



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

LYGIA MARIA POLICARPIO FERREIRA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E CIMENTO PORTLAND COM
ADIÇÃO DE PLASTIFICANTE SINTÉTICO E PLASTIFICANTE NATURAL
(ARGILA) PARA FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO**

MARABÁ
2011

LYGIA MARIA POLICARPIO FERREIRA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E CIMENTO PORTLAND COM
ADIÇÃO DE PLASTIFICANTE SINTÉTICO E PLATIFICANTE NATURAL
(ARGILA) PARA FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do título de graduação em Engenharia de Materiais, orientado pelo Prof. Dr. Elias Fagury Neto.

MARABÁ
2011

LYGIA MARIA POLICARPIO FERREIRA

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO E CIMENTO PORTLAND COM
ADIÇÃO DE PLASTIFICANTE SINTÉTICO E PLASTIFICANTE NATURAL
(ARGILA) PARA FABRICAÇÃO DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do título de graduação em Engenharia de Materiais, orientado pelo Prof. Dr. Elias Fagury

Defendido e aprovado em: 22/06/11
Banca examinadora:

Prof. Dr. Elias Fagury Neto – Orientador
Faculdade de Engenharia de Materiais

Prof. Dra. Rosane Maria Pessoa Betâncio Oliveira
Faculdade de Engenharia de Materiais

Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo
Faculdade de Engenharia de Materiais

Dedico este trabalho aos meus pais Adelmir e Elecy, por terem me apoiado incondicionalmente durante toda minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Adelmir e Elecy e meus irmãos Frank e Francleisson, que estiveram sempre por perto nos momentos difíceis.

Ao Everton, pelo companheirismo, paciência e dedicação e por estar sempre comigo.

A SINOBRAS, em especial aos colaboradores do Lingotamento Contínuo, pela oportunidade que me foi dada, contribuindo para o meu aprimoramento técnico e crescimento profissional.

Ao meu professor e orientador deste trabalho, Dr. Elias Fagury, por ter me ensinado, me incentivado, e me mostrado o quanto é importante buscar novas fontes de pesquisa e compreensão no âmbito científico.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia de Materiais, por transmitirem além do conhecimento disciplinar, o conhecimento de mundo, partilhando suas experiências e suas conquistas, nos tornando entendedores dos problemas e de como solucioná-los. A todos os Mestres e Doutores que fizeram da FEMAT uma Faculdade de qualidade, meu eterno agradecimento.

A turma de engenharia de materiais do ano 2006, principalmente Ana Paula, Edno, Elis, Rudimylla, Stephannye e Talita e a todos que sempre torceram por mim e que me ajudaram a concluir com êxito mais uma etapa da minha vida.

“Pessoas inteligentes resolvem problemas, pessoas sábias os evitam”.

Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho foi utilizada escória siderúrgica e cimento Portland CP II F-32 para fabricação de solo cimento em 8 diferentes formulações. Para fins de análise de propriedades físicas e mecânicas, foram formuladas composições com percentuais equivalentes a 97, 95, 93 e 90% de escoria de alto forno com acréscimo de cimento. Uma vez que a escória de alto forno é formada durante um processo lento de resfriamento, seus componentes formam diferentes fases cristalinas que não os permite adquirir propriedades de ligante hidráulico, fez-se necessário testar dois plastificantes: Plastificante de origem sintética e plastificante de origem natural (argila). Foram avaliados parâmetros como composição química da escória, absorção de água e densidade aparente para formulações com tempo de cura de 21 e 28 dias e resistência à compressão longitudinal para amostras com idade de cura de 15, 21, 28 e 40 dias.

Palavras-chave: Escória siderúrgica; reutilização; solo-cimento.

ABSTRACT

In this work we used steel slag and Portland cement CP II F-32 for the manufacture of soil cement in eight different formulations. For purposes of analysis of physical and mechanical properties it was made specimens with compositions equivalent to 97, 95, 93 and 90% of cement additions in granulated blast furnace slag. Since the blast furnace slag is formed during a slow cooling process, its components form different crystalline phases that do not allow them to acquire properties of hydraulic binders, it was necessary to test two plasticizers, plasticizer of synthetic origin and Clay, plasticizer natural origin. Parameters such as chemical composition of raw material, water absorption and apparent density for samples with curing time of 21 and 28 days and compressive strength for samples aged longitudinal healing 15, 21, 28 and 40 days.

Keywords: Blast furnace slag; reuse; soil cement.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA VISÃO AMBIENTAL.....	16
3.2. OBTENÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO.....	18
3.2.1. Produção do Aço.....	18
3.2.2. Fabricação do Ferro Gusa e formação da escória.....	19
3.3. A ESCÓRIA DE ALTO FORNO.....	22
3.3.1 Estabilidade dos óxidos presentes nas escórias de alto forno.....	23
3.3.2. Atuais aplicações da escória siderúrgica.....	24
3.3.2.1. Uso na Pavimentação.....	25
3.3.2.2. Uso como Agregado em Concretos.....	25
3.3.2.3. Uso na Agricultura.....	26
3.3.2.4. Uso na Indústria Cimenteira.....	26
3.4. CIMENTO.....	27
3.4.1 Cimento Portland.....	28
3.3.1.1. CP II F-32 - Cimento Portland composto com Fíler.....	28
3.5. PLASTIFICANTES.....	29
3.5.1. Conplast SP430 (Aditivo superplastificante).....	30
3.6. ARGILA.....	30
3.6.1. Tipos de Argila.....	31
3.6.2. Propriedades das Argilas.....	32
3.7. SOLO CIMENTO.....	34
3.7.1. Aplicações do Solo Cimento.....	35
3.7.2. Vantagens da utilização do solo cimento.....	35
3.7.3. Desvantagens da utilização do solo cimento.....	36
4. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	37
4.1. MATERIAIS.....	37
4.2. METODOLOGIA.....	37
4.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	38
4.3.1. Moagem da EAF.....	39
4.3.2. Decantação da EAF.....	40
4.3.3. Secagem da EAF.....	40
4.3.4. Separação Granulométrica da EAF.....	40
4.3.5. Caracterização Química da EAF: Fluorescência de Raios X (FRX)....	41

4.3.6. Preparação dos Corpos de Prova.....	41
4.3.7. Propriedades Tecnológicas.....	41
4.3.7.1. Determinação da densidade aparente (DA).....	42
4.3.7.2. Determinação da Absorção de água (DA).....	42
4.3.8. Caracterização Mecânica: Ensaio de compressão longitudinal.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1. RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA.....	44
5.2. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS.....	45
5.2.1. Resultado da Absorção de Água.....	45
5.2.2. Resultado da Densidade Aparente.....	47
5.3. RESULTADO DO ENSAIO MECÂNICO.....	49
6. CONCLUSÕES.....	51
7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Geração de Resíduos por Tipo, Destinação do Agregado Siderúrgico e Principais Utilizações do Agregado Siderúrgico (2007), retirado do Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS [6].....	16
Figura 2 -	Fluxograma da Produção do aço em Aciaria Elétrica.....	18
Figura 3 -	Fluxograma da produção do Ferro Gusa.....	20
Figura 4 -	(A) Gusa Sólido e (B) Escória de Alto forno.....	21
Figura 5 -	(A) Escória granulada e (B) Escória Moída.....	22
Figura 6 -	Argila na natureza.....	30
Figura 7 -	Percentuais das formulações propostas.....	34
Figura 8 -	Fluxograma da metodologia realizada.....	39
Figura 9 -	Ensaio de Compressão longitudinal.....	43
Figura 10 -	Resultados da Absorção de água das formulações com Plastificante sintético (Conplast).....	45
Figura 11 -	Resultados da Absorção de água das formulações com plastificante natural (argila).....	46
Figura 12 -	Resultados da densidade aparente das formulações com plastificante sintético (Conplast).....	48
Figura 13 -	Resultados da densidade aparente das formulações com plastificante natural (argila).....	48
Figura 14 -	Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal - Imagem (A) corpo de prova com 21 dias de cura; Imagem (B) corpo de prova com 40 dias de cura.....	49
Figura 15 -	Resistência mecânica a compressão das formulações com adição de plastificante sintético (Conplast).....	50
Figura 16 -	Resistência mecânica a compressão das formulações com adição de plastificante natural (Argila)	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Composições Químicas da escória de diferentes processos siderúrgicos.....	17
Tabela 2 -	Produção Mundial de Aço Bruto (WSA).....	19
Tabela 3 -	Elementos que provocam maior índice de expansão na EAF..	22
Tabela 4 -	Situação dos óxidos quanto à estabilidade.....	23
Tabela 5 -	Análise Mecânica do Cimento Portland CP II - F-32.....	28
Tabela 6 -	Análise Química do Cimento Portland CP II – F-32.....	29
Tabela 7 -	Percentual das formulações propostas.....	38
Tabela 8 -	Composição química da escória de alto forno utilizada.....	44

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AA: Absorção de Água;

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AF: Alto Forno;

CAMFLUX: Nome técnico conferido a uma mistura produzida com o objetivo de melhorar as propriedades da escória;

CP: Cimento Portland;

CP II-F-32: Cimento Portland composto com Fíler;

DA: Densidade Aparente;

DNER: Departamento Nacional de Estradas e Rodagem;

EAF: Escória de Alto Forno;

IBS: Instituto Brasileiro de Siderurgia;

FRX: Fluorescência de Raios X;

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora;

RS: Resíduo Sólido;

WSA: World Steel Association;

1. INTRODUÇÃO

A produção de aço é um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país. Seu consumo cresce proporcionalmente à construção de edifícios, execução de obras públicas, instalação de meios de comunicação e produção de equipamentos, entre inúmeros outros indicadores do crescimento econômico e social de uma nação [1].

O aço já se tornou uma matéria presente notoriamente no cotidiano, mas fabricá-lo exige inúmeras técnicas que se renovam constantemente de forma cíclica, e esse fato deve-se ao investimento constante das siderúrgicas em pesquisa. O início e o processo de aperfeiçoamento do uso do ferro representaram grandes desafios e conquistas para a humanidade. E, hoje com toda a evolução no processo fabril, o que causa preocupação é a crescente geração de resíduos advindo desse processo [2].

No Brasil, o constante crescimento de indústrias siderúrgicas tem sido notório e, junto a esse crescimento, conseqüentemente está o crescimento de rejeito sólido (RS) provenientes das mais diversas etapas do processo de fabricação do aço. Contudo, a geração de RS decorrentes dessa atividade é uma realidade que deve ser cuidadosamente discutida. Por esse motivo tem-se procurado cada vez mais soluções que visam à minimização do impacto da geração destes resíduos.

Uma solução possivelmente viável é a incorporação desse rejeito em diversas aplicações como, por exemplo, na agricultura, na pavimentação, na incorporação em materiais cerâmicos, na adição a produtos cimentícios, entre outros. Todas essas aplicações visam favorecer o meio ambiente, e elevar a qualidade e reduzir o custo do produto final [3].

A reciclagem de RS é uma tentativa de resolver problemas gerados pela deposição indevida dos mesmos no meio ambiente [2]. Mundialmente, a produção do aço gera mais de 300 milhões de toneladas de resíduos e, entre

estes está à escória, que corresponde a aproximadamente 80% do volume total [4].

2.OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi analisar através de ensaios físicos e mecânicos a viabilidade da reutilização de diferentes percentuais de escória de alto forno, em associação ao cimento Portland CII-F32 com adição de plastificante natural (argila) e sintético, para fabricação de solo-cimento com diferentes tempos de cura.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar as variações no comportamento físico e mecânico das formulações de solo cimento com adição de plastificante natural (argila) e plastificante sintético.
- Verificar as variáveis presentes nas formulações de acordo com o tempo de cura;
- Produzir um composto cimentício agregando o valor custo-benefício;
- Reduzir a disposição indevida de rejeito sólido proveniente do processo siderúrgico de fabricação do aço.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA VISÃO AMBIENTAL

A degradação ambiental a partir da disposição indevida de resíduos sólidos tem representado nos últimos anos uma preocupação de grandes dimensões em vários países, forçando assim os setores produtivos da economia a buscarem a maneira mais viável de aproveitar racionalmente seus resíduos (subprodutos) industriais, como mostra a Figura 1.

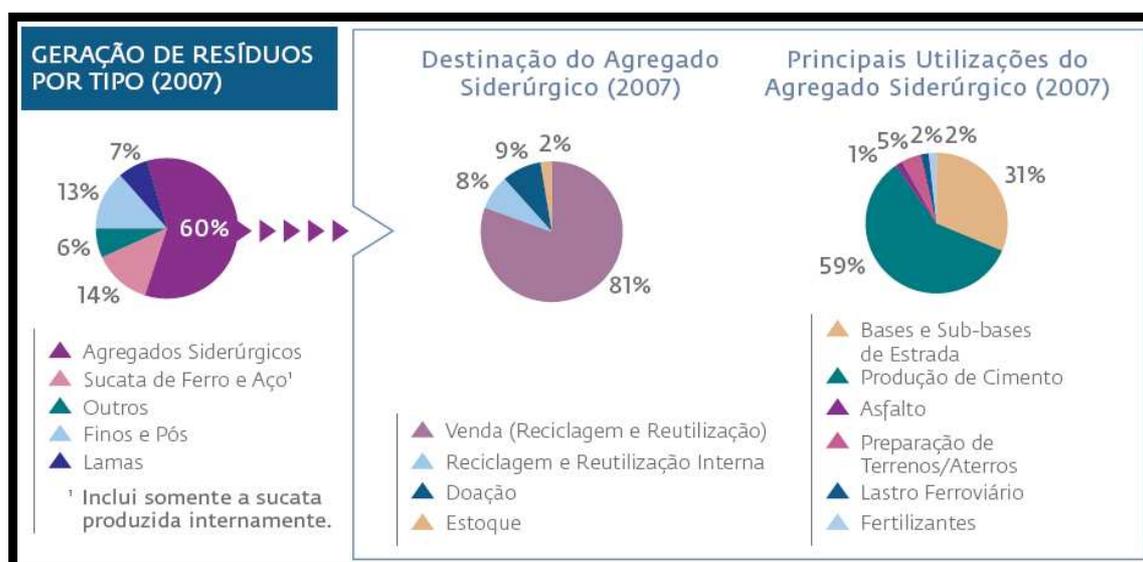


Figura 1 - Geração de Resíduos por Tipo, Destinação do Agregado Siderúrgico e Principais Utilizações do Agregado Siderúrgico (2007), retirado do Relatório de Sustentabilidade 2008 do IBS [3].

Boa parte da degradação ambiental resultante da disposição indevida de RS poderia ser evitada com a reciclagem destes e sua adaptação como matérias-primas na indústria cerâmica [3].

Atualmente, a indústria cerâmica é um dos principais setores que promovem a reciclagem de resíduos industriais, pois possibilita o consumo de

grandes quantidades de rejeitos que, incorporados às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, pode apresentar vantagens competitivas ao processo produtivo, como a economia de matérias primas e energia, favorecendo a redução de custos.

Vários são os resíduos industriais utilizados pela indústria cerâmica, podendo-se citar os resíduos de mineração, da indústria do papel e celulose, metalúrgica, energética etc., que independentemente de sua origem, têm utilização cada vez maior como insumos alternativos na indústria cerâmica. Os rejeitos podem agir como redutores de plasticidade, fundentes, combustíveis, cinzas volantes, dentre outros [4]. A tabela 1 mostra as diferentes composições químicas da escória de acordo com suas respectivas origens:

Tabela 1 – Composições Químicas da escória de diferentes processos siderúrgicos.[1]

Escória	Composição Química (% peso)					
	SiO ₂	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	MgO	Outros
Alto forno	30-40	35-45	*	12-18	3-8	MnO
Conversor	10-20	40-50	10-25	*	4-10	MnO, P ₂ O ₅
Forno Elétrico	15-20	60-65	<1	<3	5-10	CaF ₂

As diferentes proporções desses resíduos fazem com que suas aplicações sejam também variadas, o que conseqüentemente varia também sua reutilização.

3.2. OBTENÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

3.2.1. Produção do Aço

O aço é basicamente uma liga de ferro e carbono que pode ou não ser acrescida de outros constituintes. O ferro é encontrado em toda crosta terrestre,

fortemente associado ao oxigênio e à sílica [5]. O minério de ferro é um óxido de ferro, misturado com areia fina.

Para que o aço seja fabricado, é necessário que o minério de ferro passe por um processo de redução realizado no alto forno no qual o ferro se liquefaz dando espaço ao ferro gusa líquido (desejado) e a escória (impurezas como sílica, alumina...) [5]. A Figura 2 mostra através de um fluxograma simples o processo da produção do aço em Aciaria Elétrica e LD.

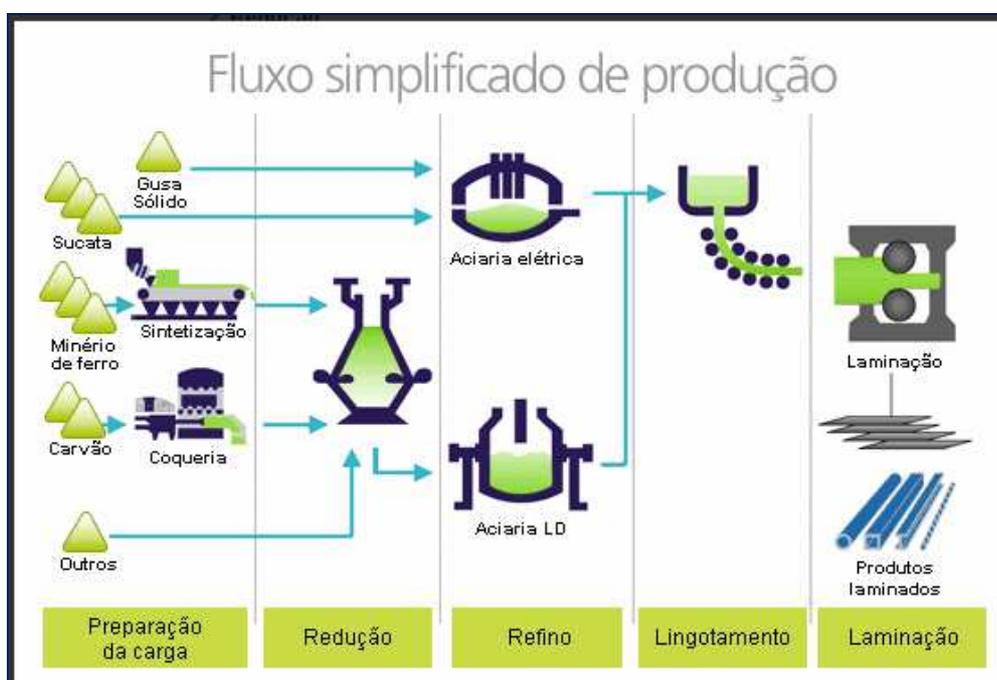


Figura 2 – Fluxograma da Produção do aço em Aciaria Elétrica e LD [6]

A Tabela 2 mostra através de números a atual produção mundial de aço bruto.

Tabela 2 – Produção Mundial de Aço Bruto (WSA) [7]

Grupos	Dezembro		Janeiro	
	2010	2009	2011	2010
China	51.524	48.492	52.804	52.535
U.E.	12.953	11.952	14.244	13.700
Japão	9.173	8.951	9.655	8.724
C.E.I.	9.640	8.888	9.645	8.485
E.U.A.	6.748	5.862	6.820	6.234
Outros	26.119	23.647	26.234	23.697
Total	116.157	107.792	119.402	113.375

Obs.: Dados correspondentes à produção de aço bruto dos países associados ao WSA

O Ranking mundial atualmente é liderado pela China, mas em se tratando de produção na América Latina, o Brasil é líder absoluto, produzindo quase o dobro do total alcançado pelo México (2º lugar na produção dos países latino-americanos) [8].

3.2.2. Fabricação do Ferro Gusa e formação da escória

O princípio da fabricação do aço começa em unidades industriais chamadas altos fornos, nas quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro e se separam as impurezas que os acompanham [3].

Durante o processo de preparação da carga, para a posterior redução do minério de ferro, ocorre o processo de aglomeração de finos, que se dá através da utilização de cal e finos de coque onde o produto resultante é chamado de sínter. O carvão por sua vez é processado na coqueria e transforma-se em um produto chamado coque.

Essas matérias-primas, uma vez preparadas, são carregadas no alto forno. Oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000 °C é soprado pela parte de baixo

do alto forno [3]. O carvão, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro transformando-o em um metal líquido: o ferro-gusa. A Figura 3 mostra o fluxograma da produção do ferro gusa nos alto fornos.

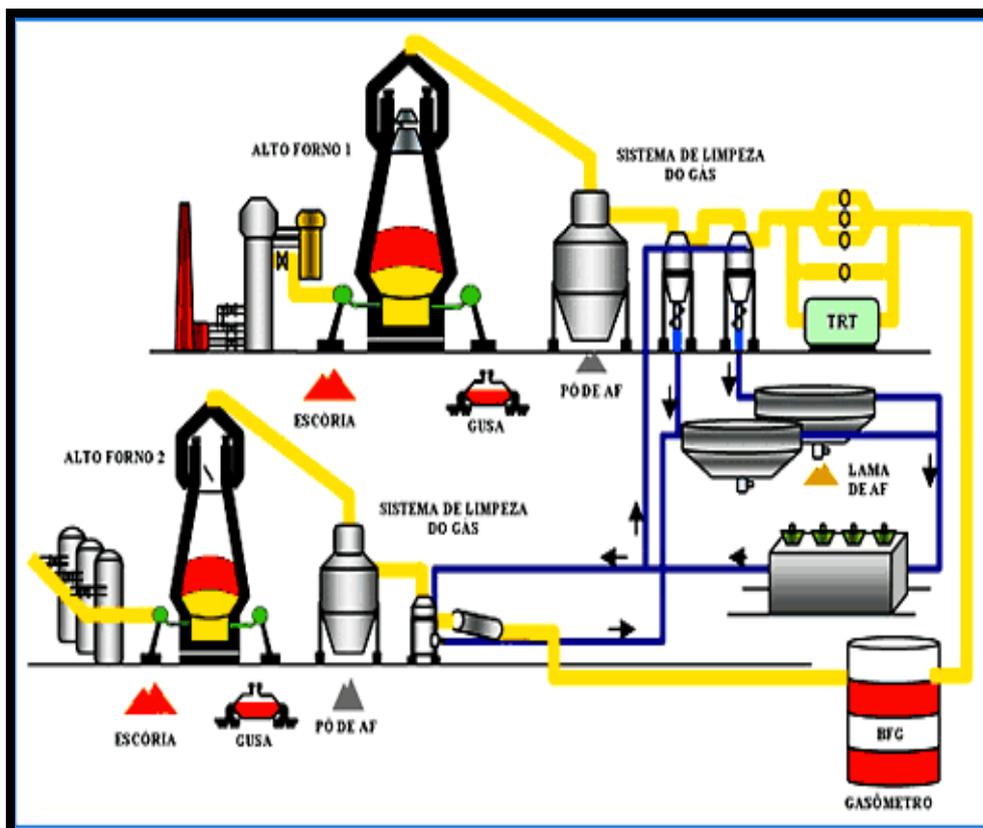


Figura 3 – Fluxograma da produção do Ferro Gusa [8]

Ao final do Processo de redução do minério de Ferro (Fe) nos AF, tem-se o ferro gusa e a escória que é vazada em estado líquido em pátios apropriados, onde são resfriadas ao ar (resfriamento lento), ou a base de água (resfriamento rápido) de acordo com as necessidades de aplicação desta escória [1]. A escória pode ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, substituindo materiais pétreos [2]. A figura 4 (A e B) mostra os dois materiais resultantes do processo.



(A)



(B)

Figura 4 – (A) Gusa Sólido e (B) Escória de Alto forno [8]

As escórias se formam pela fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque. A escória fundida é uma massa que, por sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa e é conduzida por canais, até o lugar de resfriamento [4].

3.3. A ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A composição química varia de acordo com sua origem dentro da siderurgia. As escórias são formadas nos processos metalúrgicos com dois objetivos principais: Retirar os óxidos ou outros compostos indesejáveis presentes nos minérios sujeitos ao refino e reter compostos formados a partir das impurezas que se deseja remover dos metais sendo refinados [1].

A escória de alto forno é constituída principalmente de sílica e alumina advindos do minério e de carvão/coque, combinados com óxidos de cálcio e de magnésio dos fundentes [4].

Quando ainda em estado líquido, a escória pode ser submetida a diferentes processos de resfriamento que conferem ao material, características particulares. Se o resfriamento for obtido com grandes quantidades de água, o material

produzido será escória granulada. A Figura 5 mostra a escória granulada e posteriormente moída.



(A)

(B)

Figura 5 - (A) Escória granulada e (B) Escória Moída

No caso de a escória ser resfriada ao ar e com pouca água, obtém-se uma escória em blocos denominada bruta. Isto porque, a escória de alto forno, possui um potencial pozolânico.

Esse rejeito possui uma característica tipicamente expansiva, que provoca um aumento da porosidade [9]. Em termos dos elementos com maiores participações no comportamento expansivo da escória, os principais são apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Elementos que provocam maior índice de expansão na EAF [9]

Ordem	Materiais	Composição percentual
1	SiO ₂	20-40
2	Al ₂ O ₃	3-18
3	CaO	12-30
4	MgO	2-9

A expansividade da escória é visível na elevada porosidade que a mesma apresenta. Por esse motivo, a escória além de ser constituída por fases vítreas, é consideravelmente leve e extremamente porosa.

3.3.1 Estabilidade dos óxidos presentes nas escórias de alto forno

A tabela 4 mostra o comportamento dos óxidos presentes tanto no ferro gusa quanto na escória.

Tabela 4 – Situação dos óxidos quanto à estabilidade (citar referência)

<i>Situação dos Óxidos</i>	<i>Substâncias</i>	<i>Gusa</i>	<i>Escória</i>
Óxidos Estáveis	Al ₂ O ₃ ; MgO; CaO	-	Al ₂ O ₃ ; MgO; CaO
Óxidos menos estáveis	MnO; SiO ₂	Mn; Si	MnO; SiO ₂
Óxidos Instáveis	FeO; P ₂ O ₅	Fe; P	-

Se a temperatura do gusa sobe, com um aumento do consumo de carvão vegetal, há um aumento da taxa de acordo com a Equação 1:

$$\frac{\text{Si (gusa)}}{\text{SiO}_2 \text{ (escória)}} \quad (1)$$

Durante o processo de fabricação do aço, a escória ocupa papel fundamental na qualidade do produto final [9]. As principais funções da escória durante a produção do gusa são [9]:

- a) Retirar os componentes não reduzidos da carga;
- b) Absorver a maior parte dos contaminantes da gusa;
- c) Absorver as cinzas do carvão vegetal;
- d) Proteger a superfície da gusa da oxidação na zona de combustão;

3.3.2. Atuais aplicações da escória siderúrgica

Para cada 4 toneladas de ferro-gusa produzidas, é gerada, em média, 1 tonelada de escória de alto forno [10]. Atualmente, parte da escória produzida tem sua aplicação na indústria de cimento Portland e vidros, na pavimentação de estradas, revestimentos acústicos e térmicos, neutralizante de solos, entre outros.

A construção civil é um setor com grande potencial para utilização de resíduos, pois os materiais alternativos podem viabilizar vantagem ecológica e construções com menor custo [10].

O que antes era considerado rejeito, hoje é tido como fonte de material para reciclagem e aproveitamento em diversas áreas. A EAF é hoje um dos resíduos gerados em maior quantidade no mundo inteiro. Mas, como o desenvolvimento exige uma infraestrutura adequada, o solo cimento com agregado escórico, surge como uma boa e viável alternativa.

3.3.2.1. Uso na Pavimentação

O emprego da escória de aciaria resfriada lentamente ou a mistura dos dois tipos de escórias como agregado em concreto asfáltico a quente já é normalizado no Japão desde 1979[10]. Esta prevê a produção de escórias para pavimentação através de diferentes formas de estabilização e com diferentes granulometrias, para empregos em leito superior, leito inferior de estradas, asfaltos misturados a quente etc. Esta norma prevê que se a expansibilidade da escória for inferior a 2,5%, não existe perda na resistência do pavimento. O DNER desenvolveu normalização específica para o emprego no Brasil [11]. No Brasil é comum o seu emprego com o cascalho para melhorar as condições de tráfego em vias não pavimentadas.

3.3.2.2. Uso como Agregado em Concretos

Nos trabalhos lidos e pesquisados até o momento, praticamente todos debatem a cerca das dificuldades de utilizar a escória sozinha, pois, esta tem um problema de desintegração (ela tende a desintegrar-se com o tempo de uso, devido aos grandes esforços por compressão). Este fator se deve principalmente a inexistência de propriedade hidráulica da escória de alto-forno. [12] Um uso interessante da escória é como substituta parcial de cal livre em alguns casos, pois é possível usufruir da sua alta resistência à compressão e durabilidade à abrasão. Existem algumas limitações do uso da EAF como agregado, um deles ocorre se o concreto ficar sujeito ao fogo ou o calor intenso, pois a escória tende a desintegrar-se, comprometendo o concreto.

3.3.2.3. Uso na Agricultura

A utilização da escória na agricultura resulta em impactos positivos, como por exemplo, a correção da acidez, a diminuição da disponibilidade de metais pesados, adequação de disponibilidade de alguns nutrientes essenciais e fornecimento destes para as plantas. Entre os macro nutrientes encontrados na escória, destacam-se o cálcio e o magnésio. Já entre os micronutrientes, destacam-se o ferro, o manganês, o zinco, o cobre o molibdênio e silício. A escória de alto forno tem características corretivas e/ou fertilizantes e pode ter uso agrícola, na correção do solo para atividades agrosilvopastoris [12].

Dentro do ramo agroindustrial, é notória a utilização em escala mundial das escórias siderúrgicas como principal fonte de silício. Isso porque essas escórias siderúrgicas são as fontes mais abundantes e baratas de silicatos. A reação representada pela equação 2 é um exemplo da formação de silicato de cálcio e magnésio.



A solubilidade do Si, nos diferentes tipos de escórias é bastante variável. As escórias de alto forno, normalmente, apresentam maiores teores de Si, mas com baixa solubilidade, enquanto que, as de aciarias apresentam menores teores de Si, mas de maior solubilidade. Mesmo entre as escórias de aciaria, há variação nos teores e solubilidade do Si.

3.3.2.4. Uso na Indústria Cimenteira

A escória de aciaria é quimicamente parecida com o clínquer Portland, pois contém uma quantidade considerável de silicato dicálcico e por vezes silicato tricálcico [12]. A substituição parcial do calcário por escória de aciaria tem como vantagens uma economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer e a diminuição da formação de gases, especialmente o CO₂, nocivo à atmosfera.

Processos de Produção da escória (para uso em outras áreas) propuseram alterar o processo de produção do aço de maneira a produzir escórias com características mais apropriadas para o uso em cimento Portland através de uma mistura chamada CAMFLUX, produzindo uma escória com pouca cal livre, controlando assim a expansibilidade e melhorando a hidraulicidade da escória. Existem outros tratamentos que podem ser muito diferentes deste, mas sempre visam os mesmos objetivos, ou seja, controlar a quantidade de óxidos na escória com o intuito de diminuir ou até eliminar a expansibilidade do material. Isto é necessário, pois, a expansibilidade impede o uso da escória de aciaria na maioria das aplicações em engenharia civil.

A principal utilização neste setor é junto ao processo de fabricação do Cimento Portland, no entanto, também é bastante utilizada na produção de concreto e argamassa. O caráter ácido da escória de alto forno a carvão vegetal

obriga que para a adição ao cimento esta seja utilizada em conjunto com as escórias de alto forno a coque, que apresentam maior reatividade em função de suas características de teor de basicidade e grau de vitrificação.

3.4. CIMENTO

O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água. Na forma de concreto, torna-se uma pedra artificial, que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada obra [13]. Graças a essas características, o concreto é o segundo material mais consumido pela humanidade, superado apenas pela água.

3.4.1 Cimento Portland

Cimento Portland é a denominação técnica utilizada mundialmente para o produto conhecido como cimento, que o diferencia de outros tipos como o cimento de aluminato de cálcio, o cimento polimérico, o cimento para uso odontológico, etc [10]. Seu processo de fabricação se dá pela mistura homogênea de sulfato de cálcio (gesso) e clínquer em fornos a altas temperaturas (1.500°C) e resfriados bruscamente. Ao receber adições normalizadas como escória de alto forno, cinzas volantes, argilas calcinadas e filler calcário, o cimento se transforma nos cinco tipos básicos existentes no mercado brasileiro: cimento Portland comum, cimento Portland composto, cimento Portland de alto forno, cimento Portland pozolânico e cimento Portland de alta resistência inicial.

Com a adição de água, o produto se torna uma pasta homogênea, capaz de endurecer (de acordo com o tempo de cura) e conservar sua estrutura, mesmo em contato novamente com a água. A mistura do cimento com água e outros

materiais como pedra, areia e cal possibilita a produção de concretos e argamassas, utilizados na construção de casas, edifícios, pontes, barragens e estradas [10]. As características e propriedades desses produtos dependem da qualidade e proporções dos materiais que os compõem.

3.4.1.1. CP II F-32 - Cimento Portland composto com Fíler

O cimento Portland composto tem diversas possibilidades de aplicação e por isso é um dos cimentos mais utilizados no Brasil. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. O CP II-F-32 tem adição de fíler calcário, em teor entre 6 e 10%. A tabela 5 e 6 mostram os resultados de análise mecânica e química do Cimento Portland CP II-F- 32 respectivamente

Tabela 5 – Análise Mecânica do Cimento Portland CP II - F-32 [14]

ANÁLISE MECÂNICA DO CP II – F -32		
CP II-F-32	ESPECIFICAÇÕES DA ABNT	
Tempo de Início de Pega (h:min)	≥2600	(NBR NM 76)
Tempo de Fim de Pega (h:min)	≥1	(NBR NM 65)
Finura de Peneira # 200	≤10	(NBR NM 65)
Expansibilidade a Quente (mm)	≤ 5	(NBR 11582)
Resistência a Compressão 3 dias (Mpa)	≥ 10	(NBR 7215)
Resistência a Compressão 7 dias (Mpa)	≥ 20	(NBR 7215)
Resistência a Compressão 28 dias (Mpa)	≥ 32	(NBR 7215)

Tabela 6 – Análise Química do Cimento Portland CP II- F-32 [14]

ANÁLISE QUÍMICA DO CP II-F- 32		
CP II – F – 32	ESPECIFICAÇÕES DA ABNT	
Perda ao Fogo (%)	≤ 5,5	(NBR 5743)
Resíduo Insolúvel (%)	≤ 2,5	(NBR 5744)
Trióxido de enxofre	≤ 4	(NBR 5745)
Oxido de Magnésio – MgO(%)	≥ 6,5	(NBR 7215)

3.5. PLASTIFICANTES

Tem como função a redução de microfissuras e aumento da compactidade e impermeabilidade das massas com composição de baixa propriedade aglomerante proporcionando ao mesmo tempo acabamentos mais perfeitos [15].

3.5.1. Aditivo plastificante Conplast SP430

Proporciona a obtenção de concreto e argamassas auto-adensáveis e com alta fluidez, e pode reduzir em até 25 % a água de amassamento, resultando em maiores resistências e menor permeabilidade de concretos e argamassas.

3.6. ARGILA

A argila é um material proveniente da decomposição, durante milhões de anos, das rochas feldspáticas, muito abundantes na crosta terrestre.

O mineral básico das argilas é a caulinita. Este constituinte é um silicato de alumínio hidratado, composto por alumínio (óxido de alumínio), sílica (óxido de silício) e água. Uma partícula de argila é formada por uma molécula de alumínio -

que contém dois átomos de alumínio e três de oxigênio, duas moléculas de sílica - que contém um átomo de silício e dois de oxigênio, e duas moléculas de água - com dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio [13].

As argilas são materiais plásticos pois têm a propriedade de quando misturados com água em devidas proporções, apresentarem a possibilidade de serem amassados e trabalhados mantendo a forma que se quer [16]. Quando secos ainda crus, basta adicionar água para que voltem ao estado de plasticidade. A argila em estado natural pode ser vista na Figura 6.



Figura 6 - Argila na natureza [16]

3.6.1. Tipos de Argila

Caulins, bentonitas, argilas refratárias, terra fuller são tipos especiais de argilas que têm definições particulares decorrentes de aplicações tecnológicas, composição química/mineralógica ou origem geológica.

- **Argila natural:** É uma argila que foi removida e limpa, e que pode ser utilizada em seu estado natural, sem a obrigação de adicionar outras substâncias.
- **Argila refratária:** É uma argila com elevada resistência ao calor. Suas características físicas variam, umas são muito plásticas finas, outras não. Apresentam geralmente alguma proporção de ferro e se encontram

associadas com os depósitos de carvão. São utilizadas nas massas cerâmicas dando maior plasticidade e resistência em altas temperaturas, bastante utilizadas na produção de placas refratárias que atuam como isolantes e revestimentos para fornos.

- **Caulim** ou **argila da china**: Argila primária, utilizada na fabricação de massas para porcelanas. É de coloração branca e funde a 1800 °C - pouco plástica, deve ser moldada em moldes ou fôrmas, pois com a mão é impossível.
- **Argilas de bola (Ball-Clay)**: São argilas secundárias muito plásticas, de cor azulada ou negra, apresenta alto grau de contração tanto na secagem quanto na queima. Sua grande plasticidade impede que seja trabalhada sozinha. É adicionada em massas cerâmicas para proporcionar maior plasticidade e tenacidade à massa. Vitrifica aos 1300 °C.
- **Argilas para grês**: Argila de grão fino, plástica, sedimentária e refratária - que suporta altas temperaturas. Vitrificam entre 1250 - 1300 °C. Nelas o feldspato atua como material fundente. Após a queima sua coloração é variável, vai do vermelho escuro ao rosado ou, acinzentado do claro ao escuro.
- **Argilas vermelhas**: São plásticas com alto teor de ferro resistem a temperaturas de até 1100 °C, porém fundem em uma temperatura maior e podem ser utilizadas com vidrados para grês. Sua coloração é vermelho escuro quando úmida, chegando quase ao marrom.
- **Argilas expandidas**: A argila expandida é produzida em grandes fornos rotativos, utilizando argilas especiais que expandem-se a altas temperaturas (1100°C), transformando-as em um produto leve, de elevada resistência mecânica, ao fogo e aos principais ambientes ácidos e alcalinos, como os outros materiais cerâmicos. Suas principais características são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade, além de excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico [16].

3.6.2. Propriedades das Argilas

Granulometria: As argilas são materiais geológicos finamente divididos. Os componentes dos minerais argilosos apresentam cristais de pequenas dimensões, em regra com diâmetro esférico equivalente a aproximadamente 2μ . Nos sistemas granulares dispersos, o termo argila, assim como o silte, areia ou seixo, é um conceito puramente granulométrico.

Superfície Específica: As argilas possuem elevada superfície específica muito importante em certos usos industriais em que a interação sólido-fluído depende diretamente da superfície específica do sólido: Cerâmica, catálise, branqueamento de óleos, etc. A superfície específica de uma argila é definida como a área da superfície externa somada a área da superfície interna das partículas constituintes, por unidade de massa (m^2/g). A superfície específica exprime o teor em fração argilosa, o teor relativo de finos, médios e grossos bem como o grau de dispersão/agregação das partículas constituintes de argila.

Viscosidade: O modo como o sistema argila/água flui sob a ação de uma força tem muita importância na indústria cerâmica. A viscosidade de um fluido traduz a resistência que ele oferece à fluência. A viscosidade não é mais do que a medida da fricção interna das suas moléculas e a fluidez é o inverso da viscosidade. A viscosidade de qualquer argila sofre modificações, geralmente aumentando continuamente e irreversivelmente com o tempo, se não lhe for adicionada água. A este efeito denomina-se envelhecimento de uma suspensão, o qual pode ser acelerado se for executado trabalho sobre ela, utilizando, por exemplo, a ação de um agitador mecânico ou de um agitador ultrassônico.

Plasticidade: plasticidade de uma argila é a propriedade que se manifesta na mudança de forma de uma massa feita com argila e água por aplicação de uma força exterior e pela retenção da forma quando a força é removida ou reduzida abaixo de um certo valor, correspondente à chamada tensão de cedência. O termo trabalhabilidade usa-se também, por vezes, como sinónimo de plasticidade.

O grau de deformação de uma pasta de argila, até ela entrar em rotura, aumenta progressivamente até determinado valor em função do conteúdo em

água. A água em quantidade adequada, funciona como um lubrificante que facilita o deslizamento das partículas umas sobre as outras sempre que uma tensão superficial é aplicada. Os principais fatores que afetam a plasticidade são a mineralogia, granulometria, forma dos cristais, carga elétrica dos cristais e o estado de desfloculação da argila.

Endurecimento após secagem ou cozedura: Durante a secagem dos corpos cerâmicos (a temperatura em torno de 110°C) ocorrem contrações de volume. Estas contrações podem ser boas, permitindo a separação do corpo cerâmico do molde de gesso, ou inconvenientes do ponto de vista tecnológico. Os corpos cerâmicos secos adquirem certa resistência mecânica que permite a sua manipulação no decorrer do processo de fabricação [16].

3.7. SOLO CIMENTO

Sinteticamente, o solo cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. O solo é o componente mais utilizado para a obtenção do solo-cimento. Praticamente qualquer tipo de solo pode ser utilizado, entretanto os solos mais apropriados são os que possuem teor de areia entre 45% e 50%. A figura 7 mostra os principais constituintes do solo perfeito para utilização em solo cimento.

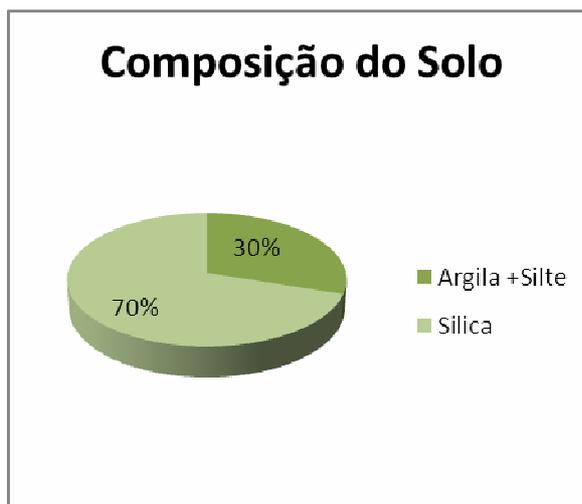


Figura 7 - percentuais dos constituintes do solo

A substituição do solo por resíduo siderúrgico na fabricação de solo-cimento é de certo modo conveniente porque na composição química dessa escória, tem-se um elevado teor SiO_2 , e Al_2O_3 , o que possivelmente influenciaria sua resistência a compressão.

De acordo com as normas DENER/ME 201/94, são considerados dentro das especificações padrão os solo-cimentos que obtiverem dentre outras atribuições resistência a compressão atendendo os seguintes limites [17]:

a) Solo tratado com cimento:

Sub-base: 1,2 a 2,1 Mpa.

Base: 1,5 a 2,1 Mpa.

b) Solo cimento:

Sub-base ou base: Superior a 2,1 Mpa.

3.7.1. Aplicações do Solo-cimento

Aplica-se a utilização de solo cimento em diversas áreas, tais como: construção de paredes monolíticas, tijolos, pavimento e o solo ensacado [10].

- **As paredes monolíticas** são compactadas no próprio local, em camadas sucessivas, no sentido vertical, com auxílio de formas e guias. O processo de produção assemelha-se ao sistema antigo de taipa, formando painéis inteiriços, sem juntas horizontais.
- **Os tijolos de solo-cimento** são produzidos em prensas, dispensando a queima em fornos. Eles só precisam ser umedecidos, para que se tornem resistentes. Além de grande resistência, outra vantagem desse tijolo é o seu excelente aspecto associado ao baixo custo.
- **Os pavimentos:** também são compactados no local, com auxílio de fôrmas, mas em uma única camada. Eles constituem placas maciças, totalmente apoiadas no chão.
- **O solo-cimento ensacado:** resultante da “farofa” úmida, colocada em sacos, que funciona como fôrma. Depois de ter a sua boca costurada, esses sacos são colocados na posição de uso, onde são imediatamente compactados individualmente.

3.7.2 Vantagens da utilização do Solo-cimento

O solo-cimento vem se consagrando como tecnologia alternativa por oferecer baixo custo e elevadas propriedades físico-mecânicas. De fácil fabricação e de qualidades equivalentes a outros produtos com mesma destinação [10]. As principais vantagens da fabricação de solo-cimento são apresentadas a seguir:

- O processo construtivo do solo-cimento é muito simples, podendo ser assimilado por mão de obra não qualificada;

- Apresentam boas condições de conforto, comparáveis às construções de alvenaria de tijolos e/ou blocos cerâmicos, não oferecendo condições para instalações e proliferações de insetos nocivos à saúde pública, atendendo às condições mínimas de habitabilidade;
- É um material de boa resistência e perfeita impermeabilidade, resistindo ao desgaste do tempo e à umidade, facilitando a sua conservação.
- A aplicação do chapisco, emboço e reboco são dispensáveis, devido ao acabamento liso das paredes monolíticas, em virtude da perfeição das faces (paredes) prensadas e a impermeabilidade do material, necessitando aplicar uma simples pintura com tinta à base de cimento, aumentando mais a sua impermeabilidade, assim como o aspecto visual, conforto e higiene.

3.7.3. Desvantagens da utilização do solo-cimento

- Este tipo de tijolo, por não ser queimado (ele é prensado), apresenta grande porosidade;
- É recomendável proteger o ambiente (de intempéries) no qual tipos específicos de solo-cimentos (com tempo de cura e composição química resultantes em uma resistência a compressão inferior a 2,1 Mpa) estão sendo utilizados.
- As trincas também podem representar um inconveniente, mas só aparecem quando alguma coisa foi mal executada.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1. MATERIAIS

As matérias primas utilizadas neste trabalho estão listadas a seguir.

- Escória de Alto Forno (Siderúrgica SINOBRÁS);
- Cimento Portland CP II-F- 32;
- Plastificante Industrial Sintético (Conplast SP 430);
- Plastificante Natural (argila);
- Água.

4.2. METODOLOGIA

A partir da escolha das matérias-primas foram preparadas 8 formulações, sendo 4 delas compostas por escória, cimento, plastificante sintético (Conplast) e água e 4 compostas por escória, cimento, plastificante natural (argila) e água. Onde, os percentuais de escória e cimento foram variados e os percentuais de plastificante, argila e água foram constantes. As formulações podem ser vistas de acordo com a tabela 7 a seguir:

Tabela 7 – Percentual das formulações propostas

FORMULAÇÕES PROPOSTAS								
CONSTITUINTES	Escória – cimento com adição de plastificante sintético (Consplast)				Escória – cimento com adição de plastificante natural (Argila)			
	F - 1	F - 2	F - 3	F - 4	F - 5	F - 6	F - 7	F - 8
Escória(%)	97	95	93	90	97	95	93	90
Cimento(%)	3	5	7	10	3	5	7	10
Conplast (%)	0,25	0,25	0,25	0,25	*	*	*	*
Argila (%)	*	*	*	*	7,7	7,7	7,7	7,7
Água(%)	10	10	10	10	10	10	10	10

Todas as formulações foram acrescidas de 10% de umidade. A idéia central neste caso foi compensar o baixo percentual de água com a adição de Conplast e argila. Para, desta forma tentar elevar as propriedades físico-mecânicas diminuindo o tempo de cura, tendo em vista que a escória não possui propriedades de aglomerante hidráulico.

4.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A preparação dos corpos de prova tal como a realização dos ensaios físicos e mecânicos foram feitas de acordo com a metodologia apresentada no fluxograma a seguir:

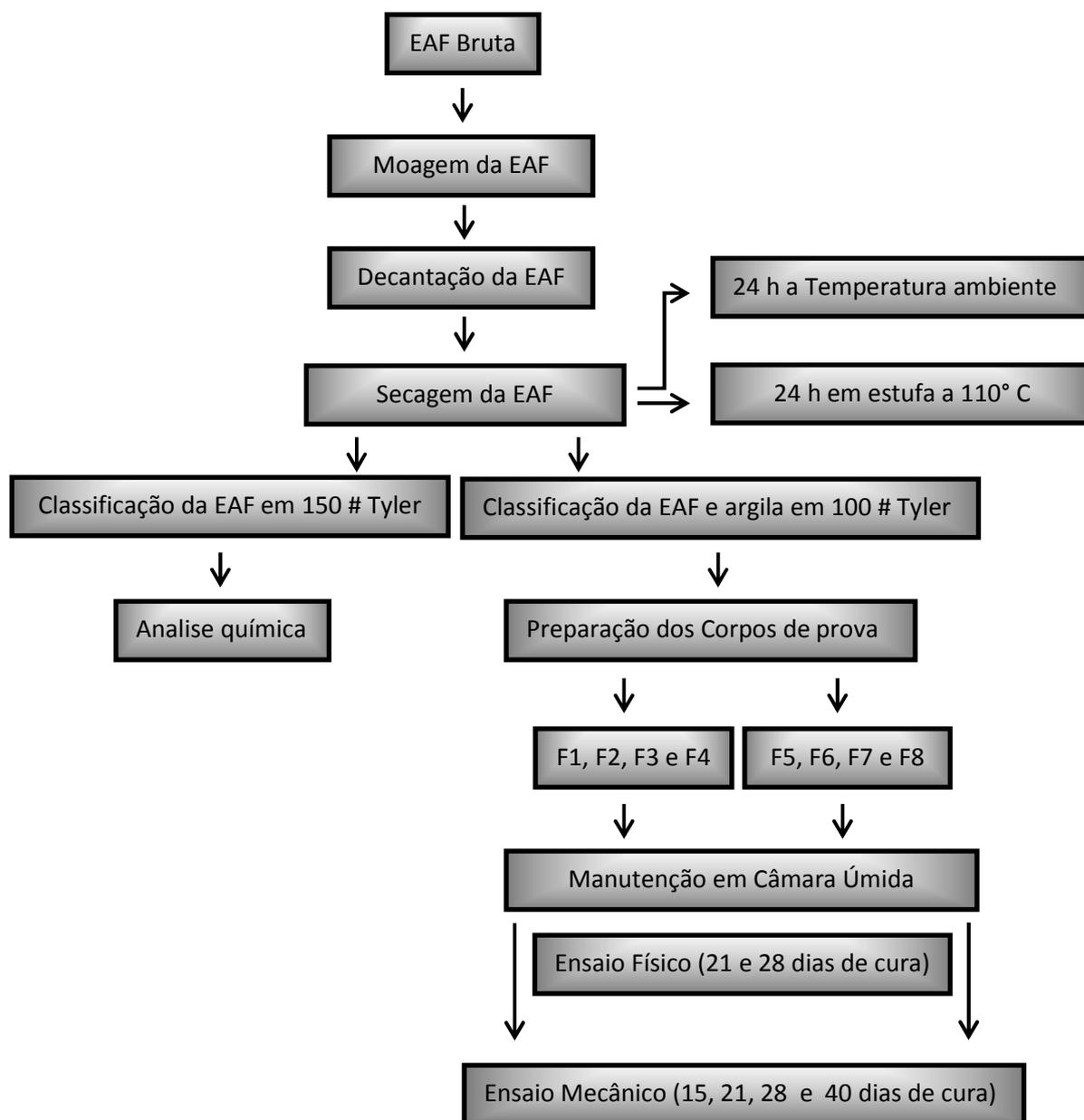


Figura 8 – Fluxograma da metodologia realizada.

4.3.1. Moagem da EAF

A carga do moinho foi composta por escória britada e água, de acordo com a NBR 5735 [18]. A escória foi moída por aproximadamente 72 horas no moinho de bolas.

4.3.2. Decantação da EAF

Foi utilizado o método de decantação para que a escória pudesse ser separada do elevado percentual de água utilizado durante o processo de moagem. A decantação demorou aproximadamente 24 horas. Em seguida foi dado início ao processo de secagem da escória.

4.3.3. Secagem da EAF

O processo de secagem foi constituído por duas etapas: Secagem a céu aberto objetivando eliminar previamente a água e em seguida a segunda etapa de secagem que consistiu na utilização da estufa ajustada a uma temperatura de 110°C.

4.3.4. Separação Granulométrica da EAF

Na etapa seguinte, a EAF foi peneirada objetivando uma granulometria inferior a abertura de 150 Tyler para que pudesse ser realizada a análise química. E, peneiramento em uma peneira de 100 Tyler propiciando granulometria ideal para junção da EAF com o CP.

4.3.5. Caracterização Química da EAF: Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise química foi interessante para que fosse possível determinar a composição de uma matéria-prima, fornecendo os percentuais de óxidos presentes. Desta forma, a caracterização a foi realizada a partir da técnica de Espectrometria de Fluorescência de Raios X.

4.3.6. Preparação dos Corpos de Prova

Após rigorosa seleção das matérias-primas os corpos de prova foram cuidadosamente selecionadas e posteriormente misturadas em um moinho de bolas. Os corpos de prova foram conformados em matriz cilíndrica de aço, com diâmetro de 30 mm e comprimento de aproximadamente 60 mm, de acordo com a norma NBR 5738 [19]. Os corpos de prova foram compactados utilizando-se uma prensa hidráulica – Marcon – Modelo MPH15. A carga utilizada na compactação foi 0,5 t. Posteriormente, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida por tempos de 15, 21, 28 e 40 dias. Constantemente a água era aspergida sob os corpos de prova para promover a cura.

4.3.7. Propriedades Tecnológicas

As propriedades físicas analisadas foram densidade aparente e absorção de água, com intuito de avaliar o nível de hidratação dos corpos de prova de acordo com a Norma DNER – ME 081[11].

4.3.7.1. Determinação da densidade aparente (DA)

A densidade aparente é obtida a partir da razão entre a massa do corpo-de-prova seco e seu volume ou ainda a razão entre a massa seca e a diferença

entre a massa saturada e a massa do corpo-de-prova imerso em água, o que inclui a porosidade aberta presente. A densidade aparente foi determinada através do método de Arquimedes, da Equação 3:

$$DA = \frac{m_s}{m_{sz} - m_i} \quad (3)$$

4.3.7.2. Determinação da Absorção de água (DA)

A absorção de água exprime a relação entre a massa de água absorvida e a massa seca do corpo, de acordo com a Equação 4.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{m_s} * 100 \quad (4)$$

Onde: m_u – Massa Úmida;
 M_s – Massa Seca;
 M_i – Massa imersa

4.3.8. Caracterização Mecânica: Ensaio de compressão longitudinal

Este ensaio avalia indiretamente a resistência à compressão do corpo de prova. Em termos qualitativos, serve como indicador da resistência à abrasão do material, e o estado de adesão matriz/agregado. Neste ensaio a tensão máxima de ruptura é calculada a partir da seguinte Equação 5 [20].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Onde: F – Força de ruptura do corpo;
 A – Área da seção transversal;

De modo geral, pode-se dizer que a compressão é um esforço axial, que tende a provocar um encurtamento do corpo submetido a este esforço. Nos ensaios de compressão, os corpos de prova são submetidos a uma força axial para dentro, distribuída de modo uniforme em toda a seção transversal do corpo de prova de acordo com a Figura 9 [16].

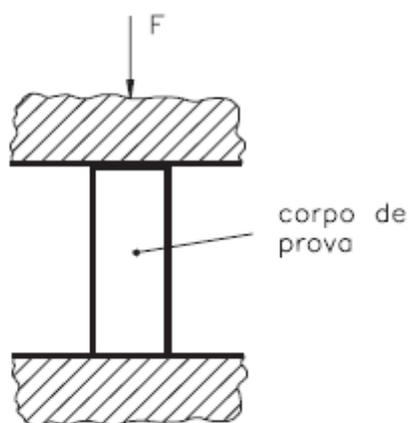


Figura 9 - Ensaio de Compressão longitudinal

O ensaio de compressão longitudinal foi realizado por intermédio da máquina universal de ensaios mecânicos, EMIC com capacidade para 100 Kg.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Estes resultados apresentados na Tabela 8, foram obtidos através do método de Fluorescência de raios-x realizados na Empresa SINOBRAS S.A por meio da utilização do equipamento Optin-X.

Tabela 8 - Composição química da escória de alto forno utilizada

Óxidos	CaO	SiO₂	MgO	FeO	Al₂O₃	K₂O	MnO	NaO	TiO
Média	29,07	41,79	2,76	0,71	17,12	2,16	4,35	0,28	0,59

De acordo com este resultado, pode-se notar que a escória de AF contém CaO e SiO₂ como os principais constituintes e é rica também Al₂O₃. Favorecendo desta forma um aumento da resistência mecânica das composições propostas. Vale lembrar que o elevado teor de sílica é neste caso fundamental, pois o Silício confere propriedades como elevada dureza, resistência mecânica além de quando associado ao cimento Portland formar uma composição próxima a do solo cimento convencional.

5.2. RESULTADOS DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

5.2.1. Absorção de Água

As figuras 10 e 11 apresentam os resultados físicos do ensaio de absorção de água para as idades de cura de 21 e 28 dias das formulações de solo-cimento com adição de plastificante sintético (Conplast) e plastificante natural (argila) respectivamente.

Observa-se a partir da Figura 10 que F4, com 10% de cimento apresentou maior absorção de água em comparação à F1 com 3% de cimento. Este resultado mostra que o maior teor de cimento da formulação 4 favoreceu as reações de hidratação e, conseqüentemente, tornou a matriz do material mais reticulada. A quantidade de água na mistura foi suficiente para desenvolver plasticidade (liga) da escória, para que na conformação não surgissem trincas, quebra de cantos e aderência excessiva do material na hora da utilização.

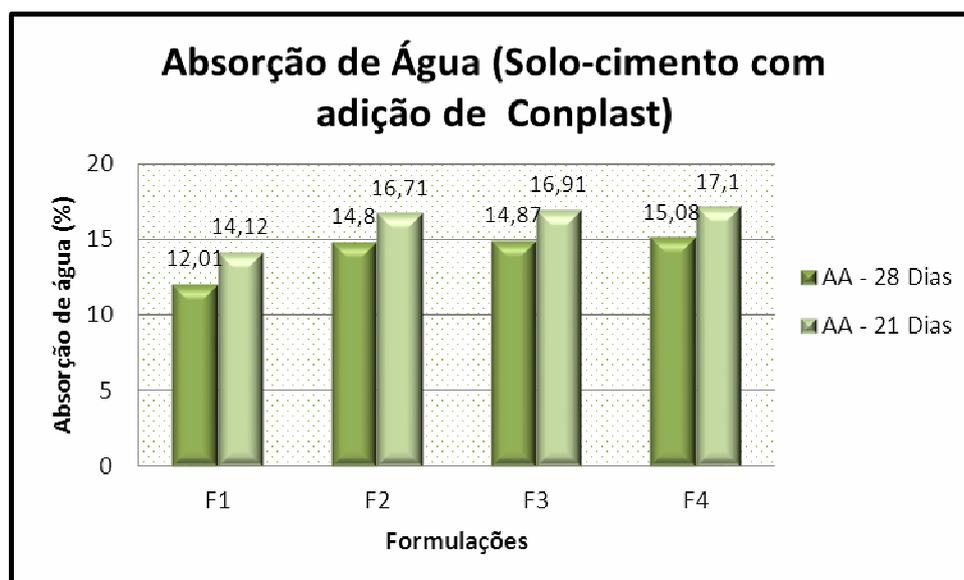


Figura 10 – Resultados da Absorção de água das formulações com plastificante sintético (Conplast)

Levando em consideração que a permeabilidade do solo-cimento é uma das suas propriedades principais por determinar sua vulnerabilidade, quanto menos impermeável mais durável é o composto. Considerando este aspecto, o tempo de cura de 28 dias seria o mais indicado para utilização em ambiente de exposição direta a fatores ambientais externos.

Na figura 11 pode-se observar que analogamente ao ocorrido com as formulações com adição de plastificante, tem-se um decréscimo da absorção de água das formulações com um maior teor de cimento para as formulações com um menor teor de cimento. E, com 28 dias de cura, é possível notar um maior índice de absorção de água.

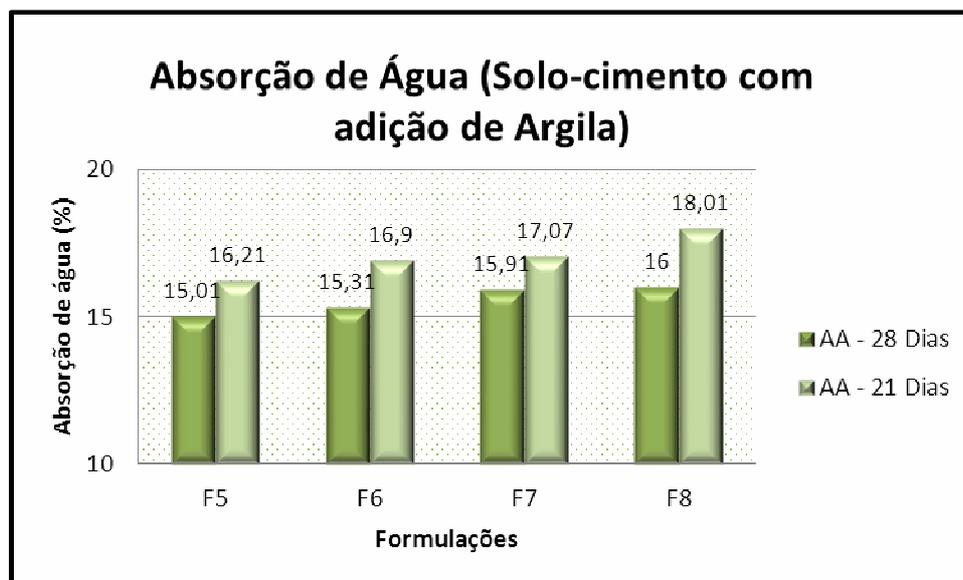


Figura 11 – Resultados da Absorção de água das formulações com plastificante natural (argila)

Como é sabido, o volume ocupado pelos poros do material, é medido pela absorção de água. Atualmente, usam-se diversos métodos para determinar a absorção de água de um corpo de prova, mas para solo-cimento, essa propriedade é medida secando-se uma amostra até a constância de massa, imergindo-a em seguida em água, e determinando-se o acréscimo de massa expressa em porcentagem de massa seca. Um dos principais motivos para as

grandes variações de absorção de água entre materiais semelhantes é a secagem em temperatura ambiente que não é capaz de remover toda a água. A absorção de água não pode (sozinha) ser considerada um padrão para avaliar a qualidade do solo-cimento, mas, grande parte dos solo-cimento de boa qualidade tem absorção bem inferior a 10%.

5.2.2. Densidade Aparente

As figuras 12 e 13 apresentam os resultados físicos do ensaio de densidade aparente para as idades de cura de 21 e 28 dias das formulações de solo-cimento com adição de plastificante e argila respectivamente.

Ao analisar a Figura 12, é possível observar que a maior densidade aparente, (aproximadamente $2,28 \text{ g/cm}^3$) foi apresentada na F4 com 28 dias de cura. Essa maior densidade, provavelmente ocorreu em virtude do teor elevado de Cimento Portland (10%) em associação ao plastificante, onde, essa junção pode ter elevado o nível de compactação do corpo de prova. E, levando em consideração ainda que uma maior compactação gera por consequência uma redução da porosidade (expansividade da escória).

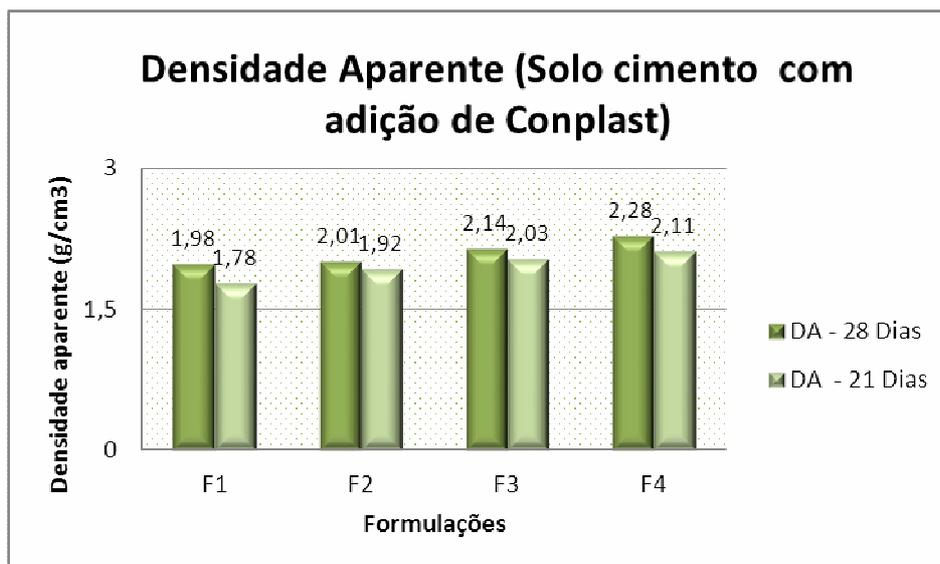


Figura 12- Resultados da densidade aparente das formulações com plastificante sintético (Conplast)

Já, no que diz respeito a figura 13, tem-se que os resultados de densidade aparente das formulações com adição de argila foram inferiores aos obtidos com adição de Conplast. Esse fato pode ter sido favorecido pelo menor índice de plasticidade da argila em relação ao Conplast. Além de favorecer um aumento da densidade para a formulação F8 com maior teor de cimento Portland.

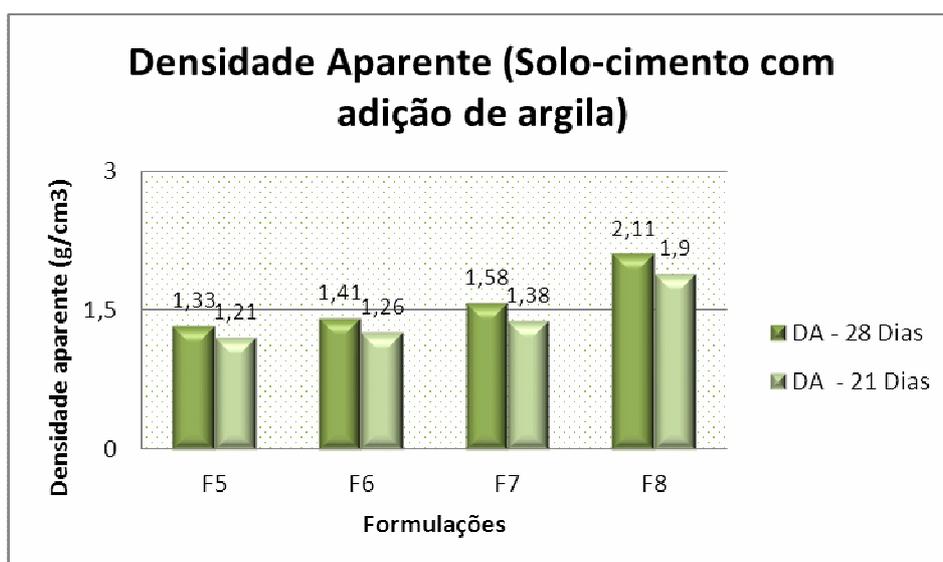


Figura 13- Resultados da densidade aparente das formulações com plastificante natural (argila)

Como o teor de cimento variou em todas as formulações propostas, uma das vantagens da proporção de umidade constante, é que em todas as reações com o cimento foram satisfatórias.

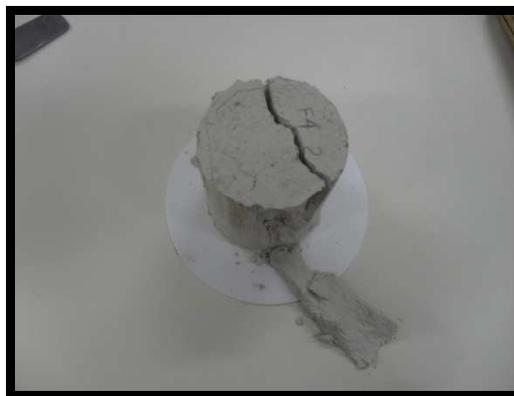
5.3. RESULTADO DO ENSAIO MECÂNICO

➤ Ensaio de Compressão após 15, 21, 28 e 40 dias de cura:

O ensaio de compressão realizado após 21 dias de cura mostra que o corpo de prova não estava totalmente seco, como mostra a figura 14 (A). No entanto, o ensaio realizado nos corpos de prova após 40 dias de cura já apresentavam-se totalmente seco como mostra a figura 14 (B).



(A)



(B)

Figura 14 - Corpos de prova após o ensaio de compressão longitudinal - Imagem (A) corpo de prova com 21 dias de cura; Imagem (B) corpo de prova com 40 dias de cura.

A partir do ensaio de compressão longitudinal realizado nos corpos de prova das formulações F1, F2, F3 e F4 (formulações com adição de plastificante sintético) para 15, 21, 28 e 40 dias de cura, obtivemos os resultados apresentados na figura 15.

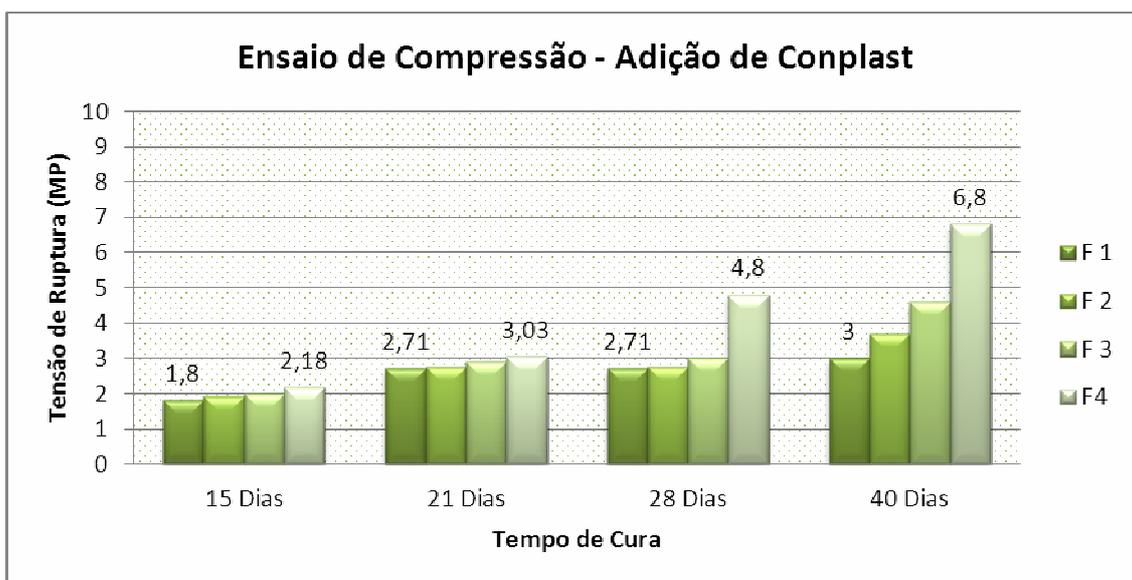


Figura 15 – Resistência mecânica a compressão das formulações com adição de plastificante sintético (Conplast)

Não houve variações significativas entre as 4 formulações para 15 e 21 dias de cura. No entanto, observa-se que para os tempos de cura superiores a 21 dias, são acentuadas as variações de resistência principalmente no que diz respeito as formulações 3 e 4. Esse fator pode ter sido propiciado em virtude de uma boa evaporação de água durante a cura.

A figura 16, por sua vez, mostra os resultados referentes ao ensaio mecânico para as formulações com adição de argila. Nesta, nota-se que os resultados não foram tão satisfatórios. A argila utilizada, provavelmente não possuía plasticidade suficiente para operar como aglomerante com tão elevado teor de escória.

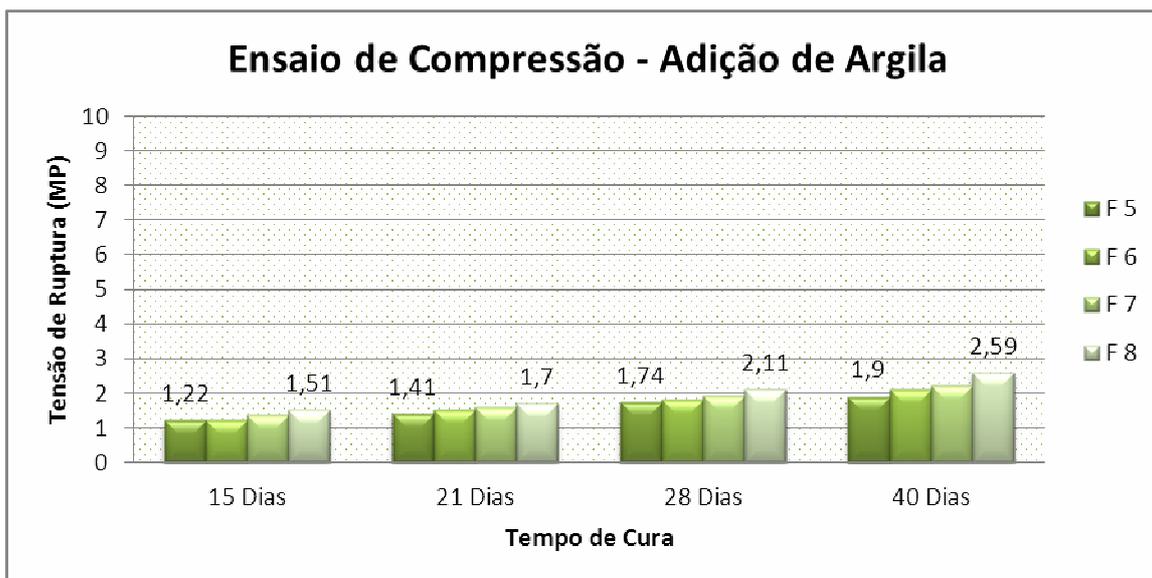


Figura 16 – Resistência mecânica a compressão das formulações com adição de plastificante natural (argila)

Pode-se dizer que a influência do teor de cimento presente em todas as formulações foi esperado já que o cimento possui uma elevada capacidade de agregação principalmente devido as suas propriedades de aglomerante hidráulico.

Desta forma, quando comparadas as formulações com adição de plastificante e adição de argila, nota-se melhores propriedades nas composições com adição do plastificante sintético. A argila com os percentuais utilizados nas formulações propostas não apresentaram os resultados esperados. No entanto, de acordo com as normas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem DENER/ME 201/94, todas as formulações poderiam ser empregadas.

6. CONCLUSÕES

Conclusões obtidas a partir das análises das formulações propostas para os diferentes dias de cura.

1. A partir da avaliação dos resultados dos ensaios tecnológicos, realizados em idades de cura equivalentes a 21 e 28 dias, foi possível verificar que a escória, quando associada ao cimento convencional (Portland), reduz o consumo de água e melhora a trabalhabilidade da massa obtida.
2. A formulação com F8 com 10% de cimento (90% de escória) e adição de plastificante sintético apresentou melhores resultados de propriedades físicas, devido ao maior grau de reticulação da matriz causado pelo teor mais elevado de cimento associado a este plastificante.
3. No que diz respeito ao ensaio de resistência a compressão realizado, pode-se dizer que quanto maior o tempo de cura e quanto maior o teor de cimento, maior a resistência a compressão. Desta forma, o resultado mais satisfatório de resistência a compressão foi também para a formulação F8 (10% de cimento Portland) com 40 dias de cura.
4. Todos os resultados foram satisfatórios no que diz respeito ao atendimento das normas pré-estabelecidas pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. No entanto, para aplicações onde a exigência de melhores propriedades mecânicas sejam iminentes, recomenda-se as formulações F3 e F4 com no mínimo 21 dias de cura.

7. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver novas formulações com diferentes teores de escória;
- Utilizar outras argilas da região;
- Utilizar a Cal (CaO) associada a teores menores de Cimento Portland;
- Monitorar as reações de hidratação para verificar a influência da escória com e sem cimento;
- Ensaio de Absorção de Água e Densidade Aparente para as idades de cura de 15 e 40.
- Utilizar Cimento Portland com outras composições químicas;

REFERÊNCIAS

- [1] NEXES - Artigos Científicos (2003) – **Núcleo de Excelência de Escórias Siderúrgicas – Arcelor Mittal**. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.cst.com.br/>>. Acessado em: 01/12/09.
- [2] COSTA, M. **Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico**. Cerâmica Industrial, 2008.
- [3] IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia, **Relatório de sustentabilidade**, 2008.
- [4] RAMOS, F.M. **Agregados Siderúrgicos em Pavimentação**. 16ª Reunião de Pavimentação Urbana (RPU) - Belo Horizonte/MG, 2009.
- [5] RIZZO, E. M. S. **Introdução aos processos siderúrgicos**, ABM. (capacitação técnica em processos Siderúrgicos - Conhecimentos Básicos), São Paulo/SP, 2005.
- [6] SUSTENTAX-2007. **Arquitetura Sustentável**. Disponível em: <<http://www.sustentax.com.br>>. Acessado em: 01/12/09.
- [7] AÇO BRASIL. **Números e Estatística – Mercado do Aço**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/>>. Acessado em: 07/03/11.
- [8] SINOBRAS – Siderúrgica Norte Brasil. S.A. **Relatórios técnicos**. Marabá/ Pa, 2009.
- [9] COELHO, P.E. **Da escória ao vidro**. Revista Limpeza Pública, v. 49, p. 36-45, dez. São Paulo/SP, 1998.
- [16] SILVA, P. R. **Estudo da interação solo-estrutura de fundação em solo-cimento**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília – Brasília/DF, 1992.
- [11] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. São Paulo/Sp. 1998. DNER – ME 081 – **Verificação de Absorção e densidade aparente de agregados**. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/>>. Acessado em 20/01/10.

[12] CASELATO, Lucila – **Ações institucionais da siderurgia brasileira para disseminação do uso das escórias de aciaria**. Rio de Janeiro. 2004.

[13] CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5ª Edição. Editora LTC, Rio de Janeiro/RJ. 2002.

[14] ECIVILNET. **Cimento Portland e Aditivos**. São Paulo. Disponível em: <http://www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland.htm> Acessado em 21/06/10.

[15] MUNDO DO CONCRETO. **Aditivos para concreto**. São Paulo. Disponível em: <www.mundodoconcreto.com.br> Acessado em 21/01/11.

[16] GOMES, C. F. Argilas: **O que são e para que servem?** Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. Visa consultores, 1988.

[17] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS, DNER/ME. Solo-cimento. **Compressão axial de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro 1994.

[18] NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA. NBR 5735. **Moagem de clínquer e de escoria de alto forno**. Rio de Janeiro 2002.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738 **Elaboração de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro 2002.

[20] CHIAVERINI, V.. **Tecnologia Mecânica**. 2ª Edição. Editora Pearson Education. São Paulo/SP, 1986.