



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

RONALDO SILVA DA GAMA

Caracterização e reaproveitamento de escórias de aciaria
como agregado para a produção de concreto convencional

MARABÁ
2013

RONALDO SILVA DA GAMA

Caracterização e reaproveitamento de escórias de aciaria
como agregado para a produção de concreto convencional

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus Universitário de Marabá,
Universidade Federal do Pará. Orientador:
Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo.

MARABÁ
2013

RONALDO SILVA DA GAMA

Caracterização e reaproveitamento de escórias de aciaria como agregado para a produção de concreto convencional

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais,
Campus Universitde Marabá, Universidade
Federal do Pará. Orientador: Prof. Dr.
Adriano Alves Rabelo.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Banca examinadora:

_____ - Membro interno
Prof. Dr. Elias Fagury Neto – UFPA

_____ - Membro interno
Prof. Dr. Edemarino Araujo Hildebrando - UFPA

_____ - Orientador
Prof. Dr. Adriano Alves Rabelo – UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por mesmo eu tendo me afastado dele na maior parte de minha faculdade, ele não ter se afastado de mim.

Agradeço aos meus pais, Sebastião e Mirena por absolutamente tudo. Cada um de seus atos foi uma oportunidade que eu tive para crescer e me tornar o que sou. A minha irmã, Milene, pelo amor incondicional e que felizmente posso dizer ser recíproco.

Ao professor Adriano Alves Rabelo pelo tempo e paciência a mim dedicados e pelo espírito crítico o qual espero, pelo menos em parte, ter adquirido.

Agradeço a Faculdade de Engenharia de Materiais e a Universidade Federal do Pará, incluindo todos os professores, todos os técnicos, todos os colaboradores e enfim a todos os alunos que colaboraram direta ou indiretamente neste trabalho.

Agradeço a Sr. Artur Carvalho por ter cedido o espaço e material da empresa Casa Goías, para elaboração do trabalho.

Agradeço a Bárbara e aos meus queridos amigos Letícia, Adriano, Caio, Daniel, Gustavo, Jhol, Leonardo, Lourival, Mayron, Micael, Rafaela, Tulio, e aos demais amigos que me acompanharam nesta jornada.

“Quando você quer alguma coisa, todo o universo conspira para que você realize o seu desejo”.

PAULO COELHO

RESUMO

A reciclagem de escória de aciaria ocorre principalmente na produção de cimento, como substituto parcial de clínquer Portland ou como base para pavimentos e como agregados. A escória de aciaria é proveniente do forno elétrico a arco ou do forno panela, sendo a escória do forno elétrico a arco a escolhida para o andamento do trabalho por possuir um menor teor de CaO, normalmente adicionado em razão do processo seguinte exigir a não reação da escória com o concreto. Entre os diversos óxidos constituintes da escória do forno elétrico a arco, se destacam CaO e MgO, uma vez que podem provocar expansividade, limitando seu uso. Pode proporcionar ganho de resistência à compressão e de durabilidade frente à abrasão quando utilizada como substituto parcial da areia para agregado do concreto. Neste trabalho foi avaliada a substituição do agregado por diferentes teores da escória de aciaria, proveniente do refino primário do forno elétrico a arco - FEA. As caracterizações realizadas consistiram dos ensaios da distribuição granulométricas da escória e agregados, resistência à compressão diametral dos corpos de prova de concreto com idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias e trabalhabilidade através do ensaio de abatimento de tronco (*slump*). Os benefícios do uso da escória como substituto parcial estão relacionados à diminuição do passivo ambiental e o cumprimento das resistências a compressão estabelecidas para 28 dias de curas.

Palavras-chave: concreto, reaproveitamento, escória de aciaria, agregado.

ABSTRACT

The recycling of steel slag occurs mainly in the production of cement, as a partial replacement of Portland cement clinker or as a base for floors and as aggregates. Steel slag is coming from the electric arc furnace or ladle furnace, being the scum of the electric arc furnace chosen to work progress by having a lower content of CaO, usually added because the process does not require the following reaction slag with concrete. Among the various constituents of the slag oxides electric arc furnace, stand CaO and MgO, since they can cause expansivity, limiting their use. Can provide gain compression resistance and durability against the abrasion when used as a partial replacement for sand aggregate concrete. This work evaluated the replacement of the aggregate by different levels of steel slag, refining from primary electric arc furnace - FEA. The characterizations of the tests carried out consisted of the distribution granulométricas slag and aggregates, diametral compressive strength of concrete specimens aged 3, 7, 14, 21 and 28 days and workability artavés the slump test trunk (slump). The benefits of using slag as a partial replacement are related to the reduction of environmental liabilities and the fulfillment of the resistance compresssão set for 28 days of healing.

Keywords: concrete, recycling, steel slag, aggregate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 : FLUXOGRAMA DA FABRICAÇÃO DO CIMENTO.....	21
FIGURA 2: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO	22
FIGURA 3: EVOLUÇÃO DA TAXA DE CALOR DETERMINADA PARA UMA PASTA DE CIMENTO, DURANTE A HIDRATAÇÃO.....	28
FIGURA 4 COMPOSTOS HIDRATADOS ASSOCIADOS AOS ESTÁGIOS DE HIDRATAÇÃO.....	30
FIGURA 5 - ENSAIO DE ABATIMENTO DE TROCO.....	36
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA PARA A OBTENÇÃO DE ESCÓRIA NA ACIARIA.....	38
FIGURA 7 - AGREGADO MIÚDO UTILIZADO.	42
FIGURA 8 - AGREGADO GRAÚDO UTILIZADO.	43
FIGURA 9 - SLUMP TESTE	46
FIGURA 10 - MAQUINA PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO	47
FIGURA 11 - TANQUE DE CURA.....	47
FIGURA 12 - PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO (20 MPA)	49
FIGURA 13 - PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO (25 MPA)	50
FIGURA 14 - PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO (30 MPA)	51
FIGURA 15 - MEV DO CONCRETO DE 20 MPA.	53
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AREIA.	54
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SEIXO.	55
FIGURA 18 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA ESCÓRIA DO FEA.	55
FIGURA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TRAÇO 20 MPA E SEUS RESPECTIVOS TRAÇOS AUXILIARES.....	58
FIGURA 20 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TRAÇO 25 MPA E SEUS RESPECTIVOS TRAÇOS AUXILIARES.....	59
FIGURA 21 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO TRAÇO (30 MPA) E SEUS RESPECTIVOS TRAÇOS AUXILIARES.....	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SEQUÊNCIA DE REAÇÃO DO CIMENTO NUM FORNO.....	20
TABELA 2 - TEORES DOS COMPONENTES DO CIMENTO PORTLAND COMPOSTO.....	24
TABELA 3 - EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS PARA O CIMENTO PORTLAND.....	24
TABELA 4 - EXIGÊNCIAS QUÍMICAS PARA O CIMENTO PORTLAND.....	25
TABELA 5 APLICAÇÕES DOS DIFERENTES TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND	26
TABELA 6 - ADIÇÕES MINERAIS NO CONCRETO.....	33
TABELA 7 - PRINCIPAIS TIPOS DE CONCRETOS E SUAS APLICAÇÕES	34
TABELA 8 - ENSAIOS FÍSICO/QUÍMICOS DO CIMENTO	40
TABELA 9 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPA) – NBR 7215/96	40
TABELA 10 - ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS.....	41
TABELA 11 - SÉRIE NORMAL E INTERMEDIÁRIA DE PENEIRAS	42
TABELA 12 - DADOS TÉCNICOS DO ADITIVO.	44
TABELA 13 - TRAÇO COM 20 MPA 8+/-2.....	48
TABELA 14 - TRAÇO COM 25 MPA 8+/-2.....	48
TABELA 15 - TRAÇO COM 30 MPA 8+/-2.....	49
TABELA 16 – ENSAIO ABATIMENTO DE TRONCO (<i>SLUMP</i>) INICIAL E SECUNDÁRIO, ANÁLISE DA PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO DE 20 (MPA).....	49
TABELA 17 - <i>SLUMP</i> INICIAL E SECUNDÁRIO, ANÁLISE DA PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO DE 25 (MPA).....	50
TABELA 18 - <i>SLUMP</i> INICIAL E SECUNDÁRIO, ANÁLISE DA PERDA DE TRABALHABILIDADE, TRAÇO DE 30 (MPA).....	50
TABELA 19 - ANÁLISE QUÍMICA DA ESCÓRIA DO FEA.	52
TABELA 20 - GRANOLUMETRIA DA AREIA	54
TABELA 21 - GRANOLUMETRIA DO SEIXO	54
TABELA 22 – DISTRIBUIÇÃO GRANOLUMÉTRICA DA ESCÓRIA DO FEA.....	55
TABELA 23 - RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA O TRAÇO DE 20 MPA.....	56
TABELA 24 - RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA O TRAÇO DE 25MPA.....	57
TABELA 25 - RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA O TRAÇO DE 30 MPA.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivos Gerais	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CONCRETO PORTLAND	18
2.2	CIMENTO PORTLAND	18
2.2.1	Mecanismo de Hidratação do Cimento	27
2.3	AGREGADOS	30
2.4	ÁGUA	31
2.5	ADITIVOS	32
2.6	ADIÇÕES	32
2.7	TIPOS DE CONCRETO	33
2.8	Trabalhabilidade do concreto	35
2.9	ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA	36
2.9.1	Geração da escória forno elétrico a arco (FEA)	38
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
3.1	PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS	39
3.1.1	Caracterização dos Materiais	39
3.1.1.1	Caracterização do Cimento CP II E -32	39
3.1.1.2	Caracterização do Agregado Miúdo	41
3.1.1.3	Caracterização do Agregado Graúdo	43
3.1.1.4	Aditivo Polifuncional	43
3.1.1.5	Escória do Forno Eletrico à Arco (FEA)	44
3.1.2	Estudo de Dosagem	44
3.1.2.1	Determinação do Teor de Argamassa	44
3.1.2.2	Determinação dos traços auxiliares	45
3.1.3	Ensaio de concreto	45
3.1.3.1	Ensaio no concreto fresco – Trabalhabilidade	45
3.1.3.2	Ensaio de concreto endurecido – Resistência à compressão axial	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos industriais e urbanos merecem cada vez mais atenção de especialistas e do poder público dos países que se dedicam ao trabalho de melhoria da qualidade ambiental. Todos os países, não importando sua localização ou seu "status" internacional, produzem milhões de toneladas por dia de resíduos, o que justifica a obrigatoriedade da criação de mecanismos que produzam a conscientização, o desenvolvimento e a implantação de tecnologias para reverter este quadro.

As usinas siderúrgicas constituem um dos grandes pilares da indústria brasileira, com forte presença tanto no mercado interno quanto nas exportações do país. Sua elevada importância econômica e seus significativos impactos ambientais as tornam, com frequência, objeto de debates, nos quais políticas públicas são sugeridas no sentido da sua expansão ao mesmo tempo em que organizações sociais fazem restrições de cunho ambiental às suas atividades.

A aplicação de tecnologias apropriadas e ecologicamente corretas, provocando assim uma redução da utilização de recursos naturais, de desperdício, da geração de resíduos e poluição, é uma ação de prioridade mundial. A produção eficaz e a poluição zero advinda desta é o desafio inerente às estratégias de produção mais limpa, cujo objetivo principal é evitar a geração de resíduos e emissões, a partir de um enfoque preventivo.

Existe uma preocupação em otimizar o uso da biomassa, para gerar menor quantidade de resíduos e garantir sua reciclagem industrial, reintegrando materiais residuais ao ciclo produtivo de forma a evitar gastos com tratamento e disposição; incentivando a promoção de tecnologias limpas e o uso racional de matéria-prima natural.

Outro fator importante é o problema da contaminação e degradação do meio ambiente em função da natureza dos resíduos, em especial os resíduos sólidos. Estes podem gerar danos na atmosfera, solo, lençol freático e rios, durante todo seu ciclo de vida, seja nas dependências da empresa e, principalmente, em sua etapa de destinação final, a qual normalmente é externa à empresa. Resíduos como os rejeitos de produtos químicos, subprodutos sólidos da indústria siderúrgica, resíduo do corte de pedras ornamentais, resíduos de demolições entre outros se enquadram nesta situação [1].

Numa usina siderúrgica é gerada uma grande quantidade de resíduos industriais, resíduos estes que para serem descartados apresentam inúmeros inconvenientes, tais como [2]:

- Necessidade de grandes áreas para o descarte;
- Elevado custo de transporte e preparação da área de descarte (US\$ 20 a US\$ 30 por tonelada de resíduo depositado);
- Perda de materiais;
- Agressão ao meio-ambiente.

Nos processos pirometalúrgicos, além da fase líquida constituída pelo banho metálico, está quase sempre presente uma fase líquida de natureza não-metálica, denominada escória [3].

Nas usinas, os esforços para reduzir emissões e efluentes tendem a passar da mera captação e tratamento à adoção de novas tecnologias de produção, menos poluentes e mais eficientes em termos energéticos.

O trabalho para preservar o meio-ambiente se faz e continuará a se realizar de quatro maneiras obedecendo à legislação ambiental; implementando medidas de conservação de energia; reciclando e conservando os recursos naturais; buscando novas tecnologias, menos poluidoras [4].

Os padrões de identificação e de descarte de resíduos industriais variam sensivelmente entre os países. Praticamente todas as nações industrializadas têm revisto e tornado mais restritivas suas legislações ambientais, em especial no que concerne à produção, ao transporte, ao tratamento e à deposição final dos resíduos industriais.

Existem alguns usos de escória de aciaria na Construção Civil, principalmente como base, sub-base e revestimento asfáltico em rodovias. Entretanto, seja qual for o reaproveitamento da escória, é necessário um período de “cura” de três meses a um ano [5]. É exatamente este processo lento de cura que pode torná-la não competitiva em certas regiões em comparação com os materiais convencionais.

As siderúrgicas têm por hábito mandar para os pátios de escória todo e qualquer tipo de escória da aciaria, não se preocupando em separá-las. Para o estudo deste material torna-se recomendável que numa aciaria as escórias de

diferentes procedências sejam separadas para que possam ser melhor avaliadas e reaproveitadas.

O volume mundial gerado de escória de aciaria é da ordem de 84 milhões de toneladas por ano, sendo que o Brasil retém aproximadamente 5% desta geração. Por isso a importância de se estudar a sua reciclagem como forma de resolver o problema de armazenagem ou descarte desta escória. Entretanto, há alguns inconvenientes no uso deste produto; por exemplo, a cal que participa no processo de produção do aço parte pode permanecer como matéria-prima não reagida presente na escória. Como a cal, em presença de umidade, reage formando compostos expansivos, limita-se o seu uso.

O desenvolvimento deste trabalho tem como objeto a avaliação de viabilidade da incorporação de rejeitos sólidos siderúrgicos em produtos cerâmicos, no intuito de diminuir os impactos ambientais gerados por esses resíduos. Considerando que no município de Marabá existe um polo siderúrgico composto atualmente por 2 empresas no ramo siderúrgico, a produção de ferro-gusa e aço não apenas consome grandes quantidades de recursos, como energia elétrica e água, poluentes cadeia produtiva gera diferentes tipos de resíduos sólidos, tais como pó de balão e escória em alto-fornos, escórias em fornos elétricos e panelas e, pó de despoiramento na aciaria. Os dados indicam que as empresas têm investido principalmente em soluções tecnológicas, como recirculação de água e cogeração de energia, para aumentar sua eficiência e reduzir seus impactos. Contudo, embora esses ganhos sejam importantes, eles são apenas incrementais e não conseguem compensar de forma substantiva o conjunto dos impactos decorrentes do aumento da produção. Dessa forma, considerando os números absolutos, os impactos das empresas continuam a crescer.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho foi a reciclagem de resíduo escória de forno elétrico a arco, proveniente da etapa de refino primário na produção do aço, estabelecendo uma destinação sustentável para o mesmo e avaliar as propriedades resistência à compressão e trabalhabilidade do concreto com substituição parcial do agregado convencional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho visa a melhoria das propriedades tecnológicas do concreto através da adição do resíduo escória de forno elétrico a arco, de maneira a atingir resistência estipulada em conformidade com a norma técnica para idade de 28 dias, devido seu potencial de hidratação e facilidade de aplicação do concreto obtido, tornando viável a diminuição do passivo ambiental das aciarias em construções civis de forma econômica e de fácil acesso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO PORTLAND

Concreto de cimento Portland é o material resultante da mistura, em determinadas proporções, de um aglomerante cimento Portland com um agregado miúdo, geralmente areia lavada, um agregado graúdo (brita ou cascalho) e água.

Pode-se ainda, se necessário, usar aditivos constituídos principalmente de material calcário, como rocha calcária ou gesso, e alumina e sílica, encontrados em materiais como argilas ou xisto.

Concreto é uma mistura homogênea de cimento Portland com água e agregados, que depois de endurecida adquire estabilidade e resistência. Pode incorporar outros componentes, na busca da melhoria de qualidades específicas. A produção de um concreto que atenda adequadamente a todas as características necessárias só é possível quando se utilizam materiais componentes de qualidade.

O proporcionamento entre eles e os processos de mistura, transporte, lançamento e cura também são fundamentais.

Atualmente, a proporção em que o concreto é usado é muito diferente do que o era há 30 anos. Estima-se que o atual consumo mundial de concreto é da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano. Apesar de não ser tão resistente nem tão tenaz quanto o aço, é o material mais largamente usado na engenharia. O concreto possui excelente resistência à água, ao contrário da madeira e do aço comum, possuindo uma ótima capacidade de resistir à água, sem deterioração séria, sendo um material ideal para estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar água.

Nos tópicos a seguir são demonstrados os componentes do concreto.

2.2 CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento, sendo um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que adquire coesão sob ação da água e que depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à hidratação, o cimento não se decompõe mais [6]. O cimento Portland é um material pulverulento constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal

livre. Estes silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se produzindo o endurecimento da massa, com elevada resistência mecânica [7].

O engenheiro John Smeaton, por volta de 1756, procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornavam-se, depois de seca, tão resistentes quanto as pedras utilizadas nas construções. Coube a John Aspdin, em 1824, patentear a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até se transformar-se em pó impalpável. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos bem finos. As matérias primas utilizadas na fabricação do cimento Portland consistem principalmente de calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, que reagem no interior do forno de produção de cimento dando origem ao clínquer, que os compostos principais são os seguintes:

- Silicato tricálcio: $3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, (C_3S)
- Silicato dicálcico : $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, (C_2S)
- Aluminato tricálcico: $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, (C_3A)
- Ferro aluminato tetracálcico: $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, (C_4AF).

Quando cimento Portland e a água são misturados, as partículas de cimento tornam-se dispersas na água. Esta suspensão altera-se do estado semifluido para o estado plástico ou rígido, com o aumento da quantidade de cimento na mistura. Os espaços preenchidos por água entre as partículas de cimento na pasta fresca podem ser considerados como um sistema capilar irregular e interconectado. A quantidade de água na mistura afeta decisivamente não somente a plasticidade ou consistência, mas também praticamente todas as propriedades importantes da pasta de cimento fresca ou endurecida. A principal razão para esse aspecto é que, com menor quantidade de água, existe maior

concentração de partículas de cimento na pasta fresca compactada, com melhores condições de obtenção de uma estrutura interna mais refinada.

A cinética de reação para a formação do cimento durante sua produção envolvem os seguintes mecanismos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Sequência de reação do cimento num forno

Temperatura °C	Processo	Reações
20 - 100 100 - 300 400 – 900	Secagem	Evaporação de água livre Perda de água de cristalização (fisicamente adsorvida) Perda de água estrutural (quimicamente ligada) grupos de H ₂ O dos minerais de argila
600 – 900	Calcinação	Liberção de CO ₂ CaCO ₃ – CaO + CO ₂ Primeira reação dos componentes. Formação de belita, aluminatos, ferritas, e fases metaestáveis.
1250 Aproxmadamente 1450	Sinterização cliquerização	Formação de uma fase líquida rica em Al ₂ O ₃ e Fe ₂ O ₃ – C ₃ A e C ₄ AF. Formação de alita a partir de belita e CaO não combinado (cal livre)
1300 – 1240	Resfriamento	Cristalização da fase líquida em aluminatos de ferrita.

Fonte: [11]

Estes compostos se formam no interior do forno quando a temperatura se eleva a ponto de transformar a “mistura crua” num liquido pastoso que, ao resfriar-se, dá origem a substâncias cristalinas, como ocorre com os três produtos acima citados, e a um material intersticial amorfo, o C₄AF, e a outros óxidos, compostos alcalinos e sulfatos. Todos esses compostos têm a propriedade de reagir em presença de água, por hidrólise, dando origem então a compostos hidratados [7].

A fabricação do cimento Portland se inicia com a extração das materiais primas para a obtenção do clínquer. Há, primeiramente, o desmonte de rocha em uma jazida de calcário, que ao ser extraído é transportado para a unidade de

britagem. Após a britagem é então submetido à moagem para a obtenção da farinha, denominação dada ao calcário moído e já misturado com argila e, eventualmente, com minério de ferro. Na sequência é feita a homogeneização da farinha em silos apropriados, que vai permitir a alimentação do forno [8].

Tratando-se de um trabalho contínuo, a fabricação do cimento segue com a entrada da farinha em um forno rotativo, o qual possui um equipamento de pré-calcinação, no sentido de diminuir o consumo de energia térmica. O material cru, ou farinha, segue por gravidade em direção à parte mais quente do equipamento [8].

Este pó é introduzido no forno, passando por etapas de aquecimento, até chegar à zona de máxima temperatura (aproximadamente 1450 °C), onde acontece a clínquerização, processo no qual 30% da mistura é convertida em fase líquida. O resultado do processo é o clínquer, em forma de pelotas. Ao sair do forno, o clínquer é submetido a resfriamento rápido, de 1450 °C a 80 °C, através de resfriadores industriais. O clínquer resfriado é transportado para a moagem final em moinho de bolas de aço que auxiliam na obtenção da finura conveniente. Nessa fase, são incorporadas as demais matérias primas em função do tipo de cimento, (escória granulada de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos) que vão conferir propriedades adicionais ao clínquer [8]. O transporte é feito mecânica ou pneumicamente para os silos, onde é estocado. São feitos ensaios finais de qualidade para então ser enviado para expedição. Na Figura 1 há um fluxograma da fabricação do cimento.

Figura 1 : Fluxograma da fabricação do cimento



Fonte: [8].

A Figura 2 exibe uma imagem da fábrica real da Votorantim no município de Xambioa/TO.

Figura 2: Processo de fabricação do cimento



Fonte [8].

O mercado nacional dispõe de 8 opções, que atendem com igual desempenho aos mais variados tipos de obras. O cimento Portland comum (CP I) é referência, por suas características e propriedades, aos 11 tipos básicos de cimento Portland disponíveis no mercado brasileiro. São eles:

- 1. Cimento Portland Comum (CP I)**
 - a. CP I – Cimento Portland Comum
 - b. CP I-S – Cimento Portland Comum com Adição
- 2. Cimento Portland Composto (CP II)**
 - a. CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória
 - b. CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
 - c. CP II-F – Cimento Portland Composto com Filer
- 3. Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)**
- 4. Cimento Portland Pozolânico (CP IV)**
- 5. Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)**

6. Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)

7. Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)

8. Cimento Portland Branco (CPB)

Esses tipos se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições, tais como escórias, pozolanas e calcário, acrescentadas no processo de moagem. Podem diferir também em função de propriedades intrínsecas, como alta resistência inicial, a cor branca etc.

O próprio Cimento Portland Comum (CP I) pode conter adição (CP I-S), neste caso, de 1% a 5% de material pozolânico, escória ou filer calcário e o restante de clínquer. O Cimento Portland Composto (CP II- E, CP II-Z e CP II-F) tem adições de escória, pozolana e filer, respectivamente, mas em proporções um pouco maiores que no CP I-S. Já o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) contam com proporções maiores de adições: escória, de 35% a 70% (CP III), e pozolana de 15% a 50% (CP IV) [9].

O aproveitamento desses subprodutos, que constituem os resíduos gerados nas indústrias como um todo a exemplo da escória de aciaria do Forno elétrico a arco (FEA), nos diversos campos da engenharia, traz benefícios ao meio-ambiente, pois representa uma redução da quantidade de material a dispor em aterros ou estocar em pilhas, como também uma diminuição significativa do consumo de recursos naturais primários e não renováveis, como brita, areia, calcário, rocha fosfática e outros. Soma-se a isso a possibilidade de substituir parcialmente o clínquer (calcário calcinado) no processo de fabricação do cimento, reduzindo o consumo energético e as emissões de CO₂ na atmosfera.

Dentre os cimentos Portland modificados podem ser citados os de pozolana e de escória de alto-forno. Os cimentos de pozolana têm adicionados a sua mistura 10% a 40% de pozolana, e apresentam características como pequena velocidade na liberação de calor de hidratação e elevada resistência a águas sulfatadas e ácidas. Os cimentos de alto-forno possuem propriedades semelhantes a dos cimentos de pozolana e são obtidos misturando-se ao clínquer escória de alto-forno granulada na proporção de 25% a 65% do peso do cimento [10].

Observa-se que há variações na composição do cimento e inserção de novas adições no concreto a fim de se garantir o seu ótimo desempenho mecânico e comercial. A Tabela 2 mostra os teores de cada componente do cimento composto.

Tabela 2 - Teores dos componentes do cimento Portland composto.

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clinker + Sulfatos de cálcio	Escória Granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material carbonático
CP II-E	25	94-56	6-34	-	0-10
	32				
	40				
CP II-Z	25	94-76	-	6-14	0-10
	32				
	40				
CP II-F	25	94-90	-	-	6-10
	32				
	40				

Fonte [11].

Os cimentos compostos também devem atender algumas exigências físicas e mecânicas, químicas, como mostram as Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Exigências físicas e mecânicas para o cimento Portland.

Características e Propriedades	Umidade	Limites de Classe			
		25	32	40	
Finura	Resíduo peneira 75 µm	%	≤ 12	≤ 12	≤ 10
	Área específica	M ² /Kg	≥ 240	≥ 260	≥ 280
Tempo de início de pega	H	≥ 1	≥ 1	≥ 1	
Expansibilidade a quente	Mm	≤ 5	≤ 5	≤ 5	

Resistência a compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 8	≥ 10	≥ 15
	7 dias de idade	MPa	≥ 15	≥ 20	≥ 25
	28 dias de idade	MPa	≥ 25	≥ 32	≥ 40

Fonte: [11].

Tabela 4 - Exigências químicas para o cimento Portland

Determinações Químicas	Limites (% da Massa)		
	CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Resíduos Insólúvel (RI)	≤ 2,5	≤ 16,0	≤ 2,5
Perda ao Fogo (PF)	≤ 6,5		
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5		
Trióxido de enxofre (SO₃)	≤ 4,0		
Anidrido carbônico (CO₂)	≤ 5,0		
Perda ao Fogo (PF)	≤ 6,5		

Fonte [11]

O gesso tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Por isso, o gesso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland. A quantidade adicionada é pequena: Em geral, 3% de gesso 97% de clínquer, em massa.

Escórias de alto-forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Estas possuem a característica de reagir em presença de água, geralmente, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. A escória de alto-forno quando adicionada à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, obtém como resultado um tipo de cimento que, além de atender

plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final [12].

As pozolanas, quando usadas em substituição parcial do cimento, aumentam a plasticidade do concreto e diminuem a segregação. Essa melhoria dependerá diretamente da finura do produto e da porcentagem substituída. A substituição ao cimento tem sido na proporção de 15% a 40% no concreto [12].

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição, tais como o próprio calcário. Quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário.

Todos os tipos de cimento são adequados a todos os tipos de estruturas e aplicações. Existem tipos de cimento que são mais recomendáveis ou vantajosos para determinadas aplicações de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 Aplicações dos diferentes tipos de cimentos portland

Aplicação	Tipos de cimento Portland
Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Pozolânico (CP IV)
Argamassa de rejuntamento de azulejos e ladrilhos	Branco (CPB)
Concreto simples (sem armadura)	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Concreto magro (para passeios e enchimentos)	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Concreto armado com função Estrutural	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Concreto protendido com protensão das barras antes do lançamento do concreto	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Concreto protendido com protensão das barras após o endurecimento do concreto	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Concreto armado para desforma rápida, curado por aspersão de água ou produto químico	I de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Concreto armado para desforma rápida, curado por aspersão de água ou produto químico	de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI), Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Branco Estrutural
Concreto armado para desforma rápida, curado a vapor ou com	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de

outro tipo de cura térmica	Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento curados por aspersão de água	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Elementos pré-moldados de concreto e artefatos de cimento para desforma rápida, curados a vapor ou com outro tipo de cura térmica	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Pavimento de concreto simples ou armado	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Pisos industriais de concreto	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)
Concreto arquitetônico	Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Argamassa armada	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Solo-Cimento	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)
Argamassas e concretos para meios agressivos (água do mar e de esgotos)	De Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos
Concreto-massa	De Alto-Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e de Baixo Calor de Hidratação
Concreto com agregados reativos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto-Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV)

Fonte: Autor

2.2.1 Mecanismo de Hidratação do Cimento

A hidratação do cimento Portland abrange um conjunto de reações interdependentes com cinéticas diferentes, ao curso das quais as partículas de cimento anidras são progressivamente dissolvidas dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Ao entrar em contato com a água, os silicatos se dissolvem precipitando os primeiros hidratos. Assim a hidratação dos silicatos é aquela que exerce maior influência sobre as principais características do material, sendo que os silicatos tricálcicos se dissolvem mais rapidamente que os dicálcicos.

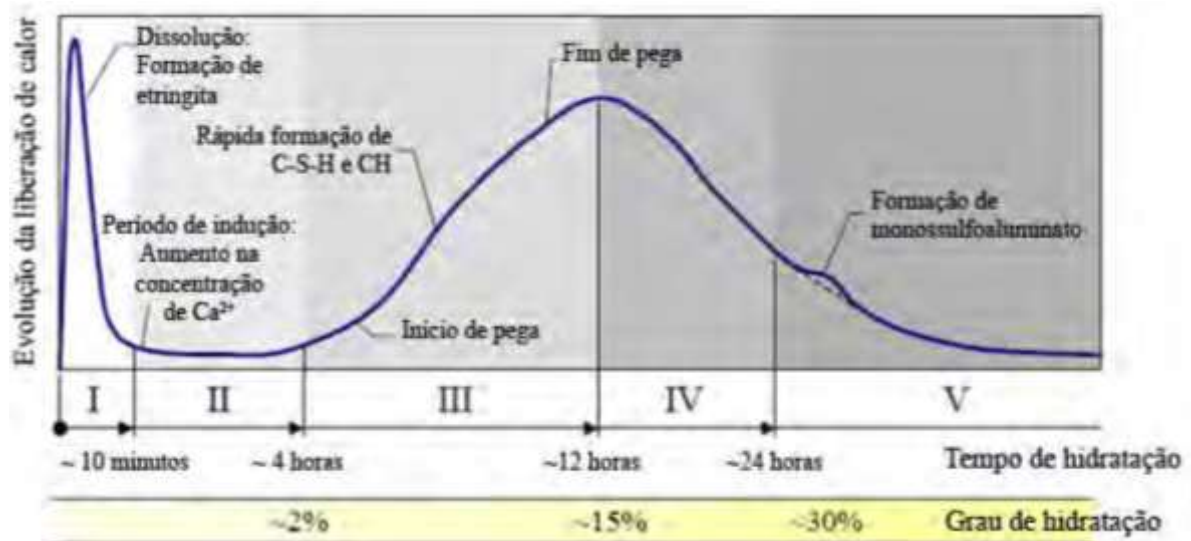
A hidratação dos aluminatos, dadas pela reação da água e do C_3A seria quase instantânea se não fosse retardada pela adição de sulfato de cálcio, e o produto obtido na reação é trissulfoaluminato de cálcio hidratado ou etringita (fase AFt), que se cristaliza sob a forma de agulhas em volta dos grãos de cimento anidro. Em caso de excesso de C_3A em relação ao sulfato de cálcio, o trissulfoaluminato de

cálcio hidratado reage com C_3A para formar monossulfoaluminatos de cálcio hidratado (fase Afm). A fase Afm se cristaliza sob a forma de plaquetas hexagonais, disseminadas nas fibras de C-S-H. [13]

A hidratação dos ferro-aluminatos, em presença de gipsita, dá origem à formação de fases similares às obtidas na hidratação do C_3A , as quais se distinguem pela substituição parcial do alumínio pelo ferro com composições químicas variáveis, mas estruturas similares as da etringita e do monossulfoaluminatos.

A hidratação do cimento Portland pode ser subdividida em cinco fases, a saber, estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV); estágio final ou período de reação lenta (V). Na figura 3 ilustra-se a associação da evolução de liberação de calor de hidratação de uma pasta de cimento Portland de acordo com o tempo de hidratação, evidenciando a termodinâmica das reações químicas desencadeadas no processo.

Figura 3: Evolução da taxa de calor determinada para uma pasta de cimento, durante a hidratação



Fonte: [14]

Fase I – Estágio inicial ou pré-indução: o pico inicial é atribuído a uma combinação exotérmica de molhagem das partículas e de reações iniciais de dissolução de sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+ , Na^+ e SO_4^{-2} ; dissolução do sulfato de cálcio até a saturação e liberação de íons Ca^{+2} e SO_4 . A hidratação do sulfato de cálcio semi-hidratado ($CaSO_4 \cdot 1/2 \cdot H_2O$) para di-hidratado ($CaSO_4 \cdot 1/2 \cdot 2H_2O$) também contribui para ocorrência do primeiro pico de liberação de calor).[15]

Fase II – Período de indução ou dormente: uma camada de gel se deposita sobre o cimento anidro, formando uma espécie de barreira entre as fases anidras e a solução aquosa. Este gel amorfo e coloidal é originado a partir de precipitação inicial da etringita, e em menor escala, de C-S-H rico em sílica e alumínio, com presença de íons cálcio e sulfato. A elevação rápida do pH e o teor de cálcio e de alcalinos da água retarda a dissolução dos constituintes. Desta forma, as reações rápidas dos primeiros minutos são seguidas por um período de fraca reatividade, que se traduz pela inércia térmica do sistema.[15]

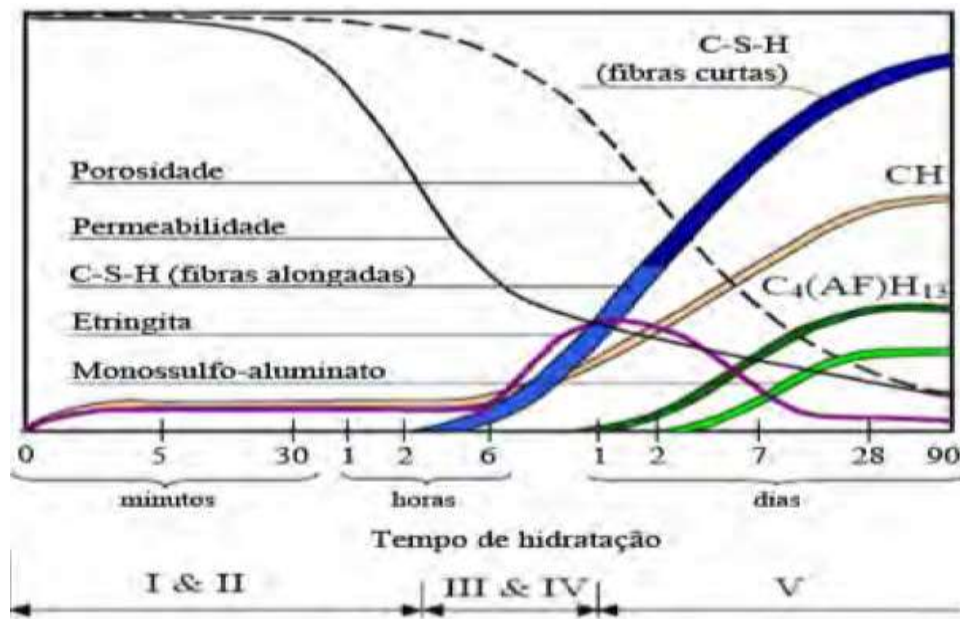
Fase III – Período de aceleração: Nesta fase predomina o mecanismo de dissolução-precipitação, com conseqüente supersaturação iônica da fase aquosa e rápida formação de C-S-H. Os principais produtos formados são C-S-H e Ca(OH)_2 , com declínio gradual da concentração de íons Ca^{2+} na solução. Este período finaliza com o aparecimento do segundo pico na curva, onde este pico sinaliza o início da desaceleração no desenvolvimento de calor do sistema. O fenômeno da pega se dá no decorrer do período de aceleração, quando os silicatos, especialmente a alita (C_3S), passam a se hidratar rapidamente até atingir a taxa máxima de hidratação, que corresponde ao máximo de calor liberado. a taxa de hidratação neste período é controlada pela formação do C-S-H.[15]

Fase IV – Período de desaceleração: Esta fase começa com diminuição gradual da taxa da evolução do calor, devido á redução gradual na concentração de íons em solução, em decorrência da precipitação de hidratos que recobrem as partículas do cimento e dificultam a solubilização das fases anidras. Após o período aproximado de 24h, prosegue as reações lentas que dão origem também ao C-S-H e ao Ca(OH)_2 . O mecanismo da reação passa a ser controlado por difusão iônica ou por reação topoquímica.[15]

Fase V – estágio final: nesta fase, ocorre a formação de placas hexagonais delgadas de monossulfoaluminato de cálcio a partir de reação do trissulfoaluminato de cálcio com o C_3A e o C_4AF , por indisponibilidade de sulfato de cálcio no sistema. Os espaços ocupados inicialmente pelo excesso de água da mistura são gradualmente preenchidos pelos produtos de hidratação em desenvolvimento, com densificação da pasta. A partir desse momento, as reações de hidratação prosseguem por mecanismo topoquímico.[15]

Na figura 4 encontra-se um esquema dos compostos hidratados associados ao tempo e aos estágios de hidratação.

Figura 4 Compostos hidratados associados aos estágios de hidratação



Fonte:[15]

2.3 AGREGADOS

Material granular, sem forma ou volume definido, de dimensões e propriedades adequadas às obras de engenharia, para fabricação de concretos e argamassas de cimento Portland, que podem ser: naturais, britados, artificiais, reciclados.

Nos primeiros estudos sobre o concreto pensava-se que os agregados eram apenas materiais para enchimento na composição do concreto e que sua única função era de baratear a fabricação, sendo considerados como inertes. Mostrou-se a necessidade de conhecer melhor este material, pois muitas das propriedades dos concretos estão influenciadas pelas características dos agregados como: porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, estabilidade, forma e textura superficial dos grãos, resistência mecânica, módulo de deformação e substâncias deletérias.

Os materiais utilizados como agregados na fabricação do concreto são encontrados na crosta terrestre originados de rochas ígneas ou magmáticas como, basalto granito, diabásio; rochas sedimentares como, arenito, argilito, calcário, gipsita, turfa; rochas metamórficas como, gnaisse, mármore, xisto, filito.

Dentre as origens das rochas as que apresentam melhores resultados são as ígneas, pois são mais densas, compactas ex.: granitos, basaltos (exceção

dos basaltos com estrutura vesicular que são vazios na forma de cavidade). As rochas metamórficas como o gnaisse e o quartzito apresentam bons potenciais como agregado. As rochas sedimentares são as que apresentam menores condições de serem utilizados como agregados devido a grande porosidade, menor resistência mecânica, somente são usados quando o nível de exigência é baixo, como por exemplo: arenito e os argilitos [16].

A constituição mineralógica e a composição química do agregado, um dos conceitos básicos da ciência dos materiais a microestrutura do material, deverá ser levada em conta, exemplo disto é a porcentagem de absorção d'água que deve ser considerado na hora de avaliar a qualificação dos agregados para concreto [16].

Uma das formas mais comuns para classificar os agregados é em função do tamanho dos grãos. Agregados graúdos conforme norma NBR 7211 - 2004 é o agregado cujos grãos passam na peneira com abertura de malha com 152 mm, e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm. O agregado miúdo é aquele cujos grãos passam na peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm conforme NBR 7217 2004.

2.4 ÁGUA

Torna a mistura suficientemente trabalhável, facilita seu transporte, lançamento e adensamento, reage quimicamente com o cimento. O excesso de água permanece na argamassa até se evaporar, deixando canais capilares e pequenas bolhas no produto. Quanto mais água existir, maior será o número de vazios e tendência de uma mistura menos resistente. Sempre haverá vazios no concreto, pois é necessária a utilização da água para hidratação do cimento Portland.[12]. Deve-se evitar o excesso, utilizando somente o necessário para ocorrer às reações químicas, e facilitar a trabalhabilidade do concreto. O fator água/cimento é de extrema importância na produção do concreto. A resistência a estanqueidade, a durabilidade estão diretamente ligados à quantidade de água que é adicionada na mistura.

A água a ser utilizada na produção de concreto tem ser de boa qualidade, guardadas em caixas estanques para evitar a contaminação por substâncias estranhas, e deve se evitar contato direto dos operários com a água, para evitar a contaminação com óleos, graxas, sabões, detergentes e outros. A princípio

considera toda água potável como apropriada para uso em concreto. Águas não potável devem atender aos requisitos da norma NBR 6118 para serem utilizadas como água de amassamento e cura.

2.5 ADITIVOS

São produtos adicionados ao concreto com a finalidade de melhorar ou modificar suas características. Se usados corretamente facilitam a trabalhabilidade, diminui a segregação, a pega, o endurecimento, o conteúdo de ar ou de outros gases no concreto, a resistência a ações físicas, as ações mecânicas, ações químicas, melhora a durabilidade e a resistência mecânica do concreto.

Nota-se que os aditivos proporcionam uma regularidade na fabricação do concreto ou argamassa e na sua qualidade, ampliando o campo de aplicação do concreto. Diversos fatores devem ser analisados para aplicação dos aditivos de forma a proporcionar os efeitos desejados, e dentre os fatores a serem verificados destacam-se: [17]

- Tipo de cimento: composição do clínquer principalmente conteúdo de C_3A e C_3S ; Adições, classe características (composição química, finura, forma), quantidade, conteúdo dos compostos alcalinos, finura, quantidade de cimento.
- Tipos de agregados: características; diâmetro máximo, granulometria, conteúdo de finos, porosidade, forma.
- Tipos de aditivos: quantidade e dosagem, temperatura ambiente, condições para realizar a mistura.

2.6 ADIÇÕES

A utilização de adições minerais nos concretos reflete benéficamente, pois elas incorporam grandes qualidades ao produto. Os efeitos benéficos das adições resultam; do efeito físico associado ao pequeno tamanho das partículas, pelo efeito químico pozolânico. A eficiência das adições está diretamente ligada à quantidade utilizada e das condições de cura.

Surgiram outras adições que geralmente são obtidos por meio de subprodutos (resíduos), o que reduz a extração de matéria prima para fabricação de

produtos cimentícios. Grande exemplo de subproduto da indústria que é utilizado como adição é a escória de alto, cinza da casca de arroz [18]. Dos materiais empregados nas adições podemos destacar na Tabela 5:

Tabela 6 - Adições minerais no concreto

Classificação	Tipo de adições
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa Metacaulim Cinzas de casca de arroz
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio Argilas calcinadas Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente Cinzas de forno Escória de caldeira Palha de arroz queimada em campo
Adições inertes (filler)	Calácio, pó de cálcio, pó de pedra

Fonte [19]

2.7 TIPOS DE CONCRETO

Os concretos são classificados em três categorias: Concreto de densidade normal em torno de 2400 kg/m^3 obtido com o uso de areias naturais ou artificiais, agregados graúdos britados, pedregulhos é o mais comum para fins estruturais. [19]

Os concretos leve massa específica menor que 1800 kg/m^3 , obtidos através de agregados naturais ou processados termicamente com menor densidade de massa.

Concreto pesado usado como blindagem em locais para resistir a radiações, produzidos com agregados de alta densidade possui massa específica maior que 3200 kg/m³. Em vários países a classificação dos concretos é em função da resistência a compressão; concreto de baixa resistência menos de 20 MPa, concreto de resistência moderada entre 20 e 40 MPa e concreto de alta resistência acima de 40 MPa.

Observa-se que, por ser o concreto um produto resultante da misturas de vários materiais, onde se pode variar a quantidade de cada matéria prima produzindo assim uma grande gama de tipos de concreto, em que a escolha depende do local onde será aplicado. Dentre as variações podemos destacar alguns mais usuais, conforme a Tabela 6 abaixo: [19]

Tabela 7 - Principais tipos de concretos e suas aplicações

TIPOS	APLICAÇÕES
Convencional	Uso frequente na construção civil.
Bombeável	Obras de difícil acesso
Projetado	Reforço estrutural, túneis, monumentos, contenção de taludes, canais, galerias.
Rolado	Barragens, pavimentações.
Auto-adensável	Peças delgadas, elevada taxa de armadura, locais de difícil acesso para vibração.
Alto desempenho (cad)	Elevada resistência, pré-fabricados, obras de arte, edificações.
Pavimento de concreto	Utilizado na execução de rodovias, corredores, etc.
Colorido	Obras com destaques arquitetônicos
Refrigerado	Barragens, peças de concreto com grande volumes
Tilt-up	É um sistema construtivo no qual as paredes do edifício (galpões industriais shopping, armazéns escritórios etc.) são moldadas sobre o próprio piso e posteriormente içadas.
Leve	Obras populares, casas com limitações de carga
Submerso	Portos, marinas, fundações de plataforma

Fonte: Autor.

2.8 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A importância da trabalhabilidade em tecnologia do concreto é óbvia. Ela é uma das propriedades básicas que devem ser atendidas. Independente da sofisticação usadas nos procedimentos de dosagem e outras considerações, tais como custo, uma mistura de concreto que não possa ser lançada facilmente ou adensada em sua totalidade provavelmente não fornecerá as características de resistência e trabalhabilidade esperadas [20]. A trabalhabilidade deve ser definida como uma propriedade física inerente ao concreto sem referência às circunstâncias de um tipo particular de construção e que determina a facilidade de lançamento e adensamento do concreto, com ausência de segregação. A forma de adensamento do concreto deve ser considerada. Seja o adensamento feito por apiloamento ou por vibração, o processo consiste essencialmente na eliminação do ar aprisionado até se chegar a uma configuração mais próxima do que é possível se conseguir para a mistura. Assim, a energia é usada para anular o atrito entre as partículas que constituem o concreto, bem como entre elas e as superfícies da fôrma e da armadura. Essas forças podem ser denominadas atrito interno e atrito superficial, respectivamente. Além disso, parte da energia aplicada é usada para vibrar as fôrmas ou para abalar e, na verdade, vibrar as partes do concreto que já tenham sido plenamente adensadas. Assim, o trabalho aplicado tem uma parte “desperdiçada” e uma parte “útil”. Como o atrito interno é uma propriedade intrínseca da mistura, a trabalhabilidade pode ser definida como a quantidade de trabalho interno útil necessário para produzir adensamento prévio [6].

Trabalhabilidade determina a facilidade com a qual um concreto pode ser manipulado sem segregação nociva. De todas as formas, um concreto que seja difícil de lançar e adensar não só aumentará o custo de manipulação como também terá resistência, durabilidade e aparência, inadequadas. De forma similar, misturas com elevada segregação e exsudação, apresentarão maior dificuldade no acabamento, um custo mais elevado e proporcionarão um concreto menos durável. Portanto, trabalhabilidade pode afetar tanto o custo quanto à qualidade do concreto [20].

Apesar de ser a mais importante característica do concreto fresco, a trabalhabilidade é de difícil conceituação, visto envolver ou englobar uma série de

outras propriedades, não havendo, ainda, completa concordância sobre quais sejam essas propriedades [21]

A trabalhabilidade é realizada pelo abatimento (deformação) causado na massa de concreto pelo seu próprio peso. Pode ser mensurada pelo teste de abatimento de tronco ou slump (em inglês). A Figura 3 mostra os equipamentos utilizados para efetivar o teste, como o molde no formato tronco cone oco, placa de base, haste de compactação e concha utilizada para coleta do material.

Figura 5 - Ensaio de abatimento de tronco



Fonte: autor

2.9 ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA

A escória de aciaria elétrica pode ser conceituada como sendo o resíduo da fusão da carga metálica – sucata – e, posteriormente, do refino secundário do banho metálico, sendo formado por uma solução de mistura de óxidos, silicato e, eventualmente, aluminatos fosfatos e boratos, de menor densidade que o aço e imiscíveis. Na temperatura de processo da aciaria, se apresentam líquidas ou parcialmente líquidas [22].

Dentre as principais funções da escória durante o processo de produção do aço, pode-se destacar:

- Isolar o banho metálico com o objetivo de reduzir as perdas de calor;

- Proteger o banho metálico da oxidação, absorção de hidrogênio e nitrogênio da atmosfera;
- Cobrir o arco elétrico tanto no forno elétrico quanto no forno panela, promovendo a proteção do revestimento refratário;
- Aumentar a qualidade do aço artavés da incorporação de óxidos de impurezas durante o refino primário e produtos da desoxidação durante o refino secundário, além da absorção de inclusões.
- Participar efetivamente nos processos de desfoforação no FEA e de dessulfuração no forno panela
- Ser mais compatível possível com a natureza do revestimento refratário.

A indústria siderúrgica nos últimos anos tem sido pressionada por uma constante necessidade de redução de custos e produção de aço de elevada qualidade, razão pela qual uma manipulação eficiente das propriedades da escória, no entanto no refino primário quanto no refino secundário, tem se tornado cada vez mais importante. É impossível se atingir o nível de produtividade exigido nos processos atuais através de práticas ineficientes de controle das propriedades da escória. Além disso, atualmente, a escória já é considerada um subproduto capaz de agregar valor aos materiais nos quais é aplicada.

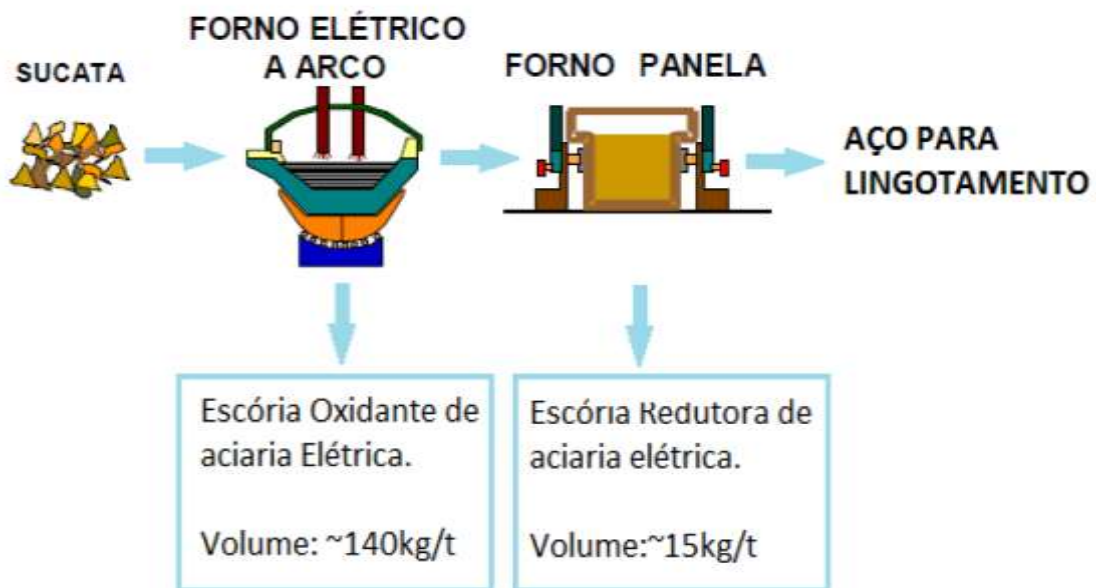
Uma das principais características da escória é o seu comportamento expansivo. Esse comportamento expansivo é causado, dentre outros elementos, pela hidratação de MgO reativo e de CaO livre, juntamente com partículas de aço ou ferro metálico que são incorporadas à escória no processo de produção, além da corrosão do material metálico presente na escória, que também contribuem para elevar a sua expansividade, tornando-o um material instável.[12]

A escória de aciaria apresenta uma estrutura porosa, por onde migra a água, reagindo com o óxido de cálcio livre e originando o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), cuja estrutura cristalina tem o maior volume, aumentando cerca de 99% do volume inicial. Esse aumento de volume deforma a estrutura cristalina já definida da escória de aciaria, gerando tensões de tração que posteriormente, irão gerar microfissuras e expansão. [23]

2.9.1 Geração da escória forno elétrico a arco (FEA)

A primeira escória a ser formada na aciaria elétrica é a escória oxidante formada no forno elétrico a arco, FEA, resultante da fusão da sucata juntamente com outras cargas adicionadas no forno. Esta escória também é conhecida como escória negra e é caracterizada por promover o ajuste primário de composição química do banho metálico através da oxidação das impurezas presentes.

Figura 6 - Fluxograma para a obtenção de escória na aciaria.



Fonte [15].

Milhares de toneladas de escória de aciaria são produzidos por ano, na faixa de 2,5 a 4 milhões de toneladas. De acordo com estatísticas publicadas pelo instituto Aço Brasil (2011), de janeiro a dezembro de 2010 foram produzidos 32,9 milhões de toneladas de aço bruto, resultando em 4,1 milhões de toneladas de escória de aciaria, considerando-se a quantidade média de 100 a 150 Kg de escória gerada por tonelada de aço bruto produzido. Estima-se que em 2016 esses valores aumentem para 77 e 10,7 milhões de toneladas respectivamente. Destes, 3,7 milhões de toneladas de escória produzida no Brasil 72,3% são produzidas em conversor de oxigênio (LD) e 27,7% são escórias produzidas em forno de arco elétrico (AF).

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 PROCEDIMENTO DE COLETA DE DADOS

O desenvolvimento das atividades práticas deste trabalho foram realizadas em duas empresas situadas no município de Marabá, sendo elas, a empresa Goiás Serviços de Concretagem Ltda, onde foram feitos os ensaios de teste de slump e resistência a compressão, e na empresa CMT Engenharia, onde foi realizado o ensaio de determinação da massa específica da adição e dos agregados.

A empresa Sinobras forneceu a escória já analisada quimicamente. Os ensaios de granulometria dos agregados e da escória foram feitos no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFPA. Já os ensaios do cimento são disponibilizados para clientes, neste caso, cedidos pela empresa Votorantim Cimentos.

O procedimento dos ensaios foi organizado por: caracterizações dos materiais separadamente, seguido de utilização de três traços padrões, sendo eles, 20, 25, 30 MPa. Cada traço, separadamente, teve a incorporação de três teores de resíduos de escória do FEA: 5%, 10% e 15% em substituição parcial da areia utilizada.

3.1.1 Caracterização dos Materiais

É de extrema importância analisar e conhecer as características dos materiais, pois estes influenciam diretamente no processo de dosagem do concreto tanto fresco como endurecido. A seguir, são mostradas as caracterizações dos materiais separadamente.

3.1.1.1 Caracterização do Cimento CP II E -32

Todos os ensaios realizados foram cedidos através do boletim de análises de cimento da Votorantim Cimentos referente ao lote de fabricação do mês de junho de 2013, exatamente o lote utilizado nas dosagens deste trabalho, conforme apresentado nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Ensaio físico/químico do cimento

Ensaio	NBR N°	Umidade	Resultados	Especificação norma NBR 11578/91
Perda ao fogo – PF	NM18/04	%	5,14	≤ 6,5
Óxido de Magnésio – MgO	NM11-2/04	%	3,04	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico SO ₃	NM16/04	%	3,02	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel - RI	NM22/04	%	0,75	≤ 2,5
Equivalente Alcalino em Na ₂ O - (0,658 x K ₂ O% + Na ₂ O%)	-	%	-	Não aplicável
Anidrido carbonico CO ₂	NBR 11578	%	-	≤ 5
Óxido de Cálcio Livre - CaO(Livre)	NM13/04	%	-	Não aplicável

Fonte [11].

Tabela 9 Resistência a compressão (MPa) – NBR 7215/96

Estabilidade a Compressão (MPa) NBR 7215/96

Idade (dias)	Mín	Máx	Média	Desvio	Especificação norma NBR 11578/91
1	-	-	-	-	Não aplicável
3	18,0	20,7	19,2	1,17	≥ 10,0
7	25,3	26,1	25,7	0,49	≥ 20,0
28	-	-	-	-	≥ 32,0

Fonte [11].

Tabela 10 - Ensaios físicos e mecânicos.

Ensaio	NBR N°	Umidade	Resultados	Especificação norma NBR 11578/91
Área Específica (Blaine)	NM76/98	cm ² /g	3400	Não aplicável
Massa Específica	NM23/01	g/cm ³		'Não aplicável
Densidade Aparente		g/cm ³		Não aplicável
Finura - Resíduo na Peneira de 0,075 mm (# 200)	11579/91	%	2,89	≤ 12
Finura - Resíduo na Peneira de 0,044 mm (# 325)	12826/93	%	13,12	Não aplicável
Água da Pasta de Consistência Normal	NM43/03	%	27,11	Não aplicável
Início de Pega	NM65/03	h:min	2:20	≥1
Fim de Pega	NM65/03	h:min	3:27	≤10
Expansibilidade de Le Chatelier - a Quente	11582/91	mm	0,00	≤ 5

Fonte [11].

3.1.1.2 Caracterização do Agregado Miúdo

- a) Composição Granulométrica: O ensaio consiste em separar os grãos da areia conforme o tamanho, através do peneiramento, após pesado cada parte, faz-se a soma das porcentagens retidas acumuladas das peneiras da série normal e intermediária com tampa e fundo, chegando ao módulo de finura, e através do qual, tem-se a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado nas peneiras da série normal dividida por 100. [24]
- A Tabela 11 mostra a série normal e intermediária de peneiras. Sendo o material utilizado extraído do Rio Tocantins no município de Marabá e fornecido pela Mara-Seixo (grupo Casa Goiás). A Figura 5 exibe o agregado miúdo utilizado.

Figura 7 - Agregado miúdo utilizado.



Fonte: autor.

Tabela 11 - Série normal e intermediária de peneiras

SÉRIE NORMAL	SÉRIE INTERMÉDIARIA
75 mm	
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μm	-
300 μm	-
150 μm	-

Fonte [17].

b) Determinação da massa específica. O ensaio baseia-se na pesagem de 500 g de areia, a qual é colocada em um frasco aferido com capacidade de 500 cm³, com erro inferior a 0,15 cm³ a 20 °C. A massa do registro é anotada e o frasco é cheio com água até a marca de 500 cm³. Após 1h enche-se o frasco até a marca de 500 cm³ e determina-se a massa total com precisão de 0,1 g. O agregado é retirado do frasco e

seco à temperatura de 105 °C, e esfriado à temperatura ambiente em dessecador e pesado com precisão de 0,1 g [25].

3.1.1.3 Caracterização do Agregado Graúdo

a) Composição granulométrica: É o mesmo ensaio utilizado para o agregado miúdo, com a mesma série de peneiras, o material utilizado como agregado graúdo é proveniente da extração do Rio Tocantins em Marabá e é apresentado na Figura 6.

Figura 8 - Agregado graúdo utilizado.



Fonte: autor.

b) Determinação da massa específica: O material deve ser pesado e em seguida submerso em água por 24 horas à temperatura ambiente. Após o período de submersão, a amostra é retirada e a água visível deve ser eliminada com pano absorvente. Deve-se pesar novamente a amostra. Novamente a amostra é imersa em água à 23 °C e pesada em água. A amostra então é seca à temperatura em torno de 105 °C e pesado novamente. A partir dos dados pode-se determinar a massa específica [26].

3.1.1.4 Aditivo Polifuncional

O aditivo utilizado é fabricado pela empresa muraplast, e possui uma ação combinada (retardante e plastificante) e a base química de lignossulfatos e

aditivos especiais. O teor utilizado nos traços foi em conformidade com laudo técnico do produto, divulgado pelo fabricante, demonstrado na tabela 12.

Tabela 12 - Dados técnicos do aditivo.

TESTE	NORMA	ESPECIFICAÇÃO
APARÊNCIA	NBR 10908	MARROM
Ph	NBR 10908	5,5 – 5,5
DENSIDADE	NBR 10908	1,22 – 1,22
SÓLIDOS	NBR 10908	41,52 - 41,52

Fonte: Muraplast.

3.1.1.5 Escória do Forno Elettrico à Arco (FEA)

a) Composição granulométrica: Foram utilizados os mesmos procedimentos dos agregados miudos, de acordo com a ABNT NBR NM 248/03 – Agregados - determinação da composição granulométrica.

b) Determinação da massa específica: Foi utilizado o mesmo procedimento do agregado miúdo, de acordo com a ABNT NBR NM 52:2003 – Agregados – determinação de massa específica e massa específica aparente de agregado miúdo.

c) Análise química foi feita no laboratório da empresa Sinobras, através do Espectrômetro de raios-X do fabricante ARL 3460, modelo Metals Analyzer, Optical Emission.

d) Para análise microestrutural, as amostras foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado com espectrômetro de energia dispersiva de raios-X (EDS), da marca Hitach e modelo TM-3000.

3.1.2 Estudo de Dosagem

3.1.2.1 Determinação do Teor de Argamassa

O teor de argamassa é de fundamental importância no estudo de dosagem, pois a falta da mesma pode ocasionar em falhas na concretagem ou porosidade no concreto, por outro lado o excesso de argamassa produz um concreto

visivelmente melhor, no entanto seu preço é mais elevado e estando mais sujeito a fissuração por origem térmica e por retração de secagem.

O estudo experimental foi realizado a partir dos traços disponíveis para comercialização na empresa Goiás Serviços de Concretagem Ltda, os quais, através das misturas, realizaram-se observações práticas, a partir daí, verifica-se a trabalhabilidade com o objetivo de determinar o teor ideal de argamassa e um fator água/cimento inicial. Estes serviram de apoio para a execução dos traços com adição de escória.

3.1.2.2 Determinação dos traços auxiliares

Baseado nas informações adquiridas (fator a/c e teor de argamassa), os traços foram desenvolvidos e a mistura foi realizada utilizando seixo, areia, cimento e 80% da quantidade de água prevista, posteriormente, colocou-se o aditivo da marca Muraplast 820 k.

Enfim, após a mistura completa do aditivo, foi acrescentado os 20% restante da água do traço. A partir dos três traços auxiliares foram feitas as dosagens com teores de rejeito de escória como adição, sendo estes, 5%, 10% e 15%, substituindo parcialmente a areia em relação aos traços de referência.

3.1.3 Ensaios de concreto

3.1.3.1 Ensaio no concreto fresco – Trabalhabilidade.

A determinação da trabalhabilidade foi feita através de um ensaio denominado Teste de Slump, onde o aparelho utilizado consiste em uma fôrma cônica no formato de tronco com diâmetro de 10 a 20 cm e altura de 30 cm, e seus respectivos instrumentos de auxílio para o teste são apresentados na Figura 3.

Dessa forma, a massa de concreto é colocada no aparelho e distribuída em 3 camadas iguais, sendo que cada camada é adensada por uma barra de 16 mm, recebendo 25 golpes sucessivos. Logo, após cessado o adensamento da última camada, é feito o nivelamento da mesma com uma colher de pedreiro. O molde então foi retirado lentamente [27].

Feito este procedimento, anotou-se a diferença entre as alturas do molde e da massa de concreto assentada, como mostrado na Figura 7, o qual permite identificar índices de trabalhabilidade em função da diferença entre alturas.

Figura 9 - Slump teste



Fonte: autor

Todos os traços desenvolvidos foram submetidos a 20 minutos de rotação na betoneira. Nos primeiros 10 minutos de rotação a betoneira era parada e assim o primeiro teste de abatimento era realizado. Por conseguinte, a mistura que ficava na betoneira era submetida a mais 10 minutos de rotação para verificar-se a perda de trabalhabilidade e então era feito novamente mais um teste de slump.

3.1.3.2 Ensaio de concreto endurecido – Resistência à compressão axial

Para todos os traços foram moldados 10 corpos de prova de 10x20 cm na forma cilíndrica, verificando-se sua resistência em 3, 7, 14, 21 e 28 dias [29].

Para cada idade, era rompido um corpo de prova e uma para a contra prova de acordo com a Figura 8. Todos os corpos de prova foram submetidos à cura total em uma câmara úmida, sendo que antes de cada rompimento eram retirados da câmara com antecedência de 12 horas para perda de umidade [29] de acordo com a Figura 9.

O concreto moldado foi submetido ao ensaio de compressão em uma prensa manual da marca Contenco, existente no laboratório da Goiás Concreto Marabá, Indústria e Comércio LTDA.

Figura 10 - Máquina para o ensaio de compressão



Fonte: autor.

Figura 11 - Tanque de cura



Fonte: autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para determinar o teor de argamassa realizou-se um cálculo onde o teor de argamassa foi determinado sendo de 61%; o que é um teor elevado, porém, relativamente comum quando se utiliza o seixo na produção de concretos convencionais.

Além disso, quanto maior o teor de argamassa e menor a superfície total dos grãos, melhor será o envolvimento dos grãos pela pasta, o que provoca uma redução do atrito interno da mistura e conseqüentemente faz com que o concreto fique mais plástico. Entretanto, se a quantidade de agregado graúdo aumentar excessivamente, a falta de argamassa criará vazios na mistura permitindo o atrito direto dos graúdos, o que resulta em uma grande perda da plasticidade e em dificuldades para o adensamento [25].

Assim, as Tabelas 13, 14, 15 exibem os traços padrões de referência e auxiliares utilizados além de todas as incorporações de adição e a/c utilizados.

Tabela 13 - Traço com 20 MPa 8+/-2.

Designação	Teor de Escória (%)	Cimento (Kg)	Escória (Kg)	Areia (Kg)	Seixo 0 (Kg)	Água (L)	Aditivo (ml)
CP I	0	8	0	24,55	27,59	4,08	30
CP II	5	8	1,24	23,31	27,59	4,08	30
CP III	10	8	2,46	22,10	27,59	4,08	30
CP IV	15	8	3,68	20,87	27,59	4,08	30

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Traço com 25 MPa 8+/-2.

Designação	Teor de escória (%)	Cimento (kg)	Escória (kg)	Areia (kg)	Seixo 0 (kg)	Água (L)	Aditivo (ml)
CP I	0	8	0	21,19	22,85	3,33	50
CP II	5	8	1,08	20,11	22,85	3,33	50
CP III	10	8	2,11	19,08	22,85	3,33	50
CP IV	15	8	3,18	18,01	22,85	3,33	50

Fonte: Autor

Tabela 15 - Traço com 30 MPa 8+/-2.

Designação	Teor de escória (%)	Cimento (kg)	Escória (kg)	Areia (kg)	Brita 0 (kg)	Água (L)	Aditivo (ml)
CP I	0	8	0	20,54	19,46	3,10	70
CP II	5	8	1,03	12,04	19,51	3,10	70
CP III	10	8	2,07	10,32	18,47	3,10	70
CP IV	15	8	3,08	8,60	17,46	3,10	70

Fonte: Autor.

Para ensaio de determinação da consistência (slump teste), foi possível a obtenção de um intervalo de abatimento de 8 ± 2 nos traços de referência.

As Tabelas 16, 17 e 18 apresentam a perda de trabalhabilidade durante o tempo de ocorrência do ensaio.

Tabela 16 – Ensaio abatimento de tronco (*slump*) inicial e secundário, análise da perda de trabalhabilidade, traço de 20 (MPa).

Traço	1° Slump (10 min)	2° slump (15 min)
Traço padrão	12,0	8,0
Traço (5%)	15,0	9,0
Traço (10%)	17,0	9,5
Traço (15%)	16,5	10,0

Fonte: Autor.

Figura 12 - Perda de trabalhabilidade, traço (20 MPa)

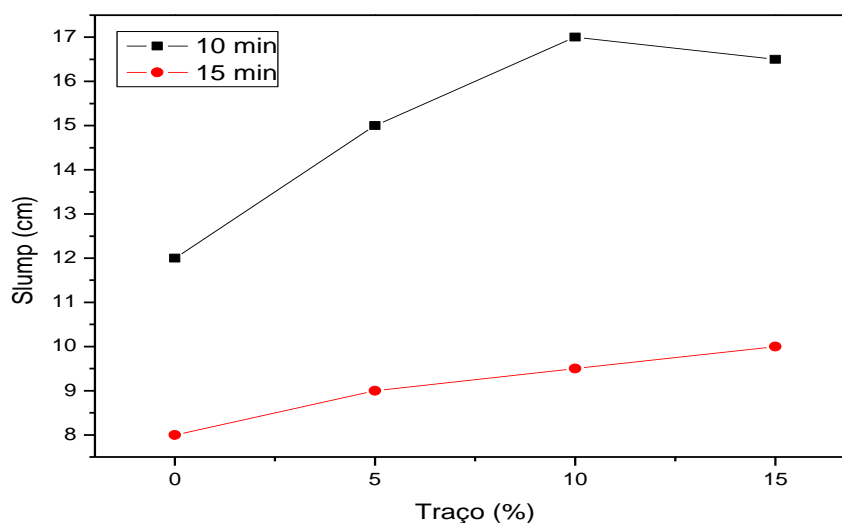
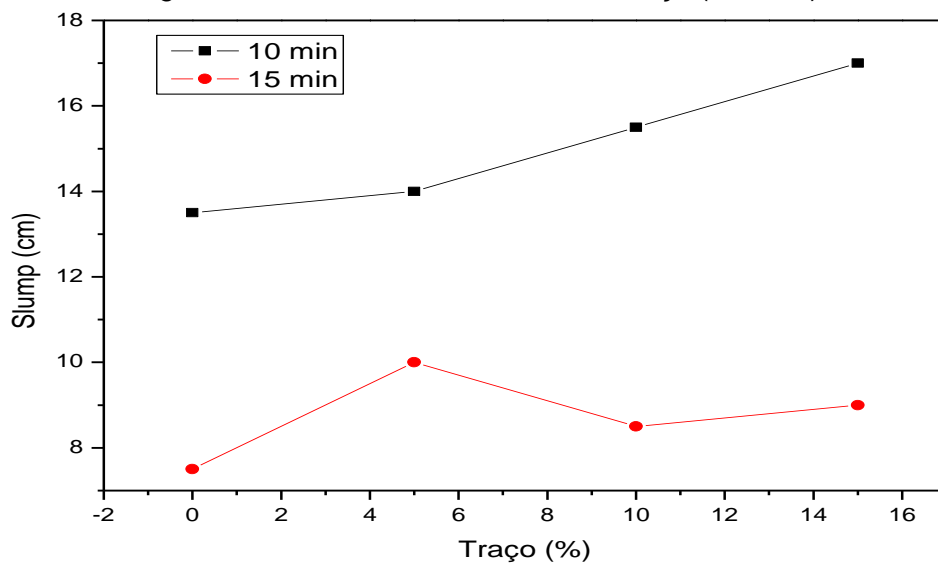


Tabela 17 - Slump inicial e secundário, análise da perda de trabalhabilidade, Traço de 25 (MPa).

Traço	1° slump (5 min)	2° slump (15 min)
Traço padrão	13,5	7,5
Traço (5%)	14	10
Traço (10%)	15,5	8,5
Traço (15%)	17	9

Fonte: Autor

Figura 13 - Perda de trabalhabilidade, traço (25 MPa)



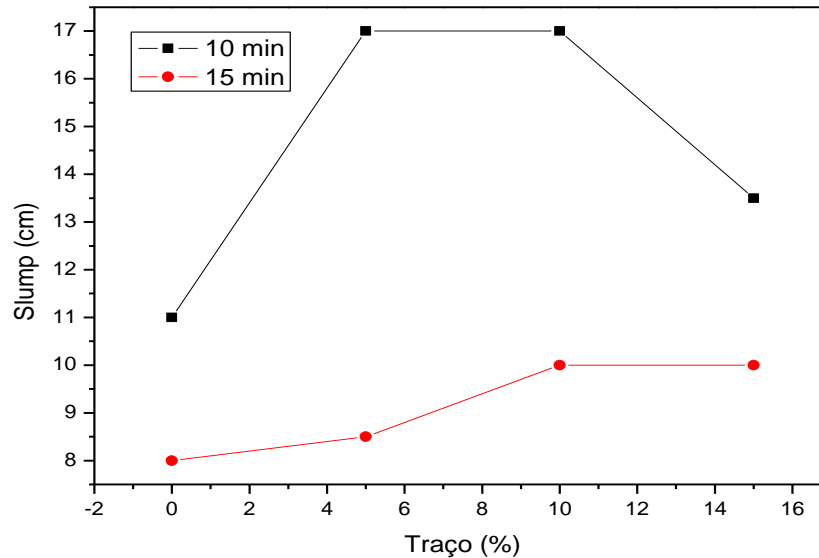
Fonte: autor

Tabela 18 - Slump inicial e secundário, análise da perda de trabalhabilidade, Traço de 30 (MPa).

Traço	1° slump (5 min)	2° slump (15 min)
Traço padrão	11	8
Traço (5%)	17	8,5
Traço (10%)	17	10
Traço (15%)	13,5	10

Fonte: Autor

Figura 14 - Perda de trabalhabilidade, traço (30 MPa)



Fonte: autor.

A trabalhabilidade do concreto é um fator determinante na produção e na agilidade da obra, sendo esta, tão importante quanto à resistência à compressão.

Observou-se também uma intensa dificuldade em perder água para o meio, que é considerado como um bom comportamento do concreto, pois quanto maior esta propriedade, maior a facilidade em proporcionar meios adequados à peça concretada para concluir uma cura efetiva, garantindo que as reações de hidratação e ganho de resistência ocorram com facilidade. O fato é comprovado pela resistência atingida em sete dias de moldagem, aonde se chega próximo do maior valor atingido dentre os traços dosados para regime estabelecido.

No traço de 20 MPa os primeiros slumps retirados são todos superiores ao traço de referência, e em relação a adição de escória, os resultados aumentam para 10%, tendo assim, uma grande instabilidade de trabalhabilidade com relação aos demais. Considerando o traço de 25 MPa, a melhor faixa de trabalhabilidade é obtida com o traço de 0% de adição, tanto no primeiro quanto no segundo slump retirado.

Para as demais dosagens básicas, nos primeiros slumps, ocorreram diferenças das consistências iniciais. Para os segundos testes, os traços de 25 MPa se mantiveram enquadrados dentro da faixa pré determinada de 8 ± 3 cm. Observa-se também no traço de 30 MPa uma considerável influência da adição neste experimento.

Para o traço padrão, os valores atingidos são os menores que 11 cm sendo reduzidos posteriormente para 8 cm. Em todos os traços com adição, os resultados foram acima dos estipulados para o ensaio, ultrapassando da faixa pré-determinada de 8 ± 3 cm no primeiro slump. Nos segundos testes de slump, em todos os casos, houve uma queda para a faixa pré-determinada, dando destaque ao traço com 15% de adição, caindo em torno de 3,5 cm.

A análise química da escória do forno elétrico a arco (FEA) obtida por fluorescência de raios X é apresentada na Tabela 19 sendo os resultados expressos na forma de óxidos. Verifica-se que o percentual de óxido de cálcio proveniente da escória é dominante, sendo 21,45%, o qual é utilizado durante o processo de refinamento do aço, já o teor de sílica é 14,88%, e o restante é constituído de óxidos metálicos, os quais são gerados durante o processo de produção do aço.

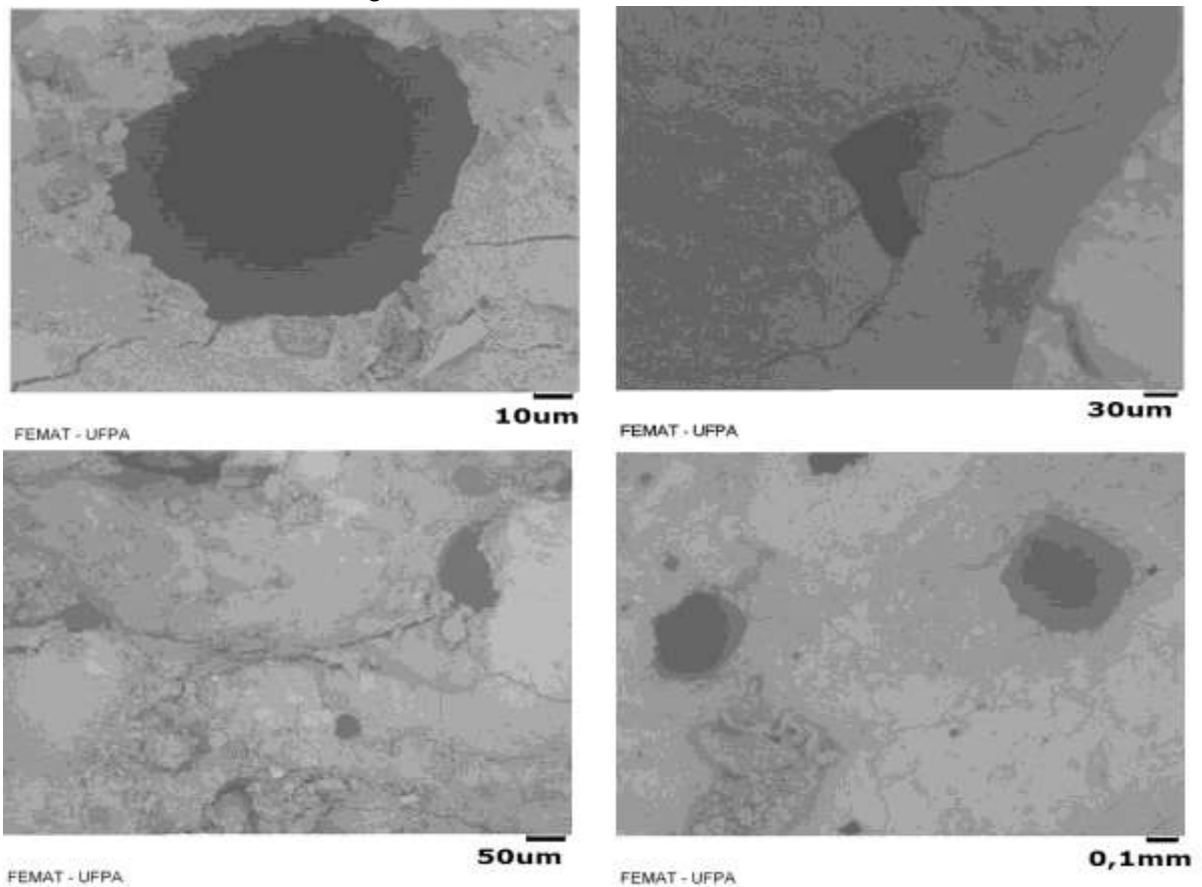
Tabela 19 - Análise química da escória do FEA.

CaO	21,447	F	1,079
SiO₂	14,885	K₂O	0,063
MgO	9,312	MnO	4,304
P₂O₅	0,276	Na₂O	0,075
FeO	53,013	S	0,035
Cr₂O₃	0,228	TiO	0,641
V₂O₅	0,217	Al₂O₃	3,479

Fonte: Autor

Na figura 15 abaixo é demonstrado o MEV do copro de prova de 20 MPa.

Figura 15 - Mev do concreto de 20 MPa.



A partir da figura 15 a morfologia de uma superfície de fratura no corpo de prova de 20 MPa, onde verificou-se a morfologia, podendo perceber como as partículas de escória ficam dispersa na concreto. É possível perceber que as trincas vão de encontro as partículas, desse modo a escória ajuda a dissipar a propagação da trinca, contribuindo para a resistência final desejada.[30]

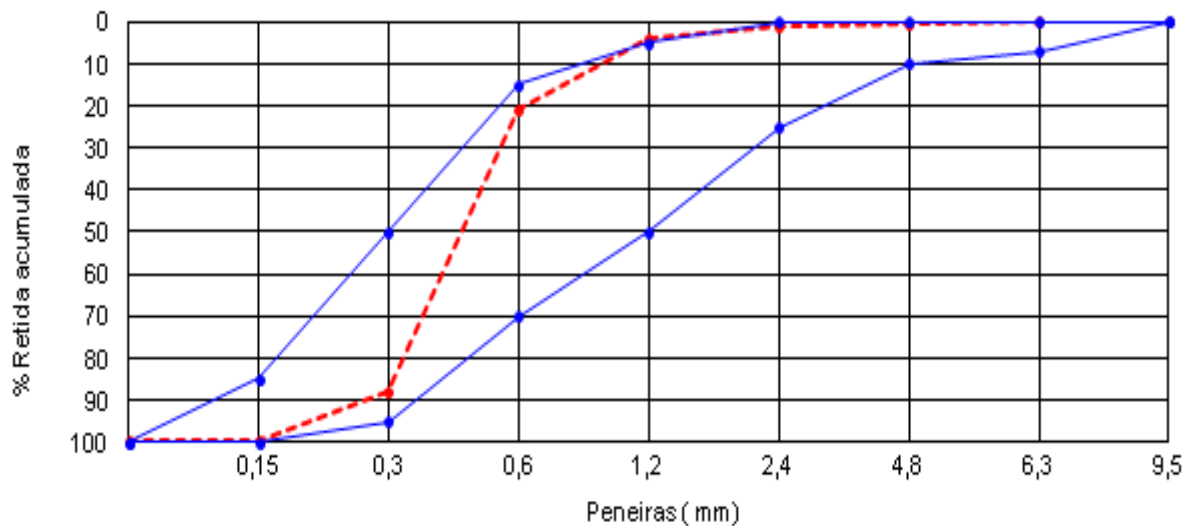
A distribuição granulométrica dos agregados é demonstrada nas tabelas 19, 20, já a granulometria da escória do FEA é apresentada na Tabela 21. Logo, através da mesma verifica-se um módulo de finura de 2,05 mm, o que caracteriza que a escória se enquadra como agregado miúdo de acordo com a norma NBR 7211-2009.

Tabela 20 - Granulometria da areia

Determinação		1ª	2ª	Média	% Retida	% Retida acumulada
Massa inicial da amostra		1000,2	1.000,1	1000,2		
PENEIRAS (mm)	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0			
	4,8	1,8	1,6	1,7	0,2	0,2
	2,4	8,9	7,7	8,3	0,8	1,0
	1,2	30,2	29,3	29,8	3,0	4,0
	0,6	169,5	170,3	169,9	17,0	21,0
	0,3	670,5	675,4	673,0	67,3	88,2
	0,15	115,4	114,1	114,8	11,5	99,7
	Prato	1,3	1,4	1,4	0,1	99,9
Dimensão máxima característica (mm)				1,20	zona: UTILIZÁVEL	
Módulo de Finura				2,14		

Fonte: Autor

Figura 16 - Distribuição granulométrica da areia.



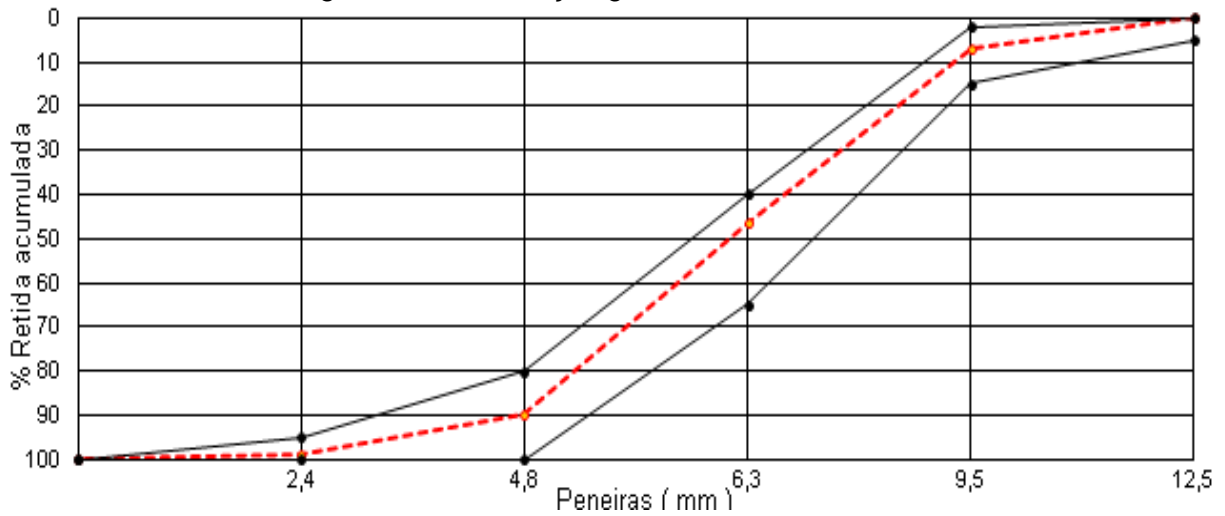
Fonte: Autor

Tabela 21 - Granulometria do Seixo

Determinação		Massa (g)			% Retida	% Retida Acumulada
		1ª	2ª	Média		
massa inicial da amostra lavada		1000,0	1000,7	1000,4		
PENEIRAS (mm)	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	9,5	69,1	70,1	69,6	7,0	7,0
	6,3	395,2	396,3	395,8	39,6	46,5
	4,8	434,9	434,1	434,5	43,4	90,0
	2,4	87,9	88,1	88,0	8,8	98,8
	Prato	12,7	12,3	12,5	1,2	100,0
Dimensão máxima característica (mm)				12,5	Zona: 7211	
Módulo de Finura				5,96		

Fonte: Autor

Figura 17 - Distribuição granulométrica do seixo.

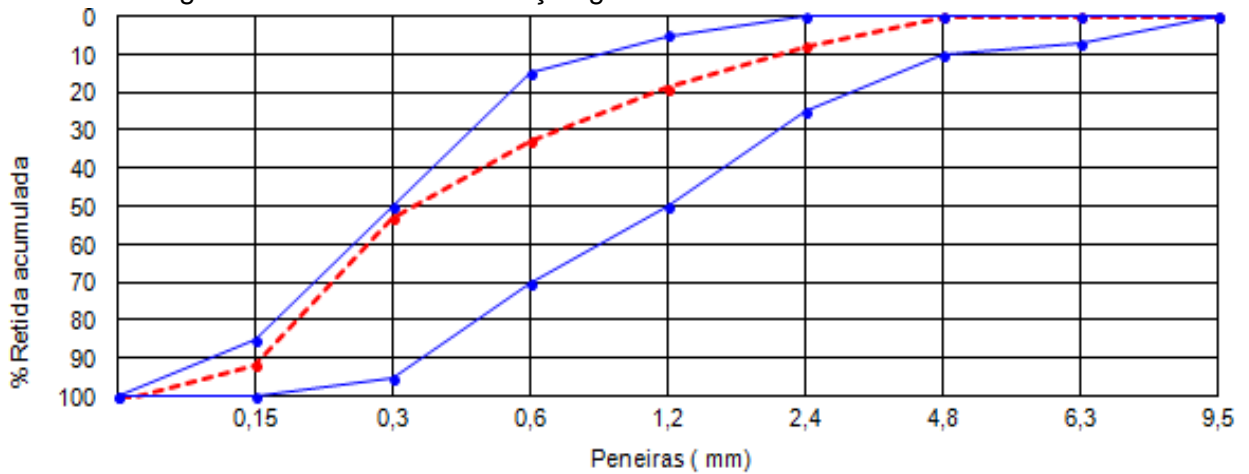


Fonte: Autor

Tabela 22 – Distribuição granulométrica da escória do FEA.

Determinação		1ª	2ª	Média	% Retida	% Retida acumulada
Massa inicial da amostra		1000,1	1.001,1	1000,6		
PENEIRAS (mm)	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	6,3	0,0	0,0			
	4,8	2,0	3,0	2,5	0,2	0,2
	2,4	75,0	74,5	74,8	7,5	7,7
	1,2	112,0	113,2	112,6	11,3	19,0
	0,6	140,0	141,1	140,6	14,0	33,0
	0,3	200,0	198,7	199,4	19,9	52,9
	0,15	390,0	389,0	389,5	38,9	91,9
	Prato	95,8	96,0	95,9	9,6	101,5
Dimensão máxima característica (mm)				4,80	zona:	
Módulo de finura				2,05	UTILIZÁVEL	

Figura 18 - Curva de distribuição granulométrica da escória do FEA.



Fonte: Autor.

Com base nos ensaios granulométricos podemos definir a areia como areia média e o seixo como seixo 1. Assim, fica evidente que os agregados miúdos exercem influência preponderante sobre a plasticidade do concreto, pois possuem uma área específica elevada. Dessa forma, qualquer alteração no teor da mistura provocará modificações significativas no consumo de água e, conseqüentemente, no de cimento [25]. Sendo que, a areia possui granulometria e densidade mais próxima a da escória, logo, foi substituída parcialmente pela mesma. A escória do forno elétrico a arco (FEA) devido à alta resistência à compressão e durabilidade, resulta em um aprimoramento de propriedades mecânicas, tais como resistência a compressão.

A composição granulométrica em que se encontram os grãos de certos agregados tem importante influência sobre a qualidade dos concretos, agindo na compactabilidade e resistência [26]. Em geral, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor será a área superficial por unidade de volume, a qual deve ser coberta pela pasta de cimento, para uma dada relação água/cimento [14]. Para os ensaios de resistência a compressão seguem as Tabelas 23, 24, e 25.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de compressão para o traço de 20 MPa.

TEMPO DE CURA		TRAÇO			
		SEM ADIÇÃO	ADIÇÃO (5%)	ADIÇÃO (10%)	ADIÇÃO (15%)
3 dias	1	14,11	13,48	12,52	11,4
	2	13,89	12,45	11,90	11,0
7 dias	1	19,32	18,22	17,50	17,3
	2	19,00	18,03	17,10	16,32
14 dias	1	24,34	24,13	23,98	23,11
	2	23,87	23,78	22,38	22,39
21 dias	1	26,70	26,50	25,04	24,89
	2	25,53	26,12	24,89	24,13
28 dias	1	34,01	33,15	31,31	30,80
	2	33,98	30,25	31,07	32,48

Tabela 24 - Resultados do ensaio de compressão para o traço de 25MPa

TEMPO DE CURA		TRAÇO			
		SEM ADIÇÃO	ADIÇÃO (5%)	ADIÇÃO (10%)	ADIÇÃO (15%)
3 dias	1	16,87	16,5	16,45	15,42
	2	15,98	15,32	15,54	15,29
7 dias	1	22,15	22,34	21,3	20,95
	2	22,05	22,01	19,89	18,81
14 dias	1	36,00	35,72	33,05	33,05
	2	34,89	33,89	32,98	32,14
21 dias	1	39,91	39,55	35,09	35,99
	2	38,13	38,76	35,0	33,79
28 dias	1	40,83	40,79	36,91	35,70
	2	40,34	40,03	35,76	35,04

Fonte: autor.

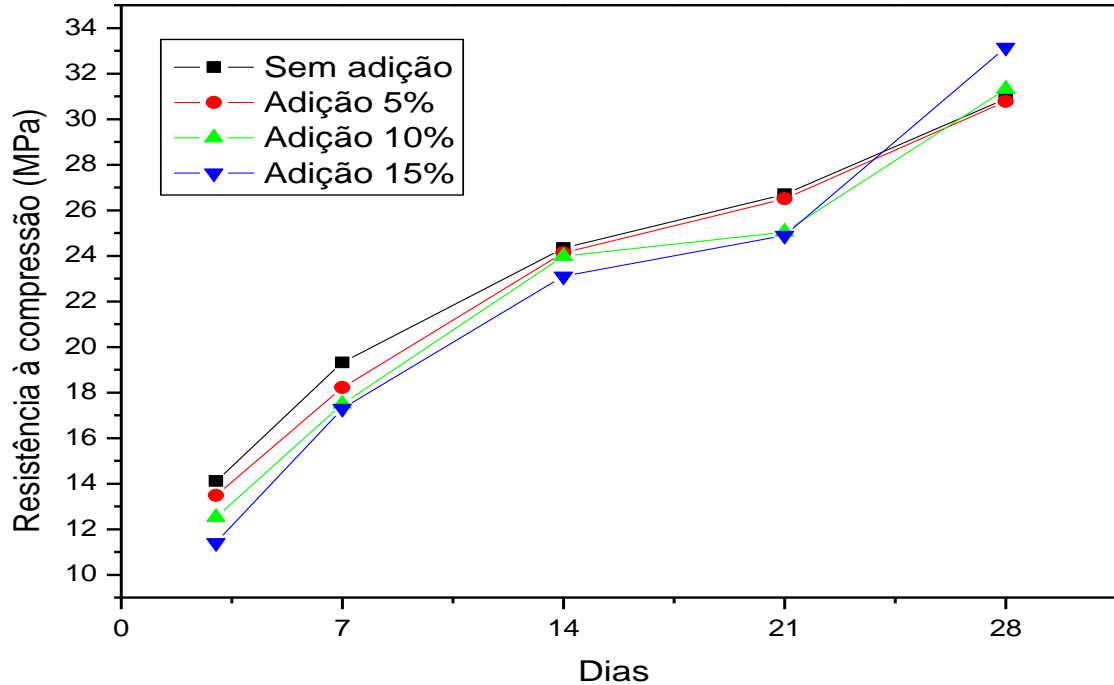
Tabela 25 - Resultados do ensaio de compressão para o traço de 30 MPa.

TEMPO DE CURA		TRAÇO			
		SEM ADIÇÃO	ADIÇÃO (5%)	ADIÇÃO (10%)	ADIÇÃO (15%)
3 dias	1	19,30	18,58	17,45	17
	2	19,23	17,57	18,33	16,30
7 dias	1	26,90	25,87	23,3	22,4
	2	24,52	24,98	22,87	21,65
14 dias	1	43,12	41,23	34,81	32,24
	2	41,89	40,09	33,99	31,0
21 dias	1	47,89	45,29	36,99	36,85
	2	42,70	45,13	35,23	35,90
28 dias	1	54,13	50,62	42,33	39,89
	2	53,01	50,24	41,80	36,98

Fonte: autor.

Para demonstrar os resultados obtidos com resistência à compressão do concreto dosado, seguem as Figuras 19, 20 e 21.

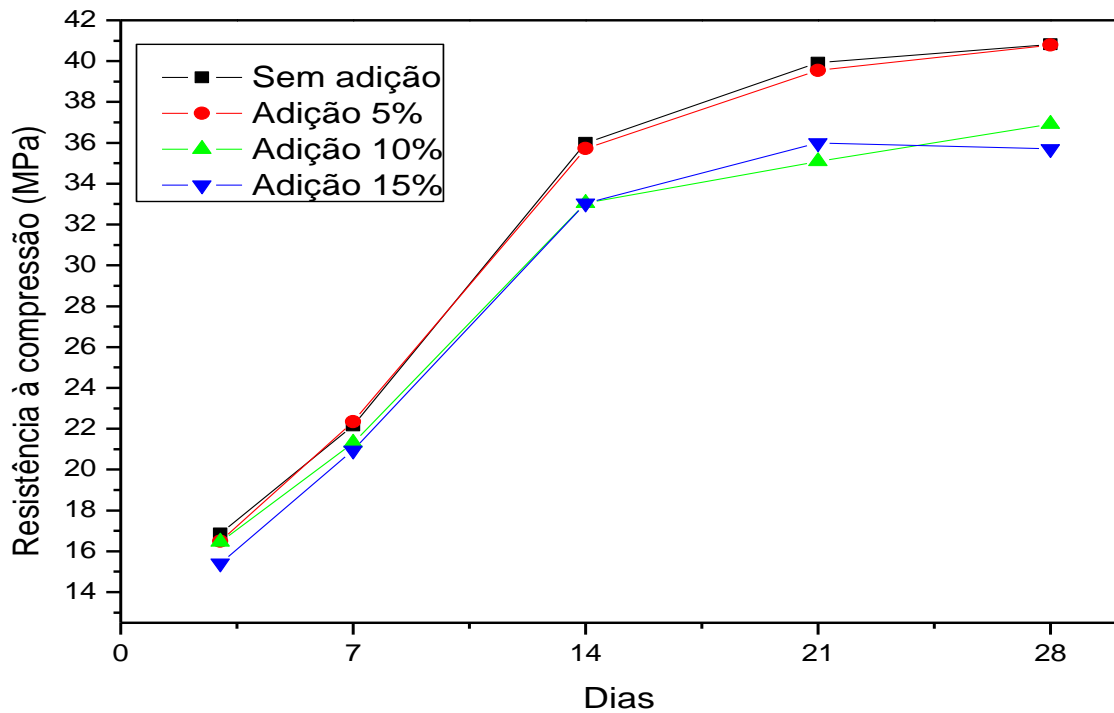
Figura 19 - Resistência à compressão do traço 20 MPa e seus respectivos traços auxiliares.



Fonte: autor

Para traço de 20 MPa, o melhor resultado em 3 dias de cura é referente ao com adição de 5% com 13,48 MPa. Em 3 e 7 dias de cura, continua em relativa vantagem, mas com uma pequena diferença dos demais. Para os demais tempos de cura, os melhores valores são exibidos no traço de referência. Mas, vale ressaltar que a diferença aos 28 dias é bastante pequena.

Figura 20 - Resistência à compressão do traço 25 MPa e seus respectivos traços auxiliares.

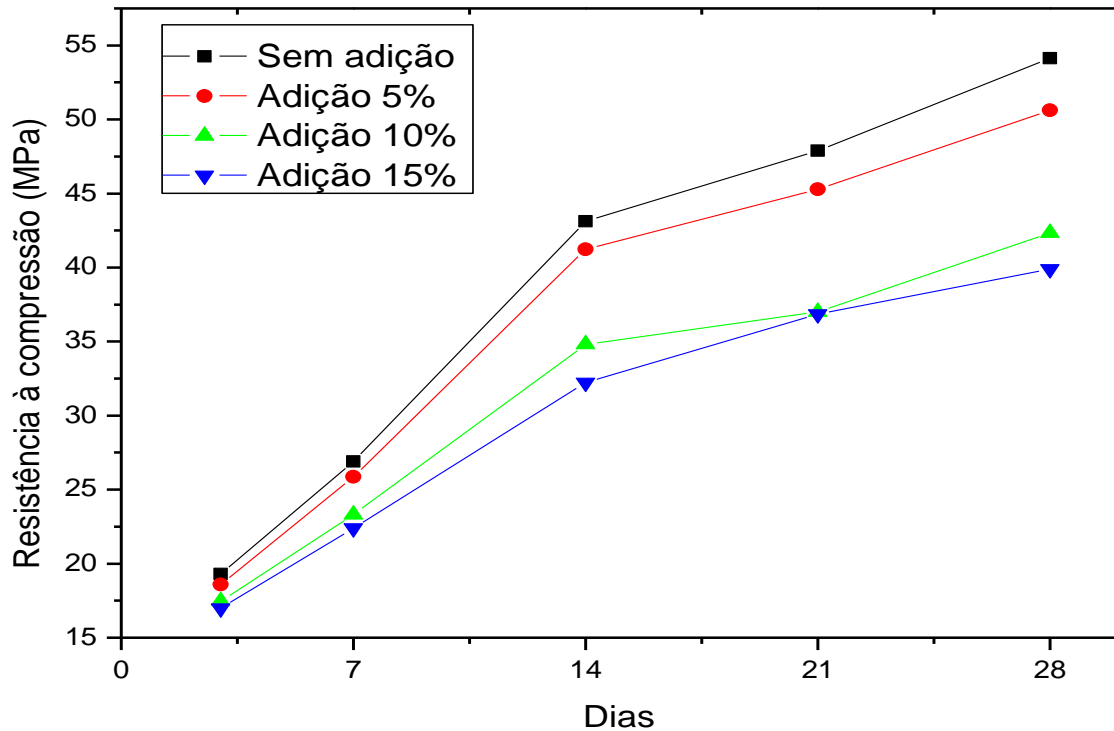


Fonte: autor

Para traço de 25 Mpa básico o melhor resultado em 3 dia de cura com adição de escória é caracterizado pelo traço 5 %, enquanto para os demais traços com adição assumem valores próximos. Nos demais dias de cura observa-se a mesma situação, sendo o traço sem adição, obtendo o melhor valor de resistência.

O melhor resultado atingido em 28 dias de cura é referente ao traço com adição de 5 % de escória. Porém, ainda neste caso, todos os resultados atingidos neste período de moldagem estão dentro de uma faixa exigida pelo traço de 25 MPa.

Figura 21 - Resistência à compressão do traço (30 MPa) e seus respectivos traços auxiliares.



Fonte: autor

Para o traço de 30 MPa, os valores atingidos em três dias de cura, podem ser considerados comuns a todas as dosagens, a diferença não é significativa. Já para os ensaios de três e sete dias de cura os melhores valores obtidos são referentes aos traços de 0% e 5%. E para 28 dias de cura o melhor resultado é obtido com adição de escória de 5%, atingindo em torno de 50,62 MPa.

Essa queda na resistência a compressão axial observado, deve-se ao fato de que uma das principais características da escória é o seu comportamento expansivo, causado pela hidratação de MgO reativo e de CaO livre, juntamente com partículas de aço ou ferro metálico que são incorporados à escória no processo de produção.

A escória de aciaria apresenta uma estrutura porosa por onde migra a água, reagindo com a cal livre originando o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), cuja estrutura cristalina tem maior volume. Esse aumento de volume deforma a estrutura cristalina já definida da escória de aciaria, gerando tensões de tração que, posteriormente, irão gerar microfissuras e expansão.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de granulometria e massa específica, foi possível comprovar a utilização da escória como possível substituta da areia em traços de concretos. O melhor constituinte inicial do traço de referência do concreto substituído é a areia natural em virtude de não reagir com os demais componentes do concreto e apresentar módulo de finura ideal, de modo que os agregados misturados apresentem um bom entrosamento com pequeno volume de vazios entre suas partículas, resultando numa economia de pasta.

Outro fator a se considerar, é que os grãos de escória apresentam maior resistência à derrapagem e ao desgaste superficial devido sua forma e textura, são trituráveis e apresentam melhor trabalhabilidade e compacidade quando comparado com grãos de outros agregados.

Nos traços de referência, todos os casos que foram submetidos à adição, possuíram um primeiro abatimento de tronco com maior trabalhabilidade que o traço de referência. Porém no segundo slump, houve uma queda para todos os traços, considerada como ótimo, pois todos os resultados se enquadraram dentro do que foi estabelecido no traço padrão, de 8 ± 2 , o qual é requerido em condições de grandes concretagens ou de obras que demandem um curto prazo de execução e uma compactação imediata.

Para resistência à compressão houve um ganho significativo para todos os traços, principalmente com 5% de adição. Para todas as idades os traços cumpriram o estabelecido, atingindo uma resistência a compressão axial bastante superior ao exigido.

O traço básico de 20 MPa exibe dados em que, a medida que o teor de adição aumenta, a resistência diminuiu com o passar dos dias de cura, sem comprometer a resistência estabelecida pelo traço, logo, em 28 dias de cura o concreto com 0% de adição corresponde a 34 MPa, e o com 15 % de adição tem a resistência em torno de 31 MPa.

Para o traço de 25 MPa, notou-se valores parecidos com o concreto de 0% e 5% de adição para a idade de 28 dias, demonstrando a viabilidade do uso da escória como agregado miúdo na confecção do concreto convencional na proporção de 5% equivalente ao traço de 25 MPa.

Observou que o traço de 30 MPa gerou dados de resistência mecânica significativos, pois foi possível notar com mais clareza a influência da adição no resultado de resistência à compressão nas idades estabelecidas, sendo que, o concreto com 0% de substituição gerou uma resistência de 54 MPa, enquanto o concreto com 15% e 28 dias de cura apresentou o valor de 40 MPa, uma diferença significativa, mas ambos com valores acima da resistência exigida de 30 MPa.

Portanto a adição de escória não apresentou um melhor resultado se comparado ao concreto sem adição de escória com relação á resistência mecânica final, porém apresentou resistência elevada, o que se deve a boa confecção e cura dos corpos de prova atendendo as normas. Embora a adição de escória tenha reduzido o desempenho do concreto em todas as propriedades investigadas, é sabido que o sazramento pode evitar o fenômeno de hidratação e com isso evitar a queda nas propriedades tecnológicas de concretos com adição de escórias.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Para efeito de complemento em trabalhos com concretos, podem-se realizar testes de tração, podendo ser feito por compressão diametral (splitting test). Para a sua realização, um corpo de prova cilíndrico de 15 cm por 30 cm é colocado com o eixo horizontal entre os pratos da prensa, sendo aplicada uma força até a sua ruptura por tração indireta (ruptura por fendilhamento).

- Realizar testes de penetração de íons de cloreto, já que boa parte de dos concretos são utilizados em concreto armado, e a penetração de íons de cloreto é uma patologia bastante registrada em concreto armado.

- Estudar e viabilizar a ampliação do emprego da escória siderúrgica com diferentes tipos de concretos.

7 REFERÊNCIAS

1. Angulo, S.C.; Zordan, S.E.; John, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. in: 4º Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, 2001 p. 43 – 56.
2. GALDEANO, O.V.R. A experiência da CSN na reciclagem de resíduos sólidos nas sinterizações da CSN. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, Volta Redonda, RJ. **Anais....** Volta Redonda, 1994.p.271-285.
3. LÚCIO, A. **Físico-química metalúrgica- 2ª parte**. Belo Horizonte, 1981. p.555-599
4. PEREIRA, E. A. C. Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS RESÍDUOS NA SIDERURGIA, 25, 1994, Volta Redonda, RJ. **Anais...** Volta Redonda, 1994. p.187-199.
5. RUBIO A.R.; CARRETERO, J. G. La aplicación de las escórias de acería en carreteras. **Ingenieria Civil**, v.80, p. 5-8, 1991.
6. NEVILLE, A. M., **Propriedades do Concreto**. São Paulo: PINI, 1997. 828p.
7. KIHARA, Yushiro; CENTURIONE, Sérgio Luiz. O Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V1. Cap. 10, p. 295-321.
8. CURTI, R. **Curso Intensivo de Tecnologia Básica do Concreto**. ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland. Caderno do Aluno. Julho de 2012.
9. LODI, Victor Hugo. **Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó – SC**. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://www.basalto.eng.br/dissertacao_vhl_vs_final.pdf>. Acesso em 13 março. 2013.
10. CURTI, R. **Curso Intensivo de Tecnologia Básica do Concreto**. ABCP. Associação Brasileira de Cimento Portland Caderno do Aluno. Julho de 2012.
11. Votorantim Cimentos. Disponível em: http://www.vcimentos.com.br/html-ptb/Produtos/Cimento_procFabricacao.html Acesso em 06/09/2013.

12. TARTUCE, Ronaldo; GIOVANNETTI, Edio. **Princípios Básicos sobre o Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: Ibracon/Pini, 1990.
13. TAYLOR, H. F. W. **Cerment Chemistry**. 2. Ed London: Thomas Telford, 1997. 459 p.
14. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Ibracon, 2008.
15. QUARCIONI, V.A. **Influencia da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta**. 2008. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.
16. NETO, Cláudio Sbrighi. Agregados para Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V1. Cap. 11, p. 323-326.
17. MARTIN, Juan Fernando Matias. Aditivos para Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V1. Cap. 13, p. 381-406.
18. MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Editora Ibracon, 2005. V1. Cap. 12, p. 346-373
19. EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos. EESC-USP, 2000.
20. SILVA, Paulo Fernando Araújo. **Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. São Paulo: Editora Pini, 1995.
21. PETRUCCI, E. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Ed. Globo, 1982. 307p.
22. Geyer, R. M. **ESTUDO SOBRE A PONTENCIALIDADE DE USO DE ESCÓRIAS COMO ADIÇÃO AO CONCRETO**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS. 2002.
23. MACHADO, Alexandre Teixeira – Estudo Comparativo de Ensaio Para Avaliação da Expansividade das Escórias de Aciaria 2000. Dissertação (MESTRADO) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil – São Paulo, 2000.

24. ABNT ____ NBR NM 248/03 – Agregados - Determinação da composição granulométrica.
25. ABNT ____ NBR 52:2003 – Agregados – Determinação de massa específica e massa específica aparente de agregado miúdo.
26. ABNT ____ NBR 53:2009 - Agregados – Determinação da massa específica, massa aparente e absorção de água do agregado graúdo.
27. ABNT ____ NBR NM 67:1998 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
28. ABNT ____ NBR NM 5738:2008 – Concreto – Procedimento para modelagem e cura de corpos-de-prova.
29. ABNT ____ NBR 5739:2007 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.
30. Askeland, D. R.; Phulé, P.P. - Ciência e Engenharia dos Materiais. São Paulo. Cengage Learning. 2008.