

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ELIS REGINA ZOLETT
LUCIENE DE SOUZA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE
ACIARIA NA REDUÇÃO DA EXPANSÃO CAUSADA NO
CONCRETO PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2012**

**ELIS REGINA ZOLETT
LUCIENE DE SOUZA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE
ACIARIA NA REDUÇÃO DA EXPANSÃO CAUSADA NO CONCRETO
PELA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Carrazedo

**PATO BRANCO
2012**

TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE VIABILIDADE DA UTILIZACAO DA ESCORIA DE ACIARIA NA REDUCAO DA EXPANSAO CAUSADA NO CONCRETO PELA REACAO ALCALI-AGREGADO

por

**LUCIENE DE SOUZA
ELIS REGINA ZOLETT**

Aos 22 dias do mês de junho do ano de 2012, às 10:00 horas, no Mini-auditório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após argüição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco – UTFPR-PB, conforme Ata de Defesa Pública nº 010-TCC/2012.

Orientador: Prof. Dr ROGÉRIO CARRAZEDO (COECI / UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Msc. JOSÉ MIGUEL ETCHALUS (COECI / UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr MÁRIO ARLINDO PAZ IRRIGARAY (COECI / UTFPR-PB)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer ao nosso orientador, Prof. Dr. Rogério Carrazedo, pela orientação e por nos dar a oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

Ao Laboratório de Armazenamento e Preparo de Soluções da UTFPR, por nos fornecer as soluções de NaOH, e ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, pelo fornecimento do agregado reativo, ambos essenciais para a execução dos ensaios que resultaram neste trabalho.

Às nossas famílias pelo incentivo incessante e pelas palavras de conforto nas horas difíceis, que não foram poucas, sem dúvida não conseguiríamos sem o apoio incondicional de todos vocês.

Aos nossos colegas de graduação, pelas experiências compartilhadas e pelos momentos de descontração.

Por fim, a todos que de uma maneira ou outra contribuíram para a realização deste trabalho, o nosso muito obrigada.

“A vida não é um corredor reto e tranquilo que nós percorremos livres e sem empecilhos, mas um labirinto de passagens, pelas quais nós devemos procurar nosso caminho, perdidos e confusos, de vez em quando presos em um beco sem saída. Porém, se tivermos fé, uma porta sempre será aberta para nós, não talvez aquela sobre a qual nós nunca pensamos, mas aquela que definitivamente se revelará boa para nós.”

A.J. Cronin (1896 – 1981)

RESUMO

ZOLETT, Elis Regina. SOUZA, Luciene de. Estudo de Viabilidade da Utilização da Escória de Aciaria na Redução da Expansão Causada no Concreto pela Reação Álcali-Agregado. 2012. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2012.

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação que ocorre entre os álcalis do cimento e alguns compostos minerais presentes em determinados agregados, gerando consequências ao concreto, como por exemplo, fissuração. A reação álcali-agregado pode ser dividida em três tipos: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. Dentre estas, a reação com maiores ocorrências e também a mais estudada é a reação álcali-sílica (RAS), devido à rapidez com que esta ocorre em função das formas minerais reativas envolvidas. Vários métodos estudados já se comprovaram eficazes para o controle desta reação, sendo um deles a substituição parcial de cimento por adições como as pozolanas, dentre as quais podem ser citadas as cinzas volantes e as escórias de origem siderúrgica. Tendo em vista a comprovação destes resultados, este trabalho teve por objetivo o estudo da utilização da escória de aciaria elétrica como redutor da reação álcali-agregado, sendo desenvolvido com base nas orientações da NBR 15577:2008 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado, onde foram avaliadas diferentes proporções de substituição parcial de cimento por escória. A escória de aciaria elétrica, uma pozolana não tradicional, resultante do processo de produção do aço, apesar de sua característica expansiva mostrou-se eficiente frente à redução da RAS.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Escória de aciaria. Substituição parcial. NBR 15577:2008.

ABSTRACT

ZOLETT, Elis Regina. SOUZA, Luciene de. Feasibility Study of the Use of Steel Slag Reduction in Expansion in Concrete Caused by Alkali-Aggregate Reaction. 2012. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2012.

The alkali-aggregate reaction (AAR) is a reaction that occurs between alkali cement and some mineral compounds present in certain aggregates, leading to concrete consequences, such as cracking. The alkali-aggregate reaction can be divided into three types: alkali-silica reaction, alkali-silicate and alkali-carbonate. Among these, the reaction with larger events and also the most studied is the alkali-silica reaction (ASR), due to the rapidity with which this occurs as a function of reactive mineral forms involved. Several methods have already studied proved effective to control this reaction, one of the partial replacement of cement by additions such as pozzolans, among which may be cited the fly ash and steel slag source. In order to prove these results, this study aimed to study the use of electrical steel slag as a reduction of alkali-aggregate reaction, being developed under the guidelines of NBR 15577:2008 Aggregates - Alkali-Aggregate Reactivity, evaluating different proportions partial replacement of cement by steel slag. Electrical steel slag, a non-traditional pozzolan, resulting in the production process of steel, despite its expansive feature proved to be efficient front of the ASR.

Keywords: Alkali-aggregate reaction. Steel slag. Partial replacement of cement. NBR 15577:2008.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de expansão causada pela RAA.	19
Figura 2 – Rocha basáltica utilizada nos ensaios.....	27
Figura 3 – Granulometria de agregado basáltico separadas para o ensaio.	28
Figura 4 – Areia utilizada para o ensaio.	29
Figura 5 – Ensaio de Massa Específica do Cimento.	31
Figura 6 – Escória de Aciaria Elétrica.	32
Figura 7 - Picnômetro com Escória Completo com Água.....	33
Figura 8 - Ensaio pH da Escória.....	34
Figura 9 – Ensaio de Expansibilidade da Escória de Aciaria.....	37
Figura 10 – Agitador de Peneiras para Ensaio de Granulometria.	37
Figura 11 - Misturador Utilizado na Produção das Argamassas.....	40
Figura 12 - Molde Utilizado.....	41
Figura 13 - Moldagem das Barras de Argamassa.	41
Figura 14 - Rasamento e Cobertura da Barra Moldada.	42
Figura 15 - Leitura Inicial da Barra de Argamassa.	42
Figura 16 - Barras de Argamassa Imersas na Solução de NaOH.....	43
Figura 17 – Acompanhamento da Expansão até 30 dias.....	45
Figura 18 – Evolução da Expansão das Barras de Agregado Reativo até 30 dias. ..	45
Figura 19 – Fases da Expansão Ocorrida em Ensaio Acelerado.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das Escórias de Aciaria	23
Tabela 2 – Granulometria do material requerida para ensaio.	28
Tabela 3 – Granulometria Utilizada da Areia para Ensaio.....	29
Tabela 4 – Composição Cimento	30
Tabela 5 – Exigências Físicas e Mecânicas.....	30
Tabela 6 – Exigências Químicas	30
Tabela 7 – Massa Específica Cimento Portland.....	32
Tabela 8 – Massa Específica Aparente da Escória	34
Tabela 9 – Ensaio de pH.....	35
Tabela 10 – Teor de Umidade da Escória de Aciaria	36
Tabela 11 – Ensaio de Granulometria.....	38
Tabela 12 - Granulometria Utilizada do Material para Ensaio	39
Tabela 13 – Medições das Barras de Argamassa (Valores Médios).....	44
Tabela 14 – Cálculo da Expansão aos 16 dias	44
Tabela 15 - Cálculo da Redução da Expansão aos 16 Dias	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA.....	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E A ESCÓRIA DE ACIARIA	14
3.1 TIPOS DE REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO.....	17
3.1.1 Reação Álcali-Sílica	17
3.1.2 Reação Álcali-Silicato.....	20
3.1.3 Reação Álcali-Carbonato.....	21
3.2 ESCÓRIA DE ACIARIA E SUA PROPRIEDADES.....	22
4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1 MATERIAIS	27
4.1.1 Agregados	27
4.1.1.1 Basalto	27
4.1.1.2 Areia	29
4.1.2 Cimento	30
4.1.2.1 Ensaio de Massa Específica do Cimento	31
4.1.3 Escória	32
4.1.3.1 Massa Específica Aparente Escória.....	33
4.1.3.2 Ensaio pH.....	34
4.1.3.3 Teor de Umidade.....	35
4.1.3.4 Ensaio de Expansibilidade	36
4.1.3.5 Ensaio de Granulometria.....	37
4.2 MÉTODOS	38
4.2.1 Definição dos Teores de Escória.....	38
4.2.2 Métodos de Ensaio.....	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICES	53
APÊNDICE A – TABELAS DE MEDIÇÕES BARRAS COM ADIÇÃO DE ESCÓRIA E BARRA DE AREIA	54
APÊNDICE B – TABELAS DE MEDIÇÕES BARRAS APENAS COM AGREGADO REATIVO	56
APÊNDICE C – TABELAS PARA O CÁLCULO DA EXPANSÃO ATÉ 16 DIAS ...	58
APÊNDICE D – TABELAS PARA O CÁLCULO DA MITIGAÇÃO	60

1 INTRODUÇÃO

Em construções de grande porte, como barragens, por exemplo, são necessários diversos planejamentos com o intuito de acelerar os processos construtivos e reduzir custos, sejam estes de transporte, alojamentos, questões de segurança, etc. Em geral, tais obras são em locais retirados dos grandes centros, podendo haver a necessidade de explorações de agregados no próprio local para produção do concreto. Os cuidados com esses materiais são de extrema importância, pois o eventual uso de agregados reativos pode implicar em patologias no concreto, sendo uma das principais a reação álcali-agregado.

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química originada a partir da junção dos álcalis do cimento e certos tipos de agregados reativos. Essa reação pode ou não resultar em um gel expansivo, o qual ao se dispor nos vazios do concreto e na superfície do agregado em contato com a pasta de cimento, pode resultar em fissuras generalizadas e desta forma comprometer a qualidade da estrutura (JESUS, 2008).

Carrazedo (2004) divide a RAA de acordo com a composição mineralógica reativa do agregado, em:

- Reação Álcali-Sílica – RAS;
- Reação Álcali-Silicato;
- Reação Álcali-Carbonato – RAC.

As três formas são prejudiciais, causando expansão no concreto e fissuras que podem chegar à superfície originando trincas, pois a superfície não expande na mesma proporção que o interior do concreto.

Segundo Pires (2009), a RAS é o tipo de reação de maior ocorrência e também a mais estudada dentre as reações álcali-agregado. A NBR 15577-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2008a) a define como sendo o tipo de reação álcali-agregado onde há a participação da sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Ainda de acordo com Pires (2009), constituem exemplos de sílica reativa: opala ou sílica amorfa, calcedônia, cristobalita e tridimita, vidros naturais ou vulcânicos e os vidros artificiais (pyrex).

Para o controle da reação, Silva (2007) diz que existem vários materiais disponíveis, e um meio de minimizar o seu risco é pela substituição parcial de cimento por adições minerais. Thomas *et al.* (2006) afirmam que produtos como pozolanas, escórias, cinzas volantes e misturas à base de sais de lítio podem ser usados para prevenir a reação, desde que sejam utilizados em quantidade correta. Atualmente, há uma série de métodos de ensaios utilizados para avaliar a eficiência da adição desses produtos para controlar a expansão devido a RAS.

A escória de aciaria, resultante do processo de produção do aço, é atualmente considerada um subproduto sem valor para comercialização e tratada como refugo, pois é composta por elementos que não são importantes para a constituição do aço. Caracterizada pela composição de óxidos como o óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), é também conhecida por ser um material expansivo, devido às reações desses óxidos (FILEV, 2011).

Apesar de sua característica expansiva, a escória de aciaria pode apresentar-se como um inibidor eficaz para a RAS, pois para este resultado será decisiva a taxa de óxido de cálcio em relação aos demais óxidos alcalinos existentes no produto, sendo que quanto maior esta taxa, mais eficaz será sua adição na inibição da RAA (MONTEIRO, *et. al*, 1997).

Desta forma, o presente trabalho propõe uma ação mitigadora da RAS utilizando escória de aciaria, em substituições parciais de cimento, na confecção de concreto composto por agregados reativos. Para isso, serão feitos ensaios de expansão em barras de argamassa utilizando o método acelerado, conforme recomenda a NBR 15577-4 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 4: Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado (ASSOCIAÇÃO..., 2008c).

1.1 JUSTIFICATIVA

Sabbag (2003) afirma que existem no Brasil cerca de 19 obras hidráulicas com registros de ocorrência da RAA, sendo que destas 13 estão localizadas na região Sudeste e 6 encontram-se na região Nordeste do país. Além destas, segundo Pires (2009), foram registrados diversos casos de RAA na cidade de Recife/PE em vários blocos de fundação, despertando a atenção e o interesse de técnicos e

pesquisadores ao assunto. Andrade (2007) diz que entre janeiro de 2005 e março de 2007, foram diagnosticados 15 casos de fissuração em blocos de fundação na Região Metropolitana de Recife, as quais creditam-se a RAA.

Neste sentido, o estudo de materiais capazes de inibir a RAA torna-se relevante, tendo em vista que essa reação diminui a vida útil das construções, sendo necessárias intervenções nas estruturas, e em casos mais extremos, tornando-as inutilizáveis, levando a necessidade de sua substituição precoce. É importante ressaltar que junto com as intervenções nas estruturas vem a geração de entulhos, a utilização de novos recursos naturais para reconstrução e o gasto com recursos financeiros que poderiam estar sendo empregados para outros fins.

Se comprovada sua eficácia no controle da RAS, a escória de aciaria, um produto até então sem aplicações significativas, passaria a ter grande importância como material de construção, deixando de ser tratada como entulho, que muitas vezes acaba tendo destinação incorreta.

Segundo dados do Instituto Aço Brasil (2011), durante o ano de 2010 foram produzidos 32,9 milhões de toneladas de aço bruto, resultando em 4,1 milhões de toneladas de escória de aciaria. Cerca de 30% da produção brasileira de escória de aciaria não é reaproveitada, e sim destinada a parques industriais, ocasionando custos de disposição (TENÓRIO, 2010).

Justifica-se este trabalho salientando-se a importância do estudo e de uma investigação criteriosa dos efeitos causados pela adição de escória de aciaria em concretos produzidos com agregados reativos, a fim de se conhecer sua eficácia.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento de barras de argamassa compostas por agregados reativos, utilizando-se substituição parcial de cimento Portland por escória de aciaria em sua produção.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o desempenho da escória de aciaria na inibição (redução) da expansão causada pela RAS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) acompanhar e identificar os efeitos causados pela adição de escória de aciaria em concretos, frente a agregados reativos;
- b) estudar a possibilidade de emprego de escória de aciaria como material de construção;
- c) avaliar a substituição parcial de material cimentício por escória de aciaria em concreto composto por agregado reativo.

3 TIPOS DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E A ESCÓRIA DE ACIARIA

A reação álcali-agregado é uma reação química que ocorre no concreto, entre agregados potencialmente reativos e os álcalis presentes, basicamente, no cimento. O mecanismo da reação se dá pela interação entre os íons hidroxilas (OH^-) e íons alcalinos (Na^+ e K^+) em condições diferenciadas de temperatura, pressão e pH (PIRES, 2009).

Os efeitos da reação álcali-agregado são: a expansão, causando microfissuras no concreto, perda de aderência da pasta de cimento junto aos agregados, movimentação de juntas de dilatação/contração, entre outros (VALDUGA, 2002). Além destes, há também a formação de um gel, que pode ser expansivo ou não, dependendo da concentração de cal ou de álcalis (FURNAS, 1997).

Segundo Prezzi *et al.* 1997, os principais elementos alcalinos encontrados em concretos em concentrações consideráveis são o sódio (Na) e o potássio (K), provenientes dos álcalis presentes no clínquer, onde ocorrem combinações químicas com silicatos, aluminatos e sulfatos, originados nos fornos de fabricação do cimento. Quando ocorre a hidratação do cimento, esses álcalis acabam se dissolvendo na água de amassamento, aumentando o pH desta, que pode variar entre 12,5 à 13,5. Neste meio de pH alto, alguns agregados contendo sílica e minerais silicosos não permanecem estáveis por longos períodos. Isso propicia um ataque à superfície da sílica por íons hidroxilas e o aumento da solubilidade da sílica.

O produto dessa reação química com consequentes ataques e aumento de solubilidade de sílica é um gel, que pode ou não ser expansivo. Pires (2009) explica que o gel é o produto de uma reação instável e que suas características, tais como viscosidade, grau de inchamento e absorção de água, dependem principalmente de sua composição química, das condições em que se encontra o concreto, das características de suas estruturas químicas, das condições ambientais (presença de água) e ainda do tipo de reação álcali-agregado que está ocorrendo, já que diferentes tipos de reações (RAS) formam géis com composições químicas diferentes.

Conforme Daher (2009), os estudos voltados à RAA iniciaram com Tom Stanton em 1940, onde este identifica princípios de expansão e fissuras em determinadas estruturas de concreto na Califórnia, causadas pela reação entre os

hidróxidos alcalinos presentes nos cimentos e determinados componentes dos agregados.

O autor afirma ainda que Stanton, ao publicar seu trabalho, demonstrou de forma experimental que determinados tipos de agregados e cimentos com altos teores de álcalis, quando combinados em barras de argamassa acondicionadas em recipientes saturados de água, apresentavam expansão combinada com fissuração, porém a expansão era muito baixa quando o teor de álcalis do cimento era limitado em 0,6%.

Pires (2009) explica que, dentre as teorias desenvolvidas para explicar a expansão do gel, destacam-se a teoria da pressão osmótica e a teoria da adsorção, desenvolvidas por Hansen (1944) e Vivan (1950):

A teoria da pressão osmótica propõe hipoteticamente que os produtos da reação ficam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento, a qual devido às pressões hidráulicas ocasiona a expansão da estrutura de concreto. Já a teoria da adsorção propõe que as expansões e fissuras nas estruturas são causadas por pressões mecânicas exercidas pelos produtos de reação no estado sólido ou semi-sólido (PIRES, 2009).

Outros conceitos desenvolvidos explicam que a RAA baseia-se na química de superfície (PREZZI *et al.* 1997), onde expansões ocasionadas pelo inchamento do gel são devidas às forças de repulsão da dupla camada elétrica. Hasparyk (2005) explica que quando fases sólidas e líquidas entram em contato, ocorre um excesso de carga na superfície sólida e esta fica eletrificada, o que altera as propriedades das duas fases:

A reação álcali-sílica está relacionada com a interação entre superfície da sílica altamente carregada presente no agregado e a solução dos poros do concreto. Esta reação promove a dissolução da sílica e a formação de um gel, que é expansivo na presença de água (HASPARYK, 2005).

Com relação à capacidade expansão, géis com maiores teores de íons monovalentes (Na^+ e K^+), produzem maiores espessuras na dupla camada que géis com maiores teores de íons bivalentes (Ca^{++}), pois a valência e a concentração de íons determinam a espessura da dupla camada elétrica e as forças de repulsão. Dessa forma, um gel rico em sódio possui maior capacidade de expansão que um gel rico em cálcio (PIRES, 2009).

Considerando que são três tipos de reações álcali-agregado e também levando em consideração as condições ambiente em que se encontra o concreto e o local de formação da própria reação, isso pode gerar géis com composições diferentes, o que, conseqüentemente, implica na alteração das características do gel, tais como viscosidade, grau de inchamento e absorção de água (PIRES, 2009).

Valduga (2007) cita alguns dos sintomas ocorridos em estruturas de concreto em consequência da RAA:

- Microfissuras no concreto, principalmente na argamassa que preenche o espaço entre os agregados graúdos;
- Fissuras na proximidade da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface pasta/agregado;
- Descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados graúdos;
- Possibilidade de ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados que reagiram com os álcalis;
- Presença de gel exsudando ou preenchendo vazios no concreto;
- Movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração e de concretagem;
- Travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões, etc.);
- Fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão. Em vários casos é confundida com o panorama de reação por sulfatos ou até mesmo retração por secagem (quando as fissuras são de pequena abertura), e com o panorama de fissuração por origem térmica (quando as fissuras são de grande abertura). Por vezes chamada de fissuração em mapa;
- Fissuras de grande abertura, transversais à maior dimensão da estrutura;
- Movimentação das superfícies livres (alteamento de cristas de barragens e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens).

Valduga (2007) afirma ainda que é preciso cuidado ao evidenciar fissuração em mapa na estrutura do concreto, pois esta patologia pode ser causada por outros fatores além da RAA, tais como carregamentos, retração por secagem, gradientes

de temperatura elevados durante a cura do concreto, ciclos de gelo e degelo e ainda ataques por sulfatos. “Um diagnóstico adequado da reação álcali-agregado deve incluir também a identificação de produtos da reação”.

Cabe lembrar ainda que o sistema de fissuras gerado pela expansão do gel pode permitir o surgimento de outros mecanismos de deterioração. A lixiviação, por exemplo, geralmente ocorre com a consequente precipitação dos carbonatos de cálcio na superfície do concreto pela percolação de água (HASPARYK, 2005).

3.1 TIPOS DE REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado pode ser subdividida em três tipos de reação, segundo o mineral reativo constituinte do agregado:

- Reação álcali-sílica (RAS);
- Reação álcali-silicato;
- Reação álcali-carbonato (RAC).

3.1.1 Reação Álcali-Sílica

Segundo Pires (2009) a reação álcali-sílica (RAS) é o tipo de reação mais registrada e estudada dentre as reações álcali-agregado. Um dos motivos é que esta normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas (HASPARYK, 2005).

A RAS é entendida como a reação química que envolve íons alcalinos e hidroxilas, originários na hidratação do cimento, e o agregado, cuja fase mineralógica contenha sílica na forma amorfa, tais como opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, assim como certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais (FURNAS, 1997).

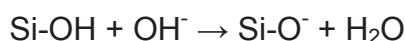
Valduga (2007) afirma que a sílica amorfa constitui a forma mais desordenada e reativa de sílica e pode estar presente em calcedônias (uma variedade de quartzo criptocristalino) e em certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais (como o pìrex). Cristobalitas e tridimitas constituem formas cristalizadas metaestáveis de sílica, enquanto a opala possui sílica na forma microcristalina.

O autor explica ainda que se a sílica é bem cristalizada, as falhas na estrutura ocorrem apenas na superfície externa do agregado, porém uma sílica fracamente cristalizada tem muitas falhas na estrutura do agregado, propiciando a desintegração da rede inteira.

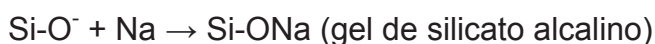
Assim, “a reação álcali-sílica vai depender principalmente da cristalinidade da sílica, que pode ser avaliada qualitativamente por microscópio óptico” (VALDUGA, 2007).

Daher (2009) afirma que o princípio da reação álcali-sílica está baseado numa reação inicial do tipo ácido-base. Assim, quando a sílica amorfa está presente em meio alcalino, ocorrem as seguintes reações:

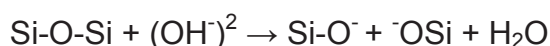
- Os íons hidroxilas atacam as ligações do grupo silanol (Si-OH), neutralizando-as.



- Posteriormente o cátion de sódio (Na^+), associa-se a estrutura, formando um gel sílico alcalino, balanceando a carga negativa dos íons de hidrogênio.



- Os íons hidroxilas em excesso atacam o grupo siloxano (Si-O-Si), desintegrando a sua estrutura, transformando-a em pares de SiO^- , deixando assim, um ambiente com pH elevado, solubilizando o ácido ortossilícico (H_2SiO_4), possibilitando a adsorção de água e dos íons alcalinos.



- O gel silicato alcalino apresenta a possibilidade de incorporar íons de cálcio (Ca_2), o que demonstra que a composição química do gel pode adquirir uma composição química variável e indefinida.
- Quando o gel apresentar um alto teor de cálcio, este passa a ser classificado como não expansivo em presença de água, porém, quando da ausência de cálcio na solução básica, o gel apresenta expansão pela absorção de água, resultando em uma expansão e conseqüente geração de pressão na região circundante.

Daher (2009) divide a expansão em estágios segundo a evolução da reação:

“No primeiro estágio, são geradas tensões internas devido à expansão do gel sem a ocorrência de microfissuras. No segundo

estágio, ocorre o aumento das fissuras de forma a causar microfissuras no entorno das partículas reativas. No terceiro estágio, há a migração de gel para o interior das microfissuras com pequena redução das tensões internas. No quarto estágio, se fazem presentes grandes tensões no interior das microfissuras preenchidas com gel, causando a abertura das mesmas, podendo gerar expansões significativas” (DAHER, 2009).

A Figura 1 mostra os estágios citados pelo autor:

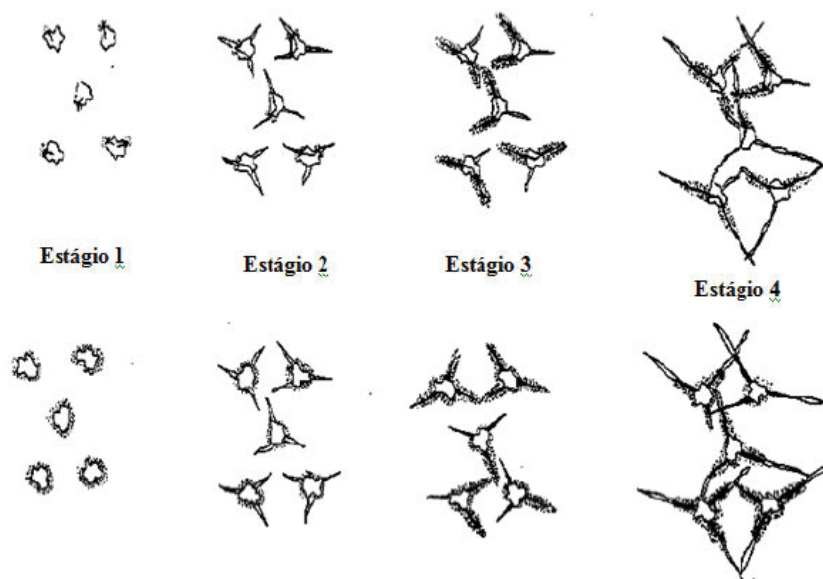


Figura 1 – Modelo de expansão causada pela RAA.
Fonte: Daher (2009).

Outra teoria bem aceita para explicar o mecanismo dessa reação é a da pressão osmótica, conforme explica Furnas (1997). Durante a fabricação do concreto, uma parte dos componentes alcalinos presentes no cimento se dissolve na água de amassamento. Posteriormente, no interior do concreto a concentração da solução aumenta com o progresso da hidratação do cimento, tornando a solução fortemente básica, a qual ataca as partículas suscetíveis do agregado reativo, produzindo uma substância viscosa denominada gel. Este, por ser higroscópico, atrai as moléculas aquosas, as quais migram através a pasta de cimento.

A pasta de cimento funciona como uma membrana osmótica, permitindo a migração das moléculas aquosas para o gel, mas não deste para a solução. Assim, o gel vai “inchando”. Envolto em pasta de cimento, e sem poder migrar através dela, começa então a exercer pressões hidráulicas, cuja intensidade poderá exceder a resistência de ruptura à tração da pasta e do concreto, tendo como consequência fissuras internas e externas no concreto (FURNAS, 1997; JESUS, 2008).

O gel decorrente da RAS pode ser colorido ou branco, ceroso ou aquoso, que em contato com água e exposto a dióxido de carbono carbonata, e, quando seco aparece esbranquiçado (VALDUGA, 2007). Não obstante, outras composições e características foram observadas em outros estudos, como por exemplo, em Hasparyk (2005).

3.1.2 Reação Álcali-Silicato

A reação álcali-silicato é um tipo específico de reação álcali-sílica em que participam os álcalis e alguns tipos de silicatos presentes em certas rochas (ASSOCIAÇÃO... NBR 15577-1, 2008a). A ocorrência é mais lenta devido ao fato dos minerais reativos estarem mais disseminados na matriz e devido a presença de quartzo deformado (PIRES, 2009). Alguns minerais que propiciam essa reação são os feldspatos, folhelhos argilosos e certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e gravaúcas), metamórficas (ardósias filitos, quartzitos, xistos) e magmáticas (granitos) (FURNAS 1997).

Pires (2009), explica que autores como Van Aardt e Visser (1977) estudaram a reação entre hidróxido de cálcio e feldspato e propuseram uma teoria chamada "*Solution Theory*". De acordo com os autores, nas primeiras idades do concreto origina-se uma camada de aderência ao redor do agregado composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Com o tempo e na presença de umidade, o (Ca(OH)_2) proveniente da hidratação do cimento reage com o feldspato. Além disso, pode ocorrer reação devido à penetração de cal no agregado, liberando álcalis sob forma de KOH e NaOH, e/ou silicatos de potássio e sódio, sendo este último na forma de gel parcialmente solúvel em água. A partir de certa concentração, os silicatos de cálcio (responsáveis pela aderência) tenderão a se dissolver em silicatos de potássio e sódio, formando um vidro ou gel composto por cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e sílica ao redor do agregado e às vezes internamente a ele. O vidro ou gel é parcialmente solúvel em água e constitui um péssimo elemento da ligação, devido à variação volumétrica (expansão e contração) em consequência da perda ou ganho de água. Dessa forma, o agregado envolvido pelo vidro ou gel semi-líquido tem baixa resistência.

Daher (2009) afirma que a reação álcali-silicato tem maior ocorrência em estruturas deterioradas no Brasil, pois esta ocorre entre os álcalis presentes na

solução dos poros do concreto, as hidroxilas e os silicatos presentes em materiais já citados, como o feldspato e outros.

A partir das décadas de 50 e 60 quando a maioria das barragens foram construídas no Brasil, foi evitada a utilização de agregados contendo sílica amorfa e conseqüentemente a reação álcali-sílica. Em muitas destas obras utilizou-se granitos, gnaisses e quartzitos, acreditando que pelo fato do quartzo ser um dos minerais mais estáveis na natureza, que estas rochas seriam adequadas para confecção de concreto (PIRES, 2009).

Porém, a partir da década de 70 foi constatado que o quartzo geralmente é encontrado com a sua estrutura levemente distorcida, cuja textura é conhecida como “quartzo deformado”. O quartzo deformado é um dos fortes indícios de reatividade potencial, e por este motivo, diversas barragens construídas no Brasil e no exterior até a década de 80, passaram a apresentar problemas em decorrência da RAA (PIRES, 2009).

3.1.3 Reação Álcali-Carbonato

Segundo Pires (2009), a reação álcali-carbonato (RAC) é um tipo de reação álcali-agregado em que participam os álcalis e agregados rochosos carbonáticos. A forma mais conhecida de deterioração do concreto ocorre devida à desdolomitização da rocha e o conseqüente enfraquecimento da ligação pasta-agregado. Nessa reação não há formação de gel expansivo, mas de compostos cristalizados como a brucita ($Mg(OH)_2$), carbonatos alcalinos, carbonatos cálcicos e silicato magnésiano (ASSOCIAÇÃO... NBR 15577-1, 2008a).

O hidróxido de cálcio presente no concreto reage com o CO_3 , produzido durante a desdolomitização, para formar calcita e regenerar íons hidroxilas, o que mantém o valor de pH elevado. Contudo, os álcalis não se incorporam nos produtos formados, mas atuam como catalisadores da reação entre a portlandita e íons carbonatos. Como a solução nos poros do concreto é saturada de portlandita, presume-se que a reação de desdolomitização ocorrerá até que se esgote a dolomita presente no agregado (JESUS, 2008).

A intensidade de reação está intimamente relacionada à proporção de calcita e dolomita. Segundo Furnas (1997), a reação ocorre com a máxima intensidade quando a calcita e a dolomita estão presentes em quantidade equivalentes ou

ambas estão finamente divididas. Os produtos formados, calcita e brucita, são partículas finas que ocupam um maior volume que aquele ocupado pela dolomita. Em face de a dolomita estar contida pela pasta de cimento ou matriz, os produtos formados no local encontram-se confinados, devido a redução de entalpia livre (energia de Gibbs) da reação. Como consequência, ocorre a expansão.

3.2 ESCÓRIA DE ACIARIA E SUA PROPRIEDADES

A escória de aciaria é um resíduo gerado durante o processo de produção do aço, e é formada por diversos elementos presentes no processo de fabricação, podendo incorporar até mesmo material do revestimento do forno utilizado (SOUZA, 2010).

Souza (2010) afirma ainda que o aço pode ser produzido de duas formas distintas, o que distingue também a escória de aciaria resultante. A produção pode ser feita em usinas integradas ou em usinas semi-integradas, diferenciadas basicamente pelos processos e pelos fornos que cada um utiliza.

O aço produzido em usinas integradas inicia-se a partir da queima dos minérios em alto forno com coque a 1250°C, iniciando a calcinação dos carbonetos e sulfetos, em seguida a combustão do carbono do coque. Após isso ocorre a redução do Fe_2O_3 para FeO e posteriormente a redução do FeO para Fe .

Em seguida, é obtido o ferro fundido ou ferro gusa, e então a cal livre é adicionada para reduzir as impurezas, tais como fósforo, carbono, silício, enxofre, dentre outros. Para ser utilizado, o ferro gusa é refundido e refinado, obtendo-se o ferro fundido de segunda fusão (GLEIZE, 2000). Neste processo em indústrias integradas são utilizados conversores a oxigênio (LD), gerando a escória de aciaria LD (MENDONÇA e RODRIGUES 2008).

Segundo HERMANN *et. al.* (2011), em usinas semi-integradas os aços vão ser os produtos do refino do ferro gusa, ferro fundido e sucata de aço com cal em atmosfera de oxigênio puro a 1600°C. O ferro fundido se torna aço líquido e as impurezas (C, P, S, Si, etc) são queimadas e fixadas pela cal para formar as escórias; nesta fase podem ser adicionadas Cr, Ni, Mg, etc. que mudam a composição química dos aços. Os aços têm teor de carbono inferior a 1,7%. Assim, são obtidos produtos semi-acabados (tarugos, blocos) que serão tratados para fabricação dos produtos siderúrgicos nas formas e com as características desejadas

(GLEIZE, 2000). Neste processo em usina semi-integrada é utilizado o forno de arco elétrico para gerar o aço e, conseqüentemente, a escória de aciaria elétrica.

Em ambos os casos, milhões de toneladas de escória de aciaria são produzidos por ano, na faixa de 2,5 a 4 milhões de toneladas (MENDONÇA e RODRIGUES, 2008). 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 quantia 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).

Filev (2011) explica que as escórias de aciaria, tanto LD quanto elétrica, são compostas basicamente por óxidos, pois sua composição deriva da matéria-prima utilizada para fabricação do aço e das tecnologias de produção do aço (tipo de forno). A composição das escórias pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição das Escórias de Aciaria

Tipo	Composição (%)							
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	FeT	MgO	S	MnO	TiO ₂
Escória LD	13,80	44,30	1,50	17,50	6,40	0,07	5,30	1,50
Escória Elétrica	19,00	38,00	7,00	15,20	6,00	0,38	6,00	0,70

Fonte: Filev (2011).

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” (MACHADO, 2000).

Segundo Masuero *et al.* (2004) o óxido de cálcio livre pode estar sob duas formas nas escórias de aciaria: pura e em solução sólida com ferro (CaO + x%FeO, onde $0 < x < 10$ com percentual em massa). Geiseler e Shlosser (*apud* Masuero, 2004)

explicam que a cal livre pode ser identificada sob duas formas: residual e precipitada. “A primeira está relacionada com o consumo de refratário e o grau de desfosforação e a segunda tem sua formação durante a solidificação e resfriamento da escória” (MASUERO *et al.*, 2004).

Os autores afirmam ainda que a cal residual pode ser dividida em categorias conforme a dimensão dos grãos. Partículas com dimensões entre 3 e 10 μ m são chamadas de cal granulosa (grainy lime) e apresentam contorno mais suave, indicando dissolução e normalmente são livres de microinclusão. A cal esponjosa (spongy lime), têm dimensões entre 6 e 50 μ m e são cristais indefinidos, com forma frequentemente irregular, que formam parte da matriz da escória ocorrendo intersticialmente às fases primárias, especialmente à C₂S.

Masuero *et al.* (2004), em sua linha de pesquisa explica a formação da cal precipitada.

A cal precipitada é formada pela transformação, no estado sólido, do silicato tricálcio em silicato bicálcio e óxido de cálcio livre no resfriamento. Este normalmente se encontra no contorno dos grãos de C₂S e no interior do C₃S, com partículas de dimensões normalmente inferior a 4 μ m. Esta reação ocorre à temperatura de 1250°C no sistema Ca-Si-O (MASUERO *et al.*, 2004).

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 (Ca(OH)₂), cuja estrutura cristalina tem 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 (MASUERO *et al.*, 2004).

A incorporação de óxido de magnésio na escória de aciaria pode ser explicada segundo o processo de produção do aço.

No processo de refino do aço, o uso de dolomito ou o desgaste do revestimento do forno promovem a presença de MgO, na escória, o que eleva em aproximadamente 10% o teor de MgO presente na escória. Em contato com a umidade, o hidróxido de magnésio hidrata-se lentamente (MACHADO, 2000).

Machado (2000) explica ainda que o óxido de magnésio forma o hidróxido de magnésio ao hidratar-se, aumentando seu volume em até 119,54% de seu volume

inicial. “Esse aumento volumétrico gera expansão devido a tensões criadas pela diferença de volume molar entre o óxido e o hidróxido”.

O óxido de magnésio presente nas escórias de aciaria pode chegar a 10%, e este se apresenta de três formas distintas: estado quimicamente combinado, que pode ser nas formas monticelita e de merwinita, que são quimicamente estáveis, não combinado ou livre (ou ainda periclásio) e ainda em solução sólida com FeO e MnO.

Normalmente o teor de magnésio livre em uma matéria prima é limitado em função das especificações e da aplicação final do produto. Como exemplo, pode-se citar que, a fim de evitar a expansão do MgO livre na produção de clínquer, a quantidade de óxido de magnésio é usualmente limitada entre 4 e 5% podendo chegar até 6,5%, conforme a NBR 5732/91. “Uma parte substitui o cálcio nos compostos do clínquer, e o excesso acima de 2% cristaliza-se como periclásio (óxido de magnésio livre)” (TAYLOR *apud* MACHADO, 2000), este último através da reação com a água na hidratação do cimento causa expansão destrutiva do material.

Mesmo com a expansibilidade limitando a sua utilização, a escória de aciaria possui características semelhantes às do cimento.

Quando comparados, o cimento Portland e a escória de aciaria possuem algumas características em comum, como por exemplo, alguns silicatos, que no cimento Portland são formados, segundo Araujo, *et. al.* (2006), na calcinação do calcário e da argila, sendo estes C₂S, C₃S, C₃A e C₄AF que apresentam reações de hidratação, influenciando diretamente na resistência mecânica. (HERMANN *et al.*, 2011).

Segundo pesquisa feita por Qiang e Yan (2010), a partir de uma análise a laser de dispersão, pode ser observado que o processo de hidratação da escória de aciaria é muito parecida com a do cimento. C₂S e C₃S são os principais componentes ativos da escória de aciaria, mas a sua atividade é muito baixa porque o material se cristaliza em um processo lento de resfriamento. Além do mais, seu conteúdo é muito menor do que no cimento. Assim, a taxa de hidratação da escória de aciaria é muito menor do que a de cimento, o que, conseqüentemente, reduz as suas propriedades cimentícias, pois reduz a atividade de C₂S e C₃S.

Qiang e Yan (2010) afirmam ainda que a taxa de hidratação da escória de aciaria nas primeiras idades pode ser acelerada pelo aumento da finura das partículas, temperatura de cura ou alcalinidade da solução. No entanto, o aumento do valor do pH da solução tem pouca eficiência para a hidratação tardia da escória

de aciaria e mesmo elevar a temperatura de cura tem influência negativa sobre a sua hidratação posterior. A hidratação da escória de aciaria é influenciada pelo calor e a condição alcalina causados pela prévia hidratação de cimento.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração deste trabalho foram utilizados os métodos de ensaio estabelecidos pela NBR 15577 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado (ASSOCIAÇÃO..., 2008). O tipo de cimento indicado pela NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c) é o cimento padrão que deve satisfazer os requisitos das ABNT NBR 5732:1991 ou ABNT NBR 5733:1991, porém na falta do cimento padrão, optou-se pela utilização do cimento CP V ARI RS, que contém características semelhantes ao especificado pela NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c).

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Agregados

Na realização dos ensaios foram utilizados dois tipos de agregados, rocha basáltica, caracterizada como agregado reativo, e areia selecionada.

4.1.1.1 Basalto

A rocha basáltica utilizada nos ensaios tem origem na região Oeste de Santa Catarina, e foi fornecida pelo LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. O material pode ser observado na Figura 2:



**Figura 2 – Rocha basáltica utilizada nos ensaios.
Fonte: Autoria Própria.**

Para seleção do material a ser utilizado, inicialmente foi necessária sua moagem, sendo que para isso utilizou-se um moinho de esferas da marca Servitech, modelo CT-242, com 02 jarros de capacidade de 3750,0 g de carga bruta cada jarro. O tempo de moagem ficou entre 10 e 28 minutos, dependendo da granulometria requerida. Ao fim da moagem obtiveram-se as granulometrias requisitadas pela norma utilizada, conforme Tabela 2, as quais podem ser observadas na Figura 3:

Tabela 2 – Granulometria do material requerida para ensaio.

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 μ m	25	247,5
600 μ m	300 μ m	25	247,5
300 μ m	150 μ m	15	148,5

Fonte: NBR 15577-4 Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 4 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c).

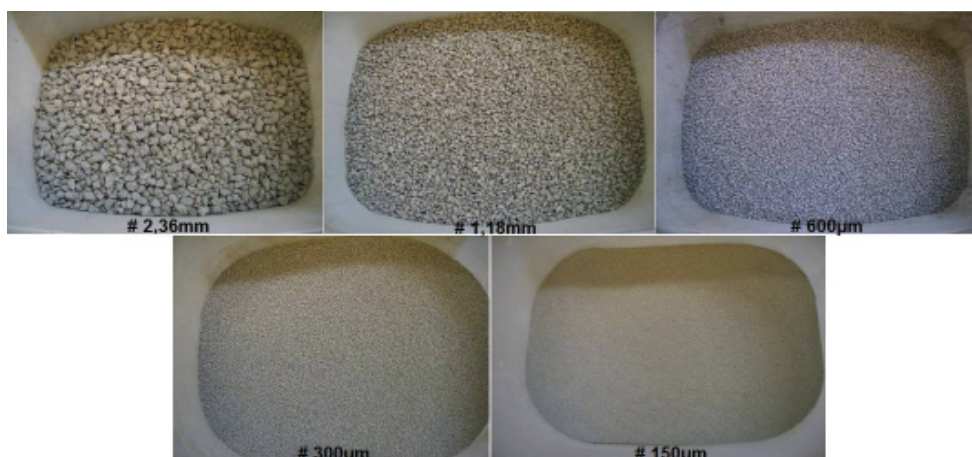


Figura 3 – Granulometria de agregado basáltico separadas para o ensaio.
Fonte: Autoria Própria.

Os agregados classificados foram lavados com água corrente, até a total remoção do pó e partículas finas aderidos, e posteriormente secos em estufa, regulada em 60,0°C, por um período de 24 horas. Os agregados foram armazenados em recipientes limpos e fechados, sendo que cada fração era novamente seca em estufa, por pelo menos 24 horas antes do início dos ensaios.

4.1.1.2 Areia

A areia utilizada foi areia normal, produzida e fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). As frações granulométricas utilizadas foram os materiais passantes nas peneiras 1,18mm, 600 μ m, 300 μ m e 150 μ m, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4 – Areia utilizada para o ensaio.
Fonte: Autoria Própria.

Assim como para o agregado reativo, seriam necessárias também para a areia as cinco frações indicadas pela norma NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c), conforme Tabela 2 para moldagem das barras de argamassa. No entanto estavam disponíveis apenas quatro das granulometrias requeridas. Adotou-se então que a primeira fração, a qual houvesse material suficiente, iria conter a porcentagem de material acumulada até aquela fração, conforme a referida norma orienta. Desta forma foram utilizadas as quantidades de areia de cada fração, conforme Tabela 3:

Tabela 2 – Granulometria Utilizada da Areia para Ensaio.

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
2,36 mm	1,18 mm	35	115,5
1,18 mm	600 μ m	25	82,5
600 μ m	300 μ m	25	82,5
300 μ m	150 μ m	15	49,5

Fonte: Autoria Própria

4.1.2 Cimento

O cimento utilizado na realização dos ensaios foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos: CP V-ARI RS, da marca Votorantim Cimentos, em conformidade com a NBR 5733 - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ASSOCIAÇÃO..., 1991), e com características que podem ser verificadas nas Tabelas 4 a 6:

Tabela 3 – Composição Cimento

Tipo	Sigla	Classe	Norma	Clínquer+Gesso	Calcário
V	CP V ARI RS	-	5733	95 a 100%	0 a 5%

Fonte: Votorantim Cimentos (2011).

Tabela 4 – Exigências Físicas e Mecânicas

Finura	Tempo de Pega	Expansibilidade		Resistência a Compressão (MPa)					
		A Frio (mm)	A Quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias		
Resíduo na Peneira 75 μm (%) $\leq 6,0$	Área Específica (m^2/kg) ≥ 300	Início (h) ≥ 1	Término (h) ≤ 10	≤ 5	≤ 5	≥ 14	≥ 24	≥ 34	-

Fonte: Votorantim Cimentos (2011).

Tabela 5 – Exigências Químicas

Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo (%)	MGO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
$\leq 1,0$	$\leq 4,5$	$\leq 6,5$	$\leq 3,5$	$\leq 3,0$	-

Fonte: Votorantim Cimentos (2011).

Não foi possível obter detalhes sobre o teor de álcalis do cimento, pois era necessário um laudo laboratorial, o qual não foi fornecido pelo fabricante.

4.1.2.1 Ensaio de Massa Específica do Cimento

O ensaio de massa específica do cimento Portland foi feito conforme recomendações da NBR NM 23 – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação de Massa Específica (ASSOCIAÇÃO..., 2000), e Da Luz (2008). Estes recomendam que o líquido utilizado durante o ensaio não reaja quimicamente com o material a ser ensaiado. Optou-se então pela utilização de querosene.

Inicialmente, o querosene foi colocado no frasco volumétrico de Le Chatelier com a ajuda de um funil de haste longa até o nível compreendido entre as marcas de zero e 1cm³. Em seguida o conjunto foi deixado em repouso por 15 minutos, para que houvesse a estabilização do querosene. Decorrido este tempo, mediu-se a massa m_1 e o volume V_1 do conjunto.

Registradas as primeiras leituras, separou-se uma quantia indeterminada de cimento Portland CPV ARI RS, e esta foi adicionada ao querosene, novamente com a ajuda de um funil, em pequenas porções, tomando o cuidado para que não ocorresse a aderência do material nas paredes do frasco. A Figura 5 mostra o frasco utilizado, já com o material em seu interior.



Figura 5 – Ensaio de Massa Específica do Cimento.
Fonte: Autoria Própria.

Após ter colocado todo o material no frasco, este foi fechado e agitado suavemente em movimentos circulares horizontais, para que não ficassem bolhas no frasco, e foram registradas a segunda leitura V_2 e a massa final do conjunto m_2 .

Ao término do ensaio, foi possível calcular a massa específica do cimento Portland a partir da relação (1):

$$\rho = (m_2 - m_1) / (V_2 - V_1) \quad (1)$$

em que ρ é a massa específica (g/cm^3), m é a massa do material ensaiado (g), e V é o volume deslocado pela massa do material (cm^3).

Os dados obtidos podem ser verificados na Tabela 7:

Tabela 6 – Massa Específica Cimento Portland

Amostra	m_1 (g)	m_2 (g)	V_1 (cm^3)	V_2 (cm^3)	ρ (g/cm^3)
1	345,09	402,20	0,60	20,10	2,93

Fonte: Autoria Própria

4.1.3 Escória

A escória empregada nos ensaios foi a escória de aciaria elétrica provinda de fornos de arco elétrico, a qual pode ser observada na Figura 6, que necessitou ser triturada para utilização.



Figura 6 – Escória de Aciaria Elétrica.
Fonte: Autoria Própria.

Para a trituração do material foi utilizado o mesmo moinho de esferas onde o agregado reativo foi moído, sendo que para a escória foram necessários 60 minutos. Separou-se para o experimento aproximadamente 1,0 kg de material passante na peneira 0,075mm. Para a caracterização física da escória foram realizados ensaios de massa específica aparente, pH, teor de umidade, expansibilidade e ensaio de caracterização granulométrica.

4.1.3.1 Massa Específica Aparente Escória

Para verificação da massa específica da escória foi utilizado o método do picnômetro. Primeiramente foi enchido completamente o picnômetro com água e registrado sua massa, obtendo-se 74,43 g (P_{ag}). Logo após foi retirado parte da água do picnômetro e adicionado 11,48 g (m) de escória, tomando-se o cuidado para que não restassem bolhas de ar dentro do picnômetro. Feito isso, o picnômetro foi completado com água, como mostra a Figura 7 e registrado novamente o valor da massa do conjunto, obtendo-se 82,83 g (P_{ag+m}).



Figura 7 - Picnômetro com Escória Completo com Água.
Fonte: Autoria Própria.

Desta forma foi possível calcular a massa específica aparente da escória, por meio da equação (2):

$$\mu = m / [P_{ag} - (P_{ag+m} - m)] \quad (2)$$

em que μ é a massa específica aparente, m é a massa da amostra, P_{ag} é o peso picnômetro com água e P_{ag+m} é o peso do picnômetro com água e amostra.

O procedimento foi repetido três vezes, a fim de se obter uma média confiável para o valor da massa específica, sendo que os dados obtidos podem ser verificados na Tabela 8:

Tabela 7 – Massa Específica Aparente da Escória

Amostra	P _{ag} (g)	m (g)	P _{ag+m} (g)	μ (g/cm ³)
1	74,43	11,48	82,83	3,73
2	74,42	11,17	82,62	3,76
3	74,42	11,29	82,73	3,79
			Média	3,76

Fonte: Autoria própria.

4.1.3.2 Ensaio pH

O ensaio de pH foi realizado utilizando-se uma mistura de água e escória, na proporção 1:1; as quantidades adicionadas foram 50,0 g de escória para 50,0 g de água. Após misturar os materiais foi posicionado o pHmetro, devidamente calibrado na solução, tomando-se o cuidado para que o eletrodo não encostasse no fundo nem nas laterais do recipiente, conforme Figura 8:



Figura 8 - Ensaio pH da Escória.
Fonte: Autoria Própria.

O ensaio foi repetido por três vezes, registrando-se os valores encontrados, conforme Tabela 9:

Tabela 8 – Ensaio de pH

Amostra	Quantidade de Água (mL)	Quantidade de Escória (g)	pH	Temperatura (°C)
1	50	50	11,97	9,7
2	50	50	11,94	9,6
3	50	50	11,92	9,8
Média			11,94	9,7

Fonte: Aatoria Própria

Conforme pode ser observado, obteve-se um pH de 11,94, a uma temperatura de 9,7°C.

4.1.3.3 Teor de Umidade

O ensaio de teor de umidade da escória foi realizado a partir da separação de três amostras de material, que foram colocadas em uma cápsula de massa conhecida, sendo em seguida pesadas, definindo estes valores como massa úmida da amostra (m_h). As cápsulas com material úmido foram colocadas na estufa, regulada em 60,0°C onde permaneceram por aproximadamente 24 horas. Decorrido este tempo as mostras foram novamente pesadas e desta forma obteve-se a massa seca da escória (m_s).

A partir dos valores obtidos, foi calculado o teor de umidade do material, a partir da equação (3):

$$h = (m_h - m_s) / m_s \quad (3)$$

em que h é o teor de umidade (%), m_s é a massa seca da escória e m_h é a massa anterior à secagem.

Os valores obtidos no ensaio podem ser observados na Tabela 10:

Tabela 9 – Teor de Umidade da Escória de Aciaria

Nº da Cápsula	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Teor de Umidade (%)
I	20,00	19,96	0,20
II	20,00	19,97	0,15
III	20,00	19,99	0,05
		Média	0,13

Fonte: Aatoria Própria

4.1.3.4 Ensaio de Expansibilidade

Para realização do ensaio de expansibilidade da escória foram seguidas as recomendações da NBR 11582 – Cimento Portland – Determinação da Expansibilidade de Le Chatelier, seguindo-se apenas o processo de cura a frio (ASSOCIAÇÃO..., 1991).

O material para o ensaio foi separado, juntamente com as agulhas de Le Chatelier e as placas de vidro, necessárias na moldagem dos corpos de prova. Previamente foram misturados a escória e o cimento, de forma que se obtivesse um material homogêneo. Em seguida foi adicionada água, observando-se a relação 0,31, como orienta Souza (2011), e misturando novamente. A pasta obtida foi colocada no molde, posicionado sobre uma placa de vidro, sendo que o excesso foi rasado com uma espátula, e em seguida coberto por uma segunda placa de vidro. O processo descrito pode ser verificado na Figura 9.

O conjunto foi colocado no tanque à $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas. Após esse tempo as placas de vidro foram retiradas, e os moldes foram posicionados no tanque, de forma que apenas as hastes ficassem para fora da água, e assim permaneceram durante 6 dias. Os resultados foram obtidos medindo-se as extremidades das agulhas com um paquímetro. Não foi registrada expansão na escória ensaiada.

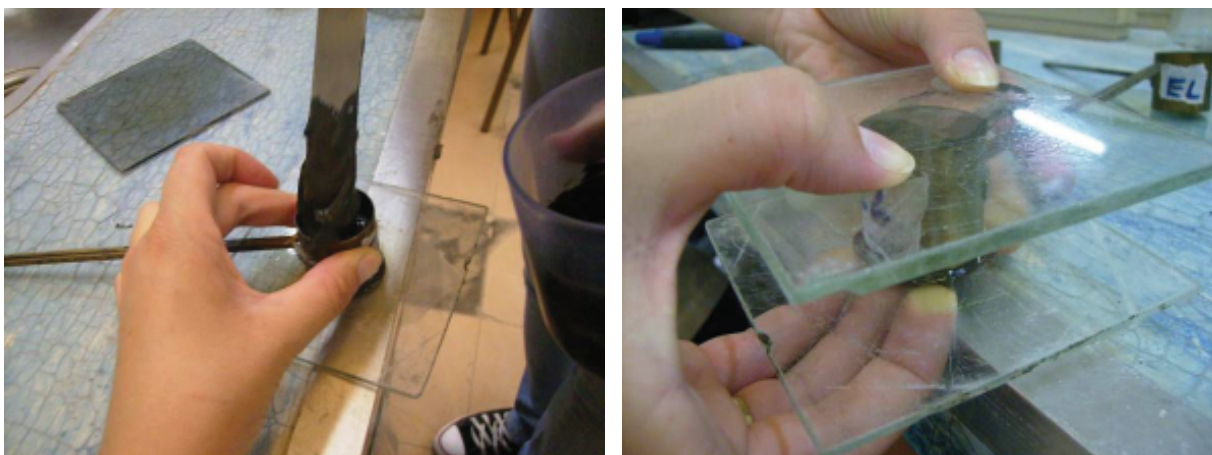


Figura 9 – Ensaio de Expansibilidade da Escória de Aciaria.
Fonte: Autoria Própria.

4.1.3.5 Ensaio de Granulometria

O ensaio de granulometria da escória foi realizado de acordo com Da Luz (2008), pois, devido a quantidade reduzida de material disponível, não foi possível seguir as orientações da norma específica, a NBR NM 248:2001. Primeiramente foi separado 2,0 kg de material para o ensaio, de forma aleatória, o qual foi dividido em duas amostras iguais de 1,0 kg cada uma. Para facilitar a moagem do material, foi separada visualmente a fração com granulometria miúda. Definiu-se então que o conjunto de peneiras necessárias teria malhas entre 0,15 e 4,75mm. As peneiras utilizadas foram pesadas antes do início do ensaio. As peneiras com as amostras foram posicionadas em um agitador mecânico, como pode ser observado na Figura 10, e agitadas por 5 minutos.



Figura 10 – Agitador de Peneiras para Ensaio de Granulometria.
Fonte: Autoria Própria.

Após esse tempo, cada peneira foi separada com a quantidade de material retida e o conjunto pesado. Tendo-se a massa de cada peneira foi possível calcular a porcentagem de material retida nas mesmas. Os dados obtidos no ensaio podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 10 – Ensaio de Granulometria

Peneiras (mm)	Amostra 01			Amostra 02			Média
	Massa Amostra (g)	% Retido	% Retido Acumulado	Massa Amostra (g)	% Retido	% Retido Acumulado	
4,75	595,38	59,63	59,63	611,98	61,30	61,30	60,46
2,38	225,85	22,62	82,25	215,95	21,63	82,93	82,59
1,18	108,29	10,85	93,09	114,06	11,42	94,35	93,72
0,6	35,06	3,51	96,60	34,96	3,50	97,86	97,23
0,3	16,13	1,62	98,22	12,21	1,22	99,08	98,65
0,15	8,69	0,87	99,09	3,85	0,39	99,47	99,28
Fundo	9,10	0,91	100,00	5,34	0,53	100,00	100,00
Total	998,50	100,00%	-	998,35	100,00%	-	-

Fonte: Autoria Própria

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Definição dos Teores de Escória

A NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO..., 1992) classifica a escória de aciaria como uma pozolana não tradicional. Segundo Guedert (1989) *apud* Santos (2006) o uso de pozolanas em adição ao cimento confere a concretos e argamassas características como maior durabilidade, contribuindo para inibição da RAA. O autor afirma ainda que outra contribuição fornecida pela adição de pozolana a concretos e argamassas é a diminuição do diâmetro dos poros da pasta hidratada, reduzindo o ataque por cloretos e sulfatos, contribuindo conseqüentemente para a inibição da RAA.

Furnas (1997) apresenta substituição de cimento por cinza volante em teores de 10, 20, 30 e 40%, com o intuito de minimizar a reatividade potencial álcali-agregado, obtendo bons resultados a partir da substituição de 30%. A partir do

raciocínio de Furnas (1997) optou-se pelas substituições de 10, 20 e 30% de cimento por escória de aciaria para realização dos ensaios a fim de analisar o desempenho desta como inibidor da RAS.

4.2.2 Métodos de Ensaio

Após a separação dos materiais necessários, foi dado início aos ensaios e à moldagem das barras de argamassa. As quantidades de agregados reativos a serem empregados nos ensaios, indicados pela norma utilizada e citados na Tabela 02, dizem respeito a moldagem de três barras prismáticas de argamassa, de seção quadrada com (25+0,7) mm de lado e 285 mm de comprimento, perfazendo um total de 990,0 g de agregado reativo. Nos ensaios, porém, foi possível a moldagem de apenas uma barra de argamassa por vez, tendo em vista o molde disponibilizado, e dessa forma fez-se necessário que as quantidades de agregado fossem recalculadas proporcionalmente, conforme Tabela 12:

Tabela 11 - Granulometria Utilizada do Material para Ensaio

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa	
	Retido	%	g
Passante			
4,75 mm	2,36 mm	10	33,0
2,36 mm	1,18 mm	25	82,5
1,18 mm	600 µm	25	82,5
600 µm	300 µm	25	82,5
300 µm	150 µm	15	49,5

Fonte: Autoria Própria

Para dosagem da argamassa foi utilizada uma parte de cimento, para 2,25 partes, em massa, de agregado classificado, e relação água/cimento igual a 0,47 em massa, resultando desta forma em 146,67 g de cimento, 330,00 g de agregado reativo e 68,93 g de água, conforme indica a norma.

Assim sendo foram moldadas três barras prismáticas de argamassa para cada mistura. Foram moldadas ainda mais três barras utilizando-se a areia normal selecionada, ao invés de agregado reativo, as quais também serviram como

referência para o comportamento da argamassa produzida, no meio utilizado para o ensaio. A mistura das argamassas foi feita em misturador mecânico, conforme Figura 11.



Figura 11 - Misturador Utilizado na Produção das Argamassas.
Fonte: Autoria Própria.

Primeiramente foi colocada toda a quantidade de água na cuba do misturador, adicionado o aglomerante, registrando-se a hora, e contando-se então 30 s de mistura em velocidade baixa.

Sem parar a mistura foram colocadas as frações dos agregados, previamente homogeneizadas, gradualmente em um intervalo de 30 s, ainda em velocidade baixa. Após a colocação dos agregados, foi alterada a velocidade do misturador para velocidade alta, mantendo essa velocidade por mais 30 s.

O misturador foi então desligado e durante 15 s foi retirada a argamassa que estava aderida às paredes da cuba do misturador, homogeneizando-a com o restante da argamassa. A argamassa foi deixada em repouso na cuba, por mais 1 min e 15 s, coberta por um pano úmido. Passado o tempo de repouso foi ligado novamente o misturador, em velocidade alta, por mais 1 min.

No procedimento de moldagem das barras de argamassa atentou-se para que o tempo não ultrapasse 2 min e 15 s após a conclusão da mistura, conforme recomendado pela norma NBR 15577 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c). Para moldagem das barras foi utilizado um molde com pinos removíveis, conforme especificações, porém com apenas um compartimento, como pode ser observado na Figura 12:



Figura 12 - Molde Utilizado.
Fonte: Autoria Própria.

A argamassa preparada foi colocada no molde, com o auxílio de uma espátula, em duas camadas aproximadamente iguais, sendo que cada camada foi adensada com 20 golpes de soquete, conforme Figura 13, tomando-se o cuidado de que os mesmos não atingissem os pinos removíveis posicionados nas laterais do molde.



Figura 13 - Moldagem das Barras de Argamassa.
Fonte: Autoria Própria.

Feito isso, foi procedido o rasamento e alisamento da superfície da barra de argamassa com uma espátula, para posterior remoção dos pinos laterais do molde e cobertura com placas de vidro para se evitar a perda excessiva de umidade, conforme Figura 14:



Figura 14 - Rasamento e Cobertura da Barra Moldada.
Fonte: Autoria Própria.

Após a moldagem, as barras foram posicionadas em local onde não houvesse interferência de terceiros, por 24 h. Decorrido esse tempo, as barras foram removidas dos moldes com o auxílio de uma espátula tomando-se o cuidado de não tocar nos pinos laterais. As barras foram identificadas com a ordem de sua moldagem e porcentagem de mistura utilizada na sua composição. Após a identificação, uma leitura inicial orientativa foi registrada, por meio de um relógio comparador de comprimento, como pode ser observado na Figura 15:



Figura 15 - Leitura Inicial da Barra de Argamassa.
Fonte: Autoria Própria.

As barras foram colocadas em um recipiente com água destilada, suficiente para imergi-las totalmente, onde as mesmas permaneceram cobertas em estufa a 80,0°C por 24 horas. Posteriormente as barras de argamassa foram retiradas da água destilada e efetuada uma nova medição, a qual também foi registrada.

Após as leituras, as barras foram colocadas em um recipiente de inox coberto, com solução suficiente de NaOH para que ficassem totalmente imersas, e retornadas a estufa regulada em 80,0°C. O recipiente foi coberto para evitar que a solução de NaOH evaporasse, prejudicando o ensaio. A solução de NaOH promove uma aceleração na reatividade do agregado, tornando possível a identificação de resultados em um curto espaço de tempo. As barras posicionadas dentro do recipiente utilizado podem ser observadas na Figura 16:



Figura 16 - Barras de Argamassa Imersas na Solução de NaOH.
Fonte: Autoria Própria.

A solução de NaOH foi preparada adicionando-se 40,0 g de NaOH a 900 mL de água destilada, e em seguida adicionado água destilada suficiente para obter 1,0 L de solução.

Feito isso, para as barras com adição de escória e com areia, foi necessário efetuar leituras nas idades de 16 e 30 dias, contados a partir da moldagem, para registro das reações apresentadas em cada amostra, tomando-se sempre o cuidado de não tocar nos pinos laterais das barras, para que não ocorresse interferências nas medidas obtidas. Foi seguido o mesmo procedimento para as barras moldadas apenas com agregado reativo, incluindo medidas intermediárias, aos 8 e 21 dias.

Vale lembrar que antes da leitura de cada barra de argamassa, foi procedida a leitura de uma barra padrão para verificação do relógio comparador de comprimento. Os resultados das medições são apresentados em capítulo subsequente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao término das atividades práticas, foi possível analisar os dados obtidos conforme a Tabela 13:

Tabela 1312 – Medições das Barras de Argamassa (Valores Médios)

0% Escória		10% Escória		20% Escória		30% Escória		100% Areia	
Tempo (dias)	Medição (mm)	Tempo (dias)	Medição (mm)	Tempo (dias)	Medição (mm)	Tempo (dias)	Medição (mm)	Tempo (dias)	Medição (mm)
1	-0,355	1	-0,243	1	-0,262	1	-0,315	1	-0,328
2	-0,303	2	-0,102	2	-0,115	2	-0,202	2	-0,111
16	0,241	16	0,106	16	0,084	16	0,137	16	0,119
30	0,504	30	0,233	30	0,175	30	0,744	30	0,307

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 13 é possível observar a retração ocorrida nas primeiras idades, como por exemplo, as barras moldadas com 20% de adição de escória, que apresentaram -0,262mm no primeiro dia, -0,115mm no segundo dia e apenas 0,084mm de expansão aos 16 dias. Em anexo encontram-se as tabelas de medições com os valores de todas as barras moldadas (Apêndices A, B, C e D).

Utilizando os valores da Tabela 13, foi possível calcular o percentual de expansão para cada barra e organizá-los na Tabela 14. Os cálculos foram feitos conforme NBR 15577-4 (ASSOCIAÇÃO..., 2008c) e NBR 15577-5 (ASSOCIAÇÃO..., 2008d).

Tabela 13 – Cálculo da Expansão aos 16 e 30 dias

L _{dias}	0% Escória		10% Escória		20% Escória		30% Escória		100% Areia	
	Comp. (mm)	E ₄ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)
L ₀	294,697	-	294,898	-	294,885	-	294,798	-	294,889	-
L ₁₆	295,241	0,208	295,106	0,071	295,084	0,068	295,137	0,115	295,119	0,078
L ₃₀	295,504	0,297	295,233	0,043	295,175	0,031	295,744	0,206	295,307	0,068

Fonte: Autoria Própria.

Nota: Para efeito de cálculo, o comprimento efetivo foi considerado L_{ef} = 295,00 mm.

Utilizando-se da Tabela 14, foi possível traçar as figuras 17 e 18.

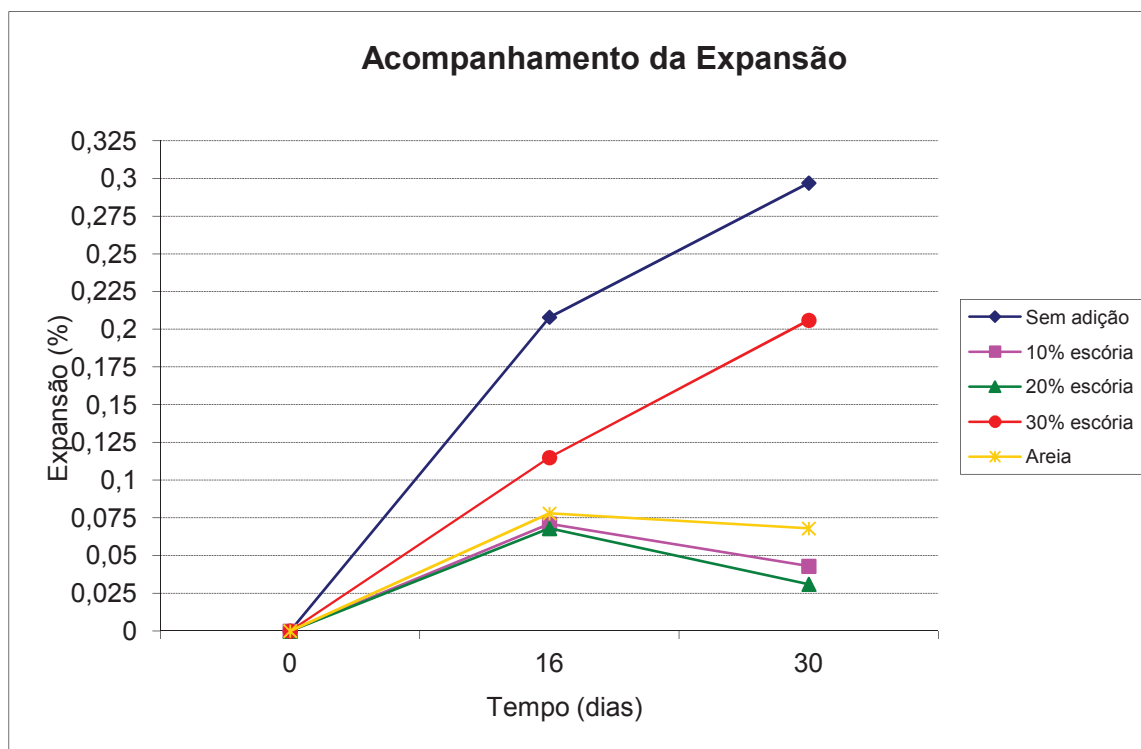


Figura 17 – Acompanhamento da Expansão até 30 dias.
Fonte: Autoria própria.



Figura 18 – Evolução da Expansão das Barras de Agregado Reativo até 30 dias.
Fonte: Autoria própria.

Carrazedo (2004), explica a ocorrência de três fases no processo evolutivo da reação, sendo um período inicial onde não são observadas expansões, um segundo período onde inicia o processo de pressão interna e expansão do concreto e no último período ocorre a extinção dos minerais reativos, o que encerra a expansão. Estas fases serão diferentes conforme o tipo de reação álcali-agregado que ocorre. A Figura 19 mostra a evolução das três fases da expansão.

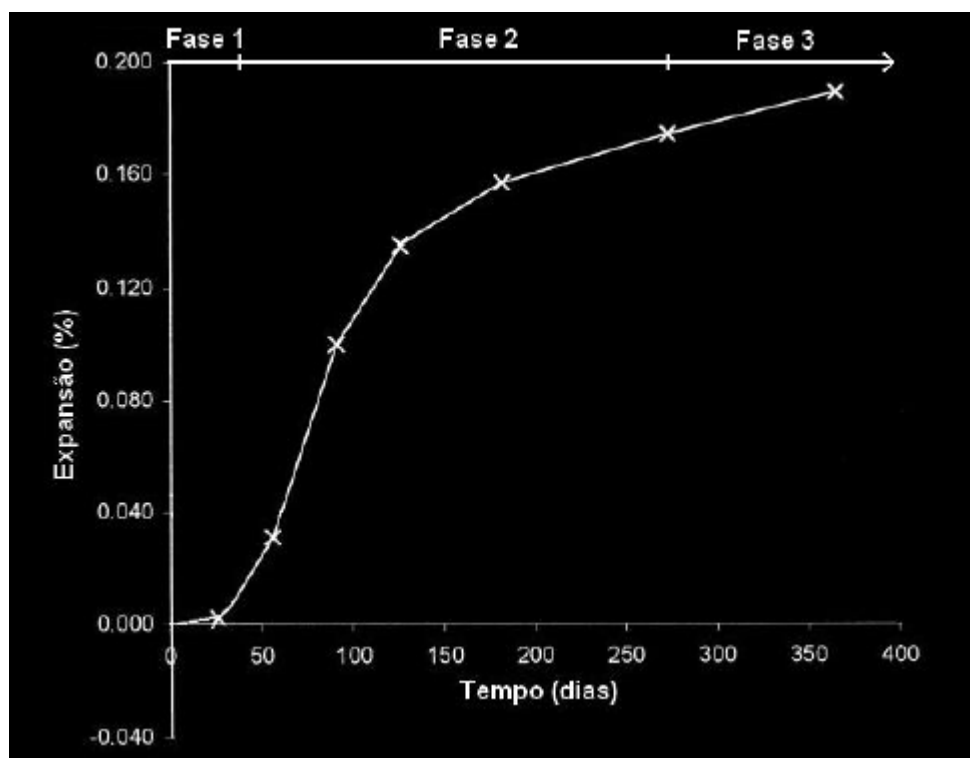


Figura 19 – Fases da Expansão Ocorrida em Ensaio Acelerado
 Fonte: Carrazedo, 2004.

Analisando-se a Figura 18 com base na Figura 19, é possível observar as três fases do processo evolutivo, com o período de ativação entre o primeiro e o oitavo dia, expansão entre os dias 8 e 21 e a partir dos 21 dias de ensaio este mostra uma tendência à tornar-se estável.

A partir dos dados da Tabela 14 e das figuras 17 e 18, observa-se que todos os corpos-de-prova apresentaram expansão aos 16 e 30 dias, com o maior percentual de expansão das barras apenas com agregado reativo, como esperado. Das barras com adição de escória, o menor percentual de expansão observado foi o de 20%, com 0,068% aos 16 dias e 0,031% aos 30 dias, superando até os valores das barras apenas com areia, que apresentaram expansão de 0,078% aos 16 dias e 0,068% aos 30 dias.

Partindo-se ainda da Tabela 14 e da relação (4):

$$R = 100 \cdot (E_4 - E_5) / E_4 \quad (4)$$

em que R é a porcentagem de redução da expansão, E_4 é a expansão média das barras em adição (%) e E_5 é a expansão média das barras com adição (%), foi possível obter a Tabela 15, que mostra os percentuais de redução aos 16 e 30 dias.

Tabela 1514 - Cálculo da Redução da Expansão aos 16 e 30 Dias

% de Adição	Redução aos 16 dias (%)	Redução aos 30 dias (%)
10	65,87	85,52
20	67,31	89,56
30	44,71	30,64

Fonte: Autoria Própria.

Analisando-se a Tabela 15, constataram-se reduções em todas as adições testadas, sendo que a maior redução obtida foi de 89,56% com adição de 20% de escória aos 30 dias.

6 CONCLUSÃO

Ao longo dos ensaios, várias dificuldades foram vencidas. Foram necessárias algumas adaptações, como a falta de equipamentos e local adequados para realização das atividades. Um exemplo foi a estufa que armazenava os corpos-de-prova, que ficou em um local aberto, onde várias pessoas tinham acesso, o que conseqüentemente interferiu nos ensaios. Os recipientes para armazenar as barras na solução de NaOH não foram os corretos, facilitando a contaminação da mesma, impossibilitando o isolamento entre as barras e dificultando o processo de medição. Durante a realização dos ensaios o canteiro de obras, onde estava a estufa, estava em reforma, e durante esta as esquadrias foram retiradas, o que aumentou a incidência de ventos no local, prejudicando também as medições, pois as barras eram retiradas da estufa a aproximadamente 80°C e encontravam um ambiente com temperaturas inferiores e oscilantes.

O estudo realizado permitiu a avaliação parcial da reatividade do agregado, em que aos 30 dias de ensaio obteve-se uma expansão de 0,297%, lembrando que a NBR 15577-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2008a) afirma que, quando a expansão aos 30 dias for superior a 0,19%, o agregado pode ser caracterizado como potencialmente reativo.

Com relação às adições, observa-se que aos 16 dias ocorreu a redução da expansão das barras moldadas. Segundo especificações da NBR 15577-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2008a), quando a expansão for menor que 0,10% aos 16 dias ocorreu a mitigação da reação, fato este comprovado ao analisar as barras com 10 e 20% de substituição. A barra com substituição de 30% apresentou redução, porém inferior a especificada por norma, mostrando-se ineficaz. Contudo é necessário o tratamento estatístico dos dados obtidos para tal afirmação, como análise de desvio padrão e coeficiente de variação entre as medições, pois durante o período de medição das barras ocorreram variações climáticas que podem ter influenciado nos mesmos. Outros estudos também são importantes, como microscopia eletrônica de varredura e análise petrográfica, pois estes forneceriam maiores informações a respeito do agregado, além do ensaio não acelerado de determinação da expansão em prismas de concreto, conforme recomenda a NBR 15577-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2008a), que podem confirmar a eficácia das adições testadas.

Dentre as substituições empregadas, o teor de 20% apresentou os melhores resultados. Sendo a escória de aciaria um material descartado e sem valor econômico, o emprego na confecção de concretos sujeitos a expansões decorrentes de reações álcali sílica pode ser uma alternativa viável, desde que não interfira significativamente em outras propriedades importantes do concreto, como módulo de elasticidade e tensão de ruptura, reduzindo o custo da fabricação do concreto e também a quantidade de material descartado ao meio ambiente.

Com relação ao possível fato que promoveu a redução da expansão das barras de argamassa, presume-se que foi o teor de óxido de cálcio (CaO) presente na escória de aciaria. Monteiro et al. (1997) explica que a eficácia na utilização de pozolanas para impedir a expansão causada pela reação álcali-sílica esta ligada a taxa de CaO em relação aos hidróxidos alcalinos, pois quanto maior esta taxa, mais eficaz será sua adição.

Porém é necessário salientar que a escória utilizada já havia tido suas reações expansivas, o que provavelmente reduziu a quantidade de óxido de cálcio disponível, o que pode ter influenciado nos resultados.

Como não foi possível investigar por um microscópio, não foi possível observar se houveram reações pozolânicas secundárias, formando C-S-H, que reduziriam o pH do meio, ao incorporar íons alcalinos, reduzindo a porosidade e permeabilidade do concreto. Não obstante, os resultados se mostraram promissores, e o estudo deve ser continuado para minimizar os efeitos das dificuldades encontradas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Tibério. Histórico de casos de RAA ocorridos recentemente em fundações de edifícios na Região Metropolitana do Recife. Disponível em: <<http://pcc2526.pcc.usp.br/Arquivos/2007/Aulas/07.03.28Aula5%282%29.pdf>> Acesso em: 30 nov. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1**: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 1: Guia para Avaliação da Reatividade Potencial e Medidas Preventivas para o Uso de Agregado em Concreto. Rio de Janeiro, 2008a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-2**: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 2: Coleta, Preparação e Periodicidade de Ensaio de Amostras de Agregados para Concreto. Rio de Janeiro, 2008b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4**: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 4: Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado. Rio de Janeiro, 2008c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-5**: Agregados – Reatividade Álcali-Agregado – Parte 5: Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado. Rio de Janeiro, 2008d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991

CARRAZEDO, Rogério. **Modelagem Numérica da Expansão do Concreto Devido à Reação Álcali-Agregado**. 2004. Dissertação (Mestre em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

DAHER, Cesar Henrique Sato. **Avaliação do Grau de Influência de Parâmetros de Contorno no Ensaio de Reatividade Potencial Álcali-Agregado pelo Método Acelerado**. Dissertação (Mestre em Construção Civil) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

FILEV, Rodrigo. **Ficha Técnica: Escória de Aciaria**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm>. Acesso em 31 ago. 2011.

FURNAS. Laboratório de Concreto. **Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado a Rolo: Ensaio e Propriedades**. São Paulo: Pini, 1997.

GLEIZE, P. **Notas de Aula de Materiais de Construção**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. Florianópolis/SC.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação de Concretos Afetados pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exudado**. Tese (Doutora em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

HERMANN, A., SOUZA, L., LUZ, C. A. **Valorização da escória de aciaria em cimentos aluminosos e cimento Portland**. In: ENECS e ELECS - VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Vitória. Espírito Santo: 2011.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Números de Mercado – Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>>. Acesso em: 31 ago. 2011.

JESUS, Giseli I. M. **Identificação e Análise da Reação Álcali-Agregado Segundo Metodologia de Ensaios Laboratoriais**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2008.

DA LUZ, C. A. **Notas de Aula de Materiais de Construção**. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008. Pato Branco/PR.

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.

MENDONÇA, Ronaldo de. RODRIGUES, Gisele – **Uso Adequado da Escória de Aciaria – Parte 1 - Siderurgia Brasil – Edição 47 2008**. Disponível em <<http://www.siderurgiabrasil.com.br/novosb/component/content/article/50-materias47/204-escoria-de-aciaria>>. Acesso em 12.mar.2010.

MONTEIRO, P. J. M.; WANG, K.; SPOSITO, G.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. **Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction**. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 12, p. 1899-1909, 1997.

PIRES, Kironi O. **Investigação do Potencial Reativo Álcali-Agregado Residual – Um Estudo de Caso**. 2009. Dissertação (Mestre em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

PREZZI, Mônica. KURTIS, K.E., MONTEIRO, Paulo J. M., SANTOS, Marcia Campos dos. ANDRADE, Walton Pacelli de. **Importância da Química de Superfície na Reação Álcali-Agregado**. Disponível em: <http://concretepapers.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=199:00174dura1997&catid=98&Itemid=499> Acesso em ago.2010.

QIANG W., YAN, P. **Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag.** Construction and Building Materials, Volume 24 (7), 2010, Pag 1134-1140. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com>> Acesso em ago.2010.

SABBAG, Anderson F. **Verificação da Existência de Reação Álcali-Agregado no Concreto da UHE de Mascarenhas.** 2003. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SANTOS, Silvia. **Produção e Avaliação do Uso de Pozolana com Baixo Teor de Carbono Obtida da Cinza de Casca de Arroz Residual para Concreto de Alto Desempenho.** 2006. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, Patrícia N. **Reação Álcali-Agregado nas Usinas Hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/CHESF. – Influência da Reação nas Propriedades do Concreto.** 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SOUZA, L. LUZ C. A. **Valorização da Escória de Aciaria em Cimento Portland.** In: SICITE – XV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2010.

TENÓRIO, Jorge A. S. **Reciclagem da Escória de Aciaria.** Disponível em: <[www.pmt.usp.br/ACADEMIC/jtenorio/larex/trabalhos/Reciclagem Escoria.pdf](http://www.pmt.usp.br/ACADEMIC/jtenorio/larex/trabalhos/Reciclagem_Escoria.pdf)>. Acesso em: 31 ago. 2010.

THOMAS. Michael, FOURNIER. Benoit, FOLLIARD, Kevin. IDEKER, Jason. SHEHATA, Medhat. **Test Methods for Evaluating Preventive Measures for Controlling Expansion due to Alkali-Silica Reaction in Concrete.** 2006. The University of Texas at Austin, Austin, 2006.

VALDUGA, Laila. **Influência das Condições de Ensaio da ASTM C 1260 na Verificação da Reação Álcali-Agregado.** 2007. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha técnica do CP V-ARI-RS.** Disponível em: <<http://www.votorantim-cimentos.com.br/hotsites/cimento/base.htm>>. Acesso em: mar. 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabelas de Medições Barras com Adição de Escória e Barra de Areia

Tabela de Medições Após 24 e 48h

CP	Medição Após 24h (mm)	Média (mm)	Medição Após 48h (mm)	Média (mm)
A0% 1	-0,353	-0,289	-0,135	-0,151
A0% 2	-0,337	-0,284	-0,139	-0,146
A0% 3	-0,368	-0,378	-0,041	-0,032
10% 1	-0,180	-0,206	-0,107	-0,113
10% 2	-0,185	-0,174	-0,137	-0,099
10% 3	-0,351	-0,357	-0,081	-0,105
20% 1	-0,289	-0,293	-0,181	-0,183
20% 2	-0,183	-0,175	-0,024	-0,008
20% 3	-0,341	-0,349	-0,127	-0,161
30% 1	-0,143	-0,163	-0,153	-0,145
30% 2	-0,391	-0,460	-0,284	-0,322
30% 3	-0,379	-0,362	-0,134	-0,156

Tabela de Medições Após 16 e 30 dias

CP	Medição Após 16d (mm)		Medição Após 30d (mm)		Média (mm)			
A0% 1	0,086	0,095	0,072	0,084	0,385	0,384	0,368	0,379
A0% 2	0,148	0,143	0,126	0,139	0,463	0,405	0,419	0,429
A0% 3	0,143	0,116	0,139	0,133	0,111	0,117	0,109	0,112
10% 1	0,116	0,100	0,081	0,099	0,159	0,144	0,133	0,145
10% 2	0,127	0,066	0,094	0,096	0,293	0,277	0,272	0,281
10% 3	0,103	0,145	0,119	0,122	0,254	0,316	0,247	0,272
20% 1	0,048	0,062	0,061	0,057	0,115	0,105	0,109	0,110
20% 2	0,135	0,130	0,120	0,128	0,225	0,224	0,238	0,229
20% 3	0,097	0,062	0,041	0,067	0,189	0,191	0,181	0,187
30% 1	0,145	0,144	0,148	0,146	0,902	0,979	0,94	0,940
30% 2	0,129	0,119	0,113	0,120	0,538	0,507	0,502	0,516
30% 3	0,142	0,139	0,155	0,145	0,798	0,777	0,753	0,776

APÊNDICE B – Tabelas de Medições Barras Apenas com Agregado Reativo

Tabela de Medições Após 24 e 48h

CP	Medição Após 24h (mm)	Média (mm)	Medição Após 48h (mm)	Média (mm)
AG100% 1	-0,320	-0,354	-0,413	-0,410
AG100% 2	-0,397	-0,297	-0,250	-0,340
AG100% 3	-0,397	-0,385	-0,102	-0,221

Tabela de Medições Após 8 e 16 dias

CP	Medição Após 8d (mm)	Média (mm)	Medição Após 16d (mm)	Média (mm)
AG100% 1	-0,260	-0,229	0,266	0,267
AG100% 2	-0,221	-0,355	0,412	0,087
AG100% 3	-0,102	-0,135	0,189	0,261

Tabela de Medições Após 21 e 30 dias

CP	Medição Após 21d (mm)	Média (mm)	Medição Após 30d (mm)	Média (mm)
AG100% 1	0,597	0,562	0,543	0,567
AG100% 2	0,537	0,321	0,281	0,380
AG100% 3	0,749	0,460	0,265	0,491

APÊNDICE C – Tabelas para o Cálculo da Expansão até 16 dias

Barras sem Adição de Escória

L_{dias}	AG100% 1		AG100% 2		AG100% 3	
	Comp. (mm)	E ₄ (%)	Comp. (mm)	E ₄ (%)	Comp. (mm)	E ₄ (%)
1	294,595	-	294,677	-	294,612	-
8	294,761	0,056	294,725	0,016	294,877	0,090
16	295,267	0,228	295,201	0,178	295,256	0,218

Barras com Adição de 10% de Escória

L_{dias}	10% 1		10% 2		10% 3	
	Comp. (mm)	E ₅ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)	Comp. (mm)	E ₅ (%)
1	294,889	-	294,893	-	294,911	-
16	295,099	0,071%	295,096	0,069%	295,122	0,072%

Barras com Adição de 20% de Escória

L_{dias}	20% 1		20% 2		20% 3	
	Comp. (mm)	E_5 (%)	Comp. (mm)	E_5 (%)	Comp. (mm)	E_5 (%)
1	294,816	-	294,984	-	294,856	-
16	295,057	0,082%	295,128	0,049%	295,067	0,072%

Barras com Adição de 30% de Escória

L_{dias}	30% 1		30% 2		30% 3	
	Comp. (mm)	E_5 (%)	Comp. (mm)	E_5 (%)	Comp. (mm)	E_5 (%)
1	294,861	-	294,684	-	294,848	-
16	295,146	0,097%	295,120	0,148%	295,145	0,101%

APÊNDICE D – Tabelas para o Cálculo da Mitigação

Cálculo da Mitigação aos 16 dias

Barra	10% Escória			20% Escória			30% Escória		
	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)	E ₄ (%)
1	0,228%	0,097%	57,589%	0,228%	0,082%	64,18651	0,228%	0,071%	68,75
2	0,178%	0,148%	16,730%	0,178%	0,049%	72,51908	0,178%	0,069%	61,32316
3	0,218%	0,101%	53,858%	0,218%	0,072%	67,21906	0,218%	0,072%	67,11548
Média	0,208%	0,115%	44,646%	0,208%	0,067%	67,62095	0,208%	0,071%	66,06269