

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO MAIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

BELO HORIZONTE

2016

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO MAIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS
ESCÓRIA GRANULADA COMO MATERIAL CIMENTÍCIO PARA MELHORIA DOS
PARÂMETROS DE DURABILIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra

BELO HORIZONTE

2016

ANA LUIZA DE FIGUEIREDO MAIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 13/12/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Augusto César da Silva Bezerra – Orientador

Luis Felipe dos Santos Lara – Coorientador

Prof. Paulo Renato Perdição de Paiva

Profa. Sofia Araújo Lima Bessa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico proporcionado, pela orientação, apoio e confiança;

Aos meus pais e à minha irmã, pelo incentivo, apoio, suporte, e amor incondicional;

Aos meus amigos e familiares por entenderem minha frequente ausência;

Aos meus colegas de curso, e em especial à Laura Saponi pelo companheirismo, pela ajuda e por todos os conselhos;

Às empresas Holcim, Brennand e a Supermix pelo fornecimento das amostras de escória;

“A straight line may be the shortest distance between two points, but it by no means the most interesting” – Doctor Who In “The Time Monster” By Robert Sloman. BBC, 1972

RESUMO

Frente ao grande consumo de cimento Portland para a produção de concreto, esse se torna um dos materiais mais utilizados no mundo. Porém, do ponto de vista sustentável, esse alto volume de material emite quantidades relevantes de gases causadores do efeito estufa, mais especificamente o gás carbônico, o que se torna um problema ambiental. Nesse contexto, soluções tecnológicas para a redução dessas emissões têm sido apresentadas, e, entre essas, a substituição parcial de clínquer na fabricação de cimento Portland por escória de granulada de alto forno tem grande potencial. No Brasil, o teor de substituição de clínquer por escória está normatizado variando de 0 a 70% a depender do tipo de cimento. A escória de alto forno é um subproduto da produção de ferro gusa, e por apresentar grande volume de material produzido, sua destinação é interessante. As propriedades hidráulicas latentes da escória granulada de alto forno já têm sido largamente aproveitadas em proporções relativamente altas para a produção do Cimento Portland de Alto Forno (CP III). A substituição do clínquer por escória acarreta alterações nas propriedades já conhecidas do concreto, tais como redução da reação álcali-agregado, diminuição da permeabilidade, diminuição do calor de hidratação, aumento da resistência a sulfatos, e em algumas proporções, o aumento da resistência à compressão, etc. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas e as alterações morfológicas sofridas em corpos de prova com teores de 40, 60 e 80% de substituição do Cimento Portland de alta resistência inicial (CPV) por escória granulada de alto forno para a produção de concretos em comparação as propriedades e morfologia do concreto sem adições. A resistência à compressão aos 28 dias dos compósitos apresenta resistência equivalente para ser utilizado em concretos estruturais. Os resultados obtidos dos corpos de prova demonstraram aumento da absorção de água, que pode ter ocorrido devido a redução da trabalhabilidade das amostras, justificada pela escória se apresentar mais fina que o cimento. O ataque ácido demonstrou um melhora no desempenho dos concretos com adição de escória quanto a durabilidade confirmando o relatado na literatura.

Palavras-chave: Cimento Portland; Substituição; Escória de alto forno; Propriedades mecânicas; Avaliação morfológica; Durabilidade.

ABSTRACT

Given the major Portland cement consumption for the production of concrete, this becomes one of the most used materials in the world. However, from a sustainable point of view, this high volume of material emits relevant quantities of gases causing the greenhouse effect, specifically carbon dioxide, which becomes an environmental problem. In this context, technological solutions to reduce these emissions have been presented, and among these, the partial replacement of Portland cement by ground granulated blast-furnace slag in the production of concrete has great potential. In Brazil, the clinker content replaced by slag is standardized, ranging from 0 to 70% depending on the type of cement. The blast furnace slag is a byproduct of pig iron production, and present large volumes of material produced, its destination is also interesting. The latent hydraulic properties of the granulated blast furnace slag have been widely utilized in relatively high proportions to produce Blast Furnace Portland cement (CPIII). The replacement of Portland cement by slag leads to alterations in the already known properties of concrete, such as reduction of alkali-aggregate reaction, decrease in permeability, decrease in the hydration heat, increased to sulfates resistance, increased compression strength, etc. This study aims to evaluate the mechanical properties and morphological changes experienced in specimens with levels of 40, 60 and 80% replacement of high early strength Portland cement (CPV) by granulated slag blast furnace for the production of concrete comparing the properties and morphology of the concrete without additions. The compressive strength at 28 days of composites even with substitution of 80%, which decreased by 44.47% compared to the reference mortar resistance still has equivalent strength to be used in structural concrete. The results obtained for the immersion absorption of the test specimens showed that the slag, once it is thinner, absorbs more water which may have weakened the workability of the samples, causing more pores to be formed and consequently more water to be absorbed. Acid attack expose an improvement in the performance of slag concrete for durability, as reported in the literature.

Keywords: Portland cement; Replacement; Blast furnace slag; Mechanical properties; Morphological avaluation; Durability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compostos principais do cimento Portland.....	16
Tabela 2 – Composição dos cimentos Portland de acordo com as normas brasileiras (NBR).	16
Tabela 3 – Composição das escórias de alto-forno no Brasil,.....	22
Tabela 4 – Identificação dos traços utilizados.....	30
Tabela 5 – Composição da escória utilizada,	33
Tabela 6 – Diâmetros equivalentes da granulometria.....	34
Tabela 7 – Acompanhamento das massas durante a imersão.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama triangular que mostra a faixa de composição	21
Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais	24
Figura 3 – Morfologia dos produtos hidratados a) pasta de cimento de escória ativada e b) pasta de cimento Portland comum	24
Figura 4 – Emissão média de CO ₂ por tonelada de cimento	26
Figura 5 – Razão clínquer no cimento	27
Figura 6 – Difratoograma escória de alto forno	33
Figura 7 – Perfil granulométrico da escória	34
Figura 8 – Degradação das amostras submetidas ao ataque ácido	37
Figura 9 – Microestrutura da amostra T1 Referência	38
Figura 10 – Sequência em amplificação – Microestrutura da amostra T1 Referência	38
Figura 11 – Sequência em amplificação – Microestrutura da amostra T2 40%	39
Figura 12 – Microestrutura da amostra T3 60%	39
Figuras 13 e 14 – Microestruturas da amostra T2 80%	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	O cimento Portland	15
3.2	Composição e classificação do Cimento Portland	15
3.3	Adições	16
3.4	A escória de granulada de alto forno	17
3.5	Granulação e aproveitamento da EGAF	18
3.6	A escória como material cimentício	19
3.7	Características físicas e químicas da escória granulada de alto-forno	20
3.8	A reatividade da escória	22
3.9	A microestrutura do concreto e as alterações decorrentes da adição de escória	23
3.10	Durabilidade de concretos	25
4	A QUESTÃO DA SUSTENTABILIDADE.....	25
4.1	As fontes de emissão	27
5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	Erro! Indicador não definido.
5.1	Materiais	29
5.2	Confecção e preparo dos corpos de prova	29
6	MÉTODOS DE ENSAIO	30
6.1	Caracterização Física	30
6.2	Caracterização Microestrutural	30
6.3	Caracterização Mineralógica	31
6.4	Caracterização Química	31
6.5	Caracterização mecânica	31
6.6	Absorção de água	31
6.7	Ataque ácido	32
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
7.1	Caracterização da escória de alto forno	33
7.3	Avaliação estrutural e mecânica dos compósitos	34
7.4	Avaliação microestrutural dos compósitos por microscopia de varredura (MEV)	37
8	CONCLUSÕES	41
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

O concreto é certamente o material mais utilizado no mundo. Frente a isso, seu precursor o cimento Portland é considerado um material vital para a construção e é também uma commodity estratégica. A dependência do cimento Portland é tão grande que a produção mundial se aproxima de 4,3 bilhões de toneladas por ano e esse volume tende a subir para mais de 5,5 bilhões de toneladas até 2030 (CEMBUREAU, 2014; IMBABI et al, 2012).

Estima-se que o atual consumo mundial de concreto seja da ordem de 11 bilhões de toneladas por ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014). E cerca de metade do cimento Portland é usado para a produção de concreto (IMBABI et al, 2012). A produção do cimento Portland é um dos grandes contribuintes na emissão de gases do efeito estufa, responsável por cerca de 5% da emissão global de dióxido de carbono, sendo que, grande parte das emissões da indústria do cimento são originadas na etapa de produção do clínquer (HENDRIKS; WORRELL; JAGER, 2002).

O clínquer é, basicamente, o produto da fusão parcial do calcário e argilas em temperaturas elevadas. Além do alto consumo de energia para produzir o clínquer, a calcinação do calcário libera quantidades expressivas de CO₂. O cimento Portland, comumente, é composto por uma mistura de clínquer, sulfato de cálcio e adições (ABDI, 2012).

Normas nacionais regulamentam os diversos tipos de cimento Portland com variações de 100 a 30% de clínquer na sua constituição. Com isso, as adições podem ter participação de 0 a 70% nos cimentos (ABCP, 2002). Essas adições, geralmente provenientes de incorporações de outros subprodutos de produções industriais, são misturadas ao clínquer na fase de moagem, sendo as mais comuns o gesso, as escórias de alto-forno, as cinzas volantes, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (RUBERT, 2015).

Frente ao contexto de desenvolvimento sustentável, a cadeia produtiva da indústria da construção civil há mais de 50 anos no país tem realizado o aproveitamento de subprodutos de outras atividades, tornando-se a maior recicladora da economia. O enorme potencial de reciclagem dessa indústria se justifica em função da grande quantidade de materiais consumidos (JOHN, 2003; IEMA, 2013).

O estudo de adições e substituições de Escória Granulada de Alto Forno (EGAF) em

cimentos possui, portanto, ótimas perspectivas visto que mais de 60% toneladas dos cimentos consumidos no Brasil foram cimentos compostos, o que mostra a absorção do mercado desse tipo de material (SNIC, 2013).

O uso da escória de alto forno como material de construção é uma alternativa antiga, que tem histórico de início na Inglaterra em 1728, antes mesmo da patente do cimento Portland, que só surgiu em 1882, na Alemanha. Frente às diversas vantagens decorrentes do uso da escória de alto-forno, tanto como adição ao cimento Portland quanto como constituinte principal, hoje o uso da escória já está bem consolidado (ALMEIDA, 2009).

Além disso, a produção de escória granulada de alto forno (EGAF) requer menos de um quinto da energia e produz menos de um décimo das emissões de dióxido de carbono em comparação com o processamento do clínquer (DISHOLI, 2014).

É de comum acordo na literatura que cimentos ricos em escória apresentam potencial de melhora nas propriedades do concreto, porém poucos estudos avaliam essa influência das escórias com altos níveis de substituição (>70%).

Reschke (2003), estudou a utilização da escória granulada de fundição, nas proporções de 0% a 50%, em substituição ao cimento Portland, em concretos na construção civil, enquanto que Mizumoto; Salles (2012) estudaram as proporções de 20%, 35% e 60% de substituição e os efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa. Güneyisi; Gesoğlu (2008) apresentaram um estudo dos efeitos combinados de métodos de cura e altos níveis de substituição de escória granulada de alto forno nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos de alta performance.

Segundo Whittaker et al. (2014), a maioria dos estudos de durabilidade e de aspectos mecânicos, para avaliação da escória e seu comportamento no compósito cimentício, não avaliam ou omitem o importante papel da microestrutura. Contudo, essas análises microestruturais vêm ganhando cada vez mais reconhecimento nos estudos mais recentes de sistemas compostos.

O presente trabalho estudará concretos de baixo carbono com apoio de técnicas de análise da microestrutura. Espera-se com o trabalho entender a microestrutura dos concretos de baixo carbono e como essa microestrutura pode afetar os parâmetros que influenciam a durabilidade destes concretos. Realizou-se um estudo a fim de viabilizar a utilização de

escória em altas proporções diretamente adicionada in site como adição ao concreto foi realizado. Espera-se também, que a partir dos conhecimentos e resultados obtidos, contribuir para a redução da emissão de gás carbônico do setor da construção civil com foco na utilização de resíduos, desempenho mecânico, durabilidade e aumento do ciclo de vida de concretos.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar a durabilidade através do comportamento microestrutural da argamassa de concreto (Concreto sem o agregado graúdo) com escória granulada de alto forno a fim de entender a escória como agente que propicia melhorias das propriedades aliadas à sustentabilidade.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar as alterações do concreto para as várias adições quanto às propriedades mecânicas;
- Avaliar a microestrutura das pastas e argamassas dos concretos confeccionados a fim de verificar a interação dos componentes;
- Correlacionar os teores de substituição do cimento com algumas propriedades significativas para a durabilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O cimento Portland

O cimento Portland é uma mistura de componentes produzidos a partir da queima de suas matérias-primas, em um forno rotativo, em temperatura de cerca de 1450°C (IMBABI et al., 2012). É um cimento hidráulico produzido a partir da pulverização de clínquer constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Como componente essencial do concreto – segundo material mais consumido em volume, perdendo somente para a água – o cimento é um produto essencial para a construção civil e infraestrutura mundial (IEA, 2009). O cimento Portland é o material industrializado mais consumido no mundo (OLIVEIRA et al., 2014), sendo que sua produção global foi cerca de 4,3 bilhões de toneladas em 2014 e a produção brasileira foi de 72 milhões de toneladas (CEMBUREAU, 2014). No Brasil, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015), o consumo aparente de cimento totalizou 64,9 milhões de toneladas em 2015.

No forno, ocorre a calcinação e fusão do material, para obtenção do clínquer. Este quando resfriado e pode ainda receber diversas adições com variadas proporções. A mistura é então moída transformando-se em cimento (ABDI, 2012). As fábricas mais modernas de cimento privilegiam o processo via seca, que se apresenta mais eficiente com uma redução de energia de combustível fóssil requerida de cerca de 600 Kcal/kg de clínquer, cerca de 60%, em relação a outros processo (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

3.2 Composição e classificação do Cimento Portland

O cimento Portland é um cimento do tipo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), onde cerca de 70% é de cálcio e o restante de alumínio, ferro e silício (IMBABI et al, 2012). A Tabela 1 apresenta os cinco principais constituintes do cimento e sua porcentagem média em peso.

A Tabela 2 apresenta a classificação dos tipos de cimento Portland e suas respectivas composições de acordo com as normas brasileiras

Tabela 1 – Compostos principais do cimento Portland

Constituinte	Fração em peso	Composição em óxidos	Abreviação
Silicato tricálcio	50%	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato dicálcio	25%	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcio	10%	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato tetracálcico	10%	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Gipsita	5%	CaSO ₄ .2H ₂ O	–

Fonte: (GARCEZ, 2008; IMBABI et al, 2012)

. Como observado na Tabela 2, as adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento, elas irão ainda depender da maior disponibilidade do subproduto na região de fabricação do aglomerante (ABCP, 2002; RUBERT, 2015)

Tabela 2 – Composição dos cimentos Portland de acordo com as normas brasileiras (NBR)

Cimento Portland	Tipo	Clínquer + gesso (% em massa)	Escória Siderúrgica (sigla E) (% em massa)	Material Pozolânico (sigla Z) (% em massa)	Material Carbonático (sigla F) (% em massa)	NBR
CP I	Comum	100	–	–	–	5732
CP I – S	Composto	95 a 99	1 a 5	1 a 5	1 a 5	5732
CP II – E	Composto	56 a 94	6 a 34	–	0 a 10	11578
CP II – Z	Composto	76 a 94	–	6 a 14	0 a 10	11578
CP II – F	Composto	90 a 94	–	–	6 a 10	11578
CP III	Alto-forno	25 a 65	35 a 70	–	0 a 5	5735
CP IV	Pozolânico	45 a 85	–	15 a 50	0 a 5	5736
CP V	Alta Resistência inicial	95 a 100	–	–	0 a 5	5733

Fonte: (ABCP, 2002)

3.3 Adições

O alto volume de cinzas volantes, ou de escória granulada de alto-forno, usados como adição nos cimentos Portland tem sido apresentados como excelentes soluções para reduzir impactos de outras indústrias como as usinas termoelétricas e as indústrias do aço (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Uma amostra disso é a normalização desses tipos de cimento, hoje

classificados como CP II, CP III e CP IV.

Essas adições têm sido utilizadas para reduzir as quantidades de clínquer utilizado no cimento, reduzindo tanto as emissões de CO₂ quanto aumentando a eficiência de energia nas plantas de produção de cimento. Além das questões ambientais, essas adições modificam a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusividade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto (ABCP, 2002; JOHN, 2003).

A etapa de produção do clínquer é responsável por 90% das emissões de carbono na indústria de cimento. Portanto, a produção de cimentos com adições ao clínquer, com materiais como escórias de alto forno, cinzas volantes, pozolanas artificiais e fíler calcário, atua na redução das emissões de CO₂, uma vez que diminuem a produção de clínquer. Além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, as adições representam uma solução ambientalmente correta para subprodutos de outros processos produtivos, como escórias siderúrgicas e cinzas de termelétricas (KIHARA; VISEDO, 2014)

3.4 A escória de granulada de alto forno

Escórias são resíduos da indústria do aço e do ferro, possuem caráter predominante vítreo devido à sua composição de constituintes neutralizantes, especialmente Ca, Mg, e Si, na forma de silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (ALMEIDA, 2009; CARVALHO–PUPATTO et al., 2003). As escórias são geradas na fabricação do ferro gusa em alto forno, onde a fusão da ganga (minério de ferro e impurezas) e dos fundentes (calcário, coque ou carvão vegetal) geram por meio de reações químicas a escória (MIZUMOTO; SALLES, 2012). Inclusive o calcário é o principal fornecedor de cálcio da escória.

A escória de alto-forno é o coproduto do refinamento siderúrgico com maior volume de geração, na faixa de 210 a 310 kg por tonelada de ferro gusa produzida. Em razão do elevado volume gerado, é de suma importância seu reaproveitamento. Esse reaproveitamento já que tem se concretizado frente ao grande volume consumido pela indústria do cimento para utilização na substituição do clínquer (GESTÃO DE COPRODUTOS, 2008).

A geração média de coprodutos e resíduos (pós, lamas e agregados siderúrgicos) pelo setor siderúrgico foi equivalente a 594 kg por tonelada de aço produzido em 2013, dos quais a escória de alto-forno representou 37% e escória de aciaria 29%. Desse total, 88% foram

reaproveitados. As escórias de alto-forno, em quase totalidade (99%) foram vendidas, especialmente para a produção de cimento (IAB, 2014)

Observada de perto pelos metalurgistas, a escória de alto-forno apresenta estabilidade em suas propriedades e composição muito constante, uma vez que desvios no processo causam demandas significativas de energia e custos adicionais. Isto garante confiabilidade para a utilização das escórias de alto-forno como adições minerais em concreto (MASSUCATO, 2005). Apesar dessa confiabilidade adquirida, a escória ainda difere muito de composição dependendo da sua fonte e método de tratamento (WHITTAKER et al., 2014).

3.5 Granulação e aproveitamento da EGAF

Alguns autores consideram que a capacidade aglomerante da escória granulada de alto forno já era conhecida antes que a patente do cimento Portland fosse registrada em 1824. Entretanto, para outros foi em 1862 que E. Langen descobriu as propriedades hidráulicas latentes das escórias granuladas de alto-forno (rapidamente resfriadas e vítreas), ao comprovar o desenvolvimento de altas resistências de uma mistura endurecida de cal hidratada e escória granulada. Ou seja, ao produzir cimentos de escória, aqueles sem clínquer Portland. A adição de escórias granuladas de alto-forno no cimento Portland foi feita pela primeira vez por G. Prüssing em 1882, dando origem aos chamados cimentos de alto-forno (MAGALHÃES, 2007; JOHN, 1995).

A fim de se obter as propriedades reativas e cimentantes satisfatórias necessárias para aplicação na indústria cimenteira, as escórias são resfriadas bruscamente pela água solidificando, portanto, em sua forma vítrea. A escória quando resfriada lentamente ao ar apresenta componentes minerais que não reagem com a água em temperatura ambiente, e quando moída esta apresentará poucas propriedades cimentantes e pozolânicas, porém esta ainda pode ser utilizada como agregado no concreto (JOHN; CINCOTTO, 1995).

Quando resfriada rapidamente, a escória não terá tempo suficiente para que os íons se organizem formando uma estrutura cristalina organizada e simétrica, e obtém-se, portanto, uma estrutura vítrea. Isto ocorre devido à diminuição da mobilidade dos íons no líquido resfriado. O processo que provoca este resfriamento rápido é conhecido como granulação, e seu produto é a escória granulada de alto forno, EGAF, que apresenta dimensões semelhantes às da areia. Essa escória obtida após a granulação é muito graúda e também úmida, ela deve,

portanto ser seca e pulverizada em partículas normalmente abaixo de 45 μ m (JOHN; CINCOTTO, 1995; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Frente a isso, no Brasil, a totalidade das usinas siderúrgicas integradas já adota o procedimento de granulação da escória de alto-forno, produzindo uma EGAF que pode ser moída e misturada ao clínquer, ou utilizadas de forma a aproveitar suas propriedades cimentícias, em estruturas de concreto (GESTÃO DE COPRODUTOS, 2008).

O aproveitamento das propriedades cimentícias da EGAF diretamente no concreto, já amplamente aplicado na União Européia, possibilita a utilização da escória de alto-forno moída diretamente no misturador de concreto, em porcentagens de adição de até 80% da massa de cimento a depender do tipo de concreto e regulamentação aplicável no país. Essa prática tem se mostrado favorável sob o ponto de vista ambiental, uma vez que reduz as emissões de CO₂, economiza energia e conserva recursos naturais (GESTÃO DE COPRODUTOS, 2008).

3.6 A escória como material cimentício

As especificações das escórias para uso como material cimentício são baseadas nas normas de cimento Portland e o uso como adição mineral está citado na norma de controle tecnológico do concreto NBR 12654 (ABNT,1992), uma vez que o Brasil ainda não possui uma norma específica para as escórias de alto-fornos (ALMEIDA, 2009).

A quantidade de adição de escória de alto-forno permitida no concreto também não é normatizada, porém as normas brasileiras limitam a quantidade de adição nos cimentos. Como anteriormente relacionado na Tabela 2, para o cimento CP III, o limite de adição varia de 35 a 70% de acordo com a NBR 5735 (ABNT, 1991) enquanto que, para os cimentos compostos, tipo CP II E, o limite de adição varia de 6 a 34%, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991) (MASSUCATO, 2005).

A maximização da propriedade aglomerante da escória granulada pode ser obtida após moagem e adição de substâncias ativadoras. O cimento Portland tradicional é considerado um caso particular de ativador da escória, uma vez que contém gipsita e libera em sua hidratação o hidróxido de cálcio, substâncias tradicionalmente utilizadas como ativadores da escória (MARQUES; TANGO, 1994).

Como consequência benéfica da adição de escórias nas propriedades do concreto é possível citar a redução da reação álcali-agregado, do calor de hidratação e da retração por secagem, assim como o aumento da resistência a sulfatos, da resistência mecânica à compressão em idades avançadas e do aumento da resistência à tração (MASSUCATO, 2005).

As escórias granuladas de alto-forno apresentam propriedades hidráulicas latentes, endurecendo quando misturadas com água. Porém, essas reações de hidratação das escórias são lentas. Espera-se que não mais de 50% da escória tenha hidratado depois de 28 dias de cura, enquanto que para o cimento esse valor é de 80% ou mais. Assim, potencial máximo da escória é alcançado após cura prolongada, limitando uma possível aplicação comercial, caso os ativadores não acelerassem o processo de hidratação (MASSUCATO, 2005; WHITTAKER et al., 2014).

De acordo com QUEIROZ et al., 2007, as propriedades cimentícias das escórias granuladas de alto-forno em estruturas de concreto são associadas à reatividade da escória de alto forno em sua forma vítrea. Entretanto, a estrutura vítrea não é suficiente para o seu emprego como aglomerante, pois se faz necessário que a escória seja solúvel para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados, ou seja, hidratar-se.

Sendo assim, a reatividade hidráulica da escória depende, portanto, da composição química, da fração da fase vítrea, da granulometria, sendo a velocidade de reação favorecida pela finura da escória, além da estrutura cristalina, da composição mineralógica, da superfície específica, da microheterogeneidade e dos defeitos superficiais. (ALMEIDA, 2009; QUEIROZ et al., 2007; MASSUCATO, 2005).

3.7 Características físicas e químicas da escória granulada de alto-forno

Em um nível macroscópico, antes do processamento, a escória granulada de alto-forno apresenta, geralmente, um aspecto de uma areia grossa, porosa, com um tamanho máximo de 5 mm, de cor branco-amarelada a marrom (SANT'ANA, 2003). Pela ausência de uma norma brasileira específica para as escórias de alto-forno, as especificações das escórias são baseadas nas normas de cimento Portland (MASSUCATO, 2005). A classificação da escória é feita de acordo com o texto da NBR 5735 (ABNT, 1991).

A NBR 5735:1991, Cimento Portland de alto-forno, define a escória granulada de alto-

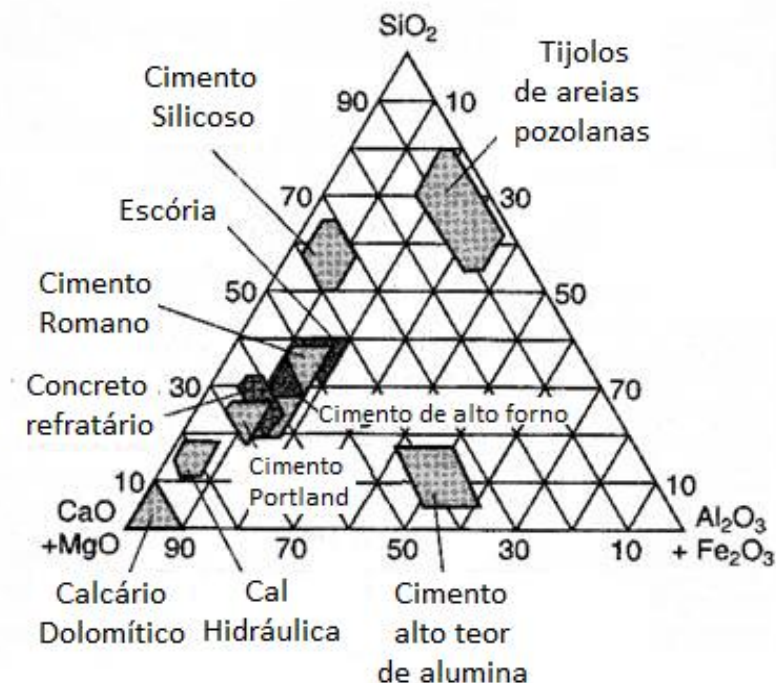
forno como “subproduto do tratamento de minério de ferro em alto-forno, obtido sob forma granulada por resfriamento brusco, constituído em sua maior parte de silicatos e aluminossilicatos de cálcio. Sua composição química deve obedecer à relação (Equação 1):”

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1 \quad (1)$$

Quando a relação é atendida as escórias podem ser utilizadas como adição mineral no concreto. Essa escória é classificada como básica, e caso contrário é classificada como ácida (MASSUCATO, 2005). A composição química das escórias está ligada à qualidade, ou seja, as impurezas do minério de ferro empregado, à natureza do escorificante, à natureza do combustível e ativador da redução (coque ou carvão vegetal) (JOHN, 1995; MAGALHÃES, 2007).

O diagrama triangular (Figura 1) mostra a faixa de composição química das escórias em relação a outros materiais.

Figura 1 – Diagrama triangular que mostra a faixa de composição química das escórias em relação a outros materiais



Fonte: (GREGEROVÁ, M, 2004) Tradução

A Tabela 3 apresenta algumas composições químicas típicas das escórias brasileiras. É

possível observar que, tanto na Figura 1 quanto na Tabela 3, os principais componentes da escória de alto forno típica são os mesmos encontrados no cimento Portland, e o que varia é a proporção entre eles.

Tabela 3 – Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao Cimento Portland Comum

Composição	Cimento Portland	Procedência			
		Usiminas (MG)	Cosipa (SP)	CSN (ES)	Açominas (MG)
CaO	66	43,58	42,22	40,97	40,99
SiO ₂	22	33,15	33,85	32,9	35,39
Al ₂ O ₃	5	12,79	13	15,44	13,88
MgO	–	5,48	7,08	5,81	6,31
Fe ₂ O ₃	3	0,37	0,68	0,91	1,97
FeO	–	0,29	0,33	0,43	–
S	–	1,11	0,67	1,03	0,87
Outros	–	3,23	2,17	2,51	0,59
CaO/SiO ₂	3	1,31	1,25	1,24	1,16

Fonte: (JOHN; AGOPYAN, 2002; SANT'ANA, 2003)

3.8 A reatividade da escória

Como mencionado anteriormente, a granulometria na qual a escória se apresenta também interfere na reatividade das escórias. Com a diminuição do diâmetro das partículas, o grau de hidratação das escórias aumenta juntamente com sua reatividade, e estas propriedades são ainda mais expressivas em partículas com diâmetros inferiores a 1µm (POLISSENI, 2005). Normalmente, partículas com menos de 10µm contribuem para a resistência inicial do concreto até 28 dias enquanto que partículas de 10 µm a 45 µm contribuem para a resistência em idades posteriores, e já as partículas maiores que 45 µm dificilmente se hidratam (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Considerando influência da estrutura cristalina, composição química e mineralógica da escória nas propriedades finais do cimento de escória, estudos da relação entre resistência à compressão de cimentos de escória com a fração vítrea, variando de 0 a quase 100%, mostraram que a resistência à compressão cresce linearmente com a fração vítrea da escória (JOHN, 1995).

A média de teor de fase vítrea das escórias básicas brasileiras é de 95%. Apesar das diversas tentativas de relacionar a reatividade da escória com a sua composição química, essas

não foram bem-sucedidas, entretanto, é evidente que a composição química da escória irá afetar a microestrutura final do sistema (NEVILLE, 2015; WHITTAKER et al., 2014).

3.9 A microestrutura do concreto e as alterações decorrentes da adição de escória

Por possuir microestrutura complexa e heterogênea, o concreto é um compósito de difícil elaboração de modelos e previsões de comportamento a partir da análise desta microestrutura. O concreto possui três constituintes: a pasta de cimento hidratada, agregado e zona de transição.

Em um nível macroscópico, duas fases podem ser facilmente identificadas: as partículas de agregado miúdo e o meio ligante de pasta de cimento hidratado. Uma análise microscópica torna evidente, porém a característica heterogênea do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

O cimento Portland quando hidratado sob condições normais, permite inicialmente o desenvolvimento de cristais de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (denominado de etringita), além de posterior desenvolvimento de diversas formas morfológicas de silicato de cálcio hidratado (C–S–H), pequenos cristais fibrosos, e de cristais prismáticos de hidróxido de cálcio (portlandita), sendo que, geralmente, o C–S–H constitui a maior porção do sistema. Em idades avançadas a etringita pode se decompõe formando o monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm), que tem a forma de uma placa hexagonal, e sua presença torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfato (MEHTA; MONTEIRO, 2014; POLITO, 2008).

Em uma imagem de microscopia de varredura além da etringita, portlandita e C–S–H, é possível observar grãos de clínquer não hidratados, que mesmo após a hidratação podem estar presentes. Produtos de reação tendem a se cristalizar bem junto às partículas desses grãos, o que faz parecer que um revestimento se forma em torno delas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Na Figura 2 as morfologias típicas do monossulfato hidratado e da etringita citados podem ser observadas.

Com a adição de escória o processo de hidratação é alterado e são esperadas diversas mudanças microestruturais nos compósitos. No cimento com escória a relação Ca/Si é reduzida, sendo essa redução mais impactante para altos teores de escória. Em resposta, mais alumínio é ligado à fase C–S–H, e essas mudanças de composição refletem, assim, na microestrutura da fase, que é convertida de fibrilar quando a relação Ca/Si é alta para folicular à baixas relação Ca/Si (WHITTAKER et al., 2014).

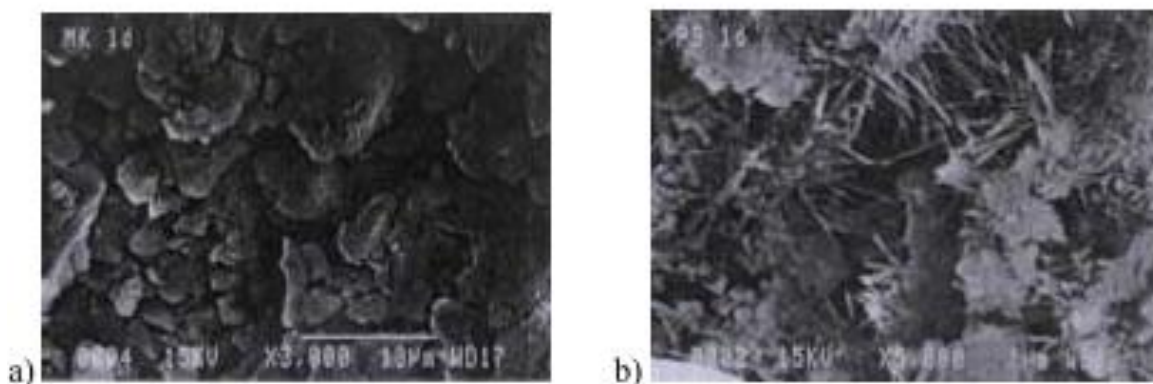
Figura 2 – Micrografia eletrônica de varredura de cristais hexagonais de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita.



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Richardson; Cabrera (2000) compararam a microestrutura do C–S–H formado no cimento de escória com o formado em sistemas do tipo C_3S , assim como o cimento Portland, e demonstraram que a morfologia do cimento de escória é diferente do tipo C_3S , variando de uma morfologia fibrilar para uma morfologia semelhante a foliculas (“*foil-like*”). Häkkinen (1992) apontou que é possível notar a formação de produtos de hidratação com textura lisa e granular na escória ativada, diferentemente do produto do cimento Portland que apresenta a morfologia fibrosa (NETO, 2002), como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 – Morfologia dos produtos hidratados a) pasta de cimento de escória ativada e b) pasta de cimento Portland comum



Fonte: (Häkkinen,1992 in Neto, 2002)

Whittaker et al. (2014) destaca em seu trabalho as dificuldades de caracterizar compósitos com escória. Ele considera os diferentes mecanismos de hidratação e a interferência destes entre si, além das diferentes composições das escórias, variando de acordo com a origem, como fatores a serem considerados uma vez que a quantidade de fases e a porosidade dependem em grande parte da composição das matérias-primas.

3.10 Durabilidade de concretos

Grande parte dos danos gerados nas estruturas de concreto ocorre em função do ataque dessas por íons de sulfatos e cloretos, o que faz com que o estudo da durabilidade estimule grande interesse tecnológico e científico. A deterioração do concreto devido à reação álcali-agregado está estreitamente relacionada com o teor total de álcalis presente no concreto, cuja maior fonte provém do cimento Portland (MAGALHÃES, 2007).

O estudo da adição de EGAF e seus efeitos na carbonatação das estruturas de concreto vêm a algum tempo sendo alvo dessas pesquisas, uma vez que as pastas de cimento se tornam menos permeáveis e, aumentam a resistência da zona de transição no concreto, reduzindo a microfissuração, a permeabilidade e a porosidade capilar (MEHTA; MONTEIRO, 2014)

A adição de EGAF já é consolidada como fator que melhora a resistência a sulfatos nos concretos. Dois mecanismos são aceitos para explicar esse desenvolvimento de resistência. O primeiro é de que a mistura de EGAF dilui as espécies do clínquer, reduzindo a quantidade total de AFm e o segundo é de que ocorre um refinamento dos poros da estrutura que se opõe ao ingresso dos íons sulfatos (WHITTAKER et al., 2014).

Magalhães (2007) afirma que as reações com a escória consomem maior quantidade de hidróxido de cálcio e induzem a formação de quantidades adicionais de silicatos de cálcio e aluminosilicatos hidratados que preenchem os poros abertos, gerando um concreto mais compacto e conseqüentemente mais resistente aos ataques.

3.11 A questão da sustentabilidade

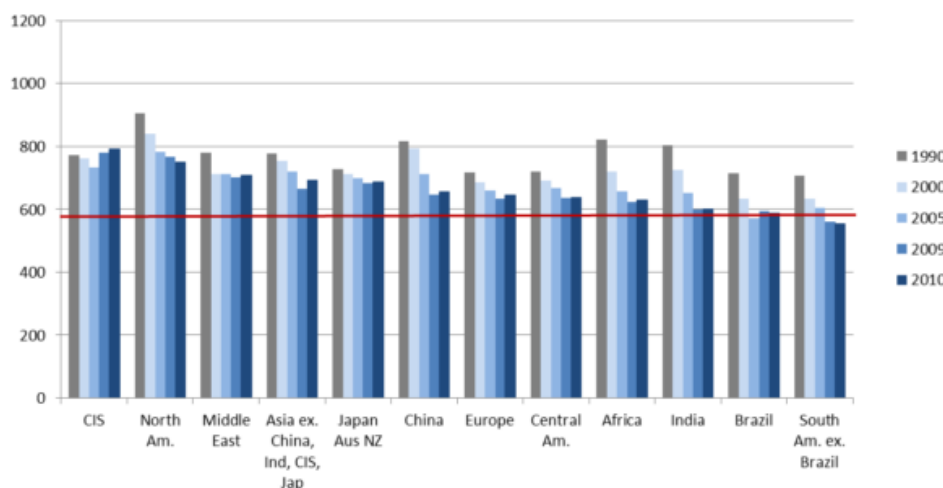
Frente às atuais mudanças climáticas, suas causas e conseqüências, a questão ambiental é uma realidade e têm sido tema dominante em discussões e fator dominante em diversas pesquisas nos últimos anos. A indústria do cimento tem dado grande importância a essa abordagem, uma vez que a emissão de CO₂ é intrínseca ao seu processo produtivo, essa contribui com aproximadamente 5% das emissões de gás carbônico do mundo, seja com a transformação química da matéria-prima em cimento, seja com a queima de combustíveis

utilizados para possibilitar essa transformação (IEA, 2009; KIHARA; VISEDO, 2014; SNIC, 2010).

O impulso para a redução das emissões de CO₂ tem sido dado pelos governos e pelas corporações que já entendem que a atual taxa de emissão para a atmosfera é uma séria ameaça à vida no futuro e à prosperidade no planeta (IMBABI et al, 2012). As indústrias cimenteiras nacionais têm obtidos bons resultados com a adoção de processos de produção mais eficientes e com menor consumo de energéticos (SNIC, 2010). Concomitantemente, o aproveitamento de subprodutos de outras atividades e matérias-primas alternativas é realizado há mais de 50 anos no Brasil, prática que só recentemente vem sendo mais adotada no mundo (KIHARA; VISEDO, 2014).

As emissões da indústria do cimento brasileira são referências mundiais, como pode se observar na Figura 4 a seguir, onde a linha vermelha representa o valor do Brasil em 2010, permitindo facilitar a visualização de como os outros países/regiões se encontram em relação ao Brasil (ABDI, 2012).

Figura 4 – Emissão média de CO₂ por tonelada de cimento

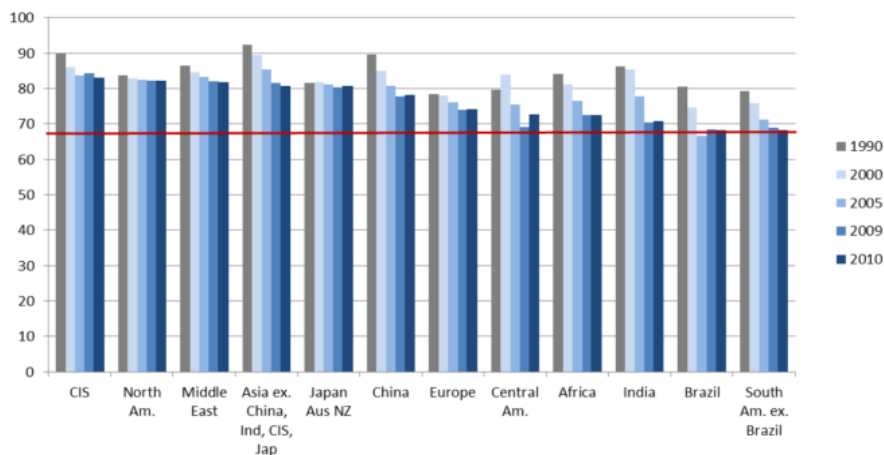


Fonte: (ABDI, 2012)

Uma das medidas mais eficazes de controle e redução das emissões no Brasil se deve à crescente utilização de adições ao cimento, e observa-se essa tendência de substituição em outros países. A Figura 5 considera a razão clínquer/cimento e, conseqüentemente o percentual de adições utilizadas. Nela, o cimento brasileiro está posicionado como tendo uma quantidade baixa de clínquer, quando comparado aos de outros países analisados. Para manter essa razão de clínquer por tonelada de cimento produzido, é necessário que o crescimento da oferta de adições acompanhe o crescimento do setor, porém, ao considerar as atuais fontes de

adições utilizadas, percebe-se a possibilidade destas crescerem em níveis menores do que a taxa de crescimento prevista para o setor até 2020 (ABDI, 2012).

Figura 5 – Razão clínquer no cimento



Fonte: (ABDI, 2012)

3.12 As fontes de emissão

Da fabricação do cimento Portland, a etapa de calcinação para obtenção do clínquer é a que mais demanda energia, cerca de 90% do consumo, e cerca de 50% do CO₂ é emitido nesta fase da produção o cimento (JOHN, 2003). Para ABDI (2012) 50% das emissões de CO₂ são provenientes da descarbonatação e 40% da combustão no forno de clínquer. Esse é ponto crítico para que o setor seja um dos principais emissores de CO₂ (PINHO; FARIA, 2012).

Neste processo o carbonato de cálcio (CaCO₃) e o óxido de silício juntos são submetidos à temperatura elevadas, tal como na reação simplificada (Equação 2), resultando em silicato de cálcio e CO₂ (IMBABI et al, 2012):



Em relação às emissões decorrentes da descarbonatação e da queima de combustíveis, a soma desses representa em média 90% das emissões de GEE (gases de efeito estufa) na produção mundial de cimento. Quanto às emissões decorrentes do uso de eletricidade, o setor de cimentos possui uma parcela mundial de 5%, porém o Brasil, que possui uma matriz renovável, tem essa participação reduzida para pouco menos de 1% (ABDI, 2012).

Como o cimento Portland é composto de uma mistura heterogênea de vários compostos, o processo de hidratação consiste em reações simultâneas dos compostos anidros

com a água. Entretanto nem todos os compostos se hidratam à mesma velocidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Quanto mais fino o cimento, mais rápido a reação de hidratação do cimento acontecerá devido ao aumento da área superficial do pó de cimento em contato com a água, porém os custos desse processo e o calor liberado durante a hidratação definem alguns limites para essa finura (IMBABI et al, 2012; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho a caracterização inicial da escória foi realizada por análise visual, granulometria a laser (GL), difração de raio X(DRX), fluorescência de raio X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A caracterização dos compósitos com substituição de 40, 60 e 80% de escória granulada de alto forno em massa nas argamassas foi feita a partir das análises dos resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, absorção de água e resistência a ataque ácido além de análises das microestruturas formadas através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1 Materiais

Como é possível observar na Tabela 2, o cimento CP V, de acordo as normas brasileiras, deve conter entre 95 e 100% em massa de clínquer e gesso, e até 5% de calcário. O cimento CP V foi então o escolhido para este estudo, uma vez que apresenta maior resistência inicial e contém grande quantidade de clínquer e gesso, viabilizando assim a análise da variação da quantidade de escória, uma vez que ela se encontra ausente.

O CP V, com valores médios aproximando de resistência a compressão acima de 50 MPa aos 28 dias, superam em muito o valor normativo de 34 MPa para sete dias, para aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida. (BATTAGIN, 2011). O cimento utilizado foi doado pela Brennand Cimentos – Cimento Nacional.

A areia utilizada foi a areia normal brasileira, produzida pelo IPT, de acordo com as especificações da norma NBR 7214 (2015). Já a água utilizada foi fornecida pela rede da COPASA. A escória de alto forno granulada utilizada foi doada pela Holcim Cimentos e pela concreteira Super Mix e foi fornecida já moída. O ácido sulfúrico utilizado foi adquirido concentrado e preparado em uma concentração de 2,5% para o ensaio de ataque ácido.

4.2 Confeção e preparo dos corpos de prova

A avaliação do comportamento mecânico das argamassas com os diferentes teores de substituição foi realizada a partir da confecção de corpos de prova, de acordo com a norma NBR 7215:1996. Esta prevê a confecção de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura com uma argamassa composta de uma parte de cimento, que

neste trabalho sofrerá a substituição em peso de 40, 60 e 80% de EGAF, três partes de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,48, neste caso, foi utilizada a relação água/ cimento+escória ($a/c+e$) = 0,48, como na Tabela 4.

Os corpos de prova foram conservados nos moldes para a cura inicial, e em seguida submetidos à cura em água saturada de cal, até a data da ruptura 28 dias depois. Pastilhas de argamassa com todas as substituições também foram moldadas em moldes de silicone a fim de facilitar a caracterização microestrutural, essas também foram utilizadas para os ensaios de ataque ácido. Já para o ensaio de absorção de água os corpos de prova foram confeccionados seguindo as mesmas diretrizes normativas da NBR 7215:1996.

Tabela 4 – Identificação dos traços utilizados

Identificação	Relação a/c+e	% de substituição	Traço
T1	0,48	0	1:3:0,48
T2	0,48	80	1:3:0,48
T3	0,48	60	1:3:0,48
T4	0,48	40	1:3:0,48

Fonte: Próprio autor

4.3 MÉTODOS DE ENSAIO

4.3.1 Caracterização Física

i. **Avaliação granulométrica:** O equipamento utilizado para a avaliação granulométrica foi o Cilas 1090 Laser Particle Analyser, que se encontra no Laboratório do DEMAT no CEFET–MG. O resultado permite a avaliação referente à distribuição granulométrica das amostras e ao diâmetro médio.

4.3.2 Caracterização Microestrutural

Para avaliação da microestrutura das fases presentes nas amostras e nos compósitos obtidos, análise de interface entre a matriz cimentícia e a escória além da avaliação da reatividade entre os mesmos a partir do aparecimento de produtos de reação. O equipamento utilizado nesta técnica foi o microscópio eletrônico de varredura, modelo TM 3000 da marca HITACHI que se encontra no Laboratório do DET no CEFET–MG. Para essa etapa foram moldadas pastilhas em molde de silicone com as mesmas massas preparadas e utilizadas para a confecção dos corpos de prova.

Nessa etapa, é importante considerar uma preparação de amostra minuciosa a fim de obter uma superfície ótima para observação do MEV. Grande parte do sucesso de caracterizações em microscópio é influenciada pelo tipo e qualidade da preparação da amostra e métodos inadequados podem mascarar as características reais e evidenciar as falsas levando a uma interpretação e conclusão errônea dos resultados (SILVA, 2004).

4.3.3 Caracterização Mineralógica

Uma avaliação qualitativa das fases minerais das escórias foi obtida pelo método de difratometria de raio-x (DRX). O equipamento utilizado nesta técnica foi difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD-7000, do Laboratório do DEMAT no CEFET-MG. A radiação foi de $\text{CuK}\alpha$, tensão de 40V, corrente 30 mA e varredura de 10 a 80 com passo $0,02^\circ/\text{min}$ no modo contínuo.

4.3.4 Caracterização Química

Utilizando a técnica de espectrometria de fluorescência de raio Xpor energia dispersiva (FRX), no equipamento FRX – 720 da marca Shimadzu, que se encontra no Laboratório do DEMAT no CEFET-MG, uma avaliação semi-quantitativa dos elementos presentes em termos de óxidos nas amostras se torna possível, ou seja, uma avaliação da composição química é obtida. A indicação dos elementos presentes neste ensaio auxiliará na identificação qualitativa dos constituintes relativos a cada fase no ensaio de DRX.

4.3.5 Caracterização mecânica

i. **Resistência à compressão:** A resistência à compressão nos corpos de prova moldados de cada traço foi avaliada aos 28 dias e o capeamento feito com o auxílio de um capeador metálico com neoprene. O equipamento utilizado foi a máquina universal EMIC que se encontra no Laboratório do DET no CEFET-MG.

4.3.6 Absorção de água

A porosidade é habitualmente relacionada com a resistência mecânica e a capacidade de ingresso e transporte de fluidos pelo concreto. Porém, além dessas contribuições, a porosidade dispersa aleatoriamente com diversos tipos e tamanhos, interfere também na durabilidade do concreto. Portanto, avaliando a penetração e deslocamento de fluidos no concreto permite a construção de algumas considerações quanto a sua durabilidade (ALMEIDA, 2009).

Com a adição de escória, um material que, além de cimentante, é mais fino que o cimento, um melhor empacotamento da estrutura do concreto ocorre é esperado, efeito filler. Este efeito de empacotamento está relacionado à diminuição da permeabilidade e conseqüentemente aumento da durabilidade (POLISSENI, 2005).

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com as diretrizes da NBR 9778 (1990). As amostras, um corpo de prova para cada traço, foram secas a 105°C até que a constância da massa fosse alcançada. Em seguida, foram submergidas em água por 72 horas e a massa saturada foi obtida.

4.3.7 Ataque ácido

Sabe-se que a exposição a ácidos é extremamente prejudicial para as pastas de cimento hidratado, uma vez que a pasta é alcalina. Essa redução do pH implicará em uma desestabilização dos produtos de hidratação levando a uma progressiva redução de resistência e perda de massa.

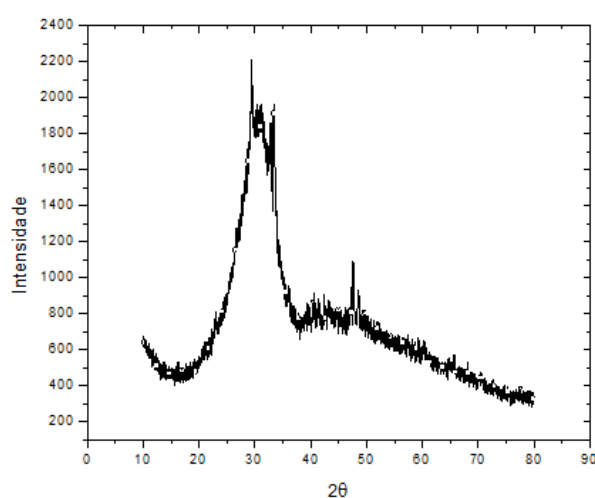
A metodologia de ataque ácido baseada na metodologia apresentada por ALMEIDA (2009) foi utilizada neste trabalho a fim de se verificar a influência do ataque ácido na absorção dos corpos de prova. Para o ensaio, duas pastilhas de cada traço, secas em condições ambiente, foram utilizadas, em seguida essas foram imersas em solução de ácido sulfúrico 2,5% por 72 horas e posteriormente, avaliadas visualmente quanto à deterioração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização da escória de alto forno

A escória de alto forno granulada (EGAF) utilizada foi recebida já seca e moída, e não apresentava indícios de variação brusca na granulometria e na homogeneidade. Na Figura 6, o difratograma da escória de alto forno é apresentado. A análise do mesmo indica a possibilidade de uma alta porcentagem vítrea da escória, sendo assim mais um fator favorável á sua boa reatividade.

Figura 6 – Difratoograma escória de alto forno



Fonte: Próprio Autor

Na literatura, Magalhães (2007) explica que um halo vítreo na proximidade de 30° (2 Θ) é o indicador de cristalinidade das escórias, e esse halo foi encontrado na amostra analisada. Assim é esperado que a escória analisada apresente boa reatividade.

Tabela 5 – Composição da escória utilizada comparativamente às escórias brasileiras

Composição	Escória utilizada
CaO	64,61
SiO ₂	22,07
Al ₂ O ₃	6,10
MgO	2,29
Fe ₂ O ₃	0,74
FeO	—
S	2,79
Outros	2,93
CaO/SiO ₂	2,927

Fonte: Próprio autor

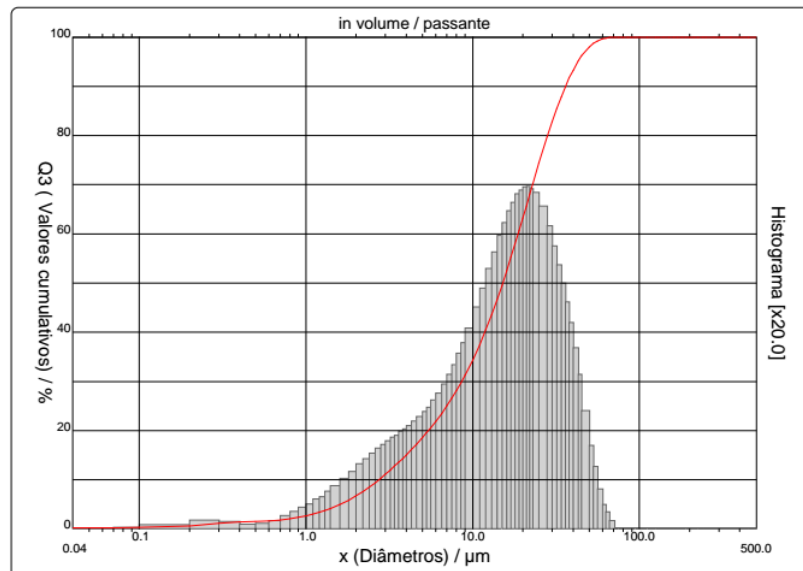
Quanto à granulometria da escória utilizada, de acordo com o resultado de Granulometria a Laser, Tabela 6, seu diâmetro médio foi de 17,56 μm . De acordo com Mehta; Monteiro (2014) essa implicará em maiores resistências em idades avançadas, ou seja, após 28 dias. A distribuição das partículas pôde ser observada na Figura 7.

Tabela 6 – Diâmetros equivalentes da granulometria a laser das partículas da escória

Diâmetros	
Diâmetro a 10% (d10)	2,73 μm
Diâmetro a 50% (d50)	15,44 μm
Diâmetro a 90% (d90)	26,10 μm
Diâmetro médio	17,56 μm

Fonte: Próprio autor

Figura 7 – Perfil granulométrico da escória



Fonte: Próprio autor

5.2 ANÁLISE DOS COMPÓSITOS

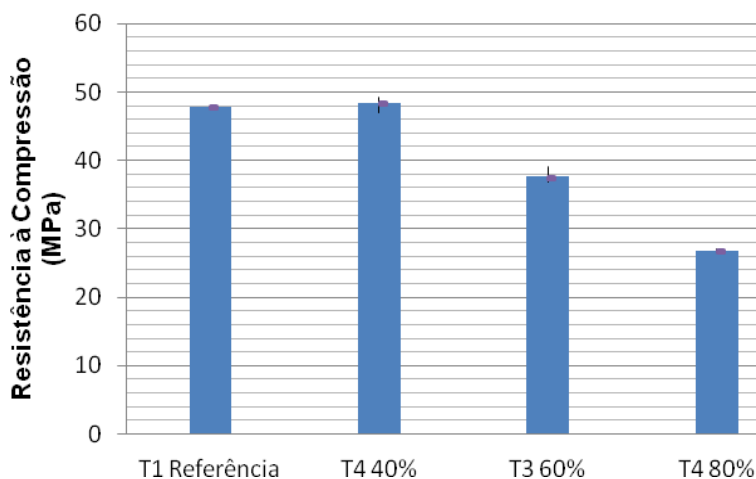
5.2.1 Avaliação estrutural e mecânica dos compósitos

A fim de se avaliar a resistência mecânica dos compósitos desenvolvidos, a resistência a compressão dos corpos de prova foi avaliada. A adição de escória pode levar o concreto a apresentar, sob mesmas condições, menor desenvolvimento inicial de resistência. Entretanto, na prática, as resistências alcançadas em todas as idades superam os limites mínimos estabelecidos pelas normas técnicas da ABNT, que especificam os valores necessários às aplicações mais usuais (ABCP, 2002).

Os resultados médios de resistência à compressão, assim como os valores de máximos e mínimos são apresentados no Gráfico 1. A partir da análise dos resultados é possível observar que a resistência do compósito cai com a adição da escória. Pode ser notado para a substituição de 40% de EGAF que a resistência se manteve relativamente similar, enquanto que para as substituições de 60 e 80% quedas de 23,16% e 44,47% na resistência puderam ser observadas.

A queda de resistência é contraditória ao já aceito pela literatura. É possível que a perda de trabalhabilidade durante a moldagem devido à diferença da granulometria entre a escória e o cimento tenha causado essa redução significativa da resistência mecânica.

Gráfico 1 – Resultados de resistência à compressão em MPa



Fonte: Próprio autor

Para a determinação da porosidade aberta à penetração de água dos compósitos desenvolvidos, o ensaio de absorção por imersão foi realizado seguindo as indicações da NBR 9778 (1990). Para Magalhães (2007), o tamanho e a distribuição dos poros determinam a capacidade de absorção dos componentes, e define a facilidade com que a água irá entrar e sair dos mesmos, podendo gerar pressões capazes de provocar danos a sua estrutura.

Assim, a avaliação da absorção se torna um importante indicativo para avaliar a durabilidade. De acordo com Neville (2015), uma absorção menor que 10% é requisito para a melhor durabilidade do concreto, enquanto que apresentando uma absorção inferior a 5%, o material pode ser considerado de baixa absorção. A absorção foi calculada como prescrito na norma, e os resultados estão descritos na Tabela 7. Todos os traços avaliados apresentaram absorção que atende ao parâmetro de durabilidade.

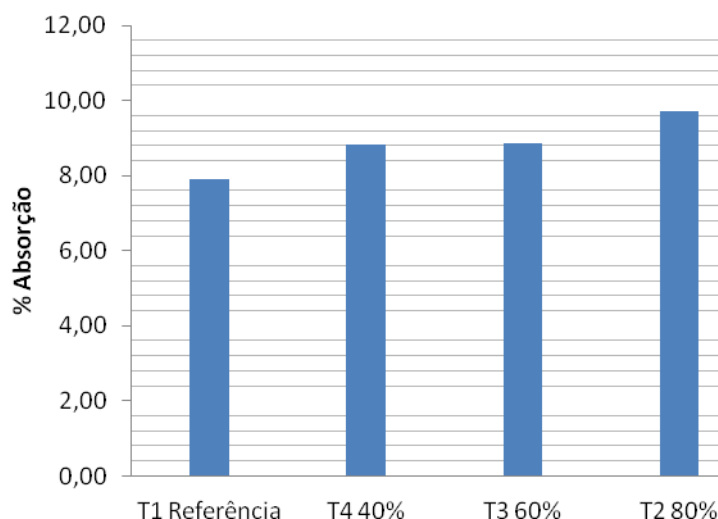
Tabela 7 – Acompanhamento das massas durante a imersão

Traço	Massa Inicial (g)	Múmida 24hrs (g)	Múmida 48hrs (g)	Múmida 72hrs (g)	%absorção
T1 Referência	417,14	449,36	449,75	450,07	7,89
T4 40%	412,02	447,92	448,22	448,40	8,83
T3 60%	407,85	443,37	443,93	444,00	8,86
T2 80%	407,89	447,09	447,35	447,53	9,72

Fonte: Próprio autor

Os resultados encontrados, apresentados no Gráfico 2, mostram que, à medida que ocorreu o aumento da substituição do cimento por escória de alto-forno, houve o aumento da absorção destes, e uma consequentemente redução da durabilidade é esperada.

Gráfico 2 – Resultados de absorção por traço



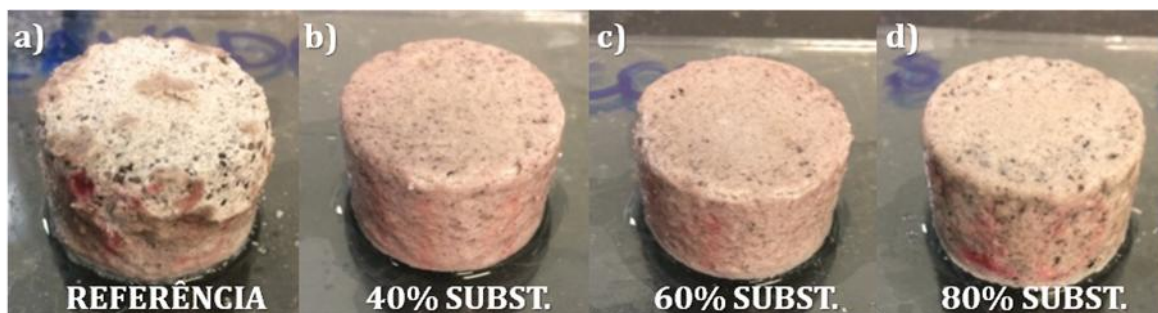
Fonte: Próprio autor

Porém, de acordo com o estudo realizado por Sato (1998), apesar de apresentarem volume total de poros maior que os concretos sem escória de mesmo traço, a escória diminui a quantidade de poros com dimensões maiores que 120 nm, que são os poros que efetivamente contribuem para o transporte de massa.

Outra hipótese é a de que a escória por ser mais fina, demanda mais água durante a mistura o que pode ter prejudicado a trabalhabilidade durante a moldagem das amostras. Com uma trabalhabilidade reduzida, mais poros se formam e menos compacta fica a massa, permitindo que durante a imersão mais água fosse absorvida.

De modo a avaliar melhor a durabilidade dos compósitos desenvolvidos, o ensaio de ataque ácido foi realizado. O esperado, assim como descrito por Mehta; Monteiro (2014), é que as amostras contendo maior substituição de escória apresentem um desempenho muito melhor, uma vez que possuem pouco ou nenhum hidróxido de cálcio na hidratação, uma vez que os mesmos são consumidos durante a hidratação. A avaliação visual quanto à degradação das pastilhas foi realizada e registrada na Figura 8, onde as fotos de a) a d) mostram as pastilhas logo após a retirada da imersão.

Figura 8 – Degradação das amostras submetidas ao ataque ácido



Fonte: Próprio autor

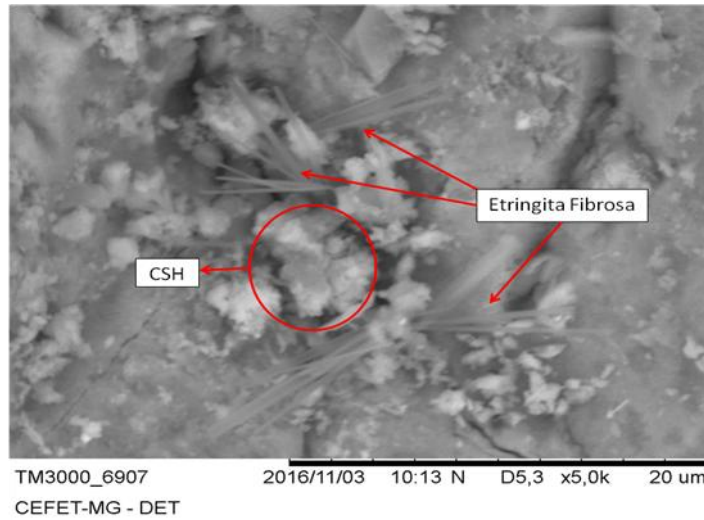
Foi possível observar que os traços com substituição sofreram menor desgaste superficial além de menor perda de massa do que a amostra referência. Foi observado que, durante a lavagem das pastilhas analisadas, parte do material superficial se soltou com leve fricção feita com os dedos, e a quantidade de material que se despreendeu foi muito maior na amostra sem substituição do que nas amostras com substituição.

Neville (1997) aponta como consequências do ataque por sulfatos a desagregação por expansão e fissuração, além da perda de aderência entre a pasta de cimento e as partículas de agregado. Fissuração progressiva e lascamento que reduzem o concreto a uma condição friável ou mesmo mole também são induzidas.

5.3 Avaliação microestrutural dos compósitos por microscopia de varredura (MEV)

Como esperado, foram encontradas, nas microscopias das amostras do traço de referência, as estruturas de etringita e C-S-H de forma mais abundante e dispersa em tornos dos componentes. Na Figura 9 essa microestrutura pode observada com as morfologias típicas da etringita em fibras e do C-S-H em tornas dessas fibras.

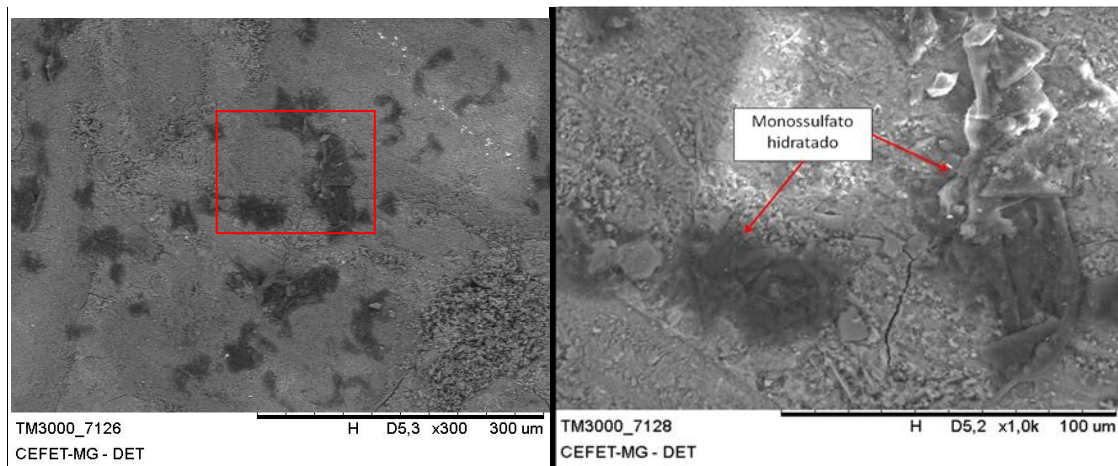
Figura 9 – Microestrutura da amostra T1 Referência



Fonte: Próprio autor

Já na Figura 10, uma sequência em amplificação do monossulfato hidratado é apresentada. Com 50X é possível identificar diversos pontos distribuídos em grande quantidade pela amostra que, com o aumento da amplificação, foi posteriormente identificado como porções de monossulfatos hidratados.

Figura 10 – Sequência em amplificação – Microestrutura da amostra T1 Referência



Com a substituição de 40% de cimento por escória na argamassa a quantidade de monossulfatos hidratados visíveis na microscopia, Figura 11, apresentou redução, porém são ainda facilmente identificáveis. Na Figura 12 a tendência de redução dos monossulfatos hidratados nas amostras com 60% de substituição também pode ser evidenciada. A presença de monossulfatos hidratados e etringita é considerada deletéria ao concreto assim a redução da presença desses pode ser considerada como favorável à melhora na durabilidade do concreto.

Figura 11 – Sequência em amplificação – Microestrutura da amostra T2 40%

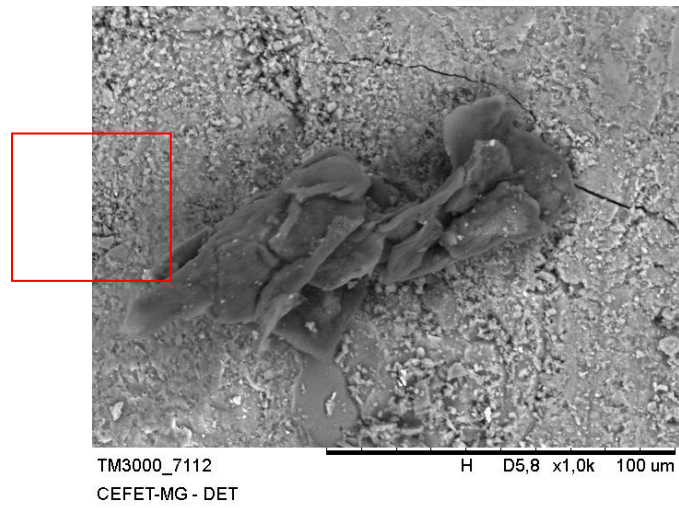
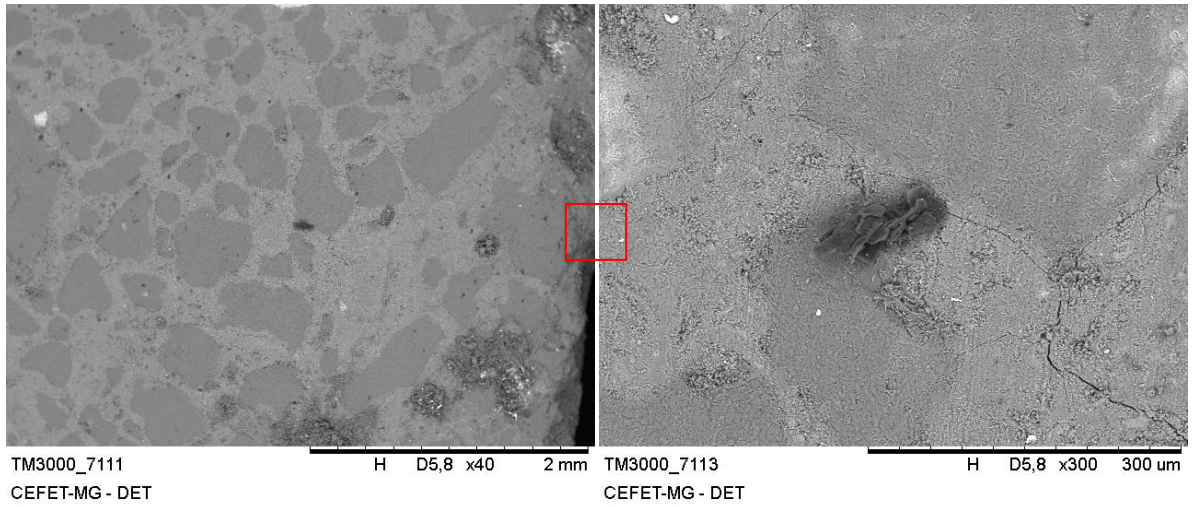
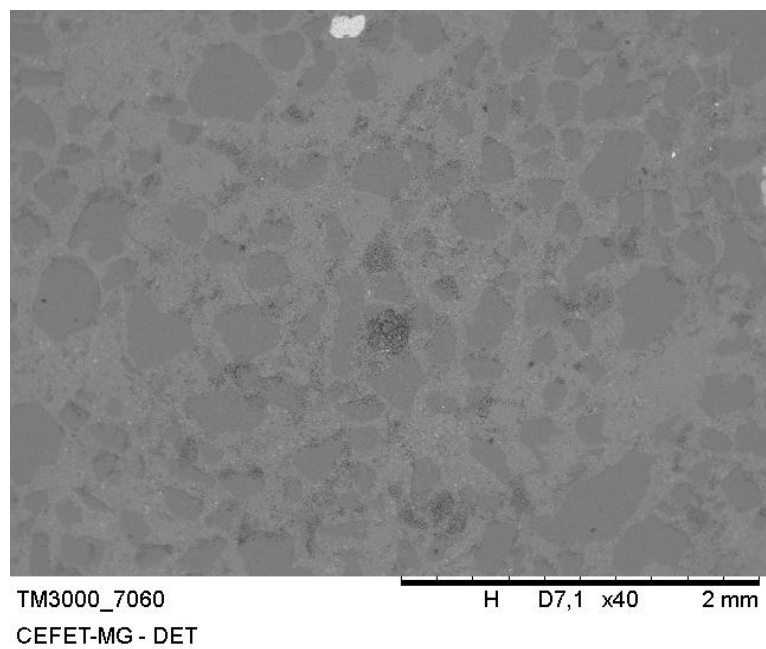
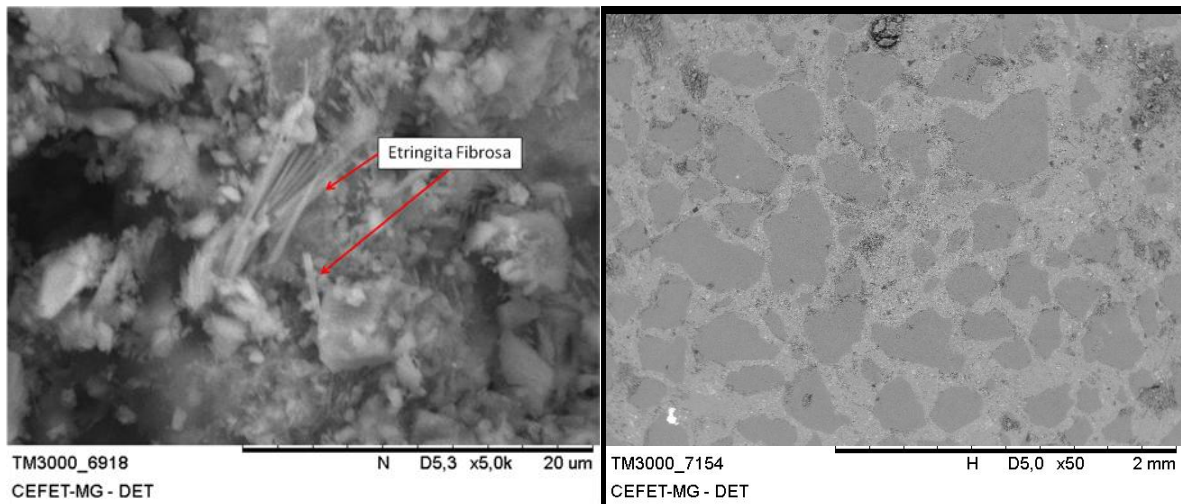


Figura 12 – Microestrutura da amostra T3 60%



Figuras 13 e 14 – Microestruturas da amostra T2 80%



Nas Figuras 13 e 14, imagens de uma amostra com 80% de substituição é mostrada. Uma pequena porção de etringita pode ser identificada nas amostras analisadas, em frequência e organização bem inferiores às das amostras de referência. Uma massa cimentícia mais uniforme também pode ser observada nas amostras analisadas.

6 CONCLUSÕES

A escória utilizada apresentou características adequadas para atuar como agente de melhora nas propriedades do concreto, tais como granulometria adequada, com possibilidades de alta porcentagem vítrea, relação $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ de 3,31 atendendo a especificação normativa para adição em concretos.

Os compósitos com substituições de 40, 60 e 80% de escória foram avaliados quanto à resistência à compressão aos 28 dias. O traço de 40% apresentou resistência equivalente quando comparado com traço referência enquanto que os traços de 60 e 80% apresentaram queda em suas resistências de 23,16% e 44,47%, respectivamente.

Mesmo com substituição de 80% do cimento o concreto ainda apresenta resistência equivalente para ser utilizado em concretos estruturais. O retorno socioambiental é também um fator a se considerar uma vez que uma substituição de 40% de escória, um resíduo industrial, reduziria a quantidade de insumos consumidos para a produção de concreto além de prover uma destinação para um resíduo que é gerado em grandes quantidades diariamente pelo mundo.

Para a avaliação dos parâmetros de durabilidade, os ensaios de absorção de água por imersão e ataque ácido foram analisados. Um aumento da absorção foi obtido com o aumento da substituição de cimento por escória nos traços, esse efeito é considerado deletério para a durabilidade dos concretos uma vez que pode ser relacionado com a permeabilidade de íons. A penetração desses agentes pode causar a desestabilização dos produtos hidratados responsáveis pela resistência dos concretos em questão, reduzindo, portanto a durabilidade dos mesmos.

O ataque ácido, de imersão em solução de 2,5% de ácido sulfúrico por 72 horas, ao qual as amostras foram submetidas, confirmou a melhora da durabilidade proporcionada pela adição de escória em altos teores em concretos. Assim como esperado, a degradação sofrida pelas amostras foi menor com o maior teor de escória adicionado. Expansão, lascamento e perda de adesão entre a pasta e o agregado muído pode ser observado em maior intensidade na amostra de referência.

A avaliação microestrutural feito com auxílio de um microscópio de varredura auxiliou na investigação quanto as mudanças decorrentes da adição de escória. Foi observado uma redução da frequência na qual os monossulfatos hidratados aparecem com o aumento do teor de escória nas amostras. Além disso, amostras mais homogêneas foram observadas a medida que a adição de escória aumentou.

Por fim, conclui-se que, apesar da influência da trabalhabilidade da massa ter possivelmente afetado os resultados, o traço de 40% de substituição pode ser considerada a melhor escolha quanto ao desempenho geral. Com maior resistência e absorção mais baixa em comparação aos demais traços com substituição, e degradação relativamente superior ao traço referência seu desempenho geral obteve um bom balanço de propriedades.

Outras análises precisam ser realizadas a fim de avaliar a real influência deletéria da trabalhabilidade das pastas estudadas. Há uma boa indicação da melhora do desempenho quanto à durabilidade e existe a possibilidade de continuação da pesquisa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para a economia de baixo carbono**: caderno 3: nota técnica cimento. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1426082523.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2016.

ALMEIDA, J. A. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. 2009. 74 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, MG

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**. 7ª Ed.. São Paulo, 2002. 28p. (BT 106)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12654**: Controle tecnológico dos materiais componentes do concreto. Rio de Janeiro, 1992

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**, por Geraldo C. ISAIA, 185–232. São Paulo: Ipsilon, 2011.

BIRICIK, H.; SARIER, N. Comparative study of the characteristics of nano silica – , silica

fume – and fly ash – incorporated cement mortars. **Materials Research**, v. 17, n. 3, p. 570–582, 2014.

CARVALHO–PUPATTO, J. G. et al. Efeito de escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 38, n. 11, p. 1323–1328, 2003.

CEMBUREAU – The European Cement Association. **Activity Report 2014**. Brussels: Disponível em: <http://www.cembureau.eu/sites/default/files/ActivityReport2014_website_1.pdf>. Acesso em: 18 mai 2016

DIVSHOLI, B. S.; LIM, T. Y. D.; TENG, S. Durability Properties and Microstructure of Ground Granulated Blast Furnace Slag Cement Concrete. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 8, n. 2, p. 157–164, 2014.

GARCEZ, D. A. **Tecnologia do concreto de alto desempenho (CAD)**. 2008. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

GESTÃO DE COPRODUTOS. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**: 2008. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. (Nota Técnica). 28 p: il.

GREGEROVÁ, M. **TECHNOLITHOLOGY**. Brno–střed: Masaryk University Faculty of Science, Departamento de Ciências Geológicas: 2004. Disponível em: <<http://petrol.sci.muni.cz/Technolitologie/skripta/anglicky/Technolithology-skripta.html>> Acesso em: 26 abr. 2016.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M. A study on durability properties of high–performance concretes incorporating high replacement levels of slag. **Materials and Structures**, v. 41, n. 3, p. 479–493, 2008.

HENDRIKS, C. A.; WORRELL, E.; JAGER, D. DE. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. **Energy Agency (IEA)**, p. 1–11, 2002.

IEA. **Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194–216, 2012.

INSTITUTO AÇO BRASIL (IAB). **Relatório de Sustentabilidade**. Brasília, 2014. Disponível em: < http://www.acobrasil.org.br/site2015/downloads/Relatorio_Sustentabilidade_2014.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO de MEIO AMBIENTE – IEMA. Nota metodológica processos industriais. Sistema de estimativa de emissão de gases do efeito estufa, Novembro 2013:

JOHN, V. M. On the sustainability of concrete. **UNEP Industry and Environment**, v. 26, n. 2–3, p. 62–63, 2003. Disponível em: < <http://www.cbcs.org.br/userfiles/bancoDeConhecimento/on%20the%20sustainability%20of%20concrete%20UNEP%20Sustainable%20concrete%20005-098.pdf>> Acesso em: 06 mai 2016

JOHN, V. M. **Cimento de escória ativada com silicatos de sódio**. 1995. 199 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, SP. 1995.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de escória de alto forno no Brasil**. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo – USP: São Paulo, 2002.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Escórias de alto forno como aglomerante**.—São Paulo: EPUSP, 1995. 21 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/152)

KIHARA, Y.; VISEDO, G. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

MAGALHÃES, A. G. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. 2007. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG. 2007

MARQUES, J.C.. **Escória de alto forno: estudo visando seu emprego no preparo de argamassas e concretos**. 175p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP: 1994.

MASSUCATO, C. J. **Utilização de Escória de Alto-forno à Carvão Vegetal como Adição no Concreto**. 2005.105f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo, 4^a ed., IBRACON, 2014.

MIZUMOTO, C.; SALLES, F. M. Efeitos da aplicação de escória granulada de alto forno em diferentes finuras em composições de argamassa. **Anais do 54o Congresso Brasileiro do Concreto CBC2012**, n. 1, p. 1–14, 2012.

NETO, A. A. M. Estudo da retração em argamassas com cimento de escória ativada. Dissertação de mestrado. 2002. 161 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo – SP, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO2 concretos. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167–181, out./dez. 2014. ISSN 1678–8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

PINHO, M.; FARIA, L. G. D. **Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas**. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2012

POLISSENI, A. E. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Escória de Aciaria Elétrica Micronizada como Material Cimentício**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS: 2005.

POLITO, Giulliano. **AVALIAÇÃO DA INTRODUÇÃO DE CAL HIDRATADA NAS**

ARGAMASSAS APLICADAS SOBRE BLOCOS CERÂMICOS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO E MORFOLOGIA. 2008. 181 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ISMS-7LSNYL>>. Acesso em: 20 set. 2016.

QUEIROZ, M. et al. **Resultados Preliminares:** Utilização Da Escória De Alto Forno a Carvão Vegetal Em Estruturas. In: SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2007. Resende, RJ. 8p

RICHARDSON, I.G.; CABRERA, J.G. The nature of C–S–H in model slag–cements. *Cement and Concrete Composites*, v. 22, n. 4, p. 259–266, 2000

RESCHKE, J. S. **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade.** 2003.174f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS.

RUBERT, S. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação.** 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Processos Químicos. Pato Branco, PR.

SANT'ANA, A. P. **Caracterização tecnológica de misturas solo – escória de alto-forno granulada moída para fins rodoviários.** 88p. Tese (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, MG: 2003.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos.** 1998, 163p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA, V. S. **Aderência de chapiscos em concretos estruturais** – melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição da sílica da casca de arroz. 2004. 229p. Tese (Doutorado) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais – EESC-IFSC-IQSC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **PRESS KIT 2010.**

Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2010.pdf>
Acesso em: 18 mai 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório anual 2013**.
Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Resultados Preliminares de Dezembro de 2015**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:
<<http://www.snic.org.br/pdfresultado/Resultados%20Preliminares%20Dezembro%202015.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

WHITTAKER, Mark et al. The impact of alumina availability on sulfate resistance of slag composite cements. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 119, p.356–369, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.015>.