

Escória de Alto Forno como substituição parcial ao cimento Portland

Blast furnace slag as a partial replacement for Portland cement

Marcelo Martins Farias¹ , Celestina Lima de Rezende Farias², Marcelo de Souza Picanço¹

¹Universidade Federal do Pará, Grupo de Análise de Estruturas e Materiais. Belém, PA, Brasil.

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Laboratório de Edificações. Vila Sinhá Bragança, PA, Brasil.
e-mail: marcelofariasmmf@gmail.com, celestinarezende2006@gmail.com, marcelosp@ufpa.br

ABSTRACT

The civil construction industry is responsible for the emission of carbon dioxide (CO₂), for each ton of cement produced, approximately one ton of carbon dioxide is emitted into the atmosphere. Therefore, the present work has as general objective to study the technical feasibility of using the Blast Furnace Slag (EAF), cooled instantly as a substitute for Portland cement. For this work, clinker, standardized sand, plaster, drinking water and EAF were used as materials. As a methodology, the materials were milled to the desired granulometry, which passed through the 0.075mm sieve. After this process, the characterization of these materials started, followed by the replacement of clinker, in the contents of 5, 15, 30, 50 and 75% by EAF. The results of this substitution showed that the tailings were characterized as an excellent by-product in the manufacture of cement, presenting characteristics for large-scale use in search of reducing CO₂ emissions.

Keywords: Blast Furnace Slag; Clinker; Mortar.

RESUMO

A indústria de construção civil é uma das responsáveis na emissão de gás carbônico (CO₂), para cada tonelada de cimento produzido é emitido na atmosfera aproximadamente uma tonelada de gás carbônico. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica do uso do da Escória de Alto Forno (EAF), resfriada instantaneamente como substituição ao cimento Portland. Para este trabalho utilizou-se como materiais o clínquer, areia normatizada, gesso, água potável e EAF. Como metodologia dos ensaios foi realizado a moagem dos materiais, até a granulometria desejada, passante na peneira 0,075mm. Após esse processo iniciou-se caracterização desses materiais, sendo seguido, da substituição do clínquer, nos teores de 5, 15, 30, 50 e 75% pela EAF. Os resultados dessa substituição mostraram que o rejeito, caracterizou-se como um excelente subproduto na fabricação do cimento, apresentando características para o emprego em larga escala em busca da diminuição da emissão do CO₂.

Palavras-chave: Escória de Alto Forno; Clínquer; Argamassa.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de construção civil é uma das responsáveis na emissão de gases de efeito estufa. Enfatizam-se as quantidades significativas das emissões de gás carbônico (CO₂) geradas na produção de cimento Portland para cada tonelada de cimento produzido é emitido na atmosfera aproximadamente uma tonelada de gás carbônico, principal gás contribuinte para o aumento do efeito estufa, assim distribuída nas etapas de produção: descarbonatação (50%), combustão no forno de clínquer (40%), transporte de matérias-primas (5%) e eletricidade (5%) [1].

Além de ter uma participação expressiva na taxa de geração de poluentes e representar a maior fonte de geração de resíduos sólidos, a construção civil é o setor que mais consome recursos naturais no mundo.

A preservação da natureza era vista, de forma geral, como antagônica ao desenvolvimento, a partir da metade do século passado começou-se a questionar tal modelo. A incapacidade de desenvolvimento, de preservação ambiental e até mesmo de garantir a sobrevivência da espécie humana. A proteção do solo e da água, a limitação da geração de resíduos e sua reutilização são itens chaves no chamado “Desenvolvimento Sustentável”,

podendo ser definido como o desenvolvimento que atende as necessidades de hoje sem comprometer a capacidade de possíveis gerações futuras de atender suas próprias necessidades [2]. Portanto, esta pesquisa propõe estudar o reaproveitamento da Escória de Alto Forno (EAF), resfriada instantaneamente como substituição ao cimento Portland, avaliando sua caracterização química e mineralógica, podendo representar uma alternativa viável para destinação final deste passivo ambiental. Assim como, a substituição deste material pode acarretar numa melhoria nas propriedades do cimento produzido, poderá também, reduzir o consumo do clínquer por m³ de concreto ou de argamassa, resultando em uma menor emissão de CO₂ para a atmosfera e menor consumo de matéria prima para a produção do cimento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1. Clínquer

O clínquer foi doado pela empresa CIBRASA – Cimentos do Brasil S/A, oriunda da cidade de Capanema no estado do Pará, no Nordeste Paraense. A amostra foi retirada do Grupo Nassau, citado acima, conforme ilustrado na Figura 1, no dia 04 de dezembro de 2018, com características químicas conforme dados fornecidos pela própria empresa, apresentados na Tabela 1.

A composição química do clínquer apresentou C₃S: 73,84%, C₂S: 1,35%, C₃A: 5,99%, C₄AF: 11,87%, característica de um cimento com endurecimento rápido, de alta resistência inicial e alto calor de hidratação.

No laboratório de Mineração do Instituto federal do Pará (IFPA), campus Belém, o Clínquer passou por um processo de moagem a seco no moinho de bolas metálicas da marca MATOLI, modelo 070M016, esse tipo de moagem é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, pois a granulometria do clínquer é o fator mais importante quando adicionada a mistura com gesso.

A realização do processo de moagem foi executada com base na aplicação feita por [3], onde foi empregada a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg do material a ser moído. A quantidade de bolas foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, visto que as bolas menores possuem maior potencial de moagem.



Figura 1: (a) Entrada da empresa CIBRASA, (b) Planta Industrial da CIBRASA. Rodovia BR 316, nº 158 – Bairro: São José. Capanema – Pará.

Fonte: Google Earth, imagens 2017.

Tabela 1: Composição química do Clínquer, dia 04/12/2018.

DENSIDADE APARENTE	PERDA AO FOGO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RESÍDUO INSOLÚVEL	CaO LIVRE	F.S.C.
g/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	–
1,445	0,47	20,1	4,75	3,9	66,58	3,77	0,58	0,2	1,67	101,02
M.S.	M.A.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	FASE LÍQUIDA			
–	–	%	%	%	%	%	%			
2,3	1,22	73,84	1,35	5,99	11,87	0,99	27,47			

Fonte: CIBRASA – Cimentos do Brasil S/A.

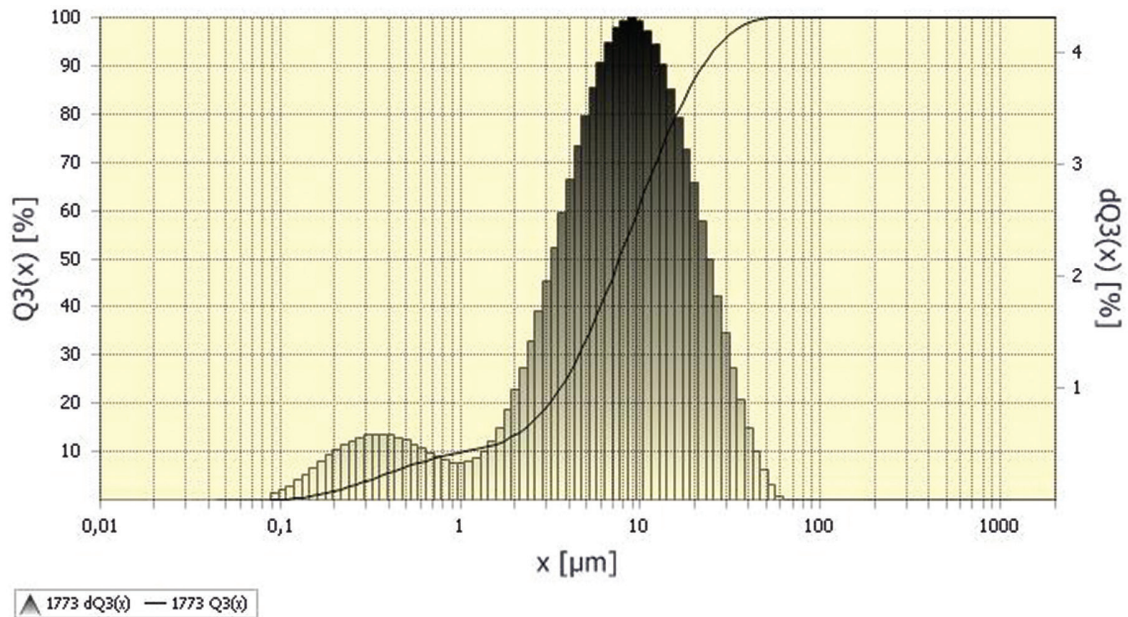


Figura 2: Distribuição granulométrica do clínquer.

Após um estudo de moagem, comparado tempos de 30, 60, 120, 180 e 240 minutos, estabeleceu-se o tempo de moagem em 3 horas (180 minutos), com esse tempo conseguimos uma eficiência de moagem de 85% suficiente para obter a granulometria desejada, isto é, diâmetro igual ou menor que ao do cimento [3], passante na peneira 0,075mm. Em 4 horas de moagem, a eficiência passou dos 90%, mas não fora utilizado neste trabalho, pois utilizávamos o tempo para o moinho esfriar e assim não comprometer o equipamento.

As características físicas analisadas depois do processo de moagem foram a distribuição granulométrica, ensaiadas no Instituto de Geologia da Universidade Federal do Pará no equipamento ANALYSETTE 22 MicroTec plus, da amostra passante na peneira 0,075mm, conforme apresentado na Figura 2 e massa específica com valor de 3,17 kg/dm³, ensaios realizados de acordo [4], no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

2.1.2. Areia normatizada

Foi empregada nesta pesquisa para a composição das argamassas areia normal brasileira obedece à norma [5], adquirida no IPT, material de referência para os ensaios de controle da qualidade de cimentos Portland, que é um dos constituintes da argamassa empregada na moldagem de corpos de prova utilizados para classificar os cimentos nas classes 25, 32 e 40.

2.1.3. Gesso

Empregado usualmente como sinônimo de “gipsita” ou “gipso”, o gesso indica o produto industrial calcinado a 125–180 °C, quando a gipsita é esmagada e calcinada ela perde água formando o gesso. A gipsita, é o mineral em seu estado natural, em sua composição química é um sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO₄·2H₂O), a densidade relativa é 2,32, não sendo um mineral de elevado peso específico.

Dada as principais características, o gesso foi abastado pela mesma empresa que forneceu o clínquer, para sua utilização foi levado à gipsita ao laboratório OPA – Oficina de Preparação de Amostra, no Instituto de Geologia da Universidade Federal do Pará. Após a britagem (diminuição do tamanho) do material, o gesso fora levado ao Instituto Federal do Pará, campus Belém, onde no moinho de bolas metálicas da marca MATOLI, modelo 070M016, foi empregada a mesma proporção de bolas para moagem do clínquer, divididas, também na mesma razão. Sendo assim, avaliou-se sua distribuição granulométrica por granulometria a laser, em tempos de moagem diferentes, pois não fora conseguido realizar o peneiramento do material, como apresentado na Figura 3.

Como mostrado na Figura 4, utilizou-se o tempo de moagem de 30 minutos, tempo necessário para obtenção da granulometria para utilização na mistura do clínquer.

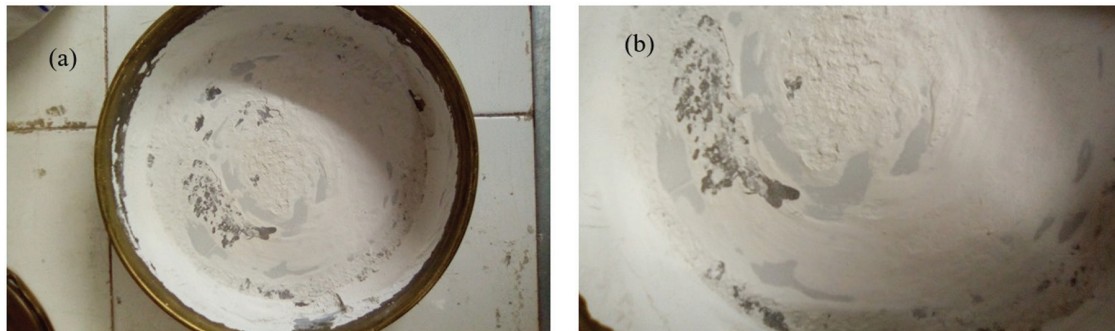


Figura 3: (a) Gesso moído passando na 0,075mm, (b) detalhe do material fino, aglomerado, sem condições de peneiramento.

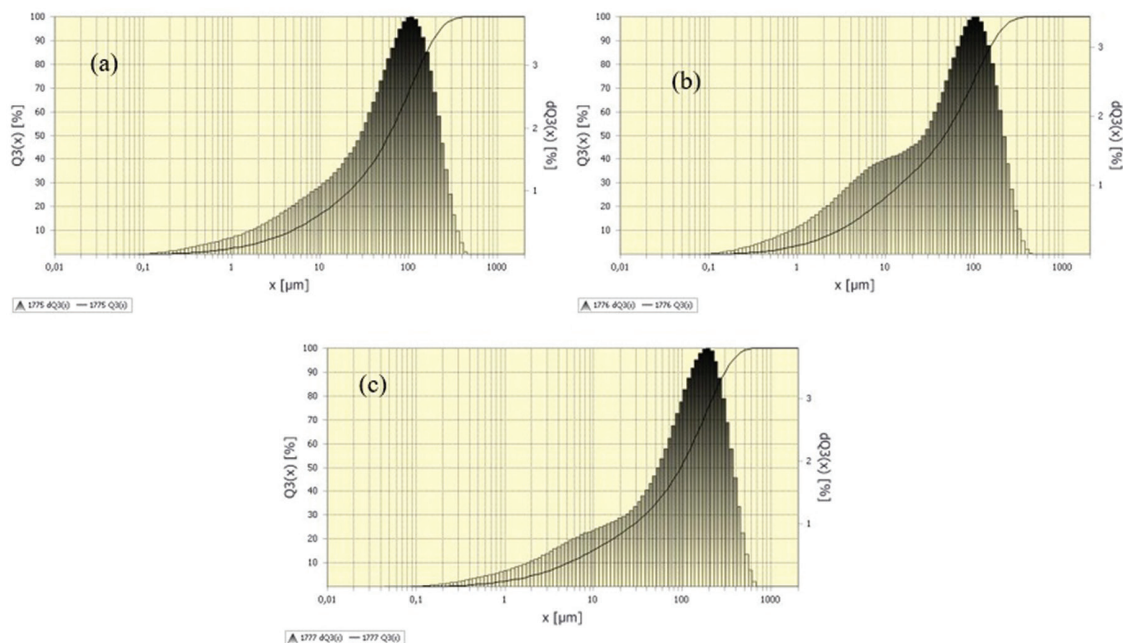


Figura 4: Granulometria a laser com seus respectivos tempos de moagem (a) 30 minutos, (b) 60 minutos, (c) 90 minutos.

2.1.4. Água

Nesta pesquisa utilizou-se do abastecimento hídrico da Universidade Federal do Pará que oferece água potável com temperatura de 28 °C e pH 6,0, portanto válida para produção de argamassas e concreto.

2.1.5. Escória de Alto Forno resfriada instantaneamente

A Escória de Alto Forno, resfriada instantaneamente é oriunda da produção de Ferro Gusa da região Sudeste do estado do Pará. A amostra foi retirada da Empresa Siderúrgica Norte Brasil S.A (SINOBRAS), no dia 14 de dezembro de 2018, na cidade de Marabá, local onde é produzido o ferro gusa e acumula-se o rejeito conforme ilustrado na Figura 5.

Aproximadamente 300 kg de amostra foram retiradas, com permissão do diretor da siderúrgica, e enviadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenadas em recipientes plásticos, para serem utilizados nesta pesquisa.

Para a caracterização química e mineralógica da Escória de Alto Forno, resfriada instantaneamente, a EAF foi levada à estufa para obtenção de constância da massa. Os 30 kg da EAF passaram por um processo de moagem a seco no moinho de bolas metálicas da marca MATOLI, modelo 070M016, onde foi empregada a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg do material a ser moído. A quantidade de bolas foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, visto que as bolas menores possuem maior potencial de moagem.



Figura 5: Planta Industrial da Siderúrgica Sinobras.
Fonte: Google Earth, imagens 2017.

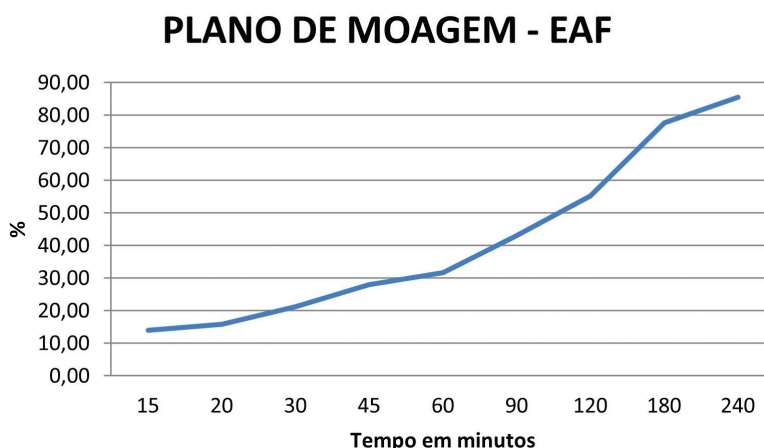


Figura 6: Porcentagem de material passante na peneira 0,075mm × tempo em minutos de moagem.

Os tempos de moagem foram pré-estabelecidos em 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 e 240 minutos, buscando identificar, o tempo suficiente para obter a granulometria desejada, isto é, diâmetro igual ou menor ao do cimento. Assim obteve-se uma curva de moagem, mostrando a eficiência do processo, em que apresentamos, conforme o Figura 6, a porcentagem de material passante na peneira 0,075mm versus o tempo necessário de moagem.

Para trabalho o tempo de moagem fora estabelecido em 180 minutos (3 horas), com esse tempo conseguiu-se uma eficiência de moagem de 77,67% suficiente para obter a granulometria desejada, isto é, diâmetro igual ou menor que o do cimento, conforme apresentado na Figura 7. Em 240 minutos (4 horas) de moagem, a eficiência chegou em 85,50%, mas não fora utilizado neste trabalho, pois se utilizou o tempo para o moinho esfriar e assim não comprometer o equipamento.

A composição química, assim como a estrutura física das Escórias de Alto-Forno, pode variar de acordo com os constituintes e proporções dos minerais utilizados, fundentes e outras matérias primas, estado de pureza do material a ser fabricada, eficiência de operação do forno, métodos de resfriamento e das diferenças nos processos de fabricação. Desta forma, do ponto de vista químico, este rejeito industrial tem uma composição que

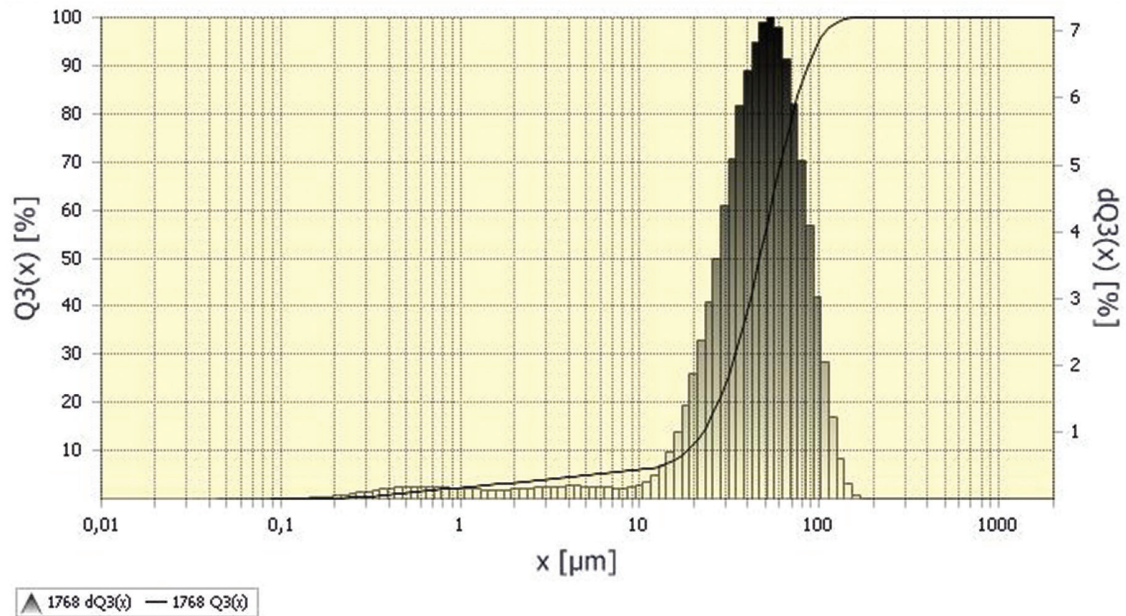


Figura 7: Distribuição granulométrica da EAF, resfriada instantaneamente.

Tabela 2: Composição química das Escórias de Alto-Forno, fornecido pela SINOBRAS.

DATA	HORA	TURMA	TEMP °C	% Si do GUSA	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO
14/dez	16:44	B	1375	0,09	26,96	19,70	0,76	7,53	2,36
SiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	IB	FECH. QUATERN.	FECH. ANÁLISE	VISCOSIDADE (poise)
37,35	2,48	0,12	0,08	2,48	0,79	0,72	91,54	100,61	1,356,91

Fonte: SINOBRAS.

requer atenção especial dos metalurgistas, haja vista que desvios nos processos podem causar demandas significativas de energia e custos adicionais [2].

Para a caracterização química da amostra da Escória de Alto Forno, resfriada instantaneamente foi obtido resultado diretamente fornecido pela empresa SINOBRAS, conforme Tabela 2.

2.2. Método: desenvolvimento das argamassas

As argamassas foram desenvolvidas utilizando areia normal de acordo [5]. Onde:

- Os corpos de prova foram elaborados com traço constante 1:3 (cimento: areia) e com relação água/cimento de 0,35, segundo [6]; e
- Substituição ao clínquer da Escória de Alto Forno, resfriada instantaneamente nos percentuais de 0, 5, 15, 30, 50, e 75%.

As moldagens foram realizadas no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA. Para as argamassas serão utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentadas na Tabela 3.

Para atender a necessidade do volume substituído nos corpos de prova e, assim, calcular o consumo de materiais de cada família, ver Tabela 4 empregada pela equação 1.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + a/c} \quad (1)$$

Tabela 3: Procedimento experimental.

AMOSTRA	QUANTIDADES				
	% DE SUBSTITUIÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO			MÓDULO DE ELASTICIDADE
		3 dias	7 dias	28 dias	
CP – REF	0	5	5	5	2
A.5	5%	5	5	5	2
A.15	15%	5	5	5	2
A.30	30%	5	5	5	2
A.50	50%	5	5	5	2
A.75	75%	5	5	5	2
	Total Parcial	30	30	30	24
	Total				114

A = Argamassa.

Tabela 4: Quantidade de materiais para uso de substituição da EAF.

MATERIAIS (g)	QUANTIDADE DE MATERIAIS					
	CP – REF	SUBSTITUIÇÃO 5%	SUBSTITUIÇÃO 15%	SUBSTITUIÇÃO 30%	SUBSTITUIÇÃO 50%	SUBSTITUIÇÃO 75%
Clínquer	624,00	592,80	530,40	436,80	312,00	156,00
Gesso	31,20	31,20	31,20	31,20	31,20	31,20
EAF	0	33,87	101,61	203,23	338,71	508,07
Areia 16	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00
Areia 30	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00
Areia 50	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00
Areia 100	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00	468,00
Água	300	300	300	300	300	300

Onde:

C = Consumo de cimento por metro cúbico de argamassa;

a = Quantidade de areia no traço em massa para 1 kg de cimento;

ρ_c = Massa específica do cimento (g/cm³);

ρ_a = Massa específica da areia (g/cm³);

a/c = Relação água/cimento.

Para montagem da Tabela 4, foram identificados às massas específicas do cimento e da Escória de Alto Forno. Para a quantidade da escória foi acrescida massa para obtenção do mesmo volume de clínquer subtraído, mantendo a relação volumétrica, sendo multiplicado pelo fator de compensação de 1,0856 para EAF.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação do tempo de pega da EAF

Análogo à determinação da pasta de consistência normal ao cimento Portland, segundo a [7] realizou-se ensaio para determinação da quantidade de água para uma amostra de 500,0 ($\pm 0,5$ g) de Escória de Alto Forno resfriada instantaneamente. Após várias tentativas para determinação da pasta de consistência normal, iniciou-se o ensaio de início e fim de pega, segundo a [8], para uma quantidade de massa água de 120g, conforme Figura 8.

Para mesma quantidade de massa de água utilizada na passa com cimento e clínquer puro, em testes realizados no laboratório a massa de água apresentou-se superior a quantidade necessária para formação da pasta com EAF. A pasta com EAF apresentou uma diminuição de seu volume com o passar do tempo.

Neste ensaio identificamos que o início de pega, quando a agulha de Vicat penetrou na pasta até uma distância de 3mm da placa de base, foi de 3 horas e 41 minutos, contados o intervalo de tempo transcorrido desde a adição da água à EAF.

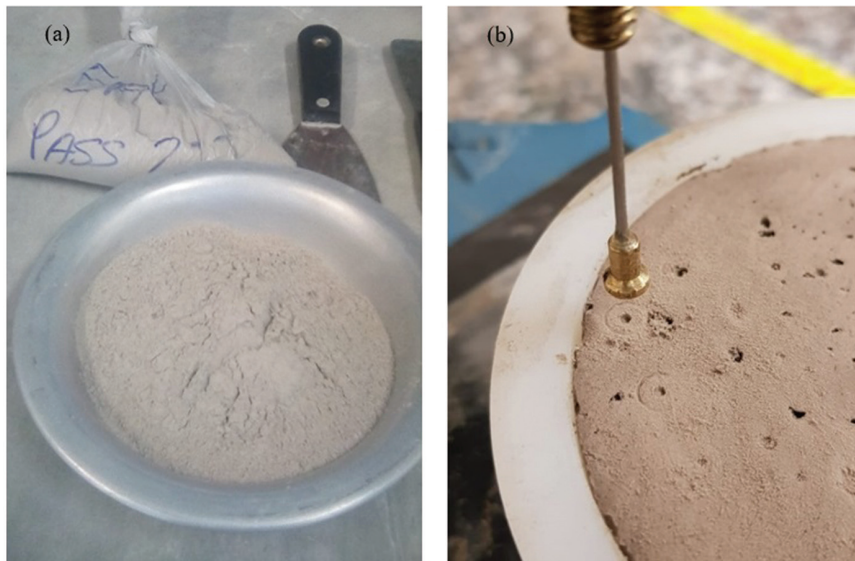


Figura 8: Ensaio de determinação de início e fim de pega com EAF (a) massa de EAF 500,0 ($\pm 0,5$ g) (b) acessório anular com marca no corpo-de-prova.

Para o fim de pega, conforme a Figura 8 (b), mesmo após 48 horas de ensaio não conseguimos identificar o tempo de fim de pega, ainda nessas condições podemos afirmar que ela não apresenta nenhuma resistência, sendo facilmente riscada/danificada.

3.2. Análises em microscopia eletrônica de varredura

As análises do MEV (microscópio eletrônico de varredura) e EDS (espectrometria de energia dispersiva de raios x) permitiram observar a morfologia dos materiais utilizados nos ensaios experimentais da produção da argamassa, além de uma identificação dos componentes químicos presentes nas amostras. Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação para visualizar a imagem como um todo. Seguidamente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação. As imagens apresentadas nas Figuras 9 e 10, foram realizadas no equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU da TESCAN, no laboratório do Instituto Federal do Pará, campus Belém.

Para especificar os elementos químicos constituintes utilizou-se do recurso de espectrometria de energia dispersiva de raio x (EDS), pelo SISTEMA DE MICROANÁLISE - EDS, modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV, marca Oxford, também, no laboratório do Instituto Federal do Pará, campus Belém.

Análise feita de EDS, com resolução de 2kx apresentada na Figura 11, com sua composição química na Figura 12.

O espectro identificou uma concentração de Cálcio, Silício em maior quantidade e Ferro, Alumínio e Magnésio em menor quantidade, além de outros elementos químicos que se apresentam para o fechamento dos 100% da amostra, para essa análise foi utilizado o método de Rietveld.

As Figuras 13 e 14 mostram a morfologia da EAF e do gesso respectivamente, com uma varredura no nível de observação e o zoom dado na respectiva janela apontada.

Análise elementar através de EDS, com resolução de 1kx apresentada na Figura 14, com sua composição química na Figura 15.

O espectro identificou uma concentração de Silício e Cálcio em maior quantidade e Alumínio, Ferro e Magnésio em menor quantidade, além de outros elementos químicos que se apresentam para o fechamento da amostra.

A composição química da EAF é bem homogênea o que se ratificou pela difração de raios-X e pelo EDS. Registrando-se percentuais significativos de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), que representam 91,54% da composição desse material, muito próximo do apresentado nas bibliografias e com perda ao fogo de 0,41%. Apresentando-se, também, como uma escória ácida, produzida por carvão mineral.

Por meio da caracterização identificou-se que a soma dos teores médios de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 encontrados na amostra de EAF foi de 57,05%, resultando em um valor baixo para que um determinado material seja considerado pozolânico.

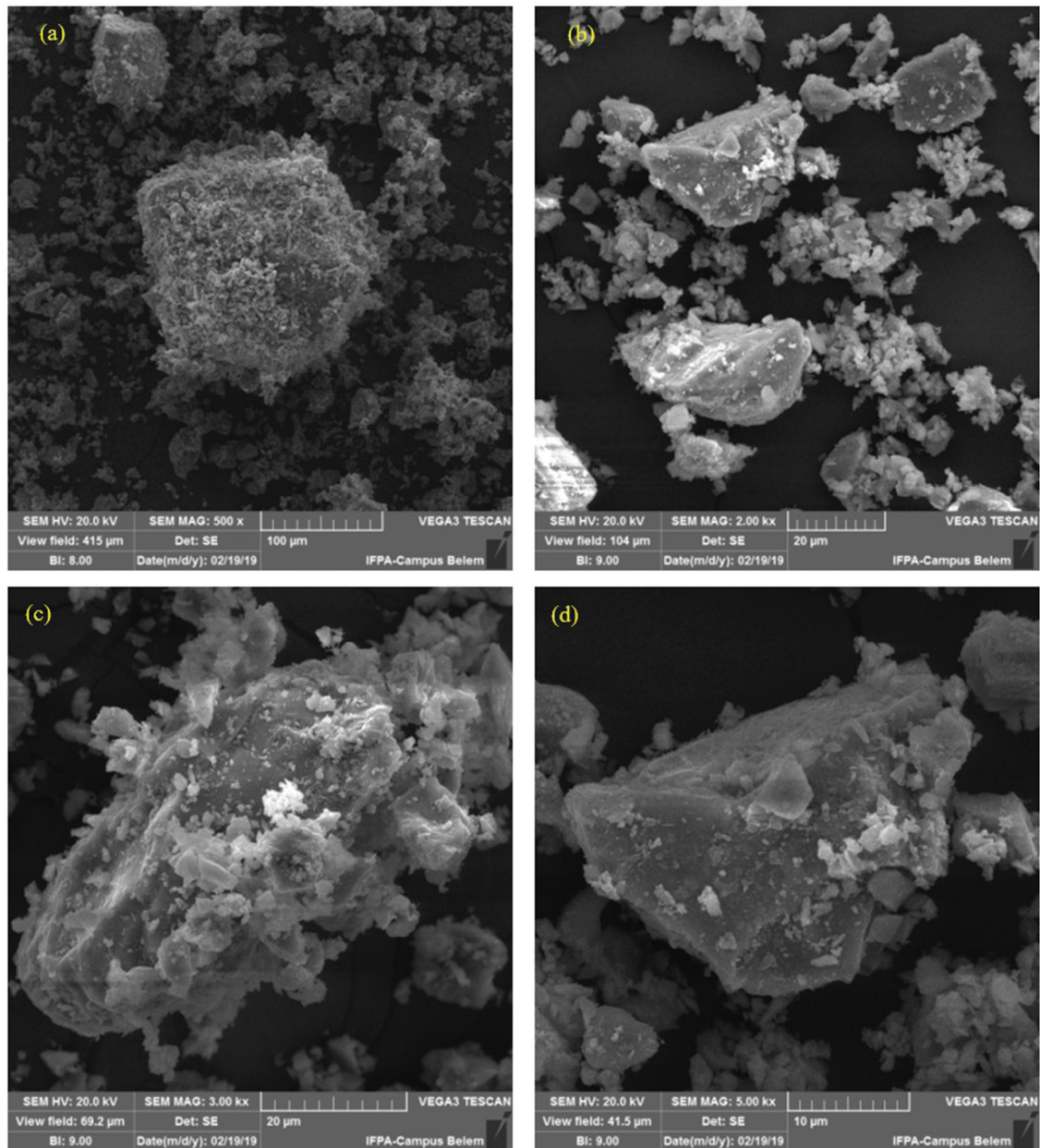


Figura 9: (a) Cristais de alita e belita no interior 20kV/ 500×, (b) seleção de cristais de alita e belita 20kV/2kx, (c) detalhes do cristal de alita com uma cavidade, provocado pela bola do moinho (d) detalhes da belita.

O gesso por apresentar uma clivagem perfeita, característica morfológica de lamelas, conforme podemos identificar na Figura 16, causou uma grande dificuldade de retirada do equipamento, por ficar grudado da borda e de difícil separação, fato, também, que dificultou o seu peneiramento, sendo adotados tempos de moagem e análise granulométrica a laser para caracterizar o tempo necessário para atender o material passante na peneira de 0,075mm.

Análise através de EDS, com resolução de 1kx apresentada na Figura 17, com sua composição química na Figura 18.

Para o gesso o espectro de EDS identificou uma concentração de Enxofre, Cálcio em maior quantidade, além de outros elementos químicos que se apresentam para o fechamento dos 100% da amostra.

3.3. Análises dos difratogramas

A difração de raios X permite a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos existentes no material. É um ensaio de caracterização mineralógica que analisa qualitativamente os minerais presentes. O resultado se apresenta em um gráfico que indica os picos característicos de cada espécie mineral. O

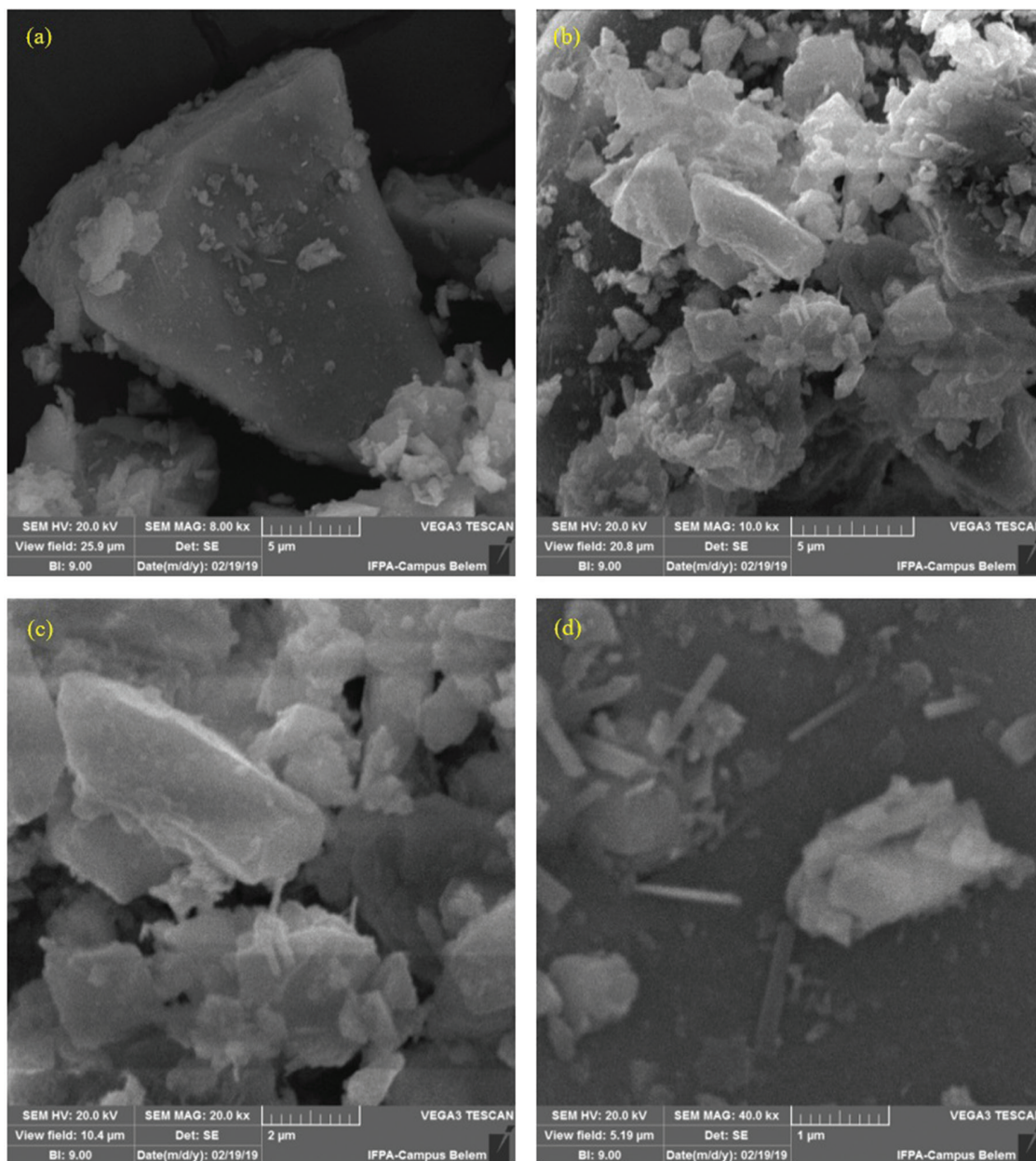


Figura 10: (a) Cristal de alita 20kV/8kx, (b) seleção de cristais de belita 20kV/20kx, (c) detalhes do cristal de belita, (d) fase intersticial 40kx (fibrilas de C-S-H).

equipamento do ensaio lança um raio laser na amostra que, dependendo do tipo de cristal de cada mineral, devolve o raio a um determinado ângulo. Como cada mineral apresenta composição cristalográfica diferente, cada ângulo caracteriza um tipo de mineral. Os picos caracterizam, qualitativamente, os principais minerais presentes [1].

A caracterização mineralógica dos materiais, foram obtidos através da Difração de Raios X (DRX), para determinação da estrutura cristalina, conduzida em equipamento marca BRUKER – modelo D2 Phaser, com anodo de radiação cobre (Cu) $K\alpha$, λ 1,54184 Å, com detector Lynxeye (1D mode). Com voltagem de 30 kV e corrente de 10mA, uma potência de 300w. Fazendo uma varredura 5 a 75° Θ -2 Θ , há um passo de 0,02 e tempo de passo de 0,2 pelo método do pó, realizados no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações – LAMIGA do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

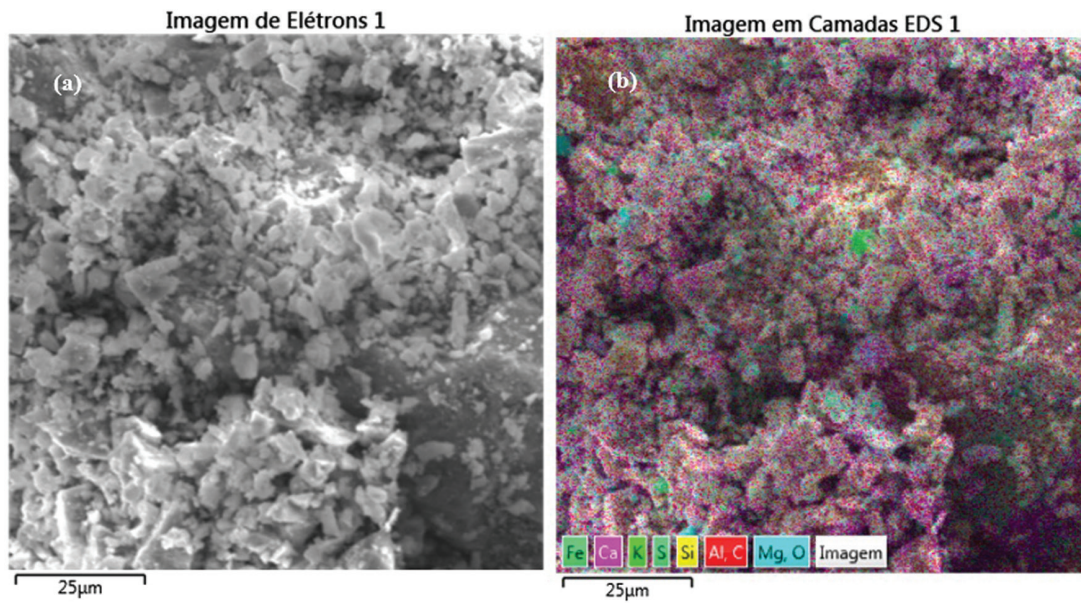


Figura 11: (a) Imagens de elétrons do clínquer, (b) imagens EDS em camadas do clínquer.

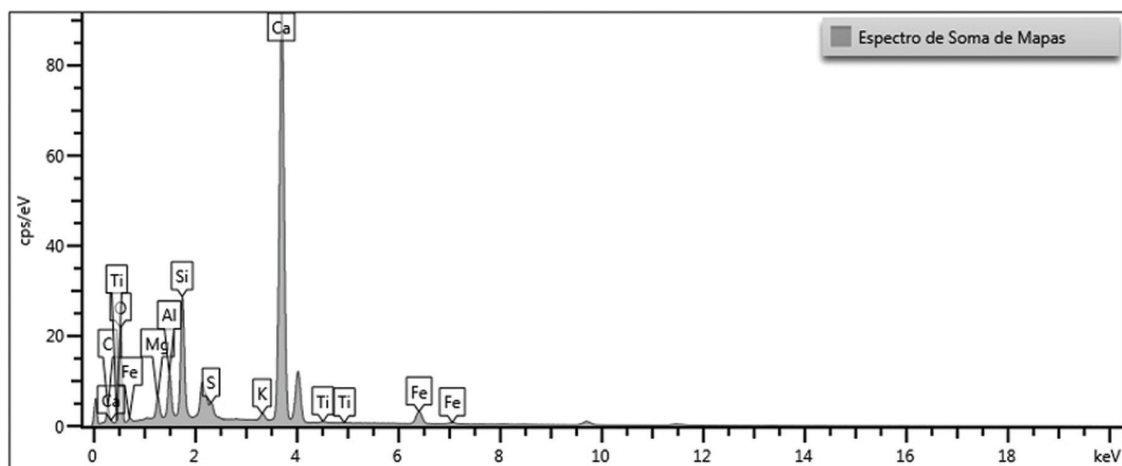


Figura 12: Espectro do clínquer, da imagem EDS apresentado na Figura 11.

A Figura 19 apresenta o difratograma do clínquer, com principais minerais encontrados, Óxido de silício e cálcio, sendo 85% da amostra, no sistema cristalino monoclinico, com densidade de 3,15 g/cm³, característica do cimento Portland e o Óxido de cálcio, alumínio e ferro, com 15%, no sistema cristalino ortorrômbico.

O difratograma da EAF resfriada instantaneamente, apresentada na Figura 20, caracteriza-se por uma baixa contagem, eixo y, sem picos, o que nos apresenta um material sem presença de estrutura cristalina. A Figura 21, apresenta o difratograma do gesso, Sulfato de cálcio hidratado, composição química Ca(SO₄)(H₂O)₂.

A difração de raios-X, configurou a EAF como uma estrutura amorfa e o clínquer e o gesso como uma estrutura cristalina.

3.4. Argamassas produzidas com substituição de Escória de Alto Forno (EAF) – resfriada instantaneamente

3.4.1. Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão de corpos de prova e módulo de elasticidade foram baseados nas recomendações das normas [6] e [9], respectivamente, com ruptura dos corpos de prova à compressão aos 3, 7 e 28

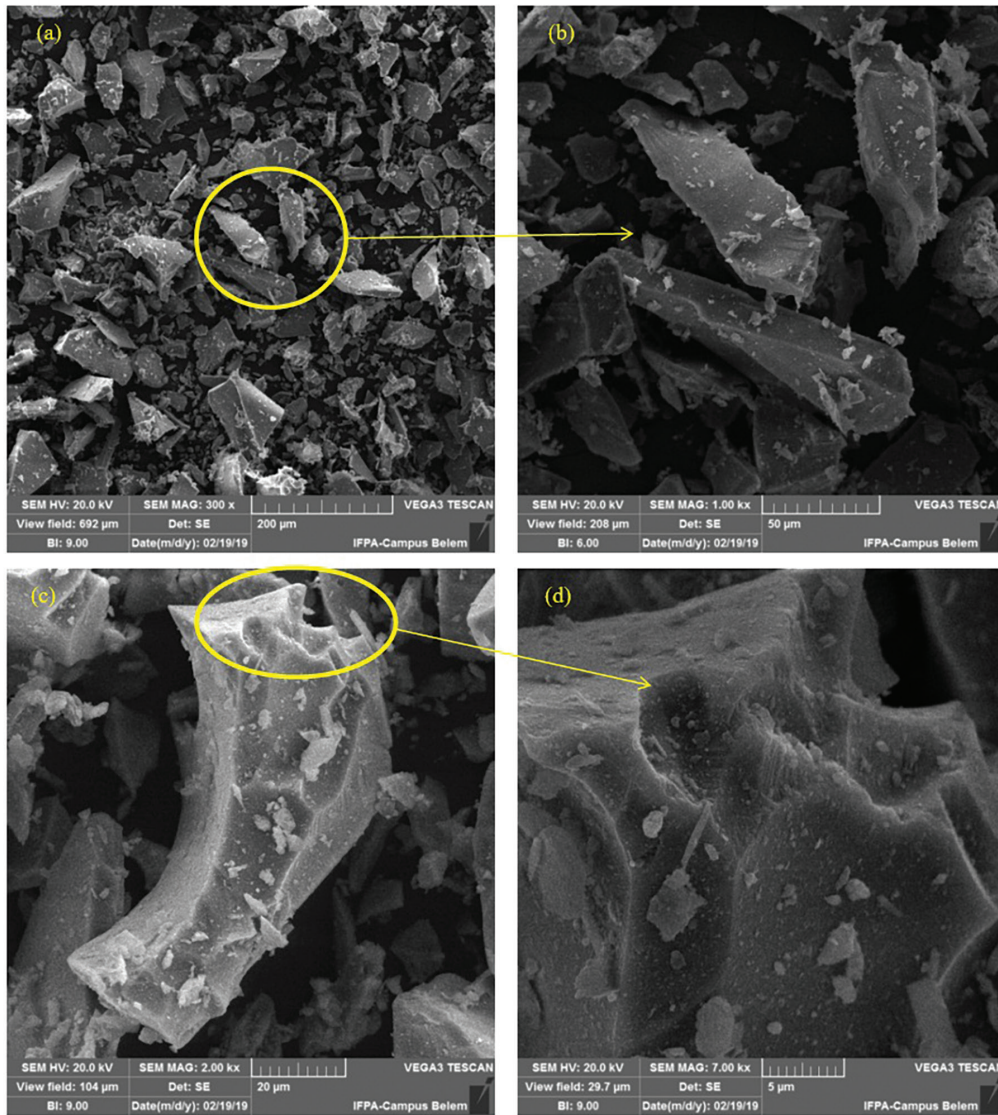


Figura 13: Morfologia da EAF em 20kV, onde os pontos mais claros são impurezas encontradas do processo de moagem ou do pátio de estocagem (a) zoom de 300×, (b) zoom de 1kx, (c) zoom de 2kx e, (d) zoom de 7kx.

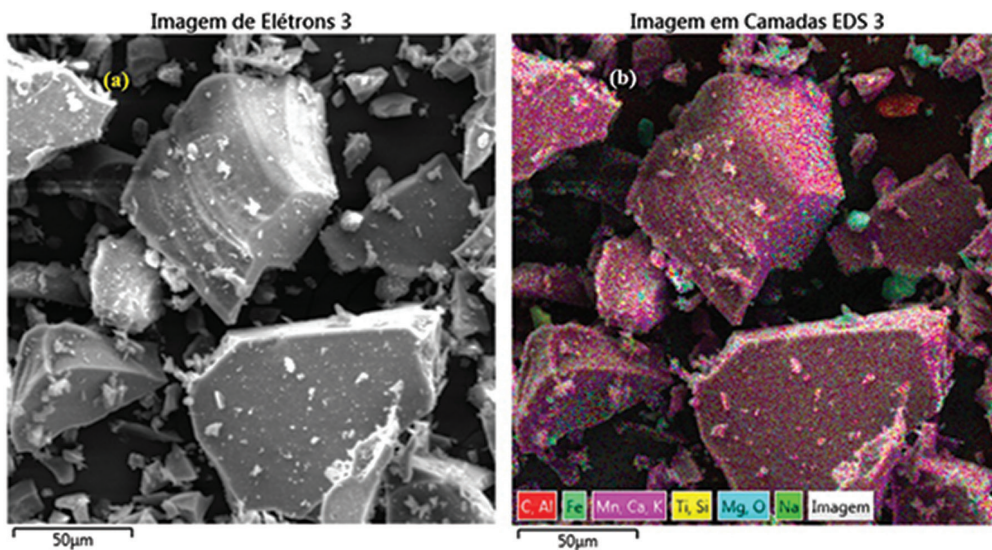


Figura 14: (a) Imagens de elétrons da EAF, (b) imagens EDS em camadas da EAF.

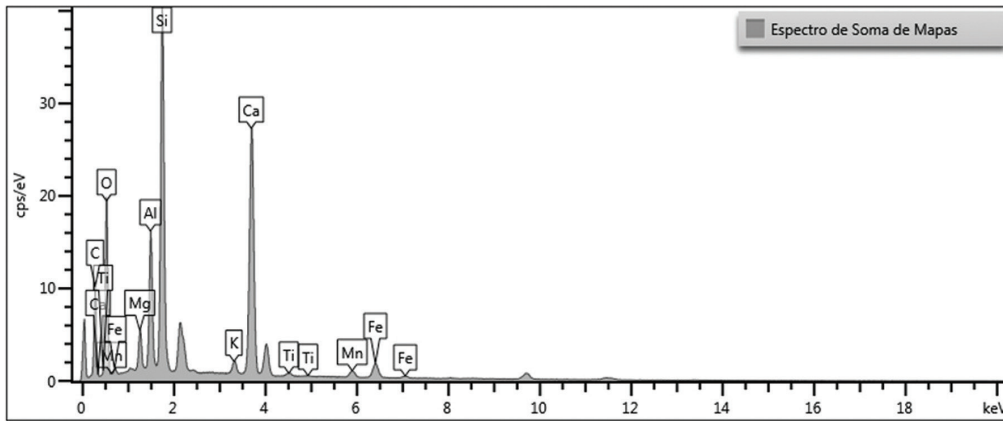


Figura 15: Espectro da EAF, da imagem EDS apresentado na Figura 14.

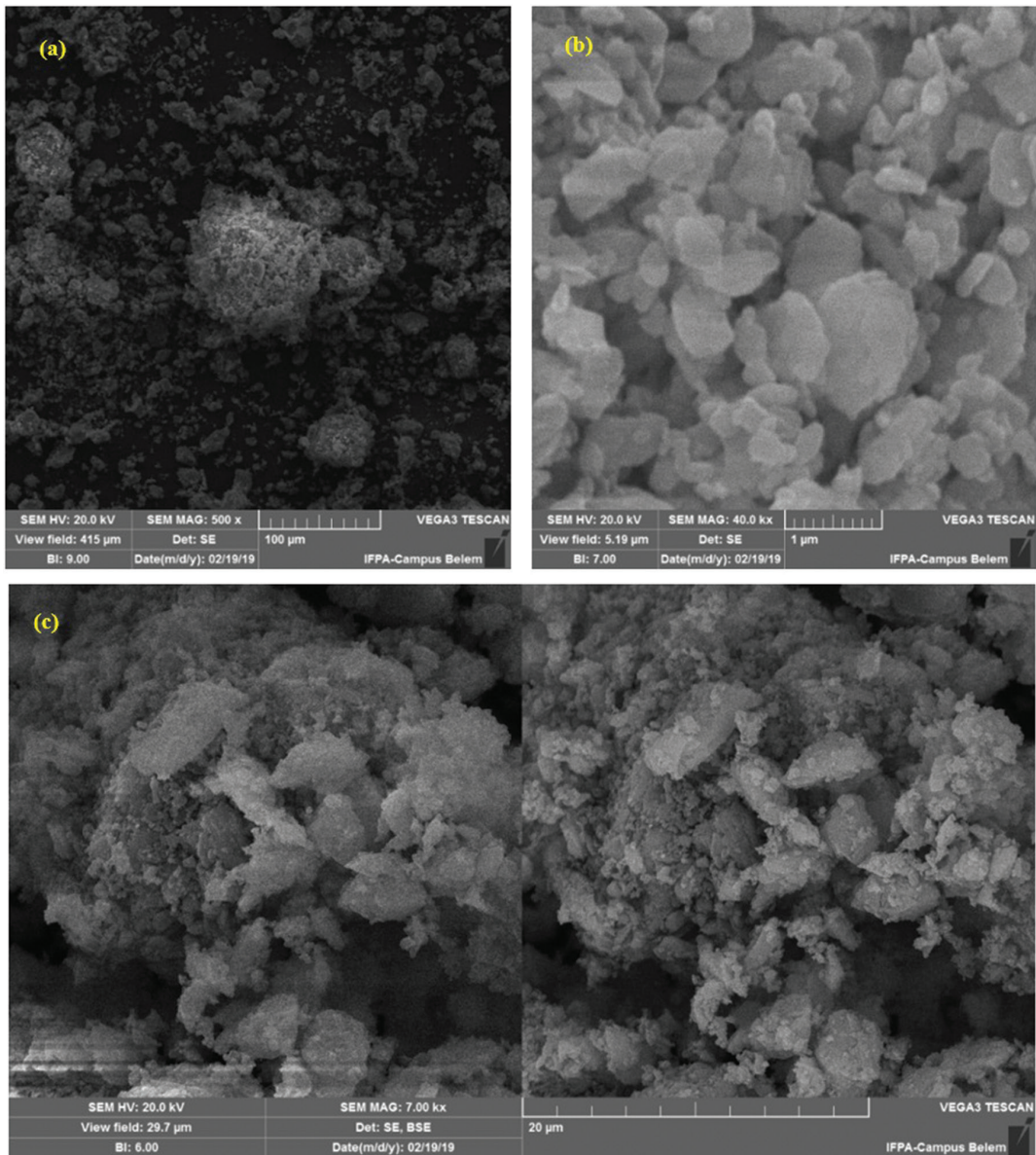


Figura 16: Morfologia do Gesso em 20kV, caracterizadas por camadas interestratificadas, clivagem perfeita numa direção, permitindo obter lâminas delgadas (a) zoom de 500x, (b) zoom de 40kx, (c) zoom de 7kx, com tratamento BSE para nitidez.

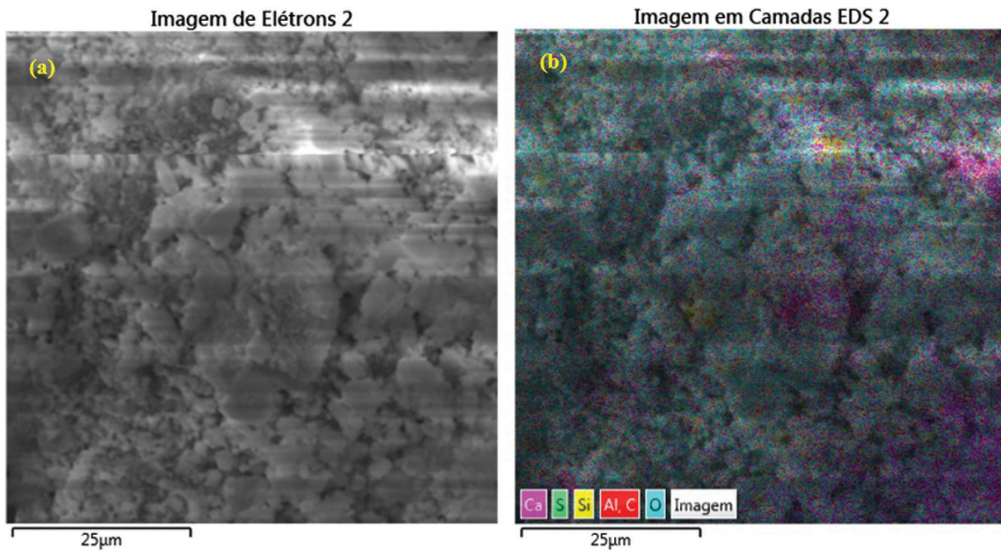


Figura 17: (a) Imagens de elétrons do gesso, (b) imagens EDS em camadas do gesso.

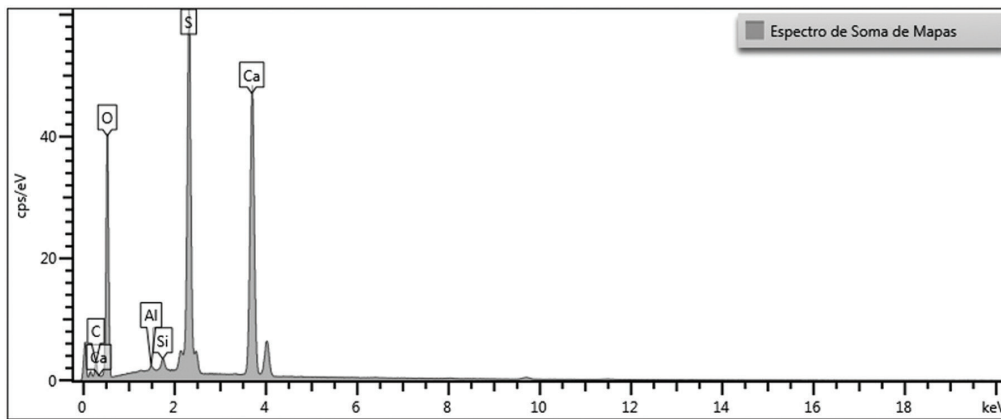


Figura 18: Espectro da EAF, da imagem EDS apresentado na Figura 17.

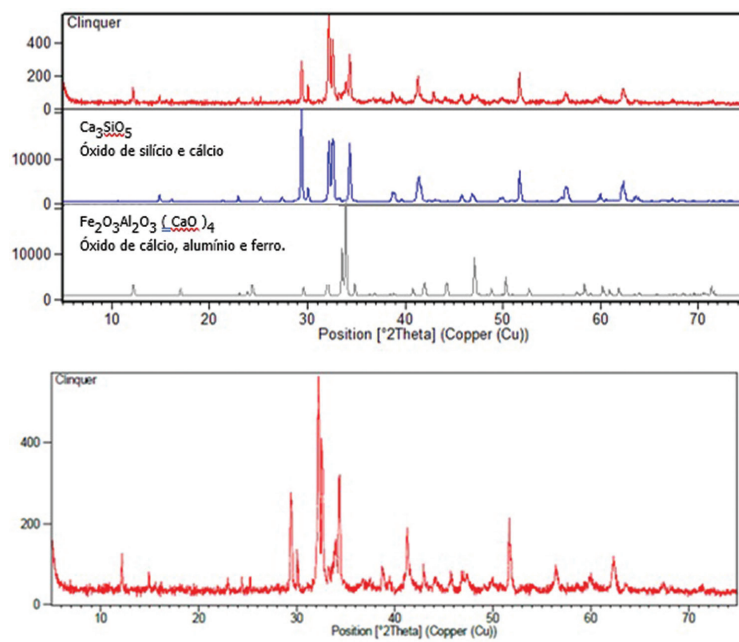


Figura 19: Espectros de Raio X do clínquer com seus minerais.

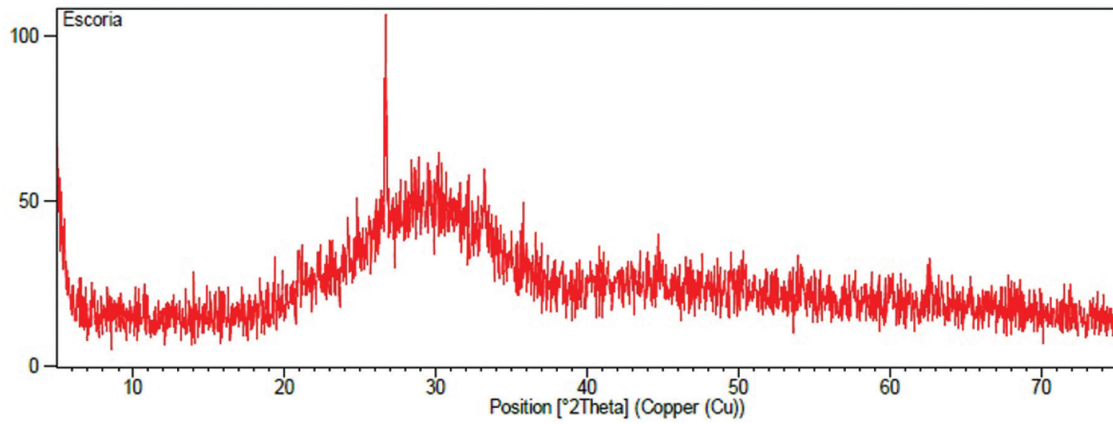


Figura 20: Espectros de Raio X da Escórias de Alto Forno, resfriada instantaneamente.

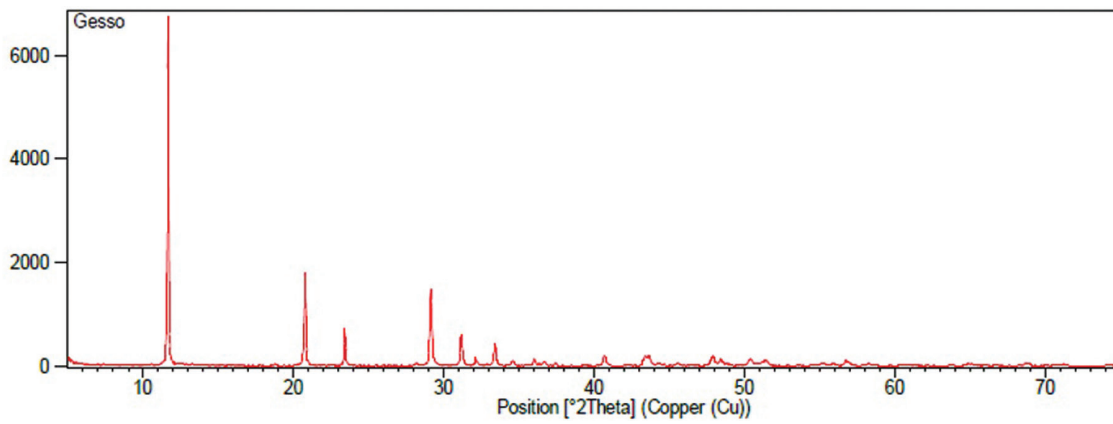


Figura 21: Espectros de raios x do gesso, sulfato de cálcio hidratado, $\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$.

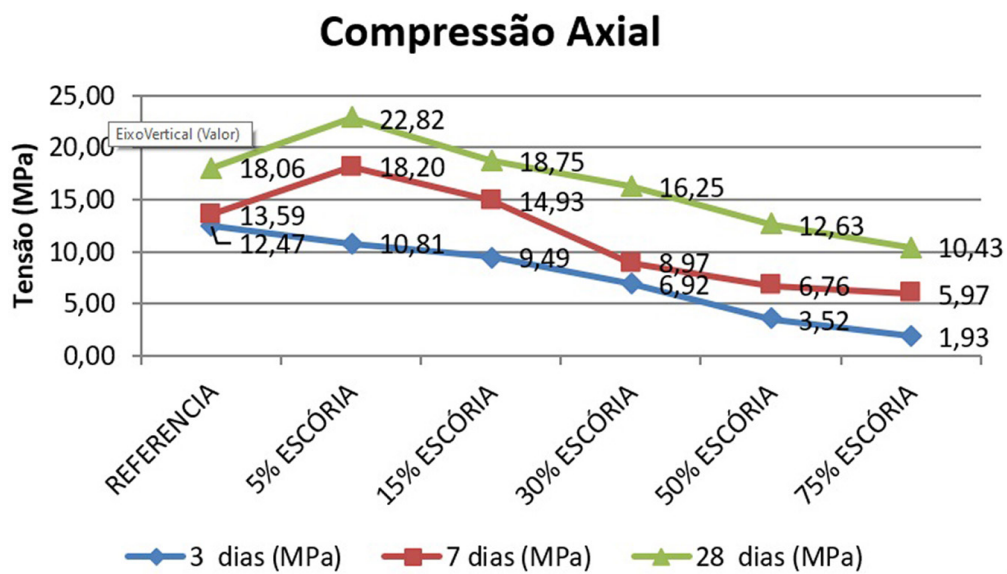


Figura 22: Gráfico com a resistência a compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.

Módulo de Elasticidade

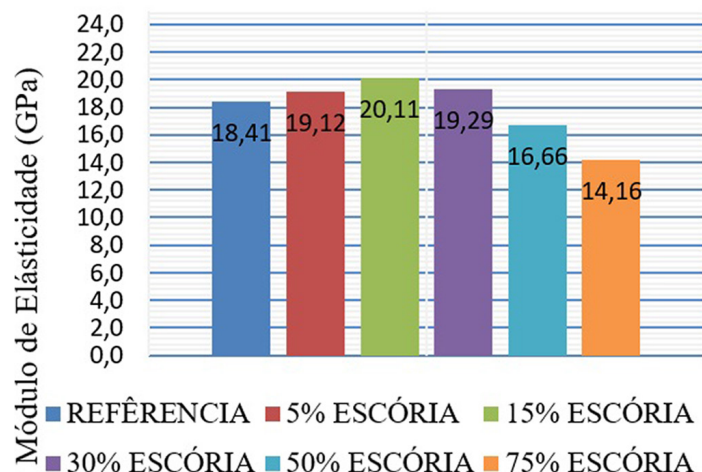


Figura 23: Gráfico do módulo de elasticidade aos 28 dias.

dias, e módulo de elasticidade aos 28 dias de idade realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA.

Os resultados da resistência à compressão para 3, 7 e 28 dias estão apresentados nas Figura 22.

Na investigação da resistência, de acordo com a argamassa de referência o corpo de prova apresentou uma resistência, com 3 dias de 69,05%, com 7 dias 75,25%, do valor da resistência final, característica de alta resistência inicial, comprovado pela alta presença de C_3S : 73,84% (Alita).

De acordo com o ensaio de compressão axial, na avaliação da substituição dos teores (5, 15, 30, 50 e 75%) do clínquer pela EAF, observou-se que a substituição do cimento pela Escória de Alto Forno resfriada instantaneamente incrementou a resistência à compressão nos teores de 5% e 15%, para os rompimentos dos corpos de prova nas idades de 7 e 28 dias em relação a argamassa de referência.

Na substituição de 5% do clínquer pela EAF, apresentou um aumento de resistência de 33,92% aos 7 dias e 26,36% aos 28 dias em relação a argamassa de referência.

Na substituição de 15% do clínquer pela EAF, apresentou um aumento de resistência de 9,86% aos 7 dias e 3,82% aos 28 dias em relação a argamassa de referência.

3.4.2. Avaliação do módulo de elasticidade

Na avaliação do módulo de elasticidade, realizados a partir de corpos de prova de argamassa 10×20 cm observou-se que não houve uma variação significativa nos resultados das substituições da EAF, resfriada instantaneamente, quando comparados à argamassa de referência. Os resultados dos módulos de elasticidade estão apresentados na Figura 23.

Na avaliação da resistência à deformação do material ou da medida de rigidez (módulo de elasticidade), observou-se que para as substituições de 5, 15 e 30%, tem-se rigidez maior em 3,85% para substituição em 5%, 9,23% para substituição em 15% e 4,78% para substituição de 30%.

Para os teores de 50 e 75% de substituição de clínquer, em relação ao módulo de elasticidade (medida de rigidez), obteve-se uma queda, sendo para 50%, 9,50%, mas uma rigidez da ordem de 90% da referência e para a substituição de 75% uma queda de 23,08%.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados e em concordância com que descreve as literaturas, pode-se concluir que a argamassa produzida com o rejeito da indústria siderúrgica, a EAF resfriada instantaneamente, obteve resultados tecnicamente satisfatórios, sugerindo seu uso como subproduto em larga escala em busca da diminuição da emissão do CO_2 , principal gás do efeito poluidor, na fabricação do cimento. Portanto viabilizando uma alternativa exequível para o combate ao efeito estufa, contribuindo para soluções mais limpas, menos degradantes ao meio ambiente.

Sobre a caracterização dos materiais, tamanho e forma das partículas.

- A moagem reduziu sensivelmente o volume do resíduo e dos materiais utilizados no ensaio, tornando-os de fácil manejo e com adequabilidade para utilização como substituição na composição do cimento.
- Para cada material tem uma curva específica de moagem, característica da dureza do material. Para o clínquer e a EAF, fora adotado um tempo mínimo de 3 horas (180 minutos), não sendo suficiente para completa moagem do material passante na peneira 0,075mm, mas por segurança do uso do equipamento. Para o gesso o tempo de moagem foi de 30 minutos, por apresentar uma dureza baixa.
- Com as massas específicas dos materiais, clínquer 3,17 kg/dm³, escória 2,92 kg/dm³, gesso 1,41 kg/dm³, observou-se que os materiais utilizados como aglomerantes apresentam valores próximos ao do cimento de 3,15 kg/dm³.

Destaca-se concluir que apesar das resistências mecânicas nas argamassas ensaiadas, a de referência e todas as substituições, em 28 dias não condizer com nenhuma resistência de norma [10] de pelo menos 25MPa, justifica-se pelas imagens do MEV em que o clínquer antes da mistura já apresentava fase intersticial, conforme Figura 10(c), ou seja, cristais de hidratação início de resistência do cimento, o que após sua mistura foram quebrados.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] RESENDE, D.S., “*Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- [2] ALMEIDA, G.M., “*Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto*”, Tese de M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- [3] POUHEY, M.T.F., “*Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, ABNT, 2001.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7214: Areia Normal para Ensaio de Cimento – Especificação*. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão*. Rio de Janeiro, ABNT, 1997.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 43: Cimento Portland - Determinação da Pasta de Consistência Normal*. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR NM 65: Cimento Portland - Determinação do Tempo de Pega*. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 8522. Concreto - Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão*. Rio de Janeiro, ABNT, 2008.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.