

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Rafael Mascolo

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE
Na₂O EM ARGAMASSAS À BASE DE ESCÓRIA DE ACIARIA
ELÉTRICA ÁLCALI-ATIVADA**

Porto Alegre
junho 2008

RAFAEL MASCOLO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE
Na₂O EM ARGAMASSAS À BASE DE ESCÓRIA DE ACIARIA
ELÉTRICA ÁLCALI-ATIVADA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero
Co-orientador: Alexandre Silva de Vargas

Porto Alegre
junho 2008

RAFAEL MASCOLO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE
Na₂O EM ARGAMASSAS À BASE DE ESCÓRIA DE ACIARIA
ELÉTRICA ÁLCALI-ATIVADA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Professor/a Orientador/a e pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2008

Prof^a. Angela Borges Masuero
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Inácio Benvegno Morsch
Chefe do DECIV

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Angela Borges Masuero (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Alexandre Silva de Vargas (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Daniel Tregnago Pagnussat (UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng^a. Lucília Maria Bernardino da Silva (UFRGS)
Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aos meus pais,
Garibaldi (em memória) e Roseli.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à professora Angela Borges Masuero, pela amizade, orientação e disposição em ajudar sempre.

Ao professor Alexandre Silva de Vargas, pela amizade, orientação, apoio, e preocupação com o ânimo do projeto.

Ao pessoal do NORIE, em especial aos amigos Airton, Bruno, Daniel, Éderson, Mauricio e Patrícia, que sempre se mostraram dispostos a ajudar.

À minha mãe Roseli, ao meu irmão Felipe e ao grande amigo Mano por estarem me ajudando e apoiando diariamente.

RESUMO

MASCOLO, R. **Estudo da influência de diferentes teores de Na₂O em argamassas à base de escória de aciaria elétrica álcali-ativada**. 2008. 62 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A indústria da construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais no Mundo, além de ser responsável por grande parte da geração de CO₂, visto que o material mais característico e utilizado do setor, o cimento Portland, contribui com mais de 5% do total das emissões de dióxido de carbono. Outro setor causador de impactos ambientais em todo o Mundo é a indústria siderúrgica que tem elevada geração de resíduos sem aplicação. Tais problemas, somados à crescente preocupação ambiental, têm contribuído para que as sociedades busquem alternativas para reduzir os impactos ambientais causados pelo homem. Um exemplo disso é o estudo sobre o cimento de escória, o qual reutiliza o resíduo da siderurgia como material aglomerante através de sua ativação por álcalis. Atualmente existem estudos para emprego da escória de alto-forno como cimento álcali-ativado, sendo escassa a bibliografia para o uso de outras escórias, o que dificulta um maior entendimento das reações e dos possíveis resultados a serem obtidos quando utilizadas diferentes escórias. A escória de aciaria elétrica, gerada em siderúrgicas que utilizam sucata como matéria prima para produção do aço, tem pouca utilização e não há trabalhos sobre a sua utilização como aglomerante álcali-ativado. Assim, neste trabalho buscou-se determinar a resistência à compressão atingida pelo cimento de escória de aciaria elétrica álcali-ativada com diferentes teores de Na₂O. Avaliou-se também a influência de diferentes temperaturas de cura e a deformação linear ao longo do tempo. Inicialmente foram moldados nove traços de argamassa com variações dos teores de ativador (1, 1,25 e 1,5%) e das temperaturas de cura nas primeiras 24 horas (20, 40 e 60°C). Após os primeiros resultados, constatou-se a possibilidade de aumentar os teores de ativador para traços com cura a 20°C, sendo então confeccionadas argamassas com os teores de 2,5, 5 e 7,5% para essa temperatura de cura. Constatou-se que o aumento do teor de ativador e da temperatura de cura para os traços com cura térmica (40° e 60°C) aumenta a resistência, já para os traços com cura a 20°C observa-se um crescimento da resistência até o teor de ativador de 1,5% e depois há um decréscimo. Quanto à deformação linear, no geral os traços apresentaram retração pouco menor que as das argamassas de cimento Portland.

Palavras-chave: álcali-ativado; cimento de escória; escória de aciaria elétrica; resíduos.

ABSTRACT

MASCOLO, R. **Estudo da influência de diferentes teores de Na₂O em argamassas à base de escória de aciaria elétrica álcali-ativada.** 2008. 62 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Study of the influence of Na₂O different contents in mortar slag based of electric arc furnace alkali-activated

The industry of civil construction has been one of the largest consumers of natural resources in the World, beyond of being responsible for great part of the CO₂ generation, since the most characteristic and utilized material in the sector, the Portland cement, has contributed with more than 5% of the total of carbon dioxide emissions. Another sector causing the environmental impacts in the World has been the siderurgic industry that has an elevated generation of residues without application. Such issues added to the growing environmental concern, have contributed for the societies searching for alternatives to reduce the environmental impacts caused by human beings. An example of that is the study on the slag cement, which re-utilize the siderurgic residue as binder material through its activation by alkalis. Currently, there have been studies for the slag use of blast furnace as alkali-activated cement, being scarce the bibliography for other slag use, what makes difficult a greater understanding of the reactions and possible results of being obtained when utilizing different slag. The electric arc furnace slag, generated in siderurgic industries which utilize scrap metal as raw material for the steel production, has little utilization and there are not researches on its use as binder alkali-activated. Therefore, this dissertation searched for determining the compression strenght achieved by the ladle slag cement of alkali-activated with Na₂O different contents. The influence of different curing temperatures and the linear deformity was also assessed over time. Initially, nine mortar traits were molded with the activator content variation (1, 1,25 and 1,5%) and from the curing temperatures in the first 24 hours (20, 40 and 60°C). After the first results, the possibility of increasing the activator content for traits with curing at 20°C was noticed, then, the mortar being manufactured with contents of 2,5, 5 and 7,5% for this curing temperature. In addition, it was noticed the activator content increase and the curing temperature for the traits with thermal curing (40° and 60°C) increasing the resistance, but for the curing traits at 20°C a resistance growing may be observed until the

activator content of 1,5% and, further, there was a decrease. Related to deformity, in general, the traits presented a little smaller retraction than from the Portland cement mortar.

Key words: alkali-activated; slag cement; ladle slag; residues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: etapas do trabalho	18
Figura 2: processo de produção de aço e escórias geradas	23
Figura 3: curva granulométrica da escória de aciaria elétrica	37
Figura 4: difratograma da escória de aciaria elétrica	38
Figura 5: pastas com teores de ativador de 2,5, 5, 10 e 20%	42
Figura 6: pastas com teores de ativador de 1,5, 2,5 e 3,5%	42
Figura 7: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C	45
Figura 8: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 40°C	46
Figura 9: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 60°C	46
Figura 10: corpo-de-prova quebrado a 2/3 da altura.....	47
Figura 11: resistência a compressão das argamassas com 1% de ativador e diferentes temperatura de cura	48
Figura 12: resistência a compressão das argamassas com 1,25% de ativador e diferentes temperatura de cura	48
Figura 13: resistência a compressão das argamassas com 1,5% de ativador e diferentes temperatura de cura	49
Figura 14: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C	50
Figura 15: efeito isolado da temperatura de cura na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada	53
Figura 16: efeito isolado do teor de ativador na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada com cura em temperatura ambiente	54
Figura 17: efeito isolado da idade na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada, sem os traços extras	55
Figura 18: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C	56
Figura 19: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 40°C	56
Figura 20: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 60°C	57
Figura 21: deformação média das argamassas com 1% de ativador e diferentes temperaturas de cura.....	58
Figura 22: deformação média das argamassas com 1,25% de ativador e diferentes temperaturas de cura.....	58
Figura 23: deformação média das argamassas com 1,5% de ativador e diferentes temperaturas de cura.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria	28
Quadro 2: distribuição granulométrica da areia	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: composição química média das escórias de aciaria	26
Tabela 2: características físicas e mecânicas de agregados de escória de aciaria elétrica e LD, em comparação aos de granito	27
Tabela 3: composição química da escória de aciaria elétrica	38
Tabela 4: argamassas estudadas e simbologia utilizada	41
Tabela 5: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador, temperatura de cura e idade na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada	51
Tabela 6: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador e temperatura de cura, para idade de um dia, na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada	52
Tabela 7: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador e idade, com temperatura de cura de 20°C, na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 METODOLOGIA	16
2.1 PROBLEMA DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS	16
2.3 HIPÓTESE	16
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 CONSTRUÇÃO CIVIL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	19
3.1 CIMENTO PORTLAND: UM GRANDE PROBLEMA AMBIENTAL	20
3.2 VIABILIDADE DE ALTERNATIVAS AO CIMENTO PORTLAND	21
4 O AÇO E SEU SUBPRODUTO	22
4.1 ACIARIA ELÉTRICA	23
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	25
4.2.1 Características químicas	25
4.2.2 Características físicas	26
4.2.3 Reatividade das escórias	28
4.3 UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA	30
5 AGLOMERANTES A BASE DE ESCÓRIA	32
6 PROGRAMA EXPERIMENTAL	36
6.1 MATERIAIS	36
6.1.1 Escória de aciaria elétrica (EAE)	36
6.1.1.1 Caracterização física	36
6.1.1.2 Caracterização química	37
6.1.1.3 Caracterização mineralógica	38
6.1.2 Hidróxido de sódio	39
6.1.3 Areia	39
6.1.4 Água	40
6.2 MÉTODOS	40
6.2.1 Estudo exploratório	40
6.2.2 Dosagem das argamassas	42
6.2.3 Condições de cura	43
6.2.4 Resistência à compressão	43

6.2.5 Método das barras	43
6.2.6 Tratamento estatístico	44
7 ARGAMASSAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA ATIVADA COM SODA CÁUSTICA: APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	45
7.1.1 Efeito do teor de ativador	45
7.1.2 Efeito da temperatura de cura	47
7.1.3 Traços extras	49
7.1.4 Análise de variância	50
7.2 MÉTODO DAS BARRAS	55
7.2.1 Efeito do teor de ativador	55
7.2.2 Efeito da temperatura de cura	57
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
8.1 CONCLUSÕES	60
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A cada ano que passa, seja pela escassez de materiais, problemas ambientais ou até questões econômicas, há uma maior conscientização da população sobre a necessidade da preservação ambiental. A maior exigência por soluções e prevenções dos danos ambientais causados pelo desenvolvimento do homem, tem dado destaque para a necessidade de políticas de crescimento da economia com sustentabilidade.

Em todos os países, uma fatia expressiva da economia é dependente da indústria da construção civil, a qual consome grande quantidade de energia e recursos naturais e ainda tem expressiva contribuição na produção de dióxido de carbono (CO_2), que é o principal responsável pelo aquecimento global. No entanto este setor industrial tem uma importante característica que é o seu bom potencial para absorver a utilização de resíduos. Com base em tais dados pode-se perceber que a construção civil tem importante contribuição para tornar possível desenvolvimento sustentável.

Um dos principais materiais usados na indústria da construção civil e no Mundo é o cimento Portland, o qual é responsável por grande parte dos impactos ambientais deste setor, principalmente na questão da produção de dióxido de carbono. O aço é outro material muito utilizado em todo o globo e que também apresenta problemas ambientais resultantes dos processos de produção, sendo um dos principais a enorme quantidade de resíduos gerados e não totalmente utilizados.

Atualmente as escórias, resíduo da produção de aço, podem ser empregadas na Engenharia Civil como lastro para estradas, matéria-prima para produção do clínquer, adição no cimento Portland e também como novo tipo de aglomerante. No entanto, nem todas as escórias podem ser aproveitadas, em função das variações de composição e propriedades, que dependem diretamente do tipo de processo de refino do aço e de resfriamento do resíduo após o seu descarte, sendo assim muitas escórias ficam armazenadas em grandes áreas, acarretando elevados custos e riscos.

A escória de aciaria elétrica, em especial a do forno panela, é um resíduo que ainda tem pouca utilização em virtude do seu potencial expansivo, sendo em sua maior parte estocada. Sua composição é parecida com a do clínquer, porém com diferentes proporções, e em função disso atualmente estuda-se a fabricação desse produto a partir do resíduo. Contudo, ainda que seja viável a utilização de escória para preparação da farinha principal do cimento Portland, o processo continuaria com um alto dispêndio de energia e elevada produção de CO₂.

Como possível alternativa para os problemas de destruição dos recursos naturais, poluição e elevado consumo energético na fabricação do cimento e do custo de disposição dos resíduos industriais, estuda-se a utilização de cimentos álcalis-ativados. Tais aglomerantes são produzidos com subprodutos industriais, como escórias e cinzas volantes, e ativadores químicos alcalinos, podendo desenvolver em alguns casos resistências comparáveis ou até mesmo superiores às do cimento Portland.

Em função da carência de estudos sobre cimentos álcali-ativados à base de escórias de aciaria elétrica (EAE), e da necessidade de se contribuir para resolução ou, pelo menos, redução dos problemas citados, testou-se um novo aglomerante à base de EAE e hidróxido de sódio (NaOH), a popular soda cáustica. Além das vantagens ambientais, todas as matérias-primas desse composto têm baixo custo e gasto de energia, o que torna o estudo ainda mais atrativo.

A resistência à compressão é uma das principais propriedades do cimento Portland, e por isso tal característica foi adotada como parâmetro principal para caracterizar as argamassas de cimento à base de escória álcali-ativada. Para a pesquisa foram produzidos um total de doze traços (nove traços iniciais mais três traços extras), tendo como componentes principais EAE, obtida de um lote representativo da produção de aço em uma siderúrgica da região metropolitana de Porto Alegre, e como ativador alcalino o hidróxido de sódio (NaOH), comercialmente conhecido como soda cáustica.

O trabalho está estruturado em sete capítulos descritos a seguir: neste primeiro capítulo são apresentadas a contextualização, justificativa e estruturação do trabalho. O segundo capítulo traz a metodologia utilizada com a questão de pesquisa, objetivos, hipótese, delimitações, limitações, delineamento e cronograma. No terceiro capítulo há uma breve discussão sobre a construção civil e o desenvolvimento sustentável, abordando o cimento Portland e possíveis alternativas para o mesmo. O quarto capítulo é fruto da revisão bibliográfica sobre as escórias, com ênfase para EAE, sendo apresentados dados a respeito da produção e caracterização do

resíduo, bem como suas possíveis utilizações. O quinto capítulo aborda sobre aglomerantes à base de escória. No sexto capítulo é apresentado o programa experimental com a caracterização dos materiais empregados e descrição dos ensaios realizados. No sétimo capítulo é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios das argamassas de escória álcali-ativada. No oitavo capítulo há as conclusões sobre a pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

2.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A questão de pesquisa proposta neste trabalho é: qual a influência de diferentes teores de Na_2O proveniente do ativador alcalino (NaOH) na resistência mecânica à compressão do aglomerante à base de escória de aciaria do forno panela?

2.2 OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é a avaliação da influência de diferentes teores de ativador na resistência à compressão de argamassas à base de EAE álcali-ativada com soda cáustica (NaOH).

Os objetivos secundários são:

- a) análise da influência de diferentes temperaturas de cura na resistência à compressão axial de argamassas de EAE álcali-ativada;
- b) avaliação das deformações lineares, ao longo do tempo, de argamassas à base de EAE álcali-ativada.

2.3 HIPÓTESE

É possível obter um desempenho mecânico superior a 20 MPa para argamassas produzidas com escória de aciaria do forno panela ativada com soda cáustica.

2.4 DELIMITAÇÕES

As delimitações da pesquisa são apresentadas a seguir:

- a) O domínio da pesquisa está restrito ao estudo de um lote significativo da escória de forno panela gerada no refino de aço em siderúrgica da região metropolitana de Porto Alegre;
- b) o programa experimental é caracterizado pela produção de argamassas à base de EAE álcali-ativada para determinação da resistência à compressão axial, bem como deformações lineares;
- c) são feitas medidas de resistência à compressão axial para cada traço nas idades de: 1 ou 3 (dependente do traço utilizado), 7, 28 e 91 dias.

2.5 LIMITAÇÕES

A pesquisa está limitada ao estudo de doze traços com variações nos teores de Na_2O e nas temperaturas de cura, utilizando apenas um ativador e uma única amostra de escória.

2.6 DELINEAMENTO

Os passos desenvolvidos no decorrer do trabalho, e suas devidas conexões, são apresentados a seguir, conforme esquema representado na figura 1. Primeiramente, foi feita a pesquisa bibliográfica para levantamento de informações relacionadas ao assunto abordado e definição das variáveis envolvidas. Essa etapa prolonga-se durante todo o trabalho a fim de dar assistência no desenvolvimento da pesquisa. A fase seguinte consiste em coletar a escória de aciaria na usina de refinamento de aço e em seguida passar o resíduo pelo processo de cominuição, elevando-se a área superficial do material e possivelmente a sua reatividade. Após, realizaram-se as análises químicas e físicas da escória moída e então se pode fazer a moldagem dos corpos-de-prova de argamassa à base de escória de aciaria álcali-ativada. Posteriormente os corpos-de-prova foram ensaiados à compressão axial nas idades determinadas. A partir dos dados coletados e bibliografias consultadas, desenvolveram-se a análise e discussão dos resultados, as considerações finais e conclusões da pesquisa.

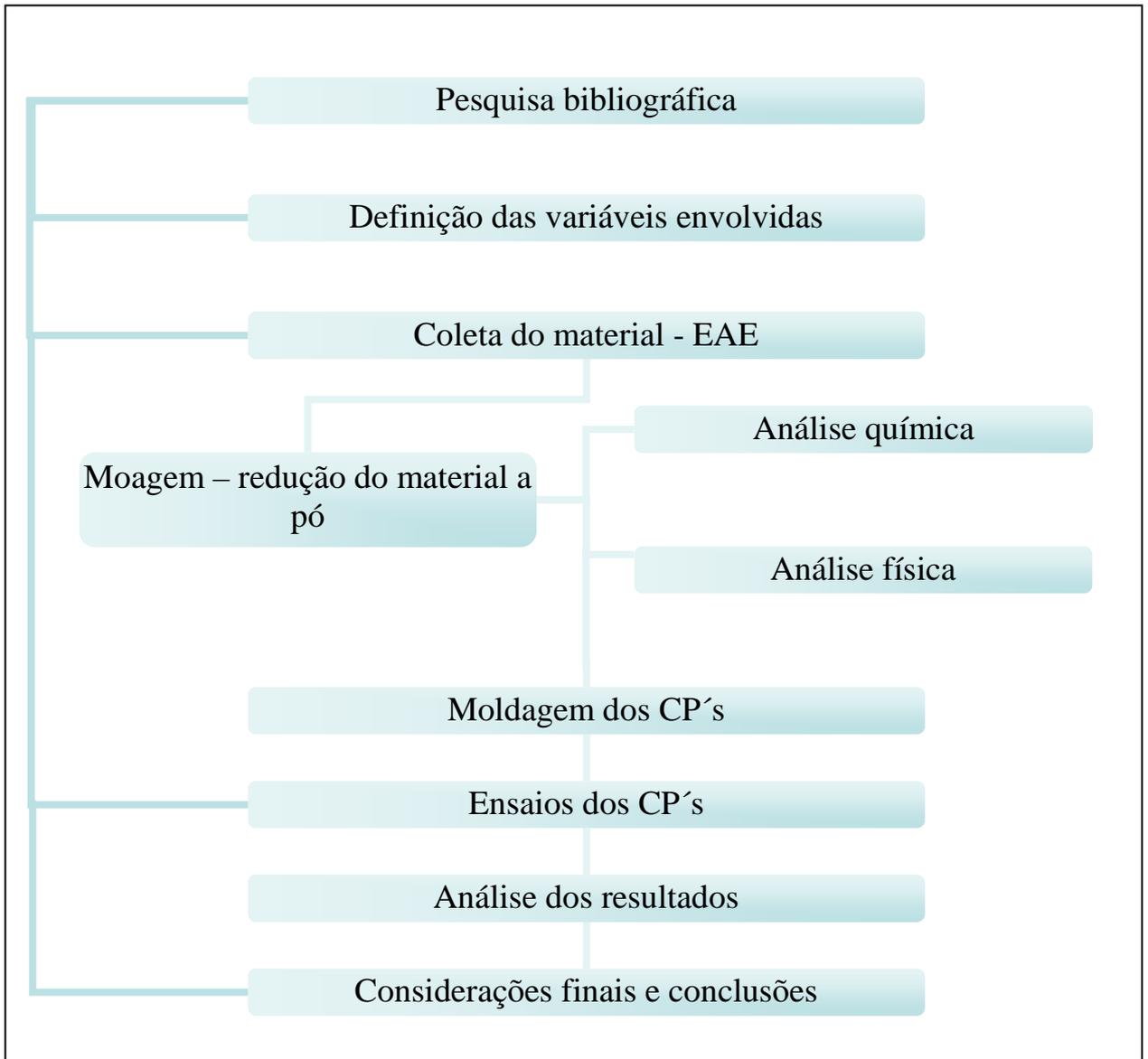


Figura 1: etapas do trabalho

3 CONSTRUÇÃO CIVIL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Na última década, sociedades de todo o Mundo têm repensado sobre aspectos ambientais, dando ênfase à preservação ambiental e ao desenvolvimento sustentável e cada vez mais as comunidades exigem soluções e prevenções dos danos ambientais causados pelo homem. A indústria da construção é uma área crucial quando se abordam essas preocupações, devido ao seu elevado consumo de energia e recursos naturais, em complemento a sua geração de resíduos e poluição (ANDERSON, 2007, p. 2).

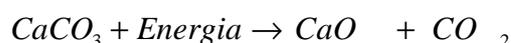
O maior impacto ambiental por parte do setor da construção civil é decorrente da produção do cimento Portland, pois em seu processamento há elevado consumo de matérias-primas naturais, elevado gasto energético e sua manufatura é responsável por aproximadamente 5% das emissões de CO₂ no Planeta. Anderson (2007, p. 4) cita a existência de programas ambientais de iniciativa privada, em nome de dez das maiores produtoras de cimento do Mundo, que propõem metas para redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂). Para tornar possível essa redução, há programas para melhorar a eficiência energética, buscar o uso de matérias-primas alternativas (por exemplo: cinzas, escória de alto-forno), e o uso de combustíveis alternativos ou de baixo teor de carbono.

De acordo com o Conselho Mundial de Negócios para o Desenvolvimento Sustentável¹, os três pilares para o desenvolvimento sustentável estão no crescimento econômico, balanço ecológico e progresso social. Sendo assim, não se deve ter preocupação apenas com o processo da manufatura do cimento Portland, mas também com os recursos naturais utilizados e o impacto ambiental causado (GARTNER, 2004, p. 1489). Em função de tais fatores é que se tem estudado a produção de novos aglomerantes, com propriedades iguais ou superiores ao cimento Portland, a partir da reciclagem de subprodutos industriais. Cimentos à base de resíduos podem trazer como benefício a redução dos impactos ambientais do setor da construção civil sem interferir na continuidade do seu desenvolvimento econômico.

¹ Associação global de cerca de 200 empresas, que trata exclusivamente de negócios e desenvolvimento sustentável.

3.1 CIMENTO PORTLAND: UM GRANDE PROBLEMA AMBIENTAL

O constituinte fundamental do cimento tipo Portland é o clínquer, o qual é produzido a partir da queima de matéria-prima rica em calcário e material argiloso. O maior problema ambiental da indústria cimenteira está nesse processo de queima, pois há liberação de enormes quantidades de CO₂ por parte da matéria-prima e do combustível utilizado. Abaixo é apresentado o balanço de massas da calcinação de calcário;



$$1000 \text{ kg} \quad \rightarrow \quad 560 \text{ kg} + 440 \text{ kg}$$

“A produção de uma tonelada de clínquer pelo método da via seca libera aproximadamente entre 820 e 870 kg de CO₂ para a atmosfera, dependendo do combustível e da eficiência do processo.” (YAMAMOTO et al., 1997 apud JOHN, 2000, p. 22).

As estimativas detalhadas das emissões totais do CO₂ provenientes da manufatura do cimento Portland mostram que para produção global de 1,381Gt em 1994, a emissão de CO₂ foi da ordem de 1,126 Gt, sendo 0,587 Gt originados dos recursos naturais e 0,539 Gt da combustão de combustíveis fósseis, incluindo os combustíveis usados para gerar eletricidade para operação da planta. As médias na produção do cimento atingiram 0,815t CO₂/t (GARTNER, 2004, p. 1491). Conforme Anderson (2007, p. 2), das emissões totais de CO₂ produzidos pela indústria cimenteira, 50% resultam do processamento químico, 40% do uso de combustível para queima, 5% de transporte, e os 5% restantes da eletricidade usada em operações na fábrica.

3.2 VIABILIDADE DE ALTERNATIVAS AO CIMENTO PORTLAND

Devido aos grandes volumes de cimento Portland requeridos, toda alternativa têm que ser feita de matérias-primas naturais que sejam abundantes e disponíveis em todo Mundo, pois o gasto com transporte encareceria os custos (GARTNER 2004, p. 1494). Também é possível, e mais vantajosa, a utilização de matérias-primas não naturais, subprodutos industriais, como alternativa. O principal resíduo da produção do aço se enquadra nestas necessidades na medida em que há siderúrgicas em todo o Mundo com elevada geração de escórias.

A utilização de escórias como aglomerantes tem vantagens econômicas, ambientais e, dependendo do ativador utilizado, pode ter características superiores ao cimento Portland (MELO NETO, 2002, p. 3). Folliot (1982 apud JOHN, 1995, p. 29) relata que a produção do clínquer, principal constituinte do cimento Portland, requer em torno de 3,35 GJ/t, enquanto que a moagem deste necessita apenas 0,1 GJ/t. A partir desses dados pode-se notar a enorme redução dos gastos energéticos, dos custos e das emissões de CO₂ quando utilizada a escória álcali-ativada como aglomerante, pois o processo de calcinação da matéria-prima é eliminado nesse caso. No entanto, Anderson (2007, p. 8) chama atenção para o fato de alguns ativadores comuns, como os silicatos, serem produzidos a partir da queima de carbonatos, o que resulta CO₂. Portanto, a quantidade de ativador a ser utilizado no cimento torna-se um fator importante para determinar se o processo global é sustentável com relação à produção de dióxido de carbono.

Melo Neto (2002), na sua pesquisa, utilizou escória de alto-forno e obteve resistência à compressão acima de 20 MPa aos 28 dias para ativação com hidróxido de sódio (5% Na₂O), e utilizando o mesmo material ativado com hidróxido de sódio e silicato de sódio (4,5% Na₂O + 7,65% SiO₂) chegou à resistência à compressão superior a 80 MPa aos 28 dias. Esses resultados confirmam que, em termos de resistência mecânica, o cimento de escória pode ser tão bom quanto o cimento Portland.

4 O AÇO E SEU SUBPRODUTO

Na atualidade, o uso do aço no desenvolvimento da sociedade é tão importante a ponto da produção dessa liga metálica ser um forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de uma nação. O crescimento do consumo do aço está diretamente ligado ao aumento da atividade econômica, visto que essa, conseqüentemente, gera um maior desenvolvimento de infra-estrutura (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2008).

Em anexo ao desenvolvimento econômico e aumento do consumo do aço, há o problema da geração do resíduo proveniente da produção desse metal. Esse subproduto é conhecido como escória de aciaria, e estima-se que a sua produção varia de 70 a 170 kg por tonelada de aço fabricada. Considerando que nos últimos 12 meses (maio 2007 a abril 2008) a produção nacional de aço foi de mais de 34 milhões de toneladas, e que a média é de 130 kg/t de aço, estimamos um montante de 4,4 milhões de toneladas de escória de aciaria gerada nesse período (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2008; MASUERO, 2001, p. 6).

Com a utilização de diferentes tecnologias para produção e refino do aço, há formação de diferentes tipos de escórias de aciaria com variações nas suas propriedades e comportamentos, o que influi diretamente nas possibilidades de reutilização desses subprodutos. Os processos mais difundidos e usados na fabricação de aço são: conversor LD, onde há transformação do ferro gusa em aço; forno elétrico a arco que processa sucata para gerar aço (MASUERO, 2001, p. 7). A figura 2 ilustra os diferentes processos de produção do aço e as respectivas escórias geradas.

Segundo a NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), os resíduos sólidos são classificados em perigosos e não perigosos, havendo ainda neste último caso, uma subclassificação em *inerte* e *não inerte*. Por Norma a escória de aciaria geralmente se enquadra como resíduo classe II A, não perigoso e não inerte, visto que há solubilização em água de alguns de seus constituintes.

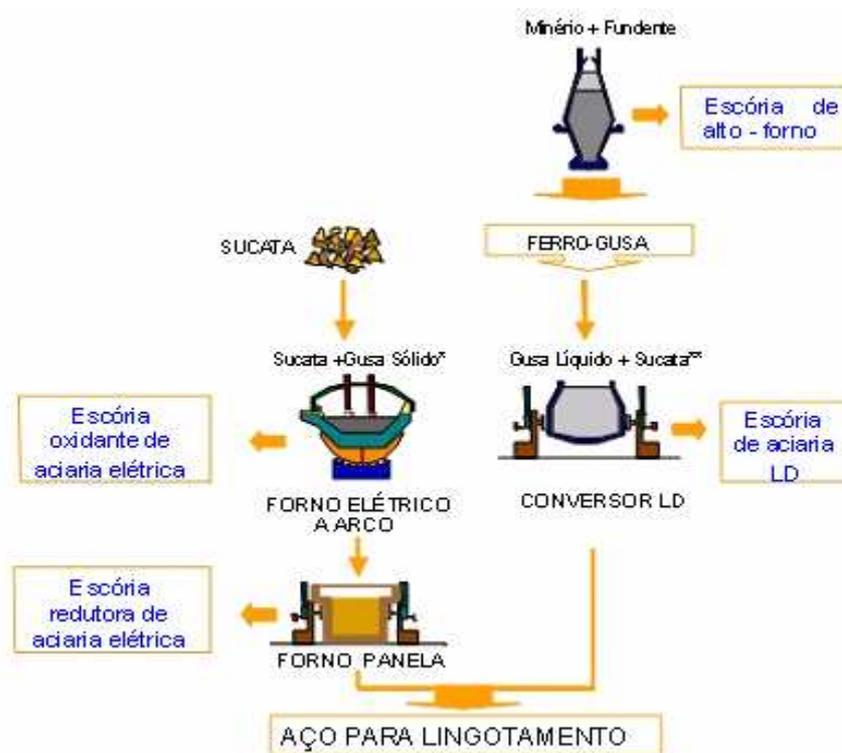


Figura 2: processo de produção de aço e escórias geradas.
(MASUERO, 2001, p. 7)

A maior parte da produção de aço é realizada através de conversores LD, seguido pelo processo de forno elétrico (MASUERO, 2001, p. 9)². Há ainda outros processos, porém com participação quase insignificante. No Rio Grande do Sul, as siderúrgicas operam com fornos elétricos e, em função disso, na região há disponibilidade apenas de escórias de aciaria elétrica, sendo estas empregadas no presente trabalho.

4.1 ACIARIA ELÉTRICA

Em siderúrgicas que utilizam fornos elétricos, o aço é fabricado a partir da sucata, podendo haver a adição de ferro gusa sólido durante a fusão. No forno elétrico a arco (FEA) é feita a fusão das cargas, a injeção de sopro de oxigênio para realizar a descarburização e desfosforação (controle dos teores de carbono e fósforo, respectivamente, na mistura líquida) e a adição de cal (MANCIO, 2001, p. 24; MASUERO, 2001, p. 8, MACHADO, 2000, p. 8). “Durante o

² Masuero (2001, p. 9) indica que estas informações foram obtidas no Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS (1997) e no Instituto Latino-Americano de Ferro e Aço – ILAFA (1995).

processo de produção do aço em FEA, a cal (CaO) e a cal dolomítica (CaO.MgO) são utilizadas como elementos formadores da escória, que tem como principal objetivo a remoção de impurezas do aço e a proteção do revestimento interno do forno” (VIKLUND-WHITE e YE, 1999 apud MANCIO, 2001, p. 24; CHESNER et al., 2001).

Após esse primeiro processo no FEA, o aço ainda líquido é encaminhado ao forno panela para processo de refino a fim de melhorar as propriedades do aço. Nesse forno é feita a adição de desoxidantes e CaO, com objetivo de eliminar o oxigênio e o enxofre do aço, e o ajuste da composição do aço através de adição de ferro-ligas (MASUERO, 2001, p. 8).

Os principais produtos resultantes dos processos anteriormente citados são o aço e a escória de aciaria, sendo este último separado em dois tipos: a escória proveniente do FEA, que apresenta maiores teores de Fe, MnO e Al₂O₃ e é denominada oxidante; e a escória resultante do forno-panela, que tem elevados teores de CaO e é chamada de redutora (MANCIO, 2001, p. 25). No trabalho será utilizada especificamente a escória redutora.

No Estado são utilizadas aciarias elétricas em função da indisponibilidade do minério de ferro na proximidade, no entanto esse processo apresenta diversas vantagens que tem contribuído para o aumento do uso de fornos elétricos. Dentre as vantagens do processo de forno elétrico, Mancio (2001, p. 25) cita:

- Permite produzir praticamente todos os tipos de aços: carbono, baixa liga, ferramenta, alta liga, inoxidáveis, etc;
- no que tange à carga é um aparelho bastante versátil, podendo ser operado com 100% de sucata;
- permite operação intermitente e mudanças rápidas de produção;
- dos fornos de aciaria, é o que permite obter os menores teores de fósforo e enxofre;
- é extremamente eficiente em termos energéticos.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

4.2.1 Características químicas

Machado (2000, p. 9) cita a constituição da escória de aciaria como sendo uma mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, silicatos de cálcio, ferro metálico, além de outras espécies químicas que aparecem em menor escala. Os principais óxidos presentes no resíduo de aciaria são (INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE FERRO E AÇO, 1995 apud MASUERO, 2000, p. 37):

a) óxidos básicos: CaO, MgO, MnO, Na₂O, K₂O;

b) óxidos ácidos: SiO₂, P₂O₅, V₂O₅, B₂O₃;

c) óxidos anfóteros: Al₂O₃, Cr₂O₃, TiO₂.

A formação destes óxidos é resultado das reações de oxidação do C, Si e P e do excesso de CaO e MgO durante o processo de produção do aço.

Os óxidos de cálcio e magnésio são encontrados em elevados teores nas escórias, isso se deve principalmente ao fato de no final do processo de refino, ocorrer a precipitação da parte da cal e do magnésio que estão em excesso, acima do limite de solubilidade da escória (MACHADO, 2000, p. 10). As concentrações de óxidos de cálcio dependem somente da quantidade de cal adicionada ao processo de refino, já os teores de óxidos de magnésio dependem essencialmente da utilização de dolomita e das reações entre a escória e o revestimento interno do forno, que é feito de material refratário rico em MgO (MOTZ; GEISELER, 2001, p. 286). A composição química média das diferentes escórias de aciaria é apresentada na tabela 1, conforme processo utilizado na produção do aço.

Tabela 1: composição química média das escórias de aciaria

	FEA (oxidante) (%)	FEA (reduzora) (%)	LD (%)
CaO	25-40	51	40-55
SiO ₂	10-17	27	12-18
Fe Tot.	15-28	1,5	14-20
MgO	4-15	7	2-8
Al ₂ O ₃	4-7	9	1,5-3
MnO	< 6	1	< 6
P ₂ O ₅	< 1,5	ND	< 2
CaO _{livre}	< 3	ND	< 10

(Fonte: RECICLAR PARA CONSTRUIR, 2008;
MOTZ; GEISELER, 2001, p. 287)

Há grande variabilidade na composição química de uma escória para outra, principalmente quanto aos teores de CaO, SiO₂ e FeO. A composição da escória depende do tipo de aço fabricado, do processo empregado, da matéria-prima utilizada, da necessidade de proteção do revestimento do forno e dos teores de cal empregados (MEADOWCROFT et al. 1996 apud MANCIO 2001, p. 30).

4.2.2 Características físicas

Conforme Chesner et al. (2001), de maneira geral, as escórias de aciaria apresentam elevada massa específica, possuem forma angular, textura superficial áspera, grande dureza e média absorção de água. Em relação ao uso como agregado, apresentam boa resistência à abrasão, boas características de sanidade e elevado índice de suporte.

As escórias de aciaria têm excelentes propriedades físicas e mecânicas, podendo ter comportamento semelhante ou superior aos agregados de rocha granítica (MOTZ; GEISELER, 2001, p. 287). A tabela 2 apresenta as características físicas e mecânicas dos agregados de escórias em comparação aos de granito, enquanto no quadro 1, são apresentadas características físicas da escória de aciaria.

Tabela 2: características físicas e mecânicas de agregados de escória de aciaria elétrica e LD, em comparação aos de granito

Características físicas e mecânicas	Escória FEA	Escória LD	Granito
Massa específica	3,5	3,3	2,5
Forma (% de partículas alongadas)	< 10	< 10	< 10
Resistência ao impacto (% / massa)	18	22	12
Resistência à britagem (% / massa)	13	15	17
Absorção de água (% / massa)	0,7	1	0,5
Resist. Ao gelo-degelo (% / massa)	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Adesão à matriz (%)	> 90	> 90	> 90

(Fonte: MOTZ; GEISELER, 2001, p. 287)

Propriedades Físicas	
Massa específica (Kg/dm ³)	3,2 - 3,6
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,6 - 1,9
Absorção (%)	< 3,0
Propriedades Mecânicas	
Abrasão Los Angeles (ASTM C131) (%)	20 - 25
Ataque por sulfato de sódio	< 12
Dureza (medida pela escala de Moh's)	6 - 7
CBR (California Bearing Ratio)	> 300
Ângulo de fricção interna	40° - 50°

Quadro 1: propriedades físicas e mecânicas das escórias de aciaria (TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER, 2007)

4.2.3 Reatividade das escórias

Conforme John (1995, p. 59), “A reatividade da escória pode ser definida como sendo uma medida potencial do seu desempenho como aglomerante.”. De acordo com John (1995, p. 35) e Vilela (2006) o resfriamento lento da escória forma estrutura cristalina, sem capacidade aglomerante, enquanto o resfriamento rápido, com água, proporciona a formação de estrutura amorfa, com propriedades cimentícias.

O resfriamento brusco da escória impede a organização ordenada, em forma cristalina, dos íons presentes, ocorrendo então a solidificação de pequenos fragmentos de escória com estrutura vítrea. Escórias com capacidade aglomerante têm tal propriedade pelo fato da estrutura vítrea reter energia de cristalização e por consequência apresentar um nível de energia superior à estrutura cristalina (JOHN,1995, p. 36; MASUERO 2000, p. 41).

A maior parte dos trabalhos avalia a reatividade da escória a partir de módulos de hidráulidade, que são obtidos a partir da correlação entre a composição química total (vidros

+ cristais) da escória e a resistência mecânica obtida em determinadas condições. No entanto, a resistência mecânica do composto à base de escória depende de outros fatores como a composição química do produto hidratado, resultante da interação das composições químicas do(s) ativador(es) e da fração vítrea (JOHN, 1995, p. 60).

De forma geral, entretanto, os módulos de hidraulicidade não são bons indicadores do potencial aglomerante da escória, visto que tal fator “[...] depende não somente da composição química, temperatura e forma de resfriamento, pode-se ter escórias com mesma composição química, porém com diferentes índices de reatividade” (ZHANG et al., 1983, apud MASUERO, 2001, p. 42) e distintos comportamentos.

Schröder (1969 apud JOHN, 1995, p. 60) demonstra a dependência entre resistência mecânica, teor de vidro e composição química do produto. Estudando a relação entre resistência à compressão de cimentos de escória de alto-forno com o teor de vidro, variando de 0 a quase 100%, observou que a resistência à compressão cresce linearmente com o teor de vidro.

Para John (1995, p. 66) a reatividade das escórias depende primeiramente do teor de vidro existente, pois só a fração vítrea é capaz de se hidratar em condições normais de temperatura e pressão. O segundo fator importante é a composição química da fase amorfa, a qual influencia na solubilidade da escória e na composição química dos produtos hidratados, resultantes da interação entre os ativadores e a fração vítrea.

De acordo com Hooton (1987, apud MASUERO, 2001, p. 41), diversos estudos mostram que o potencial hidráulico da escória aumenta com o acréscimo de fase vítrea, no entanto há divergências sobre a influência do teor de estrutura cristalina. Tal influência é demonstrada a partir de resultados apresentados por Frearson e Uren (1996) e Regourd (1980), citados por John (1995, p. 61), que demonstram a possibilidade de aumento da reatividade da escória, em determinadas condições, quando há ocorrência de fração cristalina.

4.3 UTILIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA

Os enormes volumes de escórias de aciaria gerados pelas siderúrgicas e não aproveitados, ficam armazenados nos pátios das indústrias ocupando vastas áreas e ocasionando custos de disposição. Em virtude de tais problemas, muitas vezes as escórias de aciaria eram doadas ou vendidas a preços extremamente baixos. Atualmente as escórias de aciaria vêm ganhando valor em função do maior número de pesquisas que aumentam as alternativas de uso desse resíduo.

Em países desenvolvidos as escórias de aciaria têm sido amplamente utilizadas em diversas aplicações. De acordo com Motz e Geiseler (2001, p. 286) na Europa, em média 65% da produção de escória de aciaria é reutilizada, sendo que na Alemanha esse reaproveitamento chega a 93%.

No Brasil a realidade é bem diferente, como mostram os dados de 1997 do IBS (INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 1998 apud MANCIO, 2001, p. 50), 65% de toda escória de aciaria gerada no País é encaminhada para depósitos e o restante, apenas 35%, é utilizada para aterros e base e sub-base de rodovias. O reaproveitamento das escórias de aciaria tem aumentado gradativamente conforme o desenvolvimento das pesquisas nacionais sobre o seu comportamento e suas possíveis aplicações em diversas áreas, mas em geral seguem com aplicações de baixo valor agregado.

A seguir são citadas diversas formas de uso das escórias de aciaria:

- a) fertilização e correção de solos: em função de ser um material básico, é utilizada para corrigir o pH de solos ácidos. Tem também a função de fertilizar o solo pela presença de SiO_2 e MgO , que são úteis para as plantas, e melhorar a porosidade, propiciando melhor transporte hídrico no solo (MANCIO, 2001, p. 52; MASUERO, 2001, p. 35);
- b) na pavimentação: é a principal aplicação das escórias, sendo utilizada nas obras ferroviárias como lastro e nas obras rodoviárias para sub-base, base, e até como agregado para misturas asfálticas. A escória de aciaria é muito empregada nesse setor, em virtude das suas propriedades físicas que são iguais ou superiores às dos agregados pétreos naturais, e do seu baixo custo (MANCIO, 2001, p. 53);
- c) matéria-prima para o clínquer: a escória de aciaria tem composição química semelhante à da farinha utilizada na produção do clínquer, sendo utilizada como substituinte parcial do calcário. Essa é uma utilização mais interessante

para o resíduo, pois reduz o gasto energético, o consumo de matéria-prima e a emissão de CO₂ (MACHADO, 2000, p. 39; MANCIO, 2001, p. 60);

- d) agregado no concreto: é possível sua utilização desde que seu principal problema, a instabilidade volumétrica, tenha sido tratado previamente, visto que ao ser inserido em matriz rígida de cimento, a mínima expansão causa efeitos deletérios no concreto (MANCIO, 2001, p. 62).

5 AGLOMERANTES À BASE DE ESCÓRIA

Wang et al. (1995), citado por Melo Neto (2002, p. 6), “Definem o cimento de escória como sendo composto de escória moída e uma espécie química alcalina, que podem ser hidróxidos alcalinos (ROH), sais não silicosos de ácidos fracos como carbonato, sulfeto e fluoreto (R_2CO_3 , R_2S , RF) ou sais silicosos do tipo $R_2O \cdot (n)SiO_2$, onde R é um metal alcalino, Na, K ou Li”.

Estima-se que as primeiras experiências de aglomerantes a base de escória de aciaria tenham acontecido no século XIX, através da adição de cal hidratada na escória, havendo, na segunda metade do século XIX, registros de sua utilização comercial na Alemanha. No início do século XX, houve a criação da norma suíça de materiais para produção de argamassas, a qual incluía o aglomerante obtido da mistura de escória e cal. Neste mesmo século houve diversos estudos sobre a utilização da escória de alto-forno como aglomerante, sendo alcançado significativo uso da mesma, no entanto o resíduo acabou não prosperando devido às suas dificuldades de aplicação e acabou sendo abandonado. Desde a segunda metade do século passado não houve produção expressiva desse aglomerante, com exceção da ex-URSS que colocou em funcionamento uma planta piloto de cimento de escória ativada com compostos alcalinos (JOHN, 1995, p. 8-13).

No Brasil, estudos sobre a ativação da escória iniciaram na década de 80, no Agrupamento de Materiais de Construção do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Os primeiros estudos concentraram-se na ativação de escórias de aciaria com cal e gipsita, e posteriormente, já na década de 90 iniciou-se o estudo da ativação com outros álcalis, como o silicato de sódio utilizado na tese de John (1995) (MELO NETO, 2002, p. 7).

Embora ainda ocorressem alguns estudos no século XX, é notório o desinteresse pelos cimentos de escória a partir da segunda metade do século, em virtude principalmente das diversas desvantagens, levantadas por vários autores, em relação ao cimento Portland, como baixa resistência mecânica, maior retração, fissuração entre outros. Com o aumento das políticas de preservação ambiental e dos custos de produção das últimas décadas, houve um novo ânimo para as pesquisas voltadas à utilização de resíduos, como o caso dos cimentos de escória.

Há relatos de cimentos de escória com resistência de até 120 MPa aos 28 dias e 75 MPa aos 3 dias, sem uso de aditivos e com baixo calor de hidratação (GLUKHOVSKY; ROSTOVSKAJA; RUMYNA, 1980 apud JOHN, 1995, p. 27), e nos trabalhos de John (1995) e Melo Neto (2002) foram alcançadas resistências à compressão de 100 MPa, o que mostra que é possível produzir cimentos de escória com características mecânicas tão boas quanto as do cimento Portland e com algumas vantagens. No entanto, um grande problema referente a esse aglomerante ainda persiste, a retração e conseqüente fissuração, que é geralmente superior a do cimento Portland e necessita de estudos para haver um maior esclarecimento sobre o fato.

John (1995) e Melo Neto (2002) citam diversos autores que confirmam uma maior retração dos cimentos de escória em relação ao cimento comum, variando principalmente conforme o tipo de ativador, sendo o silicato de sódio o ativador que apresenta os maiores resultados. Tezuka et al. (1984 apud MELO NETO, 2002, p. 26) constataram que as argamassas de escória de alto-forno ativadas com cal tiveram retração maior que as ativadas com hidróxido de sódio e ambas tiveram retração maior que argamassas de cimento Portland.

John (1995, p. 128) obteve retração na ordem de 0,12% para argamassas de escória ativadas com silicato e hidróxido de sódio em diferentes teores, já Melo Neto (2002, p. 123) utilizando os mesmos ativadores obteve resultados em torno de 0,3 e até 0,8% para argamassas de escória ativadas com hidróxido de sódio e silicato de sódio, respectivamente. Facilmente percebemos que as retrações são muito superiores as das argamassas de cimento comum, que atingem o valor de 0,1% para o cimento ARI, como apresentado por Melo Neto (2002, p. 123), e na ordem de 0,08% para argamassa no traço 1:3 como apresentado por Venuat e Papadakis (apud ANDRADE, 1997, cap. 15, p. 6).

Em geral ainda há pouco conhecimento sobre os cimentos de escória álcali-ativada, não havendo trabalhos que apresentem idéias e resultados que possibilitem um completo entendimento das interações que ocorrem entre o resíduo e o ativador, e a influência de outros fatores nas características finais do aglomerante.

Palomo et al. (1999, p. 1323) define a álcali-ativação de resíduos como um processo químico que permite transformar estruturas vítreas em compósitos bem compactos e cimentantes. Forsén (1938 apud JOHN, 1995, p. 43) considera que o processo de hidratação da escória é

virtualmente o mesmo do cimento Portland, envolvendo a dissolução dos compostos anidros, e seguida pela precipitação dos compostos hidratados. Féret (1939 apud JOHN, 1995, p. 43) complementa afirmando que as escórias necessitam apenas de uma **excitação apropriada** para desenvolverem suas propriedades aglomerantes.

Após o contato da escória com a água, forma-se uma película deficiente em Ca^{2+} que impede a dissolução e hidratação, sendo necessário um pH alto, acima de 12,6, para tornar possível a ativação da escória (VOINOVITCH et al., 1980 apud MELO NETO, 2002, p. 12). Isso ocorre, pois a dissolução da escória se dá por ataque hidroxílico (ataque pelos íons de OH^-), havendo assim a necessidade de um elevado número de íons OH^- , o que é obtido com o uso de álcalis na ativação.

“Uma vez que os compostos hidratados em cimentos de escória são os mesmos dos cimentos Portland, a velocidade de cristalização (ou precipitação), em ambos, deve ser da mesma ordem. Sendo assim, o que limita a velocidade de endurecimento da escória é a sua velocidade de dissolução.” (DRON 1982 apud JOHN, 1995, p. 45). A fim de acelerar o processo de hidratação, há a necessidade de realizar cura em temperaturas elevadas ($>30\text{ }^\circ\text{C}$), sendo este fator um dos maiores desafios para viabilização do uso comercial deste tipo do cimento álcali-ativado (ANDERSON, 2007, p. 8).

John (1995, p 50) cita como ativadores químicos mais comuns a cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), os sulfatos de cálcio hidratados como a gipsita, hemidrato e a anidrita, hidróxidos de metais alcalinos como KOH e NaOH, os silicatos alcalinos de sódio ou potássio ($\text{R}_2\text{O}.n\text{SiO}_2$), o cimento Portland ou mesmo mistura destes compostos. Em meio a estes ativadores, os mais utilizados e estudados atualmente são os silicatos e hidróxidos de sódio.

Jimenez et al. (1999 apud MELO NETO, 2002, p. 13) desenvolveu um estudo sobre o desempenho mecânico de argamassa de escória álcali-ativada, com variações na finura da escória, na temperatura de cura, na concentração e no tipo de ativador. Como resultado foi obtido nível de relevância para resistência à compressão na seguinte ordem: natureza do ativador > concentração do ativador > finura da escória. De forma geral a velocidade de hidratação dos cimentos de escória é determinada pela reatividade da escória, tipo e concentração de ativador e temperatura de cura.

Essa área necessita de muitas pesquisas para aprofundar os conhecimentos sobre as reações entre as diferentes escórias e os ativadores, bem como o comportamento final dos produtos formados. Conforme houver o maior domínio sobre o desempenho dos cimentos de escória, será possível encontrar novas aplicações para o material e difundir seu uso conforme as necessidades do mercado e as propriedades específicas determinadas nos diferentes cimentos gerados.

Com base em diversos trabalhos sobre cimentos de escória e buscando contribuir para o conhecimento deste novo tipo de aglomerante que tem como principal atrativo a preservação ambiental, além de baixo custo, é proposto um breve estudo sobre o cimento de escória de aciaria elétrica ativado com soda cáustica. Foram escolhidos esses materiais especificamente em função do resíduo ter pouca utilização e estar disponível na região, e do ativador ser de baixo custo e não gerar CO₂ na sua produção, como é o caso dos silicatos.

6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos estabelecidos no trabalho, foi desenvolvido um programa experimental conforme materiais e métodos apresentados a seguir.

6.1 MATERIAIS

Para produção das argamassas foram utilizados EAE, hidróxido de sódio, areia e água, tendo suas especificações na seqüência.

6.1.1 Escória de aciaria elétrica (EAE)

Foi utilizada escória de aciaria elétrica do tipo redutora, resultante do refino secundário do aço no forno panela, produzida em uma usina siderúrgica semi-integrada da região metropolitana de Porto Alegre. Após coletado, o resíduo passou por um breve beneficiamento sendo passado em um triturador de mandíbulas, do Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM) da UFRGS, em seguida em um moinho de rolos, também do LTM, e então sendo encaminhado ao moinho de bolas, do Núcleo Orientado de Inovação para a Edificação (NORIE) em pequenas porções de 3 kg com tempo de moagem de 24 horas. Após esse processo, a escória já em pó, foi passada em peneira de # 0,075 mm, sendo a parte passante armazenada e posteriormente homogeneizada com as outras porções.

6.1.1.1 Caracterização física

A curva de distribuição granulométrica da escória, mostrada na figura 3, foi determinada por granulometria a laser, realizada com aparelho da marca Cilas, modelo 1180 do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, sendo obtido um valor médio do diâmetro das partículas de 17,09 μm .

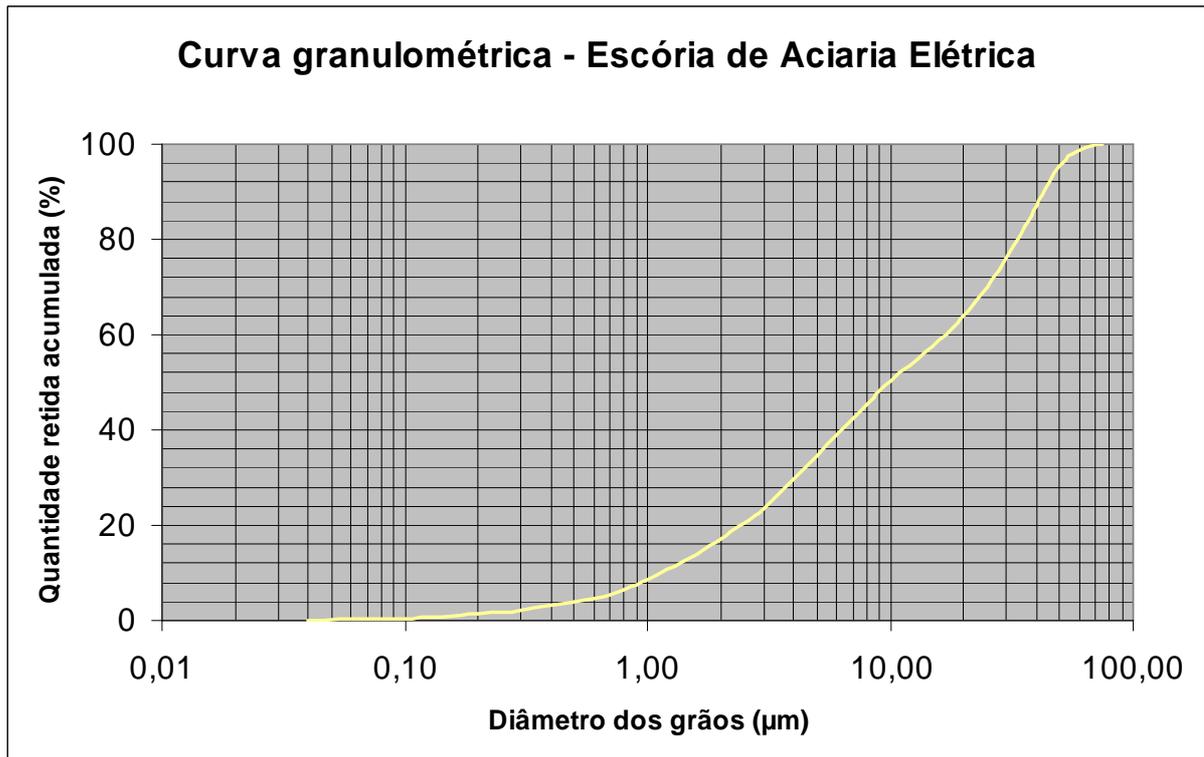


Figura 3: curva granulométrica da escória de aciaria elétrica

Foi determinada ainda a massa específica, conforme a NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001), sendo obtido o valor de 3,11 kg/dm³.

6.1.1.2 Caracterização química

A composição química da escória apresentada na tabela 3 foi determinada por fluorescência de raios X (FRX), realizada com aparelho marca Shimadzu, modelo XRF1800 do laboratório de materiais cerâmicos (LACER) da UFRGS. A escória é classificada como básica em função da razão CaO/SiO₂ ser igual a 1,23 (>1).

Tabela 3: composição química da escória de aciaria elétrica

Componente	(%)	Componente	(%)
CaO	43,74	SO ₃	0,36
SiO ₂	35,54	SrO	0,32
MgO	6,62	Cr ₂ O ₃	0,25
MnO	5,22	P ₂ O ₅	0,07
Fe ₂ O ₃	3,50	In ₂ O ₃	0,07
Al ₂ O ₃	3,34	K ₂ O	0,06
TiO ₂	0,88	NbO	0,02

6.1.1.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada por difração de raios-x (DRX), com aparelho marca Philips, modelo X'PERT MPD do LACER da UFRGS. Na figura 4 é apresentado o difratograma de raios-x referente à escória de aciaria elétrica do forno panela.

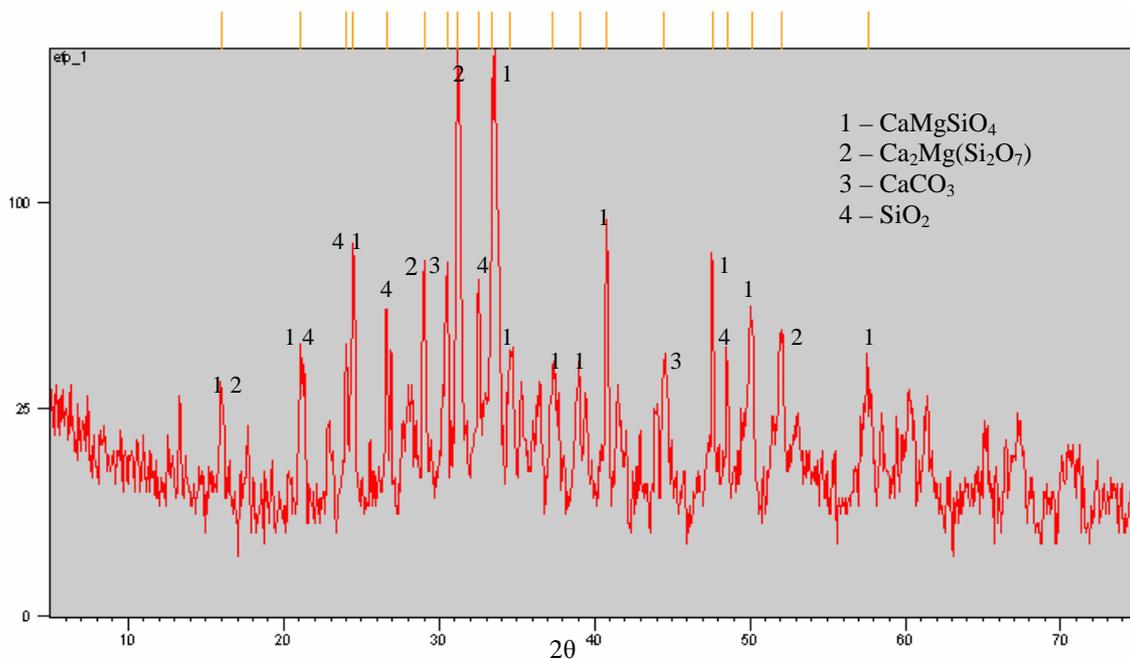


Figura 4: difratograma da escória de aciaria elétrica

Por uma avaliação visual do difratograma, percebe-se que a estrutura da escória é predominantemente cristalina, havendo um halo amorfo no espectro de DRX, aproximadamente na região entre 25 e 35°. Os picos cristalinos indicam a presença de compostos como: CaMgSiO_4 , $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$, CaCO_3 (CaO carbonatado) e SiO_2 .

6.1.2 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio foi fornecido em estado sólido, em escamas, e com composição química em massa de 75% de Na_2O e 25% de H_2O . Em função da reação exotérmica que ocorre quando combinada com água, a soda cáustica era misturada com a água da moldagem algumas horas antes da sua utilização, ficando em recipiente fechado até atingir o equilíbrio térmico com o meio. Tal procedimento evitou a perda de água por evaporação e permitiu a completa dissolução do hidróxido de sódio.

6.1.3 Areia

Foi usada areia quartzosa, facilmente encontrada no comércio da região, sendo a mesma previamente lavada, seca e então separada em quatro frações, conforme a Areia Normal Brasileira produzida pelo IPT, que segue a NBR 7214 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982). A areia foi preparada conforme as proporções apresentadas no quadro 2.

Passante na peneira (#) (mm)	Retido na peneira (#) (mm)	Porcentagem a ser utilizada para composição do agregado empregado nas argamassas (massa)
2,4	1,2	25
1,2	0,6	25
0,6	0,3	25
0,3	0,15	25

Quadro 2: distribuição granulométrica da areia

6.1.4 Água

A água utilizada é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre.

6.2 MÉTODOS

São apresentados os ensaios e análises realizadas para o desenvolvimento do trabalho.

6.2.1 Estudo exploratório

Após a determinação das variáveis envolvidas (teor de ativador e temperatura de cura) foram moldadas, em frascos de polietileno (potes de filme fotográfico), pastas de escória ativada com diferentes teores de soda cáustica a fim de visualizar o comportamento das misturas. Primeiramente foram moldadas pastas com 2,5, 5, 10 e 20% de teor de ativador em relação ao aglomerante e com cura a 20 e 60°C durante 24 horas. Pôde-se notar expansão em todas as pastas, como evidenciado na figura 5, sendo maior o aumento de volume para os exemplares com cura a 60°C e conforme o acréscimo do teor de soda cáustica. Posteriormente, foi reduzida a faixa de variação dos teores de ativador para novo teste, sendo então confeccionadas pastas com teores de ativador de 1,5, 2,5 e 3,5% e cura de 20 e 60°C, na figura 6 é mostrada a expansão das pastas para esses teores. A partir dos resultados desse

segundo teste, foram definidos os valores das variáveis a serem utilizadas na pesquisa, sendo de 1,0, 1,25 e 1,5% os teores e de 20, 40 e 60°C as temperaturas de cura. A combinação dessas variáveis resultou em nove traços de argamassas.

Em função de conclusões obtidas com os primeiros resultados das argamassas ensaiadas foram moldados três traços extras, com teores de 2,5, 5 e 7,5 e temperatura de cura de 20°C.

Na tabela 4 são apresentadas as diferentes argamassas estudadas com os seus respectivos teores de ativador em relação à massa de aglomerante, a sua temperatura de cura nas primeiras 24 horas, bem como a simbologia empregada para representar mais facilmente cada amostra.

Tabela 4: argamassas estudadas e simbologia utilizada

Ativador - Hidróxido de sódio	Temperatura de cura nas primeiras 24h (°C)	Simbologia
Teor de Na ₂ O (% em massa de aglomerante)		
1	20	T - I
1	40	T - II
1	60	T - III
1,25	20	T - IV
1,25	40	T - V
1,25	60	T - VI
1,5	20	T - VII
1,5	40	T - VIII
1,5	60	T - IX
2,5	20	TE - X
5	20	TE - XI
7,5	20	TE - XII



Figura 5: pastas com teores de ativador de 2,5, 5, 10 e 20% (esquerda para direita) com temperatura de cura de 60°C



Figura 6: pastas com teores de ativador de 1,5, 2,5, 3,5% (esquerda para direita) com temperatura de cura de 60°C

6.2.2 Dosagem das argamassas

As argamassas foram preparadas com proporção em massa igual a 1:3:0,45 (aglomerante:areia:água). A proporção de água/aglomerante utilizada foi a mínima necessária para se obter uma boa trabalhabilidade e consistência, sendo essa última característica estabelecida em $220 \pm 10\text{mm}$ no ensaio de espalhamento.

O cálculo das soluções ativadoras foi realizado em relação à massa de aglomerante, sendo considerado somente a concentração de Na_2O presente na soda cáustica. O teor de H_2O existente no hidróxido de sódio foi descontado na água de mistura.

6.2.3 Condições de cura

Após moldagem, os corpos-de-prova cuja temperatura de cura era de 40 e 60°C (T-II, T-III, T-V, T-VI, T-VIII e T-IX) foram colocados em estufa com a respectiva temperatura por um período de 24 horas. Após, foram retirados e desmoldados. Os cp cuja temperatura de cura era de 20°C (T-I, T-IV, T-VII e TE-X ao T-XII), após moldagem, foram levados para câmara climatizada (temperatura (T) = 23°C ± 1 e umidade relativa (U.R.) = 50% ± 5), onde permaneceram por 72 horas, antes de serem desmoldados, em função do seu lento ganho de resistência. Todos os cp após desmoldagem, foram encaminhados para câmara climatizada (T= 23°C ± 1 e U.R.= 50 % ± 5), onde ficaram até as datas de ruptura.

6.2.4 Resistência à compressão

A resistência a compressão é uma das principais características do cimento Portland, sendo assim esse critério foi escolhido como indicador de desempenho para as argamassas de escória ativada com soda cáustica. Os testes de resistência à compressão foram realizados conforme as indicações da NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), sendo confeccionados 4 corpos-de-prova para cada uma das datas de ruptura de cada traço e alteradas as condições de cura, como especificado anteriormente. Foram estudadas as resistências à compressão nas idades de 1, 7, 28 e 91 dias para os traços com cura térmica (T-II, T-III, T-V, T-VI, T-VIII e T-IX) e nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias para os com cura a temperatura ambiente (T-I, T-IV, T-VII e TE-X ao T-XII). Essa variação na data da primeira ruptura foi necessário em função do lento ganho de resistência dos traços sem cura térmica, o que impossibilitava a desmoldagem com um dia.

6.2.5 Método das barras

Como foi visualizado um aumento de volume nos testes iniciais com as pastas, decidiu-se confeccionar barras prismáticas de argamassa (25 x 25 x 285 mm) para cada um dos traços a fim de monitorar qualquer variação de volume após a desmoldagem. Esse ensaio foi baseado

na NBR 8490 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984), que é destinada à medição da retração por secagem em argamassas.

Foram moldadas quatro barras prismáticas para cada um dos traços, os parâmetros de cura e de leitura determinados pela Norma foram alterados, sendo seguidas as condições de cura descritas no capítulo anterior e realizado o acompanhamento da variação dos comprimentos das barras por um período de 90 dias, com leituras diárias nos primeiros 15 dias, a cada dois dias até os 30 dias e em um intervalo de 5 dias no restante do tempo. Para que as leituras fossem realizadas sempre nos mesmos pontos, as barras eram dotadas de pinos na parte central das suas extremidades, e a cada leitura o relógio comparador era zerado com uma barra metálica de referência, e então, posteriormente, era colocada a barra de argamassa, tomando o cuidado de sempre respeitar o mesmo alinhamento. Os resultados apresentados nos gráficos de deformação das argamassas (figuras 13 a 15) são calculados como a diferença entre o comprimento da barra de argamassa na idade considerada (L_f) e o comprimento inicial (L_i) da mesma quando recém desmoldada, dividido pela distância interna entre o pinos (250mm) e expressa em porcentagem. Abaixo é apresentada a equação para o cálculo da variação do comprimento linear das barras (ϵ):

$$\epsilon = \frac{L_f - L_i}{250} \times 100$$

6.2.6 Tratamento estatístico

Foi feita análise de variância (ANOVA) para determinar a significância das variáveis envolvidas com relação aos resultados obtidos nos ensaios. A ANOVA analisa se há influência significativa de uma determinada variável de entrada sobre uma variável de resposta através de comparação entre valores calculados (F_{calc}) e tabelados (F_{tab}) em função da distribuição de Fisher, sendo que nesse trabalho o F_{tab} é determinado para um nível de significância de 95%. A variável independente é considerada com influência significativa quando $F_{cal} > F_{tab}$.

7 ARGAMASSAS DE ESCÓRIA DE ACIARIA ELÉTRICA ATIVADA COM Na_2O : APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para facilitar a visualização do efeito de cada variável (teor de ativador e temperatura de cura), os resultados do ensaio à compressão das argamassas álcali-ativadas são apresentados de duas formas, uma que compara os traços de diferentes teores de Na_2O com mesma temperatura de cura e outra, de diferentes temperaturas com um mesmo teor.

7.1.1 Efeito do teor de ativador

As figuras 7, 8 e 9 mostram as resistências médias alcançadas pelas argamassas com diferentes teores de Na_2O , em diferentes idades e temperaturas de cura.

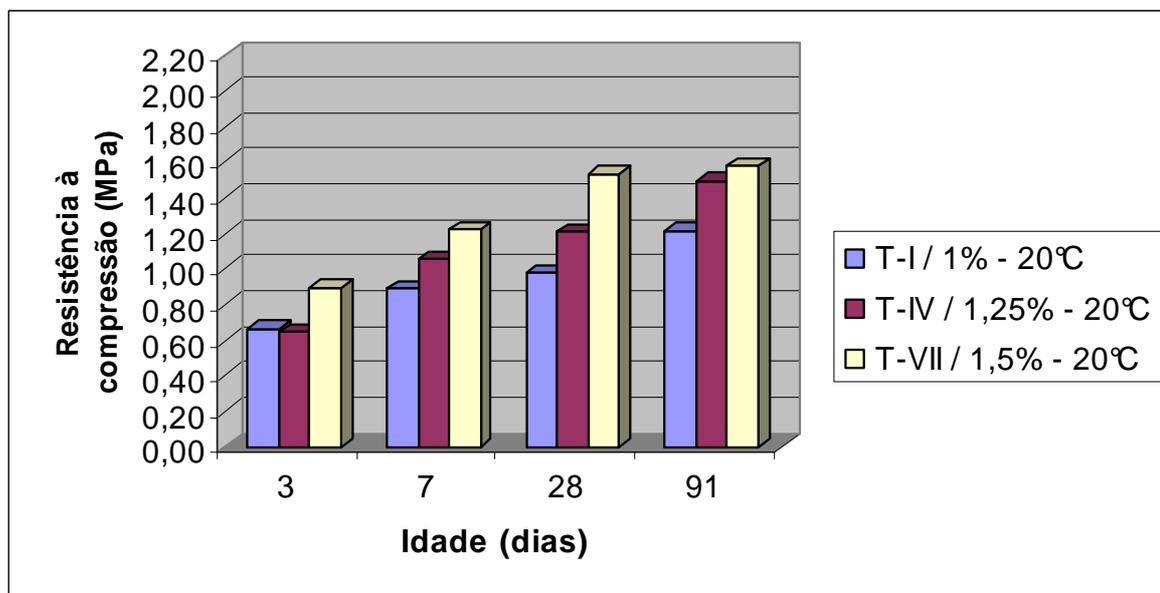


Figura 7: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C

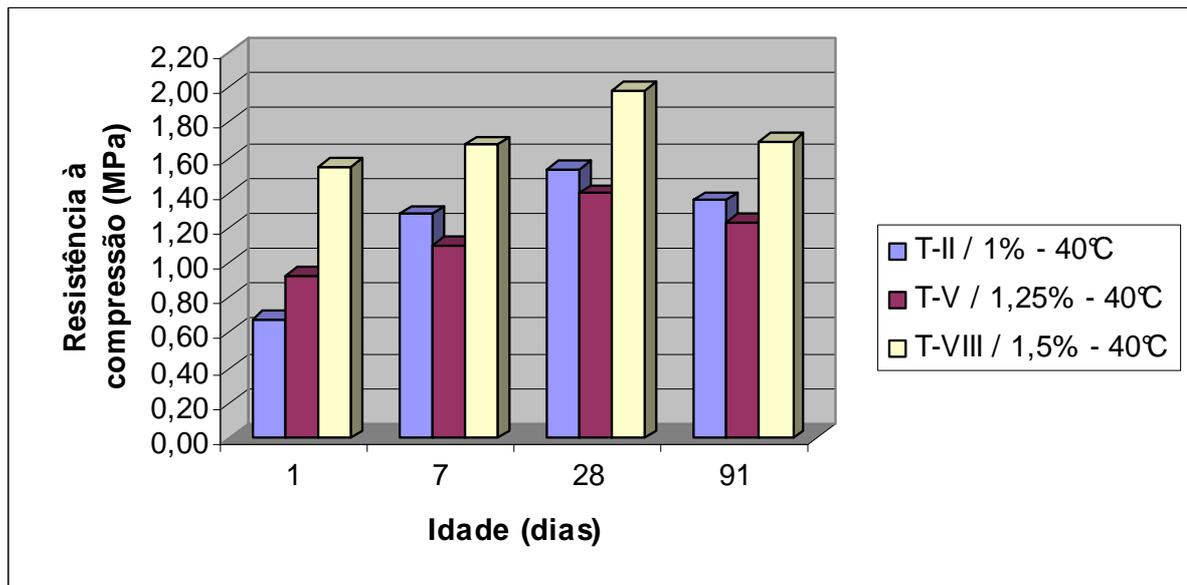


Figura 8: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 40°C

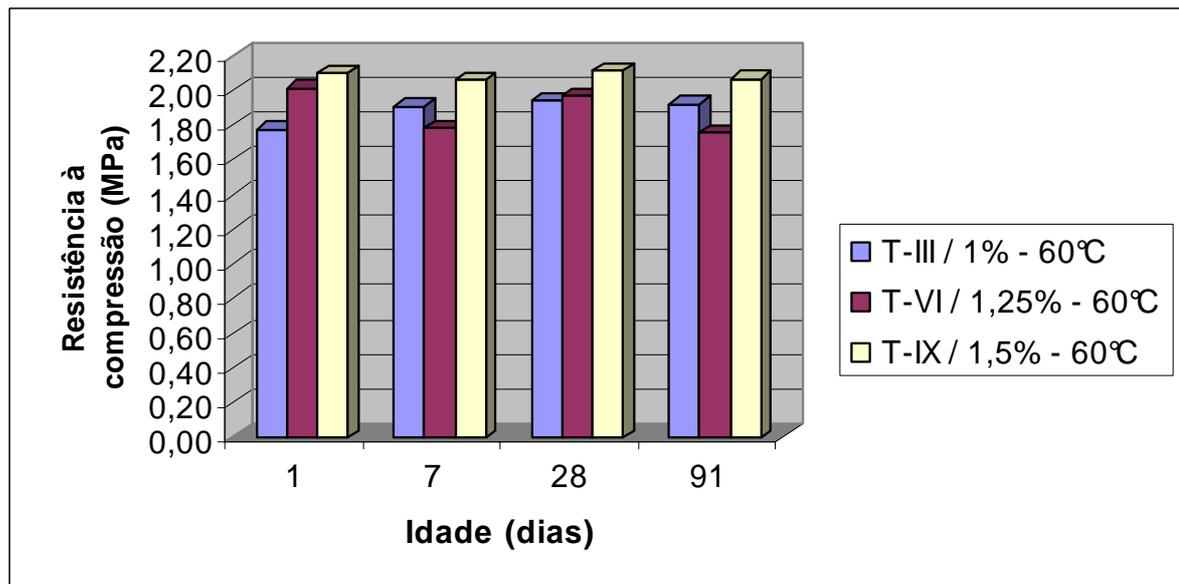


Figura 9: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 60°C

De forma geral pode-se perceber um ganho de resistência conforme aumento do teor de soda cáustica utilizado na argamassa, com exceção do traço T-V que apresentou resistência inferior aos outros traços com mesma temperatura de cura. Tal fato pode ter sido ocasionado pela ocorrência de um gradiente de temperatura no forno, visto que os traços T-II e T-V tiveram sua cura no forno ao mesmo tempo e o traço T-II ficou em uma bandeja mais próxima das resistências do forno.

Nos traços T-VI e T-IX, ambos com cura térmica a 60°C, houve uma pequena redução da resistência média com o aumento da idade, enquanto o T-III, com as mesmas condições de cura, teve uma pequena elevação.

Foi observada uma expansão das argamassas nas primeiras horas de cura, sendo esta maior conforme o aumento do teor de soda e da temperatura de cura. Nos traços T-VIII e T-IX, ambos com teor de soda de 1,5% e com cura térmica, houve uma elevada perda de corpos-de-prova, 30 e 40% respectivamente, em virtude de elevada expansão que ocasionou a quebra dos exemplares sempre em uma mesma região situada a 2/3 da altura do corpo-de-prova, como mostrado na figura 10.



Figura 10: corpo-de-prova quebrado a 2/3 da altura

7.1.2 Efeito da temperatura de cura

As figuras 11, 12 e 13 apresentam as resistências médias alcançadas pelas argamassas com diferentes temperaturas de cura inicial, em diferentes idades e teores de ativador. Os traços sem cura térmica só foram ensaiados aos três dias devido a seu lento ganho de resistência, por isso aparecem separados nas figuras.

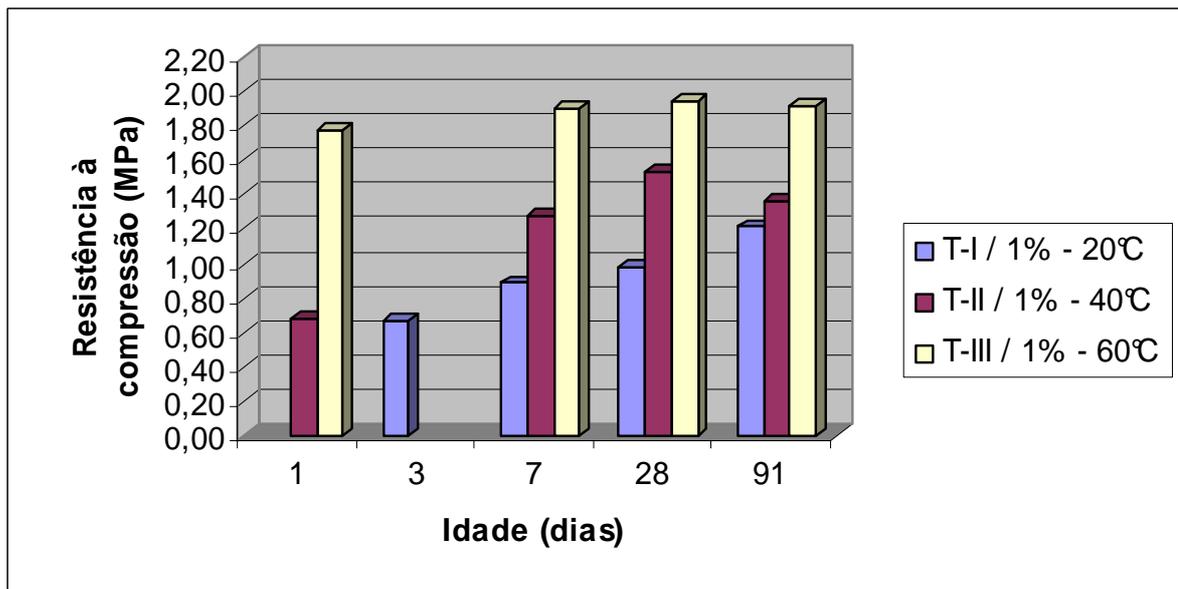


Figura 11: resistência a compressão das argamassas com 1% de ativador e diferentes temperatura de cura

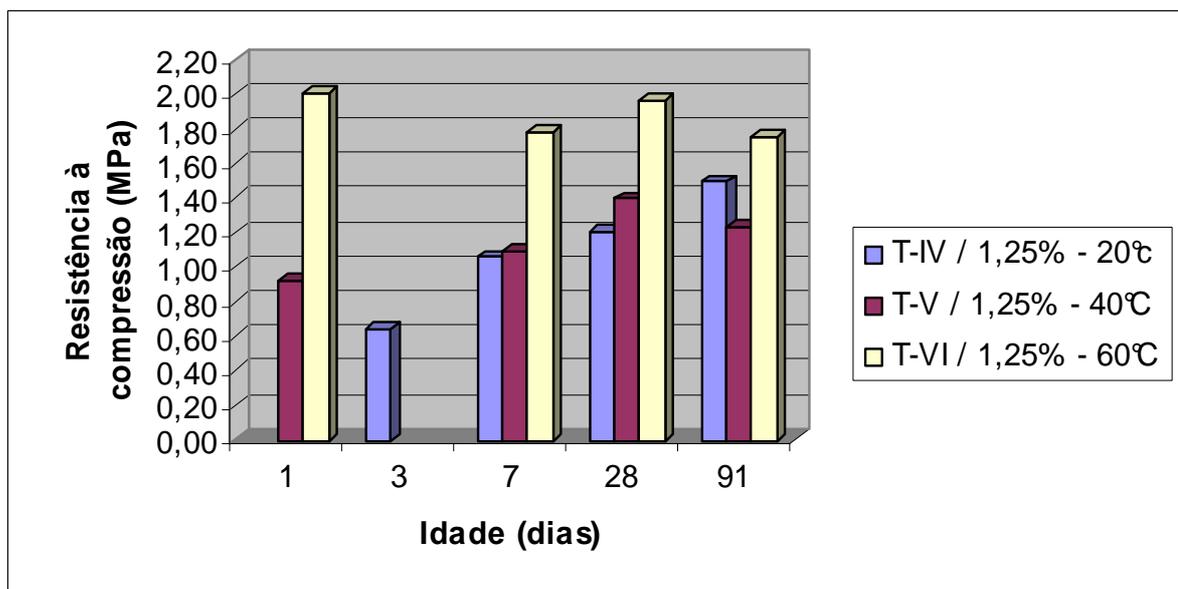


Figura 12: resistência a compressão das argamassas com 1,25% de ativador e diferentes temperatura de cura

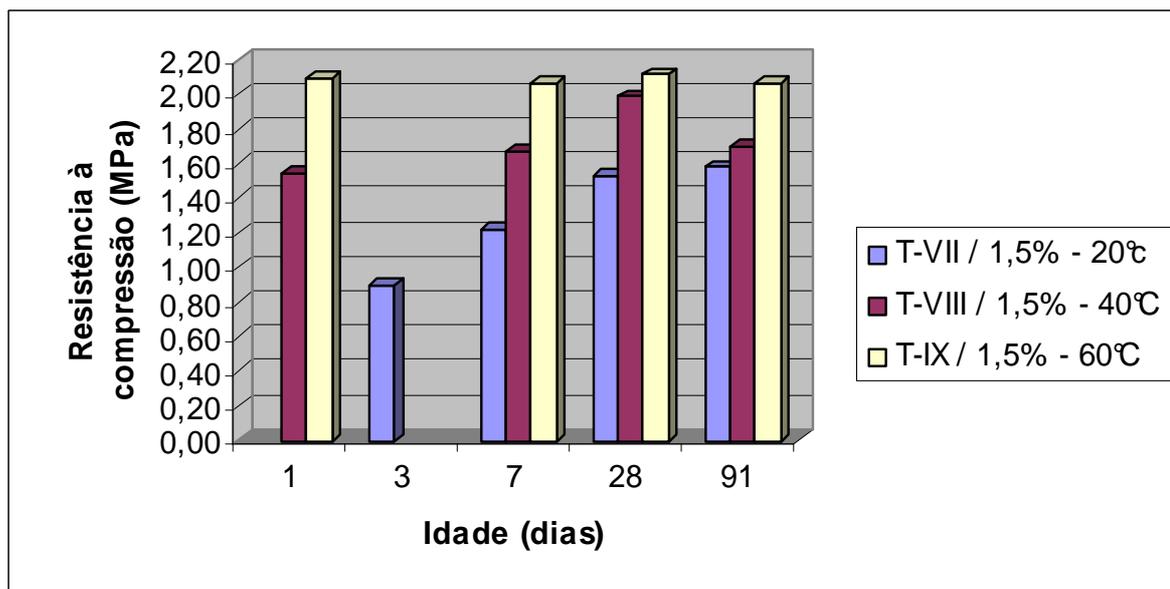


Figura 13: resistência a compressão das argamassas com 1,5% de ativador e diferentes temperatura de cura

De modo geral percebe-se que a elevação da temperatura de cura acelera o processo de ganho de resistência nos primeiros dias, sendo que nos casos com cura a 60°C a resistência atinge seu máximo já no primeiro dia. Nota-se também que a temperatura influencia na resistência final das argamassas, ocorrendo um acréscimo conforme o aumento da temperatura de cura, como evidenciado quando se compara as resistências aos 91 dias para qualquer um dos três teores de ativador.

7.1.3 Traços extras

Na busca de melhores resultados para resistência à compressão, optou-se por moldar traços extras da argamassa de escória e soda cáustica. Analisando os resultados das argamassas, notou-se que não era possível moldar traços com cura térmica e maior teor de soda cáustica, em função da expansão e conseqüente quebra que ocorreria nos corpos-de-prova. Então se optou por confeccionar três traços extras com cura em temperatura ambiente, sendo os teores de ativador determinados em função da expansão visualizada nos testes com as pastas.

A figura 14 apresenta os resultados obtidos para os traços extras em conjunto com os traços de mesma temperatura de cura, 20°C.

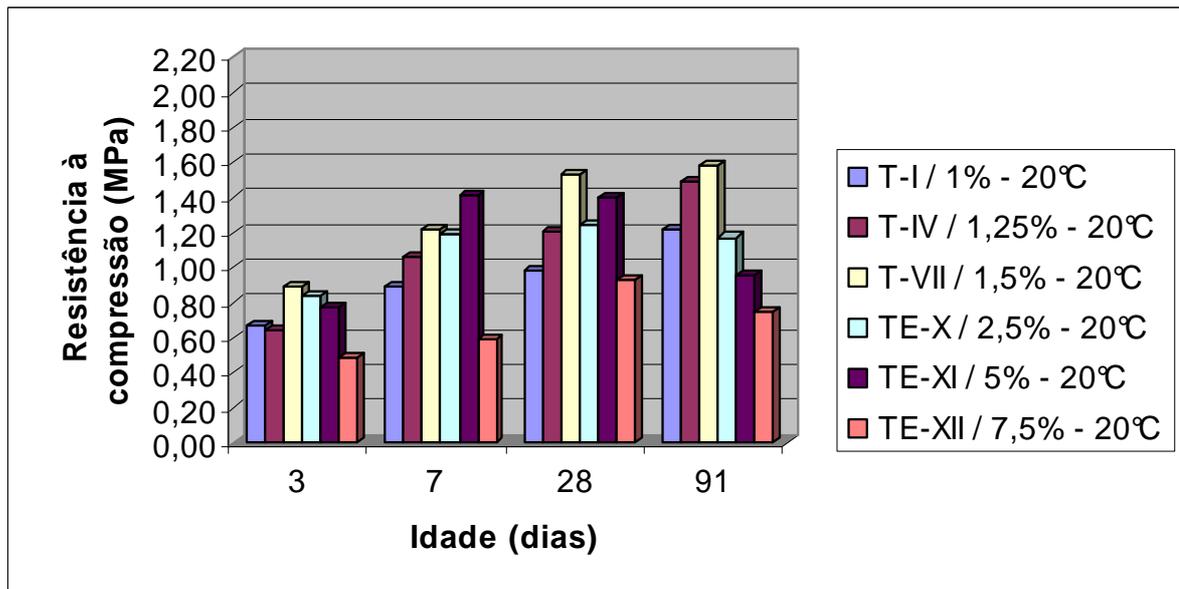


Figura 14: resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C

Nota-se que não houve melhora significativa nos traços extras, com maiores teores de ativador, sendo que o traço com maior teor de todos obteve o pior resultado. O pior desempenho do traço TE-XII pode estar ligado a um provável excesso do ativador, havendo a presença de OH livres na matriz álcali-ativada e, conseqüente modificação da estrutura, causando perdas na resistência mecânica. Outro fato que também pode estar ligado à menor resistência alcançada pelo traço TE-XII, é a ocorrência de expansão inicial em todos os corpos-de-prova desse traço, com abertura de fissuras na região a 2/3 da altura. Observa-se ainda que os traços extras apresentam decréscimo da resistência à compressão das idades de 28 para 91 dias, revelando a ocorrência de reações deletérias nas misturas. Tais reações são desconhecidas, havendo a necessidade de outros ensaios e maiores estudos para explicar o fato.

7.1.4 Análise de variância

Com base nos resultados apresentados em relação à resistência à compressão (variável dependente) foi realizada uma análise estatística para determinar a significância das variáveis independentes: teor de ativador, temperatura de cura e idade. Em função de diferentes idades e teores de alguns traços, não foi possível fazer uma única comparação de todos os fatores juntos, então foram montados três conjuntos para serem analisados.

Como a primeira ruptura dos traços com cura a temperatura ambiente só ocorreu aos três dias de idade, diferente dos outros traços que ocorreu a um dia, foi montado um conjunto de dados que abrange os traços de I a IX com idades de 7 a 91 dias (foi excluída a primeira ruptura de cada traço) para ser feita a análise de variância, a qual é apresentada na tabela 5.

Tabela 5: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador, temperatura de cura e idade na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada.

Fator	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Valor - p	Significância (95%)
Teor	1,90156	2	0,95078	39,55	2,74	0,00000	S
Temperatura	6,95383	2	3,47691	144,64	2,74	0,00000	S
Idade	0,54101	2	0,27050	11,25	2,74	0,00005	S
Erro	1,77889	74	0,02404				
Total	8,17400	80					

SQ = Soma dos quadrados;
 GL = Graus de liberdade;
 MQ = Médias dos quadrados;
 F_{calc}. = Valor calculado de F;
 F_{tab}. = Valor tabelado de F para 95% de confiança;

Valor - p = Nível de significância associados ao valor calculado de F;
 S = Efeito significativo (F_{calc} > F_{tab}.);
 NS = Efeito não significativo (F_{calc} > F_{tab}).

A tabela 6 mostra a análise de variância para o conjunto de dados dos traços com cura térmica de 40 e 60°C (T-II, T-III, T-V, T-VI, T-VIII e T-IX) para a idade de um dia (primeira ruptura), enquanto na tabela 7 há a análise para todos os traços com cura em temperatura ambiente (T-I, T-IV, T-VII e TE-X a TE-XII) nas idades de 3 a 91 dias.

Tabela 6: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador e temperatura de cura, para idade de um dia, na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada.

Fator	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Valor - p	Significância (95%)
Teor	1,08434	2	0,54217	23,90	2,14	0,00003	S
Temperatura	3,71736	1	3,71736	163,89	1,14	0,00000	S
Erro	0,31754	14	0,02268				
Total	5,11924	17					

Tabela 7: análise de variância (ANOVA) do efeito do teor de ativador e idade, com temperatura de cura de 20°C, na resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada.

Fator	SQ	GL	MQ	F _{calc}	F _{tab}	Valor - p	Significância (95%)
Teor	2,73206	5	0,54641	44,40	5,63	0,00000	S
Idade	4,66668	3	1,55556	126,41	3,63	0,00000	S
Erro	0,77526	63	0,01231				
Total	8,17400	71					

SQ = Soma dos quadrados;

GL = Graus de liberdade;

MQ = Médias dos quadados;

F_{calc.} = Valor calculado de F

F_{tab.} = Valor tabelado de F para 95% de confiança;

Valor - p = Nível de significância associados ao valor calculado de F

S = Efeito significativo (F_{calc} > F_{tab.});

NS = Efeito não significativo (F_{calc} > F_{tab.})

A partir dos resultados obtidos na ANOVA, tabela 5 a 7, verifica-se que o teor de ativador, a temperatura de cura e a idade têm influência significativa nos resultados de resistência à compressão das argamassas de escória álcali-ativada. Abaixo são apresentadas algumas figuras (15 a 17) que ilustram os efeitos de cada variável nas argamassas de escória álcali-ativada.

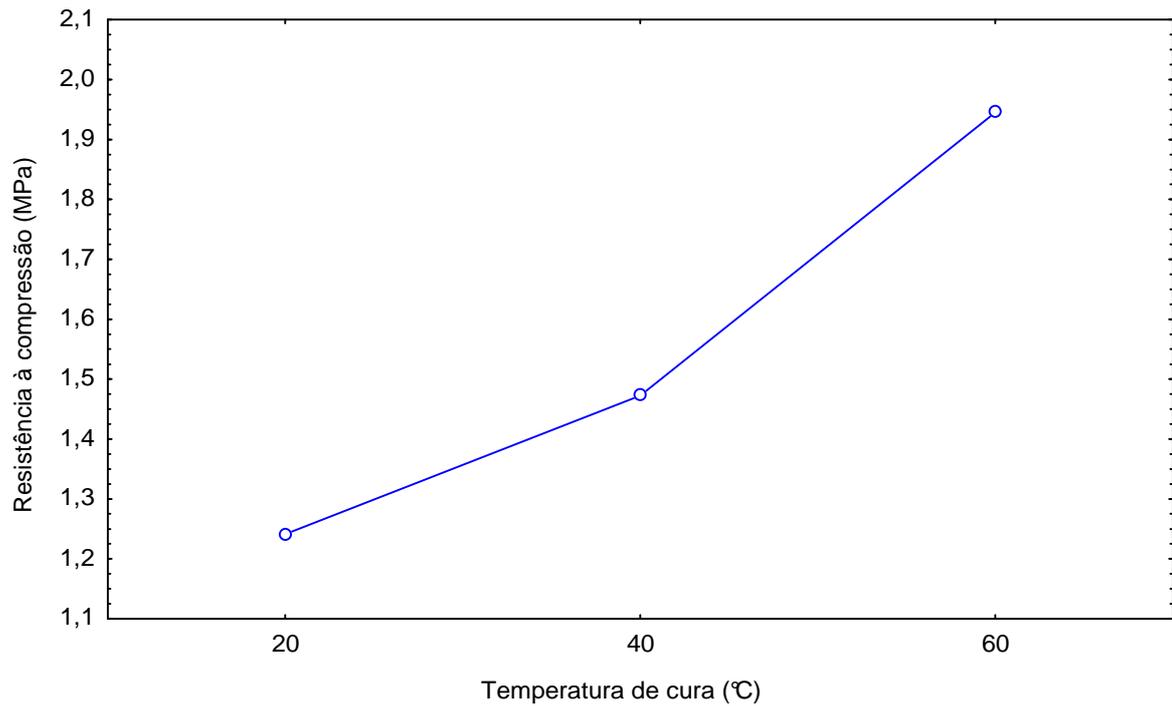


Figura 15: efeito isolado da temperatura de cura na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada

A partir do comportamento mecânico apresentado na figura 15, é visto que o aumento da temperatura contribui para o aumento da resistência à compressão, sendo obtido as maiores resistências para temperatura de 60°C.

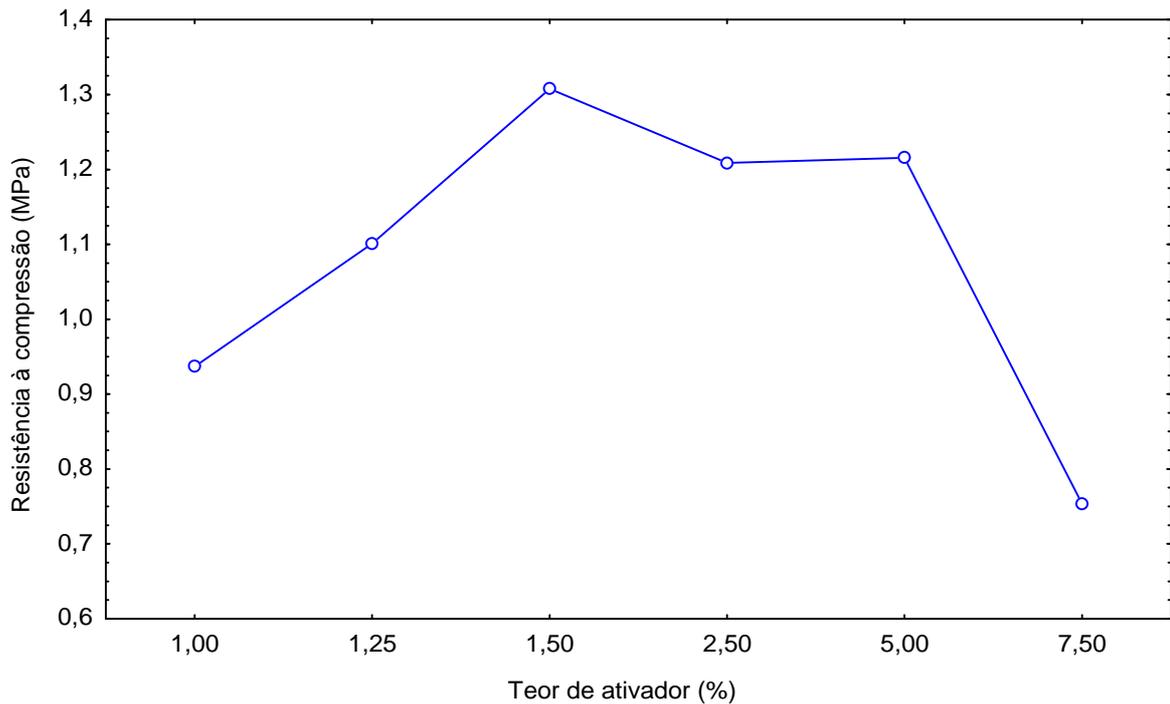


Figura 16: efeito isolado do teor de ativador na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada com cura em temperatura ambiente

Como ilustrado na figura 16 e apresentado por Palomo et al (1999), o aumento do teor de ativador, no caso Na_2O , proporciona ganho de resistência até determinado teor, ou seja, há teores ideais de ativador que proporcionam melhores resultados. Baixos teores de ativador não proporcionam uma completa polimerização dos materiais, causando baixas resistências, e com elevados teores há excesso de álcalis com enfraquecimento da estrutura e conseqüente redução da resistência mecânica. Em função da pequena diferença de resistência à compressão, ilustrada na figura 16, entre os teores de 2,5 e 5%, foi realizado teste de Duncan, verificando-se que no geral as variações de teores têm efeito significativo, no entanto a variação entre os teores de 2.5 e 5% de ativador não são significativas.

Na figura 17, observa-se que para baixos teores de ativador, no caso sem os traços extras, há ganho de resistência mecânica conforme o avanço da idade e acréscimo maior de resistência nas primeiras idades, como ocorre com argamassas com cimento comum.

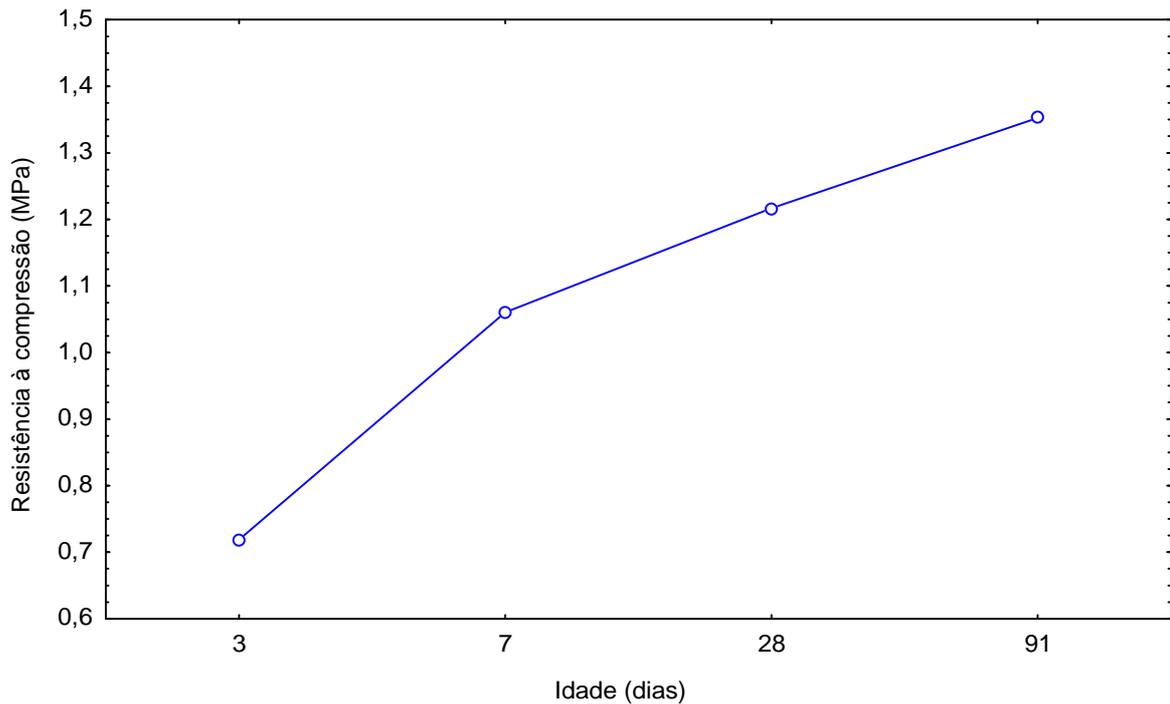


Figura 17: efeito isolado da idade na resistência à compressão nas argamassas de escória álcali-ativada, sem os traços extras

7.2 MÉTODO DAS BARRAS

Aqui são apresentados os resultados das deformações medidas nos doze traços estudados, seguindo a mesma divisão utilizada no capítulo anterior para facilitar a visualização das variáveis sobre o comportamento das argamassas.

7.2.1 Efeito do teor de ativador

São expostas, nas figuras 18 a 20, as curvas com as variações médias obtidas (4 barras prismáticas para cada traço) para cada uma das argamassas com diferentes teores de ativador e igual temperatura de cura.

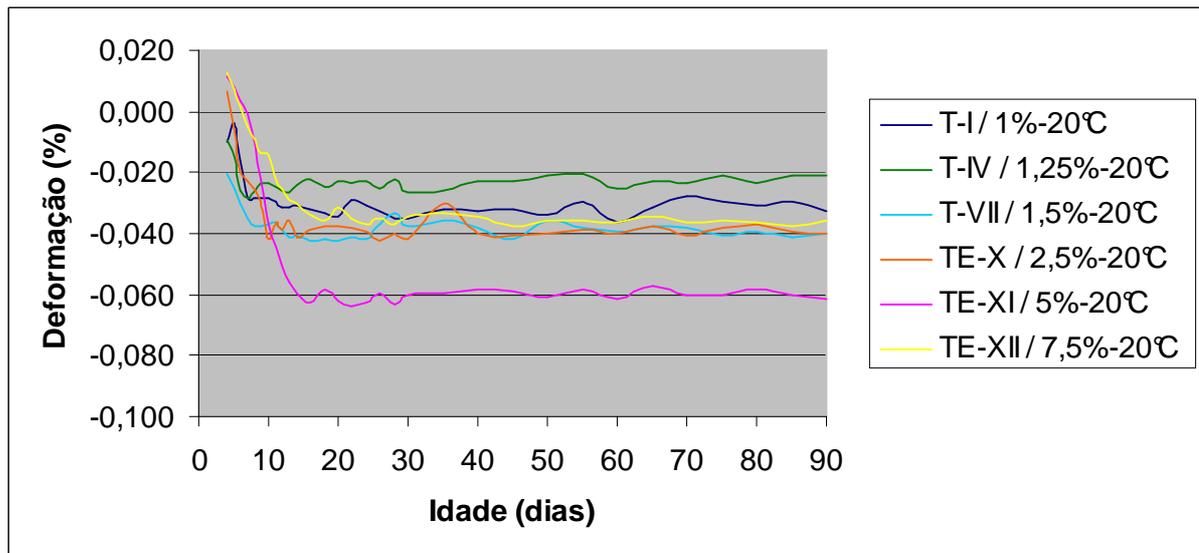


Figura 18: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 20°C

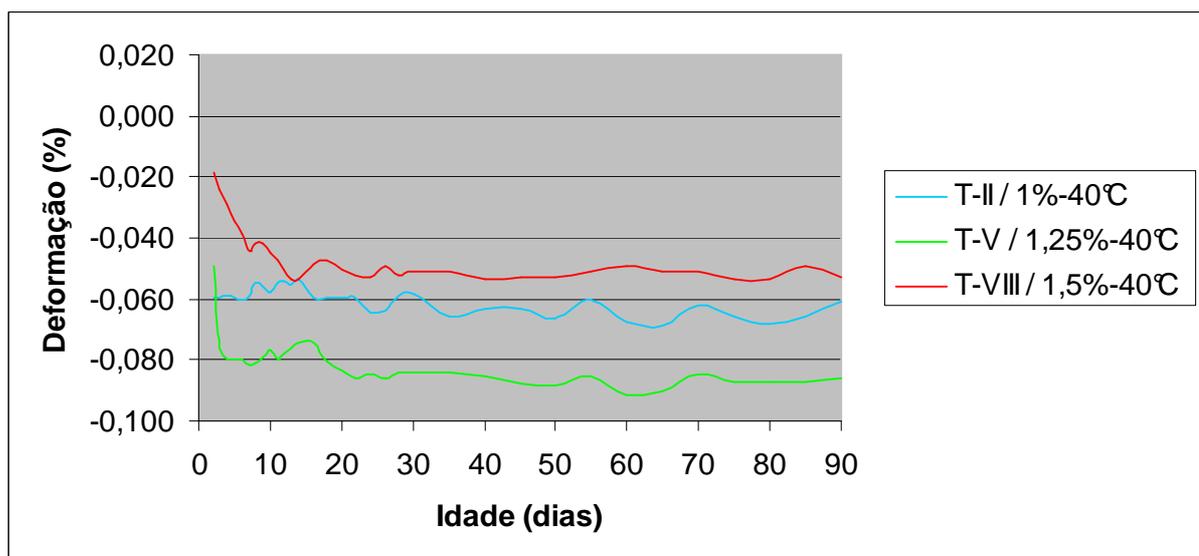


Figura 19: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 40°C

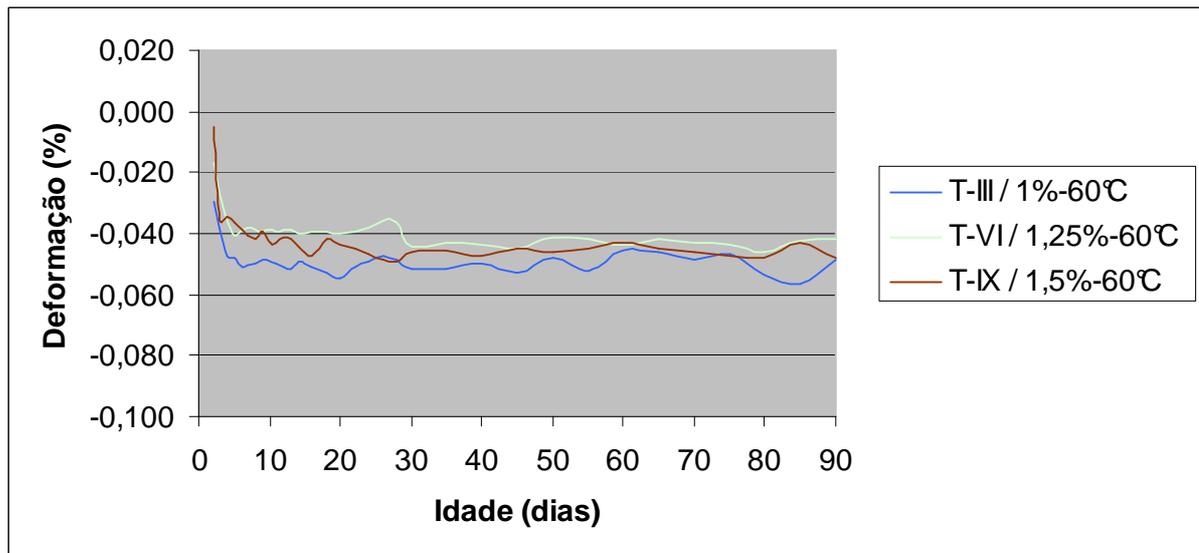


Figura 20: deformação média das argamassas com diferentes teores de ativador e temperatura de cura de 60°C

Para os traços com cura à temperatura ambiente é visto que os diferentes teores de ativador pouco alteram os valores da retração, permanecendo todos os traços, com exceção do TE-XI, em uma faixa de medidas próximas. O mesmo fato ocorre para os traços com cura em temperatura a 60°C, porém a retração medida é um pouco maior. Já os traços com cura a temperatura de 40°C apresentam maior diferença entre as retrações medidas para os diferentes teores, não ficando dentro de uma faixa específica, e tem o traço com maior retração (T-V). Nota-se para os três traços extras (TE-X a TE-XII) que nas primeiras medições há um aumento do comprimento e só depois ocorre a retração.

7.2.2 Efeito da temperatura de cura

Nas figuras 21 a 23 estão as curvas com as variações médias para cada uma das argamassas com diferentes temperaturas de cura e igual teor de ativador.

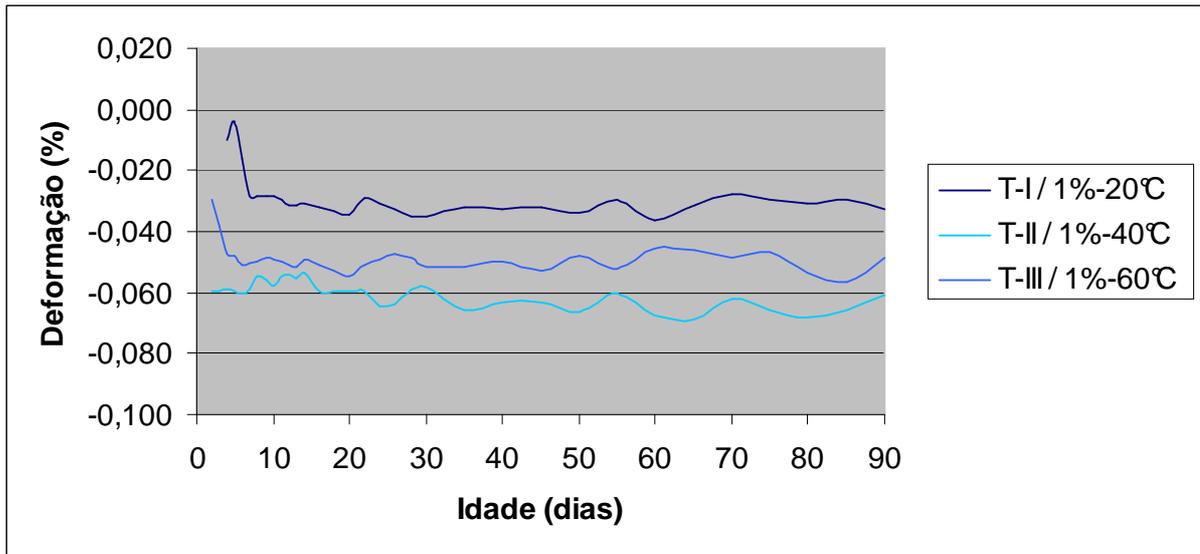


Figura 21: deformação média das argamassas com 1% de ativador e diferentes temperaturas de cura

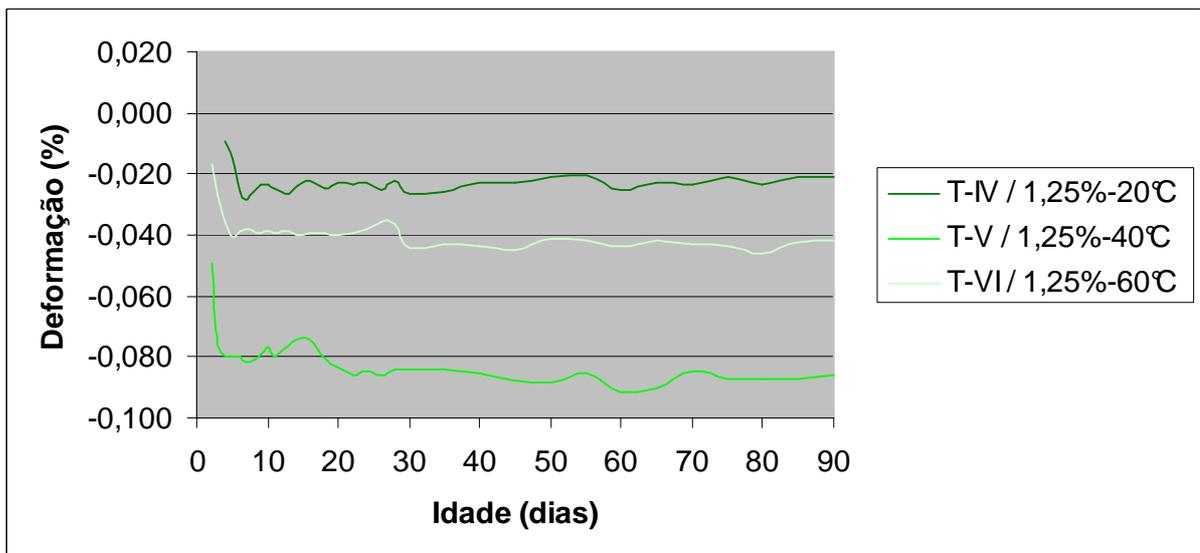


Figura 22: deformação média das argamassas com 1,25% de ativador e diferentes temperaturas de cura

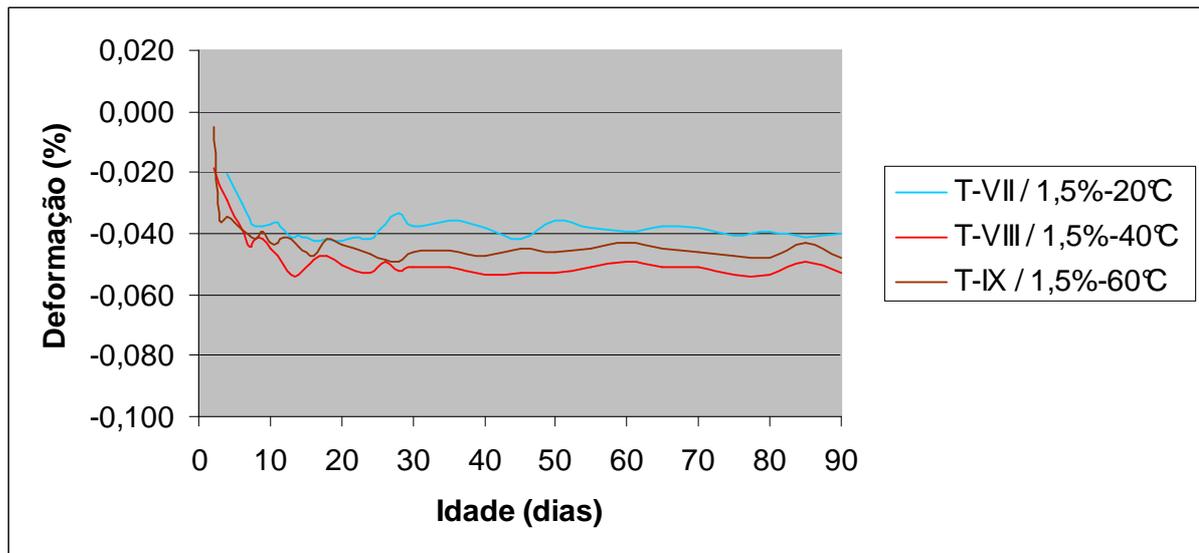


Figura 23: deformação média das argamassas com 1,5% de ativador e diferentes temperaturas de cura

Como mostrado nas figuras 21 a 23, a retração é maior nos traços com cura a 40°C, seguidos dos traços com curas a 60°C e posteriormente estão os traços com cura a temperatura ambiente, com as menores retrações de cada teor de ativador.

De maneira geral ocorre uma redução do comprimento dos prismas nas primeiras duas semanas, sendo que nos traços com cura térmica, percebe-se uma curva de deformação mais acentuada no início, o que mostra que a retração acontece com maior velocidade nesses traços.

As argamassas estudadas apresentaram resultados de retração um pouco menores que o 0,08% obtido em argamassas de cimento Portland com relação 1:3, como apresentado por Venuat e Papadakis (apud ANDRADE,1997, cap. 15, p. 6), com exceção de T-V (1,25% -40°C) que obteve resultado próximo. Esses resultados vão contra o que é normalmente apresentado na bibliografia existente, a qual diz que há uma maior retração para os cimentos álcali-ativados em relação ao cimento Portland.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 CONCLUSÕES

A hipótese inicial de se alcançar resistência mecânica superior a 20MPa para argamassas de cimento de escória e soda cáustica não foi verificada, sendo obtido baixos valores de resistência à compressão para todos os traços, chegando a média máxima de apenas 2,1MPa para o traço IX (1,5% - 60°C). Esse resultado se deve provavelmente ao fato da escória de aciaria elétrica utilizada apresentar baixo teor de fase amorfa, e conseqüentemente baixa reatividade, o que interfere nas velocidades das reações, reduzindo o ganho de resistência. Outro fator que pode ter influenciado o resultado é a granulometria do material, visto que essa característica tem interferência na velocidade de reação e no ganho de resistência. Uma possível forma para se alcançar melhores resultados mecânicos seria melhorar o processo de resfriamento da escória e reduzir a granulometria do resíduo, aumentando a finura.

Para as argamassas de escória de aciaria elétrica ativadas com soda cáustica, observou-se que os traços com cura térmica têm uma elevação da resistência conforme o aumento da temperatura de cura e do teor de ativador, já as argamassas com cura em temperatura ambiente têm um crescimento até um teor 1,5% de ativador e depois desse valor têm uma redução. A cura térmica acelera as reações da argamassa ao ponto dos traços com cura a 60°C obterem praticamente a resistência máxima já com a idade de um dia. Levando em consideração apenas a análise visual, observou-se expansão na fase inicial de cura das argamassas, sendo esta proporcional à temperatura de cura e principalmente às quantidades de ativador utilizado na mistura. Em função desta característica expansiva, que causou a abertura de fissuras e perda de corpos-de-prova em alguns traços, concluiu-se que o teor máximo de hidróxido de sódio a ser utilizado para essa escória, sem causar fissuras excessivas ou até a ruptura do corpo-de-prova, é de 7,5% no caso de cura a temperatura ambiente e de 1,25% para cura térmica. Esse teor maior para o caso do traço sem cura térmica se deve provavelmente pelo fato da argamassa ter lento ganho de resistência e endurecimento nesse caso, o que possivelmente possibilitou uma melhor “acomodação” dos produtos expansivos das reações.

Por análise estatística verificou-se que a temperatura de cura, o teor de Na_2O e a idade são fatores significativos para a resistência das argamassas, e constatou-se também que o melhor teor de ativador com cura em temperatura ambiente e térmica é o de 1,5%, embora esse tenha uma elevada perda de corpos-de-prova, no caso da cura térmica, devido à expansão.

Quanto à deformação, as argamassas de escória apresentaram retrações da ordem 0,02, chegando a quase 0,1%. Tais resultados estão próximos dos encontrados nas bibliografias para as argamassas de cimento comum, sendo que boa parte dos traços de cimento de escória obtiveram valores menores que os do cimento comum. Os resultados encontrados conflitam com a bibliografia existente, a qual diz que há uma maior retração para os cimentos álcali-ativados em relação ao cimento Portland.

Ainda são necessárias muitas pesquisas nessa área para aprofundar os conhecimentos sobre as reações entre diferentes escórias e ativadores, bem como o comportamento dos produtos formados em relação a diversas características como resistência, retração, durabilidade, entre outros. Um maior domínio sobre o comportamento dos cimentos de escória, somado à crescente demanda por produtos específicos para determinadas necessidades, certamente possibilitará encontrar aplicações para os diferentes cimentos com diferentes propriedades.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Registram-se como sugestões para trabalhos futuros os seguintes temas:

- a) avaliação do comportamento de argamassas de escória de aciaria elétrica álcali-ativada, utilizando-se a escória com processo de resfriamento brusco;
- b) avaliação do comportamento de escória de aciaria elétrica com a utilização de outros ativadores;
- c) análise do comportamento micro-estrutural de argamassas com escória de aciaria elétrica alcali-ativada.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** São Paulo: Pini, 1997.

ANDERSON, J. E. Green cement: finding a solution for a sustainable cement industry. In: GREEN CITIES COMPETITION, 2007, Berkeley. Disponível em: <http://bigideas2.berkeley.edu/BBB%202007/Anderson_Green%20Cities.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214:** areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 7215:** cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 8490:** argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 10.004:** resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NM 23:** cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

CHESNER, W.; COLLINS, R.; MACKAY, M.; EMERY, J. **User guidelines for waste byproduct material in pavement construction.** FHA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2001. Disponível em: <http://www.tfrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm>. Acesso em: 29 maio 2008

GARTNER, E. **Industrially interesting approaches to “low-CO2” cements.** França, 2004. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 27 set. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.ibs.org.br>. Acesso em: 15 maio 2008.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** 1995. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** 2000. 102 p. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria.** 2000. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

MANCIO, M. **Contribuição ao estudo do fenômeno da instabilidade volumétrica das escórias de aciaria elétrica.** 2001. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia). – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória Ativada**. 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste management**, v. 21, p. 285-293, 2001.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-Activated fly ashes: a cement for the future. **Cement and concrete research**, v. 29, p. 1323-1329, 1999.

RECICLAR PARA CONSTRUIR, São Paulo – BRASIL , 2008. Disponível em : http://www.reciclagem.pcc.usp.br/escoria_de_aciaria.htm . Acesso em 25 maio 2008.

TURNER-FAIRBANK HIGHWAY RESEARCH CENTER. Virginia – USA, 2007. Disponível em: <<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2007.

VILELA, A. C. F. Geração e processamento da escória de aciaria e sua transformação em agregado siderúrgico. In: SUSTENTABILIDADE DO SETOR SIDERÚRGICO, 2006, São Paulo. **Workshop eletrônicos...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalúrgica e Materiais, 2006. Disponível em: <www.abmbrasil.com.br/cim/download/Workshop%20Agregado%209h.pps>. Acesso em: 2 out. 2007.