retém essa quantidade de material. Logo, analisando os resultados do ensaio, é possível constatar que a dimensão máxima característica é 1,18mm.

5.1.3 Caracterização do clínquer

5.1.3.1 Massa específica

Segundo o procedimento descrito no item 4.2.1.3.1, com a utilização de 60 gramas de clínquer e querosene. Assim, de acordo com a equação 3 a massa específica encontrada foi de 3,18 g/cm³.

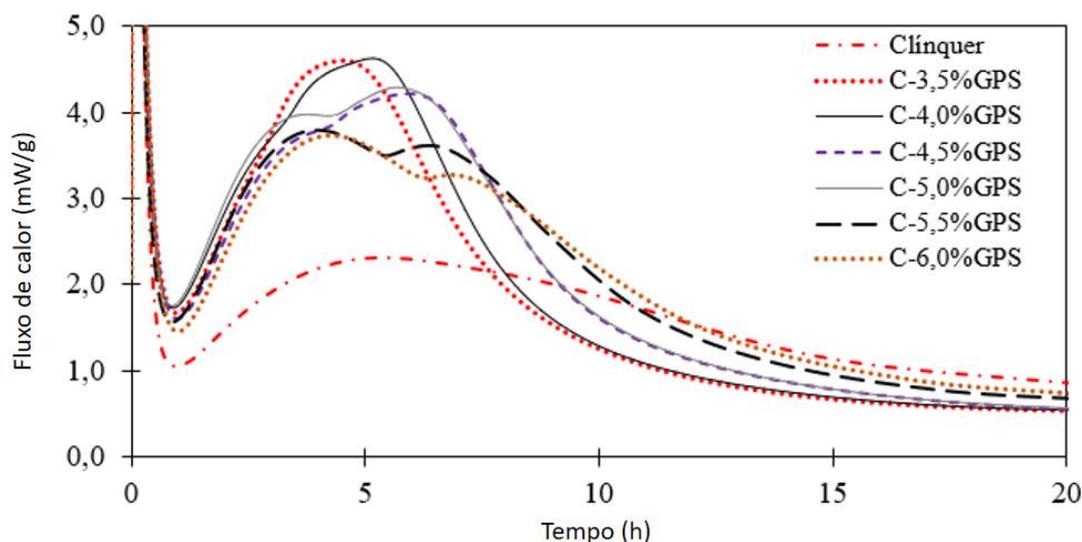
5.1.4 Caracterização da gipsita

5.1.4.1 Calorimetria

Para a análise de qual seria a melhor porcentagem de incorporação de gipsita na mistura com o clínquer foi realizado o ensaio de calorimetria pela Universidade Federal de Santa Catarina no Laboratório de Nanotecnologia (Nanotec). Os teores testados foram entre 3,5% a 6%, os quais são mais habituais nos cimentos comerciais.

A partir da Figura 37 foi possível observar que a melhor porcentagem é a de 5,5% de gipsita incorporada, por apresentar a melhor curva, sendo a única das curvas que mostra com maior nitidez a formação dos monossulfatos logo após a rápida formação do CSH e CH.

Figura 37 - Gráfico de calorimetria elaborado com diferentes teores de gipsita incorporados no cimento.



Fonte: Universidade Federal de Santa Catarina (2022).

5.2 ETAPA II

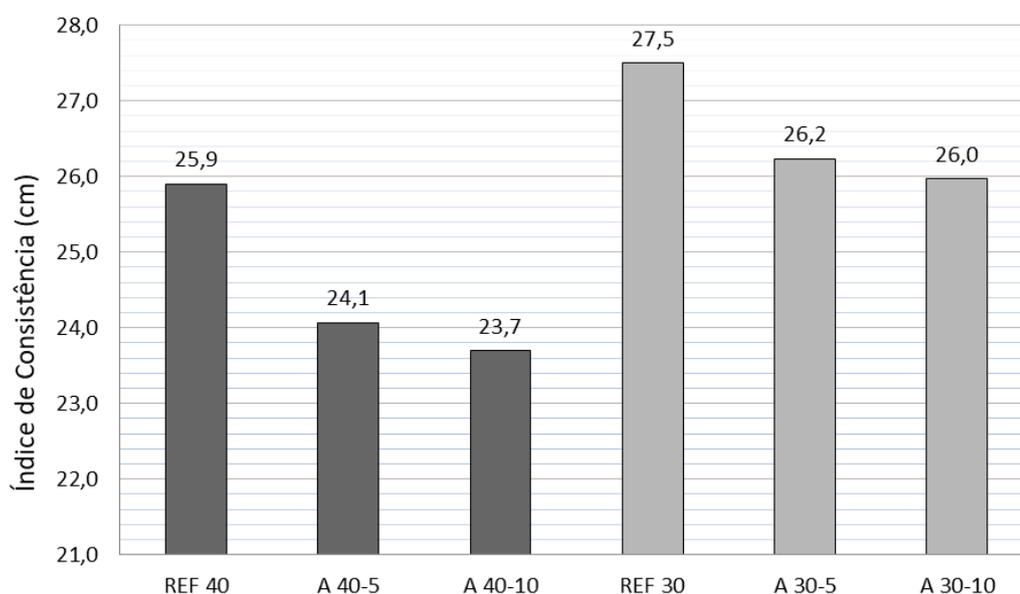
Nesta etapa serão analisados os ensaios de como a escória LD se comporta em argamassas de alto desempenho para o estado fresco e estado endurecido.

5.2.1 Índice de consistência

Neste ensaio foram executadas as medidas de mini slump para cada um dos traços elaborados (Figura 29). De acordo com este ensaio é possível analisar como a escória de aciaria LD influencia na fluidez e trabalhabilidade de uma argamassa de alto desempenho.

Na Figura 38 as medidas de abertura estão representadas em formato gráfico, tanto para os traços de relação água/aglomerante 0,4 quanto para 0,3, o que torna a conclusão a respeito dos dados mais visível. Pode-se analisar que, em ambas as relações a/c, a trabalhabilidade diminui à medida que aumenta a proporção de escória LD na mistura.

Figura 38 – Abertura das argamassas autoadensáveis.



Fonte: Autoras (2022).

De acordo com os resultados exibidos, é possível observar que os valores de abertura das argamassas diminuem à medida que a porcentagem de escória LD na

mistura é maior, para ambas relações a/c. Esses valores corroboram com os encontrados por Roslan et al. (2016) e Guo et al. (2014), os quais também encontraram valores de trabalhabilidade e fluidez inversamente proporcionais.

Como explicado no tópico 3.4.1.1, a redução de trabalhabilidade ocorre, possivelmente, pelo fato da escória de aciaria LD possuir uma certa aspereza em sua superfície, o que acaba por dificultar as reações de hidratação. Devido a isso, as partículas da escória podem reter a água e por consequência, haver a redução da trabalhabilidade da argamassa.

É importante salientar que nem todos os autores encontraram este mesmo resultado. Jiang et al. (2018) e Wang et al. (2012), obtiveram resultados opostos aos apresentados, em que a trabalhabilidade se torna melhor com a inserção de escória LD na mistura. Isso provavelmente deve-se a procedência de cada uma das escórias LD, que são advindas de diferentes siderúrgicas, o que acarreta em algumas características também distintas, como por exemplo, variações relacionadas ao tipo de superfícies, podendo ser mais lisas ou mais ásperas.

5.2.2 Resistência mecânica à compressão

Para execução deste ensaio foram realizados os rompimentos dos corpos de prova moldados com todas as argamassas propostas no programa experimental, seguindo os protocolos recomendados em norma, conforme pode ser observado na Figura 39. Estes rompimentos foram feitos para efetivação da análise de como a incorporação de escória LD afeta na resistência mecânica à compressão de argamassas de alto desempenho.

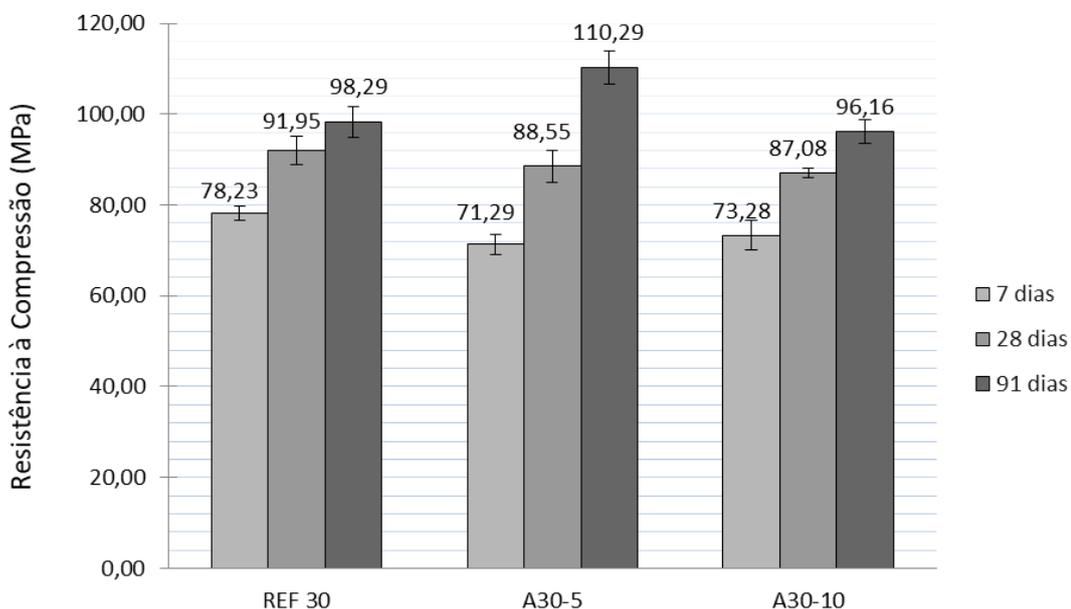
Figura 39 - Rompimento de um dos corpos de prova com escória LD.



Fonte: Autoras (2022).

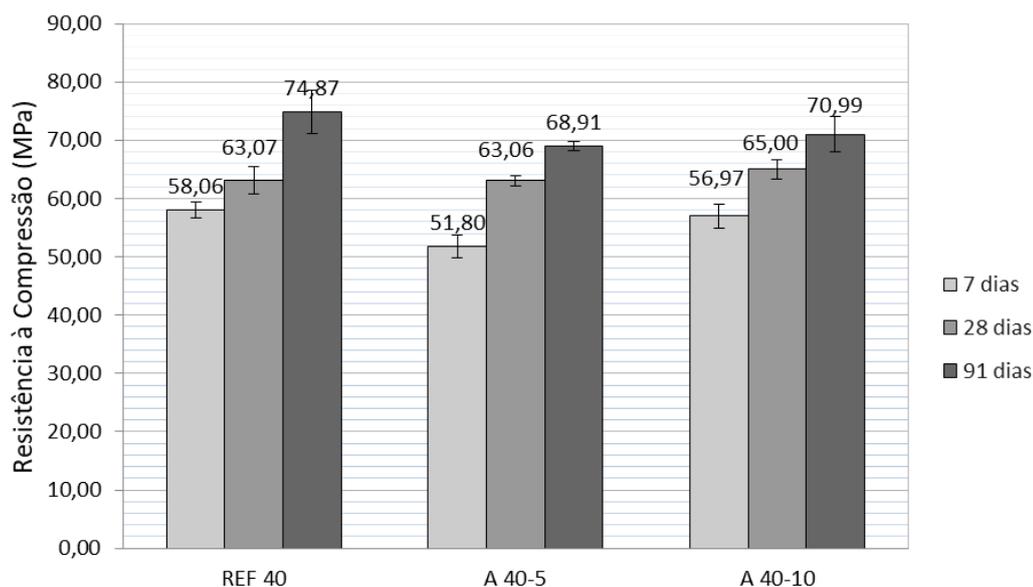
As resistências dos traços de relação a/c 0,4 e 0,3 estão graficamente apresentadas nas Figuras 40 e 41. Pode-se analisar que a resistência para os três traços foi diretamente proporcional ao tempo, conforme o esperado.

Figura 40 - Gráfico de Resistência Mecânica à Compressão para os traços com relação água/aglomerante = 0,3.



Fonte: Autoras (2023).

Figura 41 - Gráfico de Resistência Mecânica à Compressão para os traços com relação água/aglomerante = 0,4.



Fonte: Autoras (2023).

Outra análise que pode ser feita a partir dos gráficos apresentados nas Figuras 40 e 41 é que, para uma composição com traço de relação água/aglomerante 0,3 e 0,4 a maior resistência nos primeiros dias foi a da referência, ou seja, sem a incorporação de escória LD. Esse resultado era esperado, pois de acordo com Gumieri, 2002; Wang et al. 2013 e Lizarazo-Marriaga et al. 2011 as escórias LD possuem baixos teores de C3S, possuindo um tempo de pega mais lento que o cimento convencional, além disso, a escória também consegue afetar a taxa de hidratação do cimento, atrasando toda a mistura.

De acordo com Roslan et al. (2016), como citado já anteriormente, até 40% de escória de aciaria LD pode ser utilizada para substituir o cimento para aplicação em concretos e argamassas de baixa resistência, pois acima disso, o material acaba por não desenvolver boa resistência ao ser hidratado. Por conta desse fato, para o presente trabalho, foi escolhido substituições de 5 e 10% de escória LD no lugar do cimento Portland. Os resultados alcançados para os traços com relação água/cimento 0,4, quanto a resistência à compressão, confirmam os dos autores, de que quanto maior a substituição de escória LD na mistura, maior a resistência à longo prazo (até 40%). Já para os traços com relação água/aglomerante 0,3 a modificação de 10% de escória LD na mistura, possui resistência à compressão menor que a modificação de 5%.

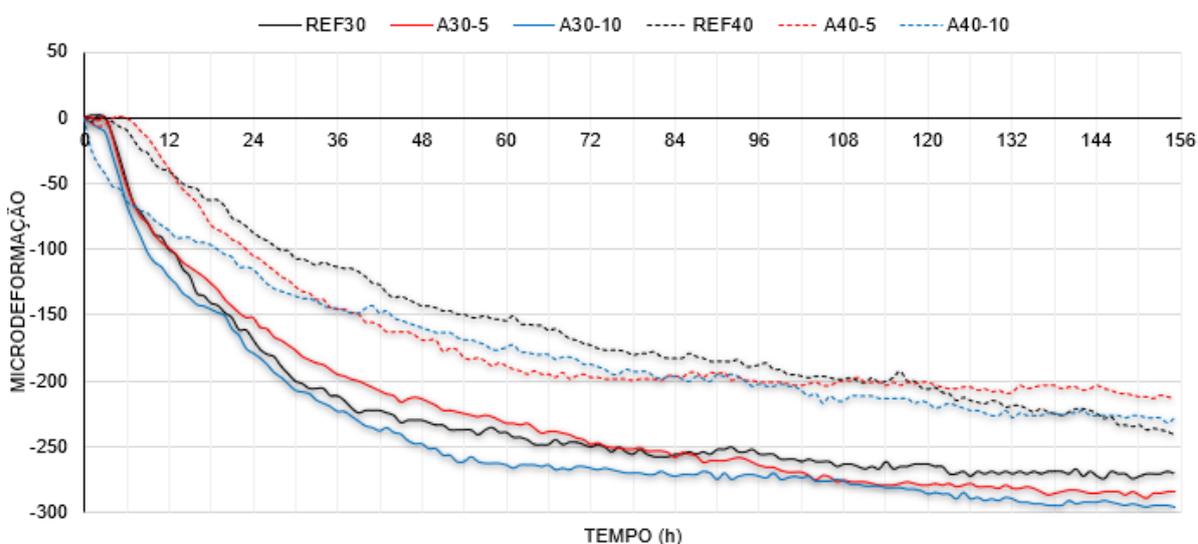
Esse aumento a longo prazo pode ser, como explicado no item 3.4.2.1 mencionado por Roslan et al. (2016) pelo fato das escórias LD terem altos teores de óxidos de sílica e cálcio, os quais são fundamentais na atividade pozolânica. Entretanto, em alguns casos, faz-se necessário a utilização de aditivos ativadores da escória, para que ela possa exercer suas propriedades cimentantes, de forma que consiga realizar adequadamente suas reações de hidratação.

Por fim, quanto às diferentes relações água/aglomerante, os resultados também deram de acordo com o esperado, dado que os traços de menor relação a/c, de 0,3, obtiveram maiores valores de resistência mecânica à compressão quando comparados com o de 0,4.

5.2.3 Bancada de retração

A análise de resultados foi realizada por meio da elaboração de gráficos dos valores de retração a cada uma hora conforme mostrado na Figura 42. Cada linha representada no gráfico foi obtida através da média dos valores de retração dos 3 prismas equivalentes àquela mistura. As primeiras seis horas de leitura foram eliminadas, pois devido a argamassa estar no estado fresco, ainda se acomodando na forma, os ruídos poderiam atrapalhar as análises sendo confundidos com deformações.

Figura 42 – Gráfico de microdeformação dos prismas com o tempo.



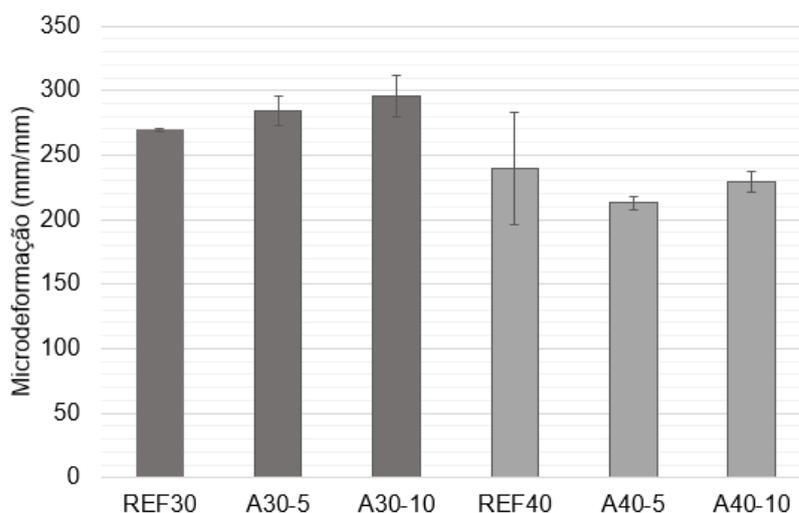
Fonte: Autoras (2023).

O aquisitor fornece os dados de deformação variando com o tempo dado em segundos, no entanto, foram utilizados dados a cada uma hora. Inicialmente, foi calculada a variação da deformação de cada lado do prisma, posteriormente sendo calculada a variação de deformação total. Em seguida, foram obtidos os valores da deformação, dada pela divisão entre a deformação total do prisma e comprimento inicial do prisma, equivalente à dimensão da forma. Para melhor visualização da deformação pelos gráficos, por serem valores muito pequenos, os números encontrados em mm/mm foram multiplicados por 10^6 para obtenção da microdeformação e também tiveram o sinal invertido para representar a retração.

Devido a fatores externos como temperatura, movimentação e possíveis impactos, uma vez que o ensaio foi realizado em um ambiente compartilhado com outras pessoas, algumas leituras obtiveram valores que fugiram do padrão, possivelmente por algum erro. Portanto, para elaboração dos gráficos, foram eliminados os dados que estavam fora do padrão das demais leituras, como ocorreu com um dos prismas da REF 30 e da A40-10, que apresentaram uma curva com valores muito abaixo e muito acima das demais, respectivamente.

As leituras se encerraram com tempos variados devido a necessidade do operador, portanto, foi determinada um tempo em comum para todos os prismas para que fosse feita a análise dos dados calculados em um mesmo momento. Por meio de média das horas 154 e 155 de cada prisma, que equivale à metade do sexto dia, obteve-se três valores de microdeformação para os respectivos traços, e calculando novamente a média, obteve-se um único valor para o traço, como pode ser observado na Figura 43, que apresenta os valores de microdeformação, bem como os desvios padrão. Desse modo, a partir da microdeformação dos traços de referência REF 30 e REF 40, pode-se fazer um comparativo percentual em relação aos traços com incorporação de 5% e 10% de escória.

Figura 43 - Microdeformação (retração) nas horas 154 e 155 com desvio padrão.



Fonte: Autoras (2023).

A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível constatar que a argamassa A30-5 retraiu 5% a mais em relação a REF 30, enquanto A30-10 retraiu 10% a mais, ou seja, houve um pequeno aumento da retração. Já a mistura A40-5 retraiu 11% a menos e a A40-10 retraiu 4% a menos que a REF 40, o que comprova uma pequena redução na retração da argamassa com incorporação de escória LD, quando dosadas com relação água/aglomerante 0,4.

Conforme Gumieri (2002), utilizando o método acelerado das barras, as pastas foram feitas com proporções equivalentes a 50% da massa de escória LD e de cimento. O resíduo foi moído e peneirado na malha de 0,075mm, tornando a escória na forma pulverulenta. Os resultados mostraram uma pequena expansão para as amostras analisadas no decorrer do tempo, porém, essa expansão não atingiu o valor limite aos 12 dias. Conclui-se então, que o tipo de amostra e o tempo de duração do ensaio não apresentaram diferença significativa com relação à expansibilidade das barras, e, nas condições de ensaio adotadas, a expansão destes materiais pode ser considerada inócua, como também aconteceu no presente trabalho.

Além disso, Geyer (2001) também executou ensaios com métodos de avaliação da escória de aciaria LD. No teste de expansão em autoclave, foram utilizadas porcentagens distintas de substituição de escória de aciaria no cimento, dentre esses valores, 5% e 10%. Fazendo a análise dos resultados encontrados, foi constatado que

o uso de adições em até 10% de escória LD, como é o caso deste trabalho, não exercem influência sobre as argamassas em relação à expansão.

Desse modo, constatações como as de Gumieri (2002) e Geyer (2001) convergem com os resultados obtidos nessa pesquisa, de que a escória LD, em baixas porcentagens, substituindo parcialmente o cimento Portland em argamassas, não impactam consideravelmente a expansibilidade da mistura.

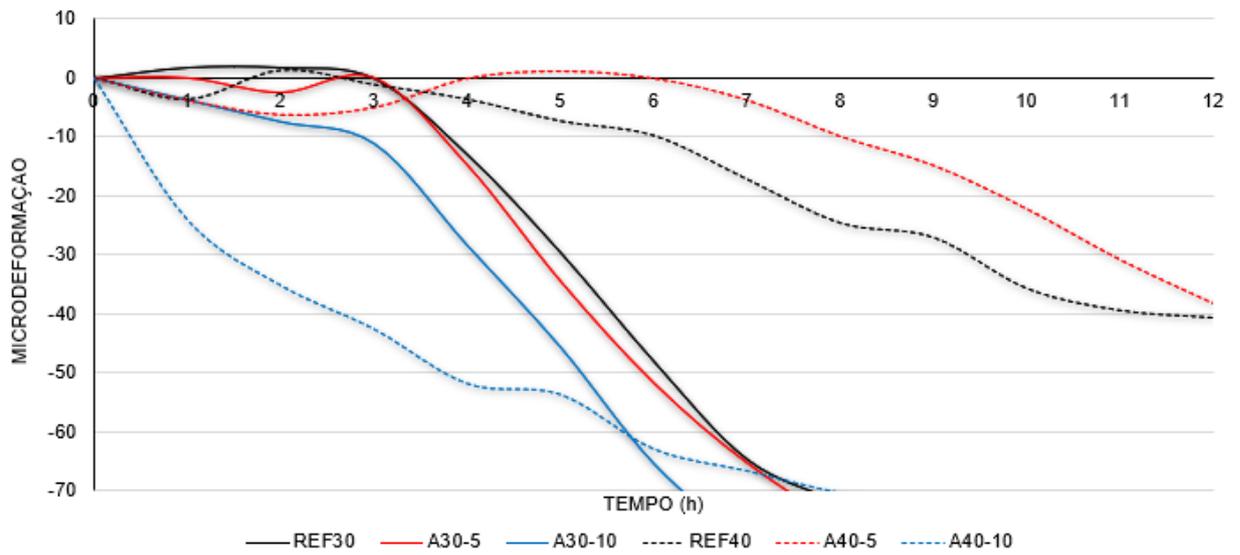
Conforme estudado por Thomas (1978), a estabilização da escória de aciaria está relacionada com a origem de produtos estáveis, tanto por hidratação da cal livre e do periclásio, quanto pela carbonatação dos produtos hidratados gerados por estes óxidos. Essas reações geram compostos estáveis volumetricamente, devido a fatores como umidade, temperatura e teor de CO₂. Apesar dos fatores citados, os mesmos não contribuíram para este resultado, visto que o resíduo utilizado ficou estocado no pátio de escória por um tempo mínimo.

Outrossim, é importante ressaltar que para a produção do cimento utilizado, tanto o clínquer como a escória foram cominuídos e posteriormente peneirados na peneira de número 150, resultando em um material com granulometria muito baixa. Segundo Machado (2002), um dos possíveis procedimentos para acelerar a velocidade de cura da escória seria reduzir sua granulometria, aumentando assim a superfície de contato entre o material e a água, facilitando as reações de hidratação, e, conseqüentemente, estabilizando-a volumetricamente.

Conforme estudos de Qiang e Peiyu (2010), a escória LD quando em contato com água, permite a geração de produtos de hidratação semelhantes aos do cimento. Além disso, quanto menor a granulometria desse coproduto após moído, maior será sua superfície específica, incrementando a sua reatividade.

Desse modo, constatou-se que os resultados encontrados para microdeformação corroboram com as ideias dos autores. Devido a essa baixa granulometria, ainda nas primeiras idades, a escória teve sua reatividade aumentada, o que pode acarretar na aceleração do tempo em que os óxidos presentes irão se solubilizar. Com essa solubilização acelerada, há possibilidade de uma eventual expansão, no entanto, por se tratar do estado fresco, não houve variação volumétrica significativa, como pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 - Primeiras horas de leitura da bancada de retração.



Fonte: Autoras (2023).

6 CONCLUSÃO

Diante do objetivo proposto para o presente trabalho, o programa experimental foi traçado e ensaios foram realizados obtendo os respectivos resultados. Embora os resultados encontrados para os ensaios de resistência à compressão e trabalhabilidade fossem dentro do esperado, nos quais a resistência média cresceu conforme o tempo e a trabalhabilidade diminuiu conforme aumento do percentual de escória, por outro lado, os resultados alcançados no ensaio da bancada de retração, em partes, divergiram do esperado.

A partir do traço piloto foi possível analisar que a incorporação do resíduo siderúrgico, oriundos da aciaria, em partes, não causaram reduções significativas na retração das argamassas. Para as argamassas com relação a/c 0,3, houve um aumento na retração para ambas porcentagens de resíduo incorporado, não atendendo a expectativa, possui granulometria muito baixa.

Apesar disso, as argamassas com traço a/c 0,4 apresentaram melhores resultados e se mostraram mais alinhadas com o embasamento técnico e científico apresentado neste trabalho. Para esses traços, houve uma pequena redução na retração, esperando-se que, para maiores percentuais, essa redução aumente. Com isso, foi possível constatar que a variação da quantidade de aglomerante reagente na mistura, definido pelo traço, é de grande influência na retração.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora o resultado não fosse o esperado, a partir dele, será possível desenvolver novos trabalhos para fomentar o uso desse resíduo em matrizes cimentícias, aprimorando cada vez mais as propriedades do material. Ademais, contribui para ampliar o uso de potenciais resíduos sem destinação, além de auxiliar na redução do uso de matérias primas virgens, especialmente relacionadas à produção de cimento. Este trabalho é uma referência que permitirá que se desenvolvam novos estudos para a obtenção de resultados mais positivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR 10004**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13276**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13583**. Cimento Portland – Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 16372**. Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16697**. Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6452**. Grão de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52**. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

AITCIN, Pierre-Claude. **High-Performance Concrete**. London: E & FN Spon, 1998.

AMARAL, L. A. **Hormigones com escorias de forno elétrico como aridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. Tese de doutorado. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 230 p. 1999.

ARCELORMITTAL, Aços inteligentes para as pessoas e o planeta. **ArcelorMittal Brasil**, 2022. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/a-arcelormittal/quem-somos>. Acesso em 15/06/2022.

BARBOSA, Marina. **Caracterização geoambiental da escória da aciaria de cinco estados brasileiros**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, julho de 2013.

CAMARGO, M. e FERRARI, V. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END)**. Revista Matéria, Paraná, v. 26 n. 03, janeiro, 2021

CAMPOS, V.F. **Tecnologia de fabricação do aço líquido**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1985. v. 1, 259 p.

CASTELO BRANCO V. T. F. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

CASTRO, Alessandra. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CRUZ, E.B.; BENEDUCE NETO, F.; TOSETTI, J.P.V.; FERREIRA NETO, J.B. **Pyrometallurgical treatment of BOF slags for the production of construction materials and refining fluxes**. In: JAPAN-BRAZIL SYMPOSIUM ON DUST PROCESSING-ENERGY-ENVIRONMENT IN METALLURGICAL INDUSTRIES, 1 ST, 5 oct., São Paulo, Brazil – 4 nov., Sendai, Japan, 1999. Proceedings... São Paulo, 1999. P. 97-115.

CUSSON, D.; REPETTE, W.L. Early-Age Cracking in Reconstructed Concrete Bridge Barrier Walls. ACI Materials Journal, v.97, n.4, p.438-446, 2000.

FERNANDES, Daniel. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria Id para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** Porto Alegre: Tese de doutorado. UFRGS, 2001.

GLOBALSLAG. **Basics of slag production.** 2011. Disponível em: <https://www.globalslag.com/magazine/articles/604-basics-of-slag-production>. Acesso em: 12 jun 2022

GONÇALVES, Wanderlei. **Adequação do processo de fabricação de aço LD, utilizando ferro-gusa líquido com baixo teor de silício.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

GUMIERE, A. G. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escórias de Aciaria do Processo LD em Materiais de Construção Civil.** Proposta de Tese. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 101 p.

Guo, X., Shi, H., Wu, K., 2014. **Effects of steel slag powder on workability and durability of concrete.** J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed. 29 (4), 733–739.

IAB. **Relatório de sustentabilidade 2022.** A siderurgia em números. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/#dados-do-setor>. Acesso em: 22/06/2022.

IAB. **A Siderurgia em Números. Instituto Aço, Brasil, 2022.** Disponível em: <https://institutoacobrasil.net.br>

IBS. **SGT 1 – classificação dos agregados siderúrgicos.** Rio de Janeiro, 1997. 10 p. (Boletim IBS -GT Escórias).

JIANG, Yi. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete - A review. **Resources, Conservation & Recycling**, Volume 136, Páginas 187–197, Setembro, 2018.

JUNIOR, José. **Obtenção, Mercado e Reciclagem de sucatas ferrosas na indústria siderúrgica brasileira.** Projeto de Graduação - Faculdade de Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Novembro, 2013.

LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete.** 3 ed. Northants, Great Britain, Woolnough Bookbinding Limited, 1988.

LIZARAZO-MARRIAGA, J., CLAISSE, P., GANJIAN, E., 2011. **Effect of steel slag and Portland cement in the rate of hydration and strength of blast furnace slag pastes.** J. Mater. Civil Eng. 23 (2), 153–160.

MACHADO, Alexandre Teixeira. Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

MAGALHÃES, D.C. ; PASSAMANI, F. ; SILVA, J.B.R. **Uso de escória de aciaria da arcelormittal aços planos América do sul no tratamento de efluentes domésticos.** 70º congresso anual, ABM Week e 15º ENEMET. Página 929-936. Rio de Janeiro, 2015.

MARTINI, Matheus. Avaliação do Potencial de Expansão de Escória de Aciaria LD: Uma nova metodologia. Contribuição técnica ao **46º Seminário de Aciaria – Internacional, parte integrante da ABM Week.** Rio de Janeiro, Agosto, 2015.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª edição ed. [s.l.] : IBRACON, 2008.

MODRO, N.L.R. et al. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET.** Matéria. Rio de Janeiro, 2009, v. 14, n. 1

MOTZ, H. GEISELER, J. **Products of steel slags an opportunity to save natural resources.** Waste Management, 21, 285-293. Duisburg, 2001.

MONTGOMERY, D.G.; WANG, G. **Preliminary laboratory study of steel slag for blended cement manufacture.** Materials Forum, n. 15, p. 374-382, 1991a.

MORAIS, Reginato. **Um estudo por simulação numérica do processo de lingotamento contínuo de tarugos de aço.** Programa de pós-graduação - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2020.

MOURÃO, Marcelo Breda. **Introdução a siderurgia. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.** São Paulo, 2007. 428 p.

NETO, A. A. M. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

PACHECO, Ronaldo. **Estudo sobre a utilização das escórias de aciaria LD naturais ou modificadas para substituição parcial do cimento ou como adição ao clínquer.** Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

PALANKAR, N., SHANKAR, A.U.R., MITHUN, B.M., 2016. **Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates.** J. Clean. Prod. 129, 437–448.

PEDROSA, Rogério. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Março de 2010.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para utilização em peças de concreto para pavimentação.** 2004. 152p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2004.

PILAR, Ronaldo. **Avaliação nos estados fresco e endurecido de concretos autoadensáveis de alto desempenho com aditivos redutor e compensador de retração.** 2017. Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2017.

PROCESSO SIDERÚRGICO. **Instituto aço Brasil**, 2022. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>. Acesso em: 07/07/2022.

PROCTOR, D. M.; SHAY, E. C.; FHELING, K. A.; FINLEY, B. L. **Assessment of Human Health and Ecological Risks Posed by the Uses of Steel-Industry Slags in the Environment.** Human and Ecological Risk Assessment. Vol. 8. N° 4. 2002. pp 681 – 711.

QIANG, W.; PEIYU, Y. **Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag.** Construction and Building Materials, v. 24, p. 1134-1140, 2010.

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) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2005.

REDDY, A.S., PRADHAN, R.K., CHANDRA, S., 2006. **Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder.** Int. J. Miner. Process. 79 (2), 98–105.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos - Estudo laboratorial**. 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

ROSLAN, N.H., ISMAIL, M., ABDUL-MAJID, Z., GHOREISHIAMIRI, S., MUHAMMAD, B., 2016. **Performance of steel slag and steel sludge in concrete**. Constr. Build. Mater. 104, 16–24.

SABBATINI, F. H. **O Processo Construtivo de Edifícios de Alvenaria Estrutural Sílico-Cálcária**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da UFES para mestrado em engenharia. 320p. São Paulo, 1984.

SANTOS, W. **Argamassa de Alto Desempenho**. Dissertação de mestrado em ambiente construído - Faculdade de Engenharia - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. **Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil**, CPTI, São Paulo, 40p, 2002.

SILVA, N. G. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. 2006. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

SILVA, F. G. S.; DANTAS, A.B. **Estudo sobre a retração autógena em concretos de alto desempenho (cad's)**. Programa de pós graduação em estruturas e construção civil. Universidade de Brasília. Pg 1236-1239. IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba.

TAVAKOLI H. ; AZARI A.; ASHRAFI K.; POUR M.S. **Cementitious properties of steelmaking slags**. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences. Página 1071-1073. Março, 2013.

TAZAWA, E. I.; SATO, R.; SAKAI, E.; MIYAZAWA S.: **Work of JCI Committee on autogenous shrinkage**. In: Baroghel-Bouny V and Aïtcin P.C. (eds) I International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete (Shrinkage 2000), RILEM proceedings PRO 016. RILEM Publications S.A.R.L, Bagneux, pg 21-40. 2000.

THOMAS, G. H. **Expériences britanniques d'utilisation des scories LD comme revêtements routiers.** Revue de Métallurgie, Paris, n 5, p. 329-334, 1978.

TOILLIER, H. C. **Estudo do desempenho de aditivos de manutenção de trabalhabilidade no concreto.** Trabalho de Conclusão de curso, Universidade de Santa Cruz do Sul. Santa Cruz do Sul, 2017.

TUTIKIAN, B.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Editor Geraldo C. Isaia. Volume I, Pg 415- 452. IBRACON. 2011.

WANG, Q., YAN, P., YANG, J., ZHANG, B., 2013. **Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete.** Constr. Build. Mater. 47, 1414–1420.

Wang, Q., Yan, P., Mi, G., 2012. **Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement.** Constr. Build. Mater. 35 (10), 8–14.

Yi, H., Xu, G., Cheng, H., Wang, J., Wan, Y., Chen, H., 2012. **An overview of utilization of steel slag.** Procedia Environ. Sci. 16, 791–801.

YILDIRIM; Prezzi,.Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering**, Volume 2011, artigo ID 463638, 13 páginas. Fevereiro, 2011.

ZAGO, S.C. **Estudo do efeito da cristalinidade da escória de aciaria nas propriedades físico-químicas do cimento Portland CPIII.** Lorena, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Paulo, 2015.

ZAGO, S.C. **Avaliação da durabilidade do concreto da construção civil com a utilização de agregados de escória de aciaria LD.** Lorena, Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo, 2019.