

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**CIMENTOS ÀLCALI ATIVADOS: EFEITO DA CURA TÉRMICA  
NO DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

ANDREZA FRARE

**CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS: EFEITO DA CURA TÉRMICA  
NO DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná,  
Campus Pato Branco.  
Orientador: Prof.<sup>a</sup>Dr<sup>a</sup> Caroline Angulski  
da Luz

PATO BRANCO  
2016

## TERMO DE APROVAÇÃO

### **CIMENTOS ÁLCALI ATIVADOS: EFEITO DA CURA TÉRMICA NO DESENVOLVIMENTO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

No dia 21 de Novembro de 2016, às 10h30min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado, e após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para o grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 22 – TCC/2016.

Orientador: Prof.<sup>a</sup>Dr<sup>a</sup> Caroline Angulski da Luz

Membro 1 da Banca: Prof.<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> José Ilo Perreira Filho

Membro 2 da Banca: Prof.<sup>o</sup> Ms<sup>o</sup> José Miguel Etchalus

## DEDICATÓRIA

*Aos meus queridos Pais Lorena e Levi  
e ao meu irmão Thiago.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao fim dessa caminhada posso olhar para trás e ver que todo esforço valeu a pena, assim agradeço:

A minha Orientadora, Professora Dr<sup>a</sup>. Caroline Angulski da Luz, pela oportunidade de trabalhar na Iniciação Científica e se disponibilizar a me orientar nesse trabalho, assim como a paciência e dedicação em todos os momentos.

A técnica de laboratório de materiais da UTFPR – PB, Claudia e a estagiária Jesiane, pela ajuda.

Ao departamento de pesquisas LAMIR da UFPR-Curitiba por ter permitido a realização das análises de difração aos raios-X (DRX). Também a todos da Central de análises DAQUI da UTFPR-Pato Branco pelo auxílio nas análises térmicas.

Aos meus amigos e colegas, pelos conselhos e ajudas, e aos Mestrandos, Roberto, Douglas, Juciane, Neusa e Adernanda, aos quais compartilharam sua amizade e experiência.

Por fim agradeço aos meus pais Levi e Lorena, pela confiança, pelos conselhos, pelo investimento e por me ajudarem sempre que precisei.

*“Que os vossos esforços desafiem as  
impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes  
coisas do homem foram conquistadas do que  
parecia impossível.”*

*Charles Chaplin*

## RESUMO

FRARE, A. Cimentos álcalis ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica. 2016. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Devido a extração de matérias primas não renováveis e o lançamento de CO<sub>2</sub> na atmosfera pela produção de Cimento Portland, a produção de cimentos álcali-ativados vem ganhando espaço no cenário mundial. A produção de CAT's (cimento álcali-ativados) não envolve calcinação dos materiais e utiliza subproduto da indústria de aço. Assim, eles são classificados como um novo produtos de baixo impacto ambiental e com propriedades aglomerantes para emprego na construção civil. Sua matéria prima é a escória de alto forno ativada, essa pode ser de origem de fornos a carvão vegetal e a coque, o que modifica sua composição química. Nesse trabalho, o objetivo é melhorar a resistência dos CAT's através da cura térmica, utilizando-se dois tipos de escória de composições químicas diferentes (escória A e B), com 5% de ativador alcalino submetidas a uma cura úmida térmica de duração de 24h nas temperaturas de 40<sup>o</sup>C e 60<sup>o</sup>C. Avaliou-se a resistência mecânica das argamassas nas idades de 24h, 3, 7 e 28 dias, onde obteve-se melhores resultados para a escória A, submetida a cura de 40<sup>o</sup>C. Realizou-se também análises térmicas para as pastas de CAT, onde observou-se formação para ambas as escórias de C-S-H e hidrotalcita para escória B, o que pode ter influência na resistência mecânica.

Palavras-chave: Cimento álcali ativado. Escória de alto forno. Cura térmica.

## ABSTRACT

FRARE, A. Activated alkali cements: effect of thermal curing on the development of mechanical strength. 2016. 52 f. Completion of course work. Graduation in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2016.

Due to the extraction of non-renewable raw materials and the release of CO<sub>2</sub> into the atmosphere by the production of Portland Cement, the production of alkali-activated cements has been gaining ground on the world stage. The production of CAT's does not involve calcination of materials and uses by-products of the steel industry. Thus, they are classified as a new products of low environmental impact and with binding properties for employment in construction. Its raw material is activated blast furnace slag, which may be from furnaces to charcoal and coke, which modifies its chemical composition. In this work, the objective is to improve the strength of the CAT's (Activated alkali cements) by thermal curing using two types of slag of different chemical compositions (slag A and B), with 5% of alkaline activator subjected to a thermal wet cure lasting 24 hours At temperatures of 40<sup>0</sup> C and 60<sup>0</sup> C. The mechanical strength of the mortars was evaluated at ages 24, 3, 7 and 28 days, where better results were obtained for the slag A, which was cured at 40 ° C. Thermal analysis was also performed for the slags of both slags, where formation was observed for both slag C-S-H and hydrotalcite for slag B, which may have influence on mechanical strength.

Keywords: Alkali cement activated. Blast furnace slag. Thermal cure.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Desenvolvimento da resistência à compressão dos compostos .....	20
<b>Figura 2-</b> Taxa de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento.....	22
<b>Figura 3-</b> Micrografia (MEV) da hidratação do cimento Portland aos 360 dias.....	22
<b>Figura 4 -</b> Pátio para estocagem de escória de alto-forno.....	25
<b>Figura 5 -</b> Influência da quantidade $Al_2O_3$ na hidratação da escória utilizando NaOH (a) em.....	27
<b>Figura 6 -</b> Três tipos de cinética de reação da escória, por Shi et al., (1995).....	28
<b>Figura 7 -</b> DRX das escórias A7 e A17 comparadas com o DRX das escórias ativadas com .....	29
<b>Figura 8 -</b> Análise termogravimétrica (TG e DTG) de sistemas álcali ativados com escórias.....	30
<b>Figura 9 -</b> Esquema do ciclo adequado de cura térmica .....	33
<b>Figura 10 -</b> Curvas calorimétricas dos cimentos Portland comum e de alto-forno, a 23 e 60°C. AF-1: 35% de escória; AF-2: 50% de escória; AF-3: 70% de escória .....	34
<b>Figura 11 -</b> Diagrama do programa experimental.....	36
<b>Figura 12 -</b> (A) Escória granulada de alto forno a carvão vegetal (B) Escória granulada de alto forno a coque.....	37
<b>Figura 13 -</b> Moinho de bolas.....	37
<b>Figura 14 -</b> Difração de raios – X da escória ácida (A) e (B). .....	39
<b>Figura 15 -</b> Resistência à compressão (7 e 28 dias) escória ativada com NaOH (cura imersa e .....	40
<b>Figura 16 -</b> Resistência à compressão escória A e B, respectivamente.....	43
<b>Figura 17 -</b> Difractogramas das pastas de escórias ativadas A e B, submetidas a cura térmica de 40°C e 60°C. ....	44
<b>Figura 18 -</b> Análise térmica escória A e B e temperaturas de cura de 40 <sup>o</sup> e 60 <sup>o</sup> .....	46

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Tipos de cimento Portland .....	23
<b>Tabela 2:</b> Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland de alto forno .....	24
<b>Tabela 3:</b> Trabalhos desenvolvidos com diferentes curas .....	31
<b>Tabela 4:</b> Caracterização física da escória .....	38
<b>Tabela 5:</b> Composição química da escória A e escória B.....	38

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1:</b> .....	19
<b>Equação 2:</b> .....	20
<b>Equação 3:</b> .....	20
<b>Equação 4:</b> .....	21
<b>Equação 5:</b> .....	21
<b>Equação 6:</b> .....	21
<b>Equação 7:</b> .....	21
<b>Equação 8:</b> .....	26

## SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO .....	14
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo geral .....	15
1.1.2 Objetivos específicos .....	15
1.2 JUSTIFICATIVA .....	15
2.REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
2.1 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL .....	17
2.2 HISTÓRICO.....	18
2.2.1 Primeiros Registros de Utilização de Escória de Alto Forno .....	18
2.2.2 No Brasil.....	19
2.3 CIMENTOS PORTLAND .....	19
2.3.1 Adições .....	23
2.4 CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO .....	23
2.5 ESCÓRIA DE ALTO FORNO .....	25
2.6 CIMENTO ALCALI-ATIVADO.....	26
2.6.1 Propriedade dos CAT's .....	27
2.7 CURA DO CONCRETO .....	31
2.7.1 Cura térmica.....	32
2.7.2 Efeitos da temperatura nos cimentos de escória.....	33
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1 MATERIAIS .....	36
3.1.1.Escórias .....	36
3.1.2 Ativador alcalino .....	39
3.2 MÉTODOS .....	39
3.1.2 Definição dos teores de ativador .....	39
3.2.2 Definição do processo de cura.....	40

3.2.3 Preparação das pastas e argamassas .....	41
3.2.4 Caracterização das pastas e argamassas .....	42
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	43
4.1 Resistência à compressão .....	43
4.2 Análise microestrutural .....	44
5 CONCLUSÕES .....	47
SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS .....	48
REFERÊNCIAS.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Representando 6,5% do PIB nacional de acordo com dados do CBIC (Câmara Brasileira da Indústria da Construção) (2014), a indústria da construção civil é um dos setores que mais movimentam a economia nacional. É também o setor que produz bens de maior dimensão física do planeta, conseqüentemente o maior consumidor de recursos naturais (JOHN, 2000).

Dados do Sindicato Nacional da Indústria do cimento, em 2013, foram consumidas 71 milhões de toneladas de cimento. E sua produção, contribui com aproximadamente 2,5 a 5 % das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> devido ao processo de calcinação do calcário e na queima dos combustíveis no forno (KAVALEROVA, 2007).

O consumo elevado de energia para o processo de fabricação do cimento tornou-se um incentivo para a busca mundial de medidas para a diminuição do consumo energético do setor. A utilização de escória de alto forno e materiais pozolânicos na composição dos chamados cimentos Portland de alto forno e pozolânicos, respectivamente, tem apresentado bons resultados, tornando-se uma alternativa viável (ABCP, 2002).

As escórias de alto forno são provenientes da produção de ferro gusa. Esse resíduo geralmente ficava estocado nos pátios das siderúrgicas sem maior aproveitamento até ser descoberto que elas possuem propriedades ligantes semelhantes ao clínquer. (ABCP, 2002)

Com adições de até 70% de escória de alto forno o cimento Portland de alto forno (CP III) é o cimento com maior empregabilidade de escória do mercado nacional. Já o Cimento álcali-ativado (CAT), que vem sendo estudado com maior frequência por apresentar material aglomerante composto com maior quantidade de escória de alto forno que o CP III.

Em comparação com cimentos tradicionais, estes, apresentam maiores resistências á compressão nas primeiras idades. O CAT possui também baixo calor de hidratação e resistência a ambientes agressivos. (PUERTAS et. al, 2003)

Jonh (1995) comenta que em análises anteriormente efetuadas, que as características mecânicas dos cimentos com escória, estão ligadas ao tipo de ativador utilizado, a finura da escória e também a temperatura em que está submetida.

Esse trabalho busca entender e caracterizar o comportamento dos CAT sob efeito da temperatura, e obter o processo de cura térmica mais favorável para obtenção de maiores resistências à compressão.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da cura térmica no ganho de resistência dos cimentos com escória.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Caracterizar o comportamento de resistência do cimento álcali-ativado quando submetido a temperaturas mais altas.

Analisar o desenvolvimento de resistência de cimentos em idades iniciais e finais, em diferentes temperaturas.

Verificar quais compostos e reações do cimento são afetados com o efeito da temperatura.

Identificar qual o melhor processo de cura para haver aumento de resistência dos cimentos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O cimento Portland é o tipo de cimento mais consumido mundialmente pela construção civil. Variando sua composição de acordo com as propriedades físicas e mecânicas esperadas, esse cimento possui grande versatilidade. Porém, a indústria cimenteira vem se atentando ao alto custo de produção e consumo energético na geração do mesmo (JUENGER et al., 2011). Responsável por grande parte das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera os impactos ambientais causados pela produção de cimento tem se tornado um incentivo a busca de novas alternativas (O'ROURKE; MCNALLY; RICHARDSON, 2009).

Nesse cenário a utilização de subprodutos industriais na composição dos cimentos tem chamado a atenção. Um desses subprodutos é a escória de alto forno proveniente da fabricação de aço. As escórias de alto forno até pouco tempo eram consideradas materiais sem maior utilidade, até descobrir-se que elas possuíam propriedades de ligante hidráulico desenvolvendo características aglomerantes semelhantes ao clínquer, sendo assim, utilizadas na composição de cimentos (ABCP 2002).

No mercado brasileiro o CPIII é o cimento composto por maior quantidade de escória de alto forno, levando adições de até 70%. Mas nos últimos anos, novos tipos de cimento vêm sendo estudados, o CAT é um exemplo. Esse cimento é composto de escória de alto forno ativada, e além de atender plenamente aos usos comuns, apresentam melhorias em relação à durabilidade e à resistência final (GRUSKOVNJAK et al., 2008b).

A originalidade do estudo está na análise de resistência do CAT quando submetidos a variações de temperatura. Também procura-se avaliar o método de cura dos cimentos, para entender qual seria a influência da cura térmica, e como isso afeta o desenvolvimento da resistência à compressão nas primeiras idades, e possível utilização na indústria de pré-moldados Sua viabilidade é verificada tendo em vista a disponibilidade do laboratório de materiais de construção do *Câmpus*, assim como a produção de escória nacional em largas escalas.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 IMPORTÂNCIA AMBIENTAL

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2015), a produção de cimento durante o ano de 2015, no Brasil, foi de aproximadamente 64,9 milhões de toneladas. Sendo que a produção de cimento Portland (CP), contribui com cerca de 5% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> e demanda alta quantidade energia, fez –se necessário buscar alternativas para esse consumo (KAVALEROVA, 2007).

Das emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes da produção de CP, 90% ocorrem durante a produção de clínquer, sendo que destas, 50% emitido do processo de calcinação da matéria-prima e 40% da queima de combustíveis para o aquecimento de fornos (MDIC, 2008). Em média, cada tonelada de CP produzido, uma tonelada de dióxido de carbono é liberado na atmosfera, além de extrair 1,15 toneladas de calcário (AITCIN e MINDESS, 2011).

Nesse contexto, uma das alternativas encontradas para a diminuição de impacto ambiental seria diminuir a geração de resíduos e reutiliza-los, agregando assim, valor a materiais anteriormente dispensáveis. Uma vez que torna-se impossível obter-se uma sociedade que não gere resíduos, a reciclagem adquire extrema importância para um desenvolvimento sustentável da construção civil, em função da quantidade de materiais consumidos (JOHN, 2000).

A substituição das matérias-primas para a produção de CP por resíduos, contribui para a reciclagem e preservação de recursos naturais, aumentando a vida útil das reservas (JOHN, 2000).

O cimento Portland de alto forno e pozolânicos, possuem em sua composição escórias de alto-forno e materiais pozolânicos, respectivamente, tornando-se uma boa opção para as indústria cimenteiras para a utilização de subprodutos industriais e diminuição de emissões de dióxido de carbono (ABCP, 2002).

Esses cimentos utilizam menor quantidade de clínquer, e são baseados em sub produtos industriais de fabricação do aço. Ainda assim, apresentam desvantagens em relação ao ganho de resistência mecânica e as variações de temperatura (NEVILLE, 2015).

Os cimentos álcali-ativados, diferentemente do CP convencional e do alto forno, utilizam apenas subprodutos da indústria, as vezes, sem destinação correta ou valorização comercial, além disso não necessitam calcinação da matéria-prima. Essa tecnologia reduz o impacto ambiental das cimenteiras e desenvolve cimentos com propriedades mecânicas aplicáveis à construção civil.

## 2.2 HISTÓRICO

### 2.2.1 Primeiros Registros de Utilização de Escória de Alto Forno

Conforme Jonh (1995) o cimentos com adições de escória foram descobertos, produzidos e utilizados inicialmente na Europa, eles apresentavam um custo menor que os cimentos convencionais, porém apresentavam algumas limitações como, pega lenta, risco de congelamento em temperaturas muito baixas.

Segundo Mather (1957), Venuat, (1818) apud Jonh (1995), vários pesquisadores, já observavam o poder aglomerante da escória, antes mesmo, de Aspadin registrar sua patente do cimento Portland em 1824. Já para outros autores, a capacidade aglomerante da escória foi descoberta a partir de 1980.

Em 1862, em Troisdorf, Alemanha, Emil Langen, diretor-chefe da Friedrich-Wilhelm Iron and Steelworks, produziu pela primeira vez cimentos de escória, adicionando cal hidratada (SCHRÖDER, 1969; SMOLCZYK, 1980 apud JONH, 1995). Porém, a utilização comercial desse cimento deu-se em 1965, em fábricas Alemãs, que produziam blocos de alvenaria (KERSTEN, 1921 apud JONH, 1995).

Em 1900, a norma suíça para fabricação de argamassas, já incluía cimentos de escória, e os recomendava para obras submersas, também determinava uma finura e resistência à compressão mínima (LEDUC & CHENU, 1912 p.227 apud JONH, 1995).

Já em 1949, dificuldades no emprego do cimento de escória, fizeram com que sua produção fosse abandonada, somente na França e na Alemanha, grandes produtores de escória, seu uso continuou, e houve o surgimento de cimento de escória sem clínquer. Estudos da ativação da escória com cal hidratada aconteciam paralelamente na URSS. Porém seu uso foi completamente cessado em 1970 (CLÉRET DE LANGAVANT 1949 apud JONH, 1995).

### 2.2.2 No Brasil

No Brasil a adição de escória de alto forno ao Cimento Portland iniciou-se em 1952 e tem crescido continuamente (BATTAGIN & ESPER, 1988 apud JONH, 1995).

Já segundo Jonh (1995) as pesquisas, referente a produção de cimentos de escória sem clínquer no Brasil, começaram nos anos 80, pelo ITP (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), esses estudos buscavam entender a influência da finura das escórias na resistência à compressão, retração e expansibilidade. Também, buscou-se resultados para ativação das escórias com outros materiais e os possíveis teores.

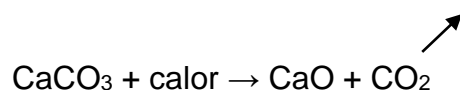
As possibilidades comerciais desses cimentos são avaliadas levando em consideração os avanços nas pesquisas e tecnologias dos materiais, além da crescente consciência ambiental.

### 2.3 CIMENTOS PORTLAND

O Cimento Portland é um material fino com propriedades aglomerantes, que endurecem sobre a ação da água. Seu surgimento deu-se através de um construtor inglês, Joseph Aspdin em 1824. Nessa época, costumava-se construir com pedras de Portland, ilha localizada ao sul da Inglaterra. Essas pedras possuíam cor e dureza semelhante ao cimento endurecido, por isso, Aspadin registrou esse nome em sua patente (NEVILLE, 2013).

A matéria-prima para a fabricação do cimento vem da extração de calcário e argila. Esses materiais são moídos, misturados em proporções adequadas e então levados a queima a uma temperatura de 1400<sup>0</sup>C, formando assim, o clínquer. Para tornar-se o cimento Portland comercializado, faz –se necessário ainda, uma mistura de gipsita (sulfato de cálcio) e nova moagem (NEVILLE, 2013).

Durante a produção do clínquer, o calcário, sofre o processo de calcinação, que consiste em aquecer o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), formando o óxido de cálcio (CaO) e liberando na atmosfera CO<sub>2</sub>. A equação 1, apresenta esse processo (IEMA, 2013).



**Equação 1:**

Após a clinquerização, os compostos do cimento, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, formam quatro principais minerais (AITCIN e MINDESS, 2011):

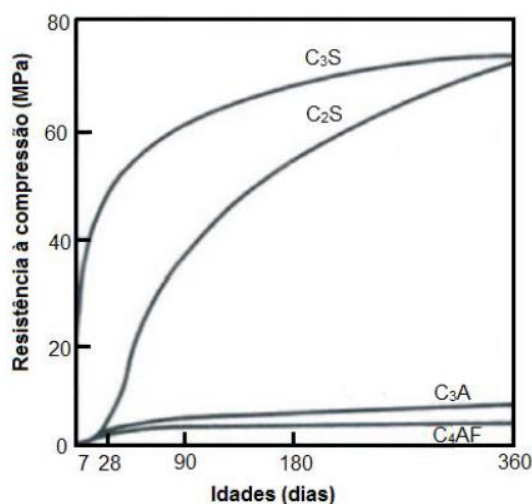
Silicato tricálcico, 3CaO·SiO<sub>2</sub>(C<sub>3</sub>S) - alita

Silicato dicálcico, 2CaO·SiO<sub>2</sub>(C<sub>2</sub>S) - belita

Aluminato tricálcico, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A) – aluminato

Ferro-aluminato tetracálcico, 4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF) - ferrita.

A figura 1 apresenta os principais produtos anidros produzidos pela reação, e responsáveis pelo desenvolvimento da resistência à compressão.

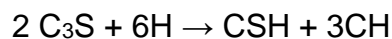


**Figura 1-** Desenvolvimento da resistência à compressão dos compostos

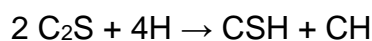
**FONTE:** BOGUE, 1995 apud NEVILLE e BROOKS, 2013.

Quando hidratados os silicatos sofrem as seguintes reações:

**Equação 2:**



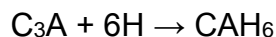
**Equação 3:**



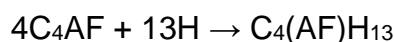
Formando, assim o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsáveis pela resistência mecânica do cimento, o C<sub>3</sub>S nas primeiras idades e o C<sub>2</sub>S nas idades maiores (NEVILLE *et al.*, 2013).

Já os aluminatos são responsáveis pelas primeiras reações, porém apresentam baixos valores de resistência. O processo de hidratação está representado nas equações 4 e 5.

**Equação 4:**

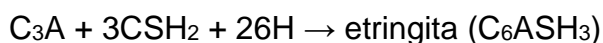


**Equação 5:**

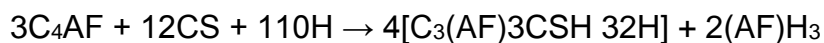


Os sulfatos, como a gipsita, são adicionados para o controle da pega. Sua reação está representada nas equações 6 e 7.

**Equação 6:**

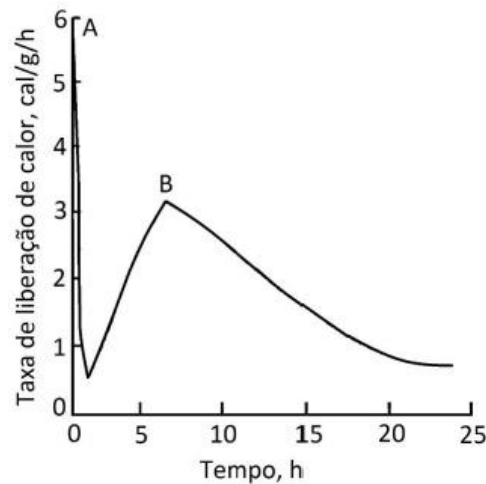


**Equação 7:**



A hidratação do cimento, no início, é controlada pela taxa de dissolução das fases do clínquer e sulfato de cálcio, que apresenta alta evolução de calor. Que está representado na figura 2, como primeiro pico. A medida que o cimento hidrata-se a reação torna-se cada vez mais controlada pela taxa de nucleação e crescimento dos cristais das fases de hidrato formado, e por último pela taxa de difusão de água e dos íons dissolvidos. (HEWLETT, 2004).

O segundo pico da figura 2 representa a segunda fase de evolução de calor, esse ocorre entre 4 e 8 horas de hidratação. As reações químicas nesse período favorecem a formação de sulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita) e silicato de cálcio hidratado (C-S-H - tobermorita), e preenchem os poros ocupados inicialmente pela água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

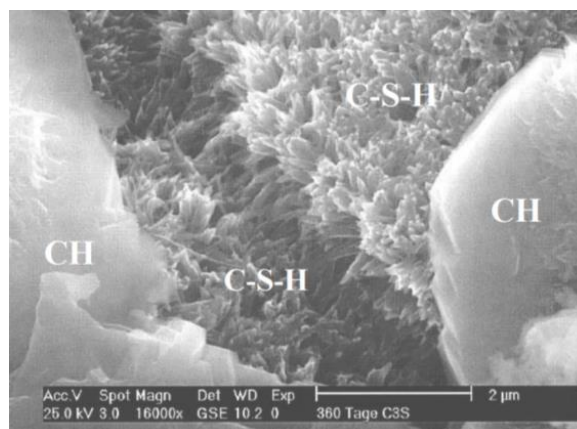


**Figura 2-** Taxa de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento

**FONTE:** MEHTA e MONTEIRO, 2008.

Pode-se assim dizer que o material hidratado formado, depende da composição do cimento, da relação água/cimento, da temperatura e tempo de hidratação e da presença ou não de aditivos (HEWLETT, 2004). Nota-se ainda que as reações de hidratação do cimento são exotérmicas e dependem da composição e finura do material aglomerante (NEVILLE *et al.*, 2013).

Na figura 3 observa-se o composto C-S-H e a fase CH no processo de hidratação do cimento, através de uma micrografia MEV (Microscopia eletrônica de varredura).



**Figura 3-** Micrografia (MEV) da hidratação do cimento Portland aos 360 dias

**FONTE:** THOMAZ, 2015

### 2.3.1 Adições

A produção do clínquer é responsável por 90% das emissões de CO<sub>2</sub> vindas da fabricação do cimento, tanto da calcinação do calcário, quanto da queima de combustíveis para aquecimento dos fornos (IEMA, 2013).

Como alternativa para a diminuição de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, a indústria cimenteira incorpora adições de materiais pozolânicos no cimento. Essa adições melhoram as propriedades do sistema, reduzindo a porosidade da estrutura (VIEIRA, 2005).

Adições como escória de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário, sílica ativa, conferem ao cimento características desejáveis, além de tornar-se um material menos agressivo ao meio ambiente (IEMA, 2013).

A tabela 1 apresenta os tipos de cimento Portland comercializados no Brasil.

**Tabela 1:** Tipos de cimento Portland

Tipo	Sigla	Classe resistência (Mpa)	Composição (%)				Norma Brasileira
			Clínquer + gesso	Escória alto forno	Pozolana	Fíler	
Comum	CP I - S	32	90-95		1-5%		NBR 5732
	CP I - S	40					
Composto	CP II - E	32	76-94	6-34%	6-14%	0-10%	NBR 11578
	CP II - Z	40					
	CP II - F	32					
Alto forno	CP III	32	30-65	35-70%		0-5%	NBR 5735
		40					
Pozolânico	CP IV	32	45-85		15-50%	0-5%	NBR 5736
Alta resistência inicial	CP ARI	--	95-100			0-5%	NBR 5733

**FONTE:** ABCP, 2002.

## 2.4 CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO

Conforme a NBR 5735 (1991) Cimento Portland de alto forno é um aglomerante hidráulico obtido da mistura homogênea de clínquer e escória de alto forno. Essa por sua vez deve apresentar-se de 35 a 70% da massa total de aglomerante.

As adições de escória de alto forno no cimento, proporcionam vantagens técnicas e ambientais, como, baixa liberação de calor durante o processo de hidratação, menor consumo de energia para a produção do cimento, minimização da reação álcali-agregado, permeabilidade e resistência a sulfatos (NEVILLE *et al.*, 2013).

A escória apresenta uma taxa de hidratação mais lenta quando comparado ao CP, por isso, faz-se necessário a adição de ativadores para a acelerar a reação (KOLANI *et al.*, 2012). Nesse processo a escória consome hidróxido de cálcio e o usa na formação de C-S-H (PAL *et al.*, 2003).

O baixo calor de hidratação das escórias prejudica o desenvolvimento inicial de resistência, o que torna o cimento mais sensível às variações de temperatura (NEVILLE, 2015). As resistências mínimas a serem alcançadas estão estabelecidas na NBR 5735: 1991 e apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2:** Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland de alto forno

Características e propriedades	Unidade	Limites			
		CPIII - 25	CPIII - 32	CPIII - 40	
Finura (resíduo na	%	<8,0	<8,0		
Tempo de início de pega	h	1	1		
Expansibilidade a quente	mm	<5	<5	<5	
Resistência à compressão	3 dias	MPa	8	10	12
	7 dias	MPa	15	20	23
	28 dias (limite inferior)	MPa	25	32	40
	28 dias (limite superior)	MPa	42	49	-
Perda ao fogo (PF)	% da massa	<4,5	<4,5	<4,5	
Resíduo insolúvel (RI)	% da massa	<1,5	<1,5	<1,5	
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	% da massa	<4,0	<4,0	<4,0	
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	% da massa	<3,0	<3,0	<3,0	

**FONTE:** Adaptado de NBR 5735: 1991



## 2.5 ESCÓRIA DE ALTO FORNO

A escória de alto forno é um subproduto industrial da produção de ferro gusa. Elas apresentam características semelhantes ao cimento Portland, quando esfriadas rapidamente de modo a formar um material vitrificado (BATAGIN e ESPER, 1988).

Dados de 2014, mostram que a produção anual de escória de alto forno no Brasil chega a 8,8 milhões de toneladas, dessas 1,7 milhões são de escória ácida (SINDIFER, 2014).

Nem toda a escória granulada, é consumida pela indústria cimenteira, permanecendo ainda aglomerada nos aterros das indústrias de siderurgia (figura 4). Daí a importância, em âmbito global, de utilizar-se a escória na fabricação de cimento. O emprego de 75% desse material, como adição ao cimento pode reduzir aproximadamente 70% das emissões de CO<sub>2</sub>, envolvidas na fabricação do clínquer (BINA, CASTRO e YOSHIMURA 2002).



**Figura 4** - Pátio para estocagem de escória de alto-forno

**FONTE:** SOUZA JÚNIOR, 2007

As escórias são classificadas de acordo com sua composição química. Escórias ácidas possuem em sua composição sílica como componente predominante e, relação entre seus elementos principais CaO/SiO<sub>2</sub> menor que um. Esse tipo de escória provem dos fornos de carvão vegetal. Já as escória produzidas a coque, são classificadas como básicas, por possuírem valores para a relação maior que um (JOHN, 1995; MASSUCATO, 2005; MALARD, 2009).

As escórias ácidas normalmente são descartadas pela indústria cimenteira por não apresentarem características químicas favoráveis prescritas pela norma Brasileira (MASSUCATO, 2005; SOUZA JÚNIOR, 2007).

O que define se a escória pode ser aplicada ou não na produção de cimento são os módulos de basicidade/hidraulicidade, representado pela fórmula:

**Equação 8:**

$$\frac{(CaO+MgO+Al_2O_3)}{SiO_2},$$

onde a relação deve apresentar valor maior que um para que o material tenha aplicabilidade como aglomerante. Essa característica é normatizada pela NBR 5753:1991, se esta relação for atendida a escória é classificada como básica, caso contrário como ácida. Porém Talling *et al.*, (1989) *apud* Provis *et al.*, (2014), afirma que nem sempre a resistência mecânica tem boa correlação com esses módulos.

## 2.6 CIMENTO ALCALI-ATIVADO

Os sistemas álcali-ativados já vem sendo estudados desde 1940, quando Purdon observou bom desenvolvimento de resistência mecânica na ativação de escórias com soluções alcalinas e cal (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2008a; JUENGER *et al.*, 2011).

Glukhovsky Viktor, também estudou os cimentos alcalinos e em 1959, notou que esses apresentavam composição semelhante a de muitos minerais e rochas constituintes da crosta terrestre. Ele então os classificou em dois grupos conforme a composição do material inicial: o sistema aglomerante alcalino ou geopolímero  $Me_2OAl_2O_3-SiO_2-H_2O$  e o sistema alcalino terroso  $Me_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ , sendo  $Me=Na, K, \dots$  e  $M=Ca, Mg$  (SHI *et al.*, 2011).

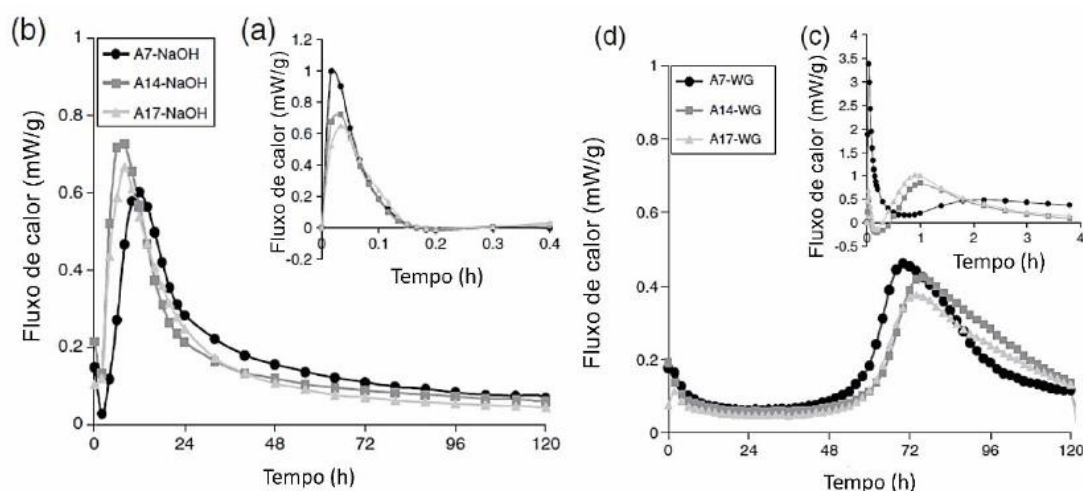
O primeiro sistema ( $Me_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ), refere-se a materiais alcalinos ricos em  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ , que quando ativadas por soluções alcalinas formam um material aluminossilicato amorfo, responsável pela elevada resistência mecânica Já o segundo sistema ( $Me_2O-MO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ ), produz um gel de C-S-H, o que forma compostos ricos em cálcio (ALONSO *et al.*, 2001b; SHI *et al.*, 2011).

Tanto para o sistema aglomerante alcalino (geopolímero) quanto para o alcalino terroso, a matéria-prima, o tipo de ativador, e a finura influência nas propriedades finais (PINTO, 2006).

## 2.6.1 Propriedade dos CAT's

### 2.6.1.1 Cinética de Hidratação

Em estudos realizados por Ben Haha *et al.* (2012), onde ativou-se três tipos de escória com porcentagens de  $Al_2O_3$  variadas, 7%, 14,1% e 16,7 %, com dois ativadores alcalinos, Hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio hidratado ( $Na_2Si \cdot 5H_2O$ ), acompanhou-se a evolução de hidratação das pastas, com a utilização de um calorímetro.



**Figura 5** - Influência da quantidade  $Al_2O_3$  na hidratação da escória utilizando NaOH (a) em idades precoces (b) até 5 dias, utilizando WG (c) em idades precoces e (d) até 5 dias

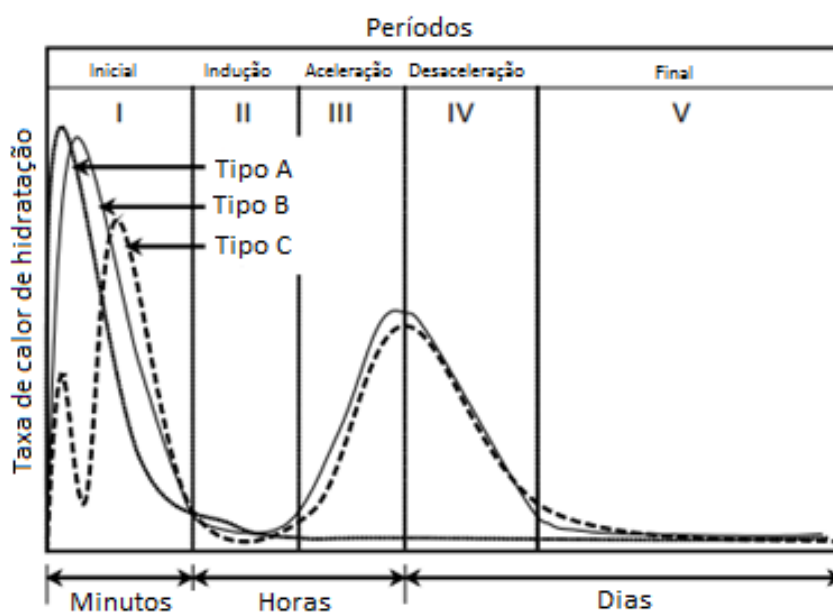
**FONTE:** Adaptado de BEN HAHA *et al.* 2012.

Na figura 5, observa-se que as escórias ativadas com NaOH, com maior teor de  $Al_2O_3$  reagiram mais rapidamente, já as pastas com WG apresentaram um longo período dormente. O primeiro pico apresentado nas análises referem-se a molhagem e dissolução da escória, e o segundo pico à formação de C-S-H.

Concluiu-se que escórias ativadas com NaOH apresentaram resistências maiores nas primeiras idades, já as ativadas com WG apresentaram resistência maiores em 28 dias (BEN HAHA *et al.*, 2012).

Em estudo realizado por Shi *et al.* (1995), onde utilizou-se diferentes tipos de ativadores de escoria (NaOH,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SiO_3 \cdot H_2O$ ,  $Na_3PO_4$  e NaF), os autores

concluíram que três tipos de cinética da reação podem ser apresentados, como pode ser observado na figura 6.



**Figura 6** - Três tipos de cinética de reação da escória, por Shi et al., (1995)

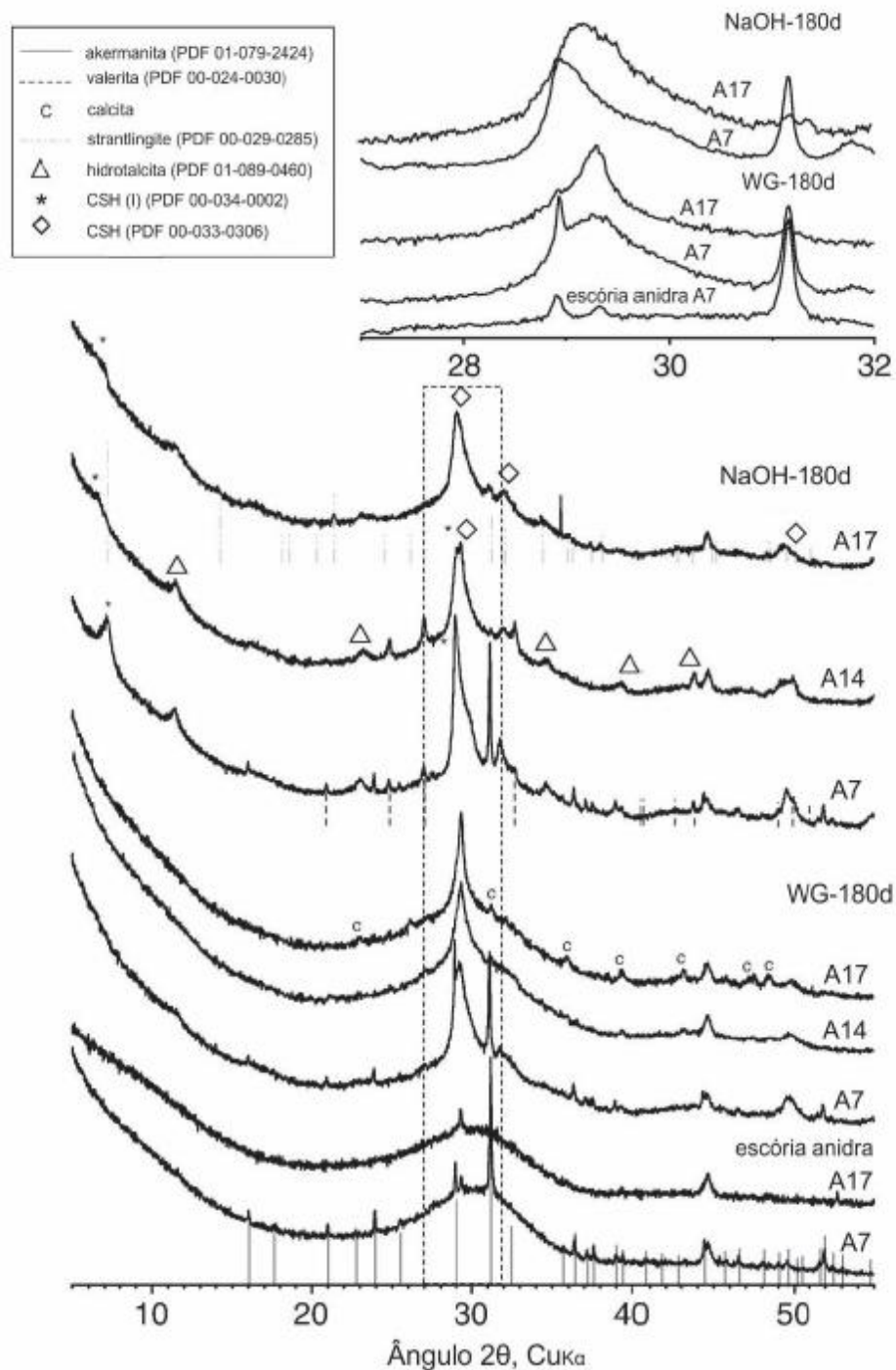
**FONTE:** Adaptado de CHEN *et al.*, 2007.

Nota-se que o processo de hidratação da escória apresenta-se semelhante ao do Cimento Portland, com os cinco estágios bem definidos (inicial, indução, aceleração, desaceleração e final) (SHI *et al.*, 1995). O tipo A a escória foi ativada por  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (Fosfato dissódico), onde a hidratação apresenta apenas um pico e a escória não endurece. O tipo B ativado com  $\text{NaOH}$ , a cinética da reação é mais semelhante como do Cimento Portland, apresentando um pico inicial um pouco antes do período de indução e um pico de aceleração de hidratação. Já para o tipo C a cinética de hidratação apresenta dois picos iniciais e um pico no período de aceleração, é o caso da ativação por  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  e soluções de  $\text{NaF}$  (SHI *et al.*, 1995).

#### 2.6.1.2 Microestrutura e resistência mecânica

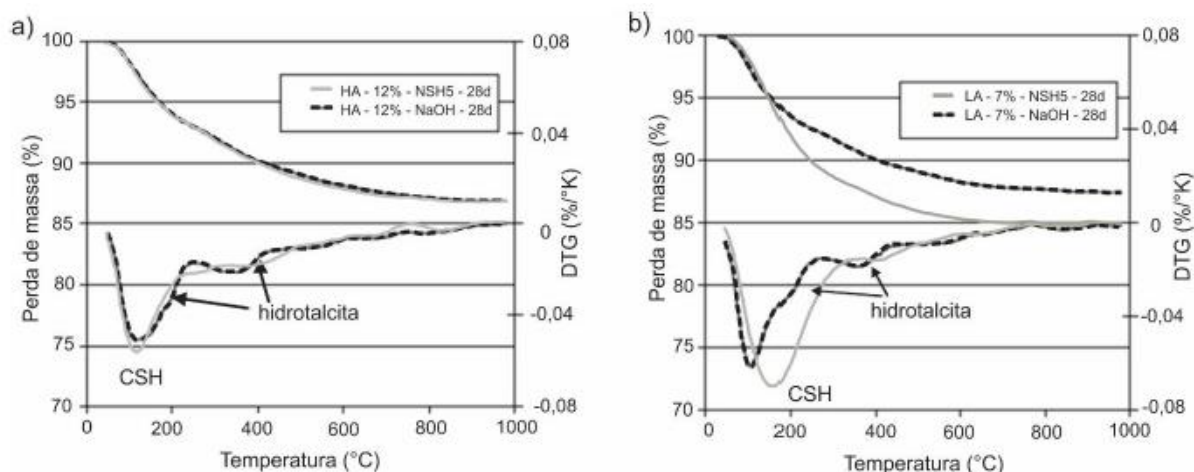
Análise de DRX (Difração Por Raio-X) (figura 7) realizada por Ben Haha *et al.*, (2012) com escórias ativadas por  $\text{NaOH}$  e metassilicato de sódio, observou-se akermanita em algumas amostras, vestígios de anidrita em todas, presença de C-S-

H e uma fase de Hidrotalcita. Esses componentes também foram observados em análises térmicas representada na figura 8.



**Figura 7** - DRX das escórias A7 e A17 comparadas com o DRX das escórias ativadas com NaOH e WG aos 180 dias

**FONTE:** BEN HABA *et al.* 2012.



**Figura 8** - Análise termogravimétrica (TG e DTG) de sistemas álcali ativados com escórias ambos aos 28 dias (a) Escória HA (12% de  $Al_2O_3$ ) e (b) Escória LA (7% de  $Al_2O_3$ )

**FONTE:** Adaptado de BEN HAHHA *et al.* 2011b.

As conclusões apresentadas por Ben Haha *et al.*, (2011b), são que o ativador NaOH acelera a reação inicial, proporcionando resistências iniciais melhores, porém em idades mais tardias o WG apresentou-se melhor, também constatou-se que os produtos de hidratação formados em ambas as escórias são o C-S-H e a hidrotalcita.

### 2.6.1.3 Durabilidade

Os sistemas álcalis-ativados, são conhecidos por apresentarem uma boa durabilidade, essa durabilidade tem grande influência dependendo do tipo de cura empregado. Para alcançar uma estrutura de poros mais favorável, é necessário um controle mais cuidadoso e uma investigação mais detalhada (JUENGER *et al.*, 2011).

Alguns trabalhos desenvolvidos a partir da cura estão listados na tabela 3.

**Tabela 3:** Trabalhos desenvolvidos com diferentes curas

Material	Especificações e Relação a/c	Cura	Autor
CP <sup>4</sup> e EGAF <sup>1</sup>	ASTM C778 0.5 (argamassa)	Imersa	Acevedo-Martinez <i>et al.</i> , 2012
MK <sup>2</sup> e hidróxido de cálcio	EN 196-1	Úmida temp.: 35°C, 45°C e 60°C	Alonso <i>et al.</i> , 2001b
EGAF <sup>1</sup>	EN 196-1 0.38, 0.46, 0.53	Cura úmida; seca (temp.: 60, 80 e 95°C); e em temp. ambiente	Altan <i>et al.</i> , 2012
EGAF <sup>1</sup>	EN 196-1 0.40 (pasta) 0.45 (argamassa)	Cura seca e imersa	Ben Haha <i>et al.</i> , 2011a
EGAF <sup>1</sup>	ACI 211.1-91 0.42 (concreto)	Cura úmida	Bernal <i>et al.</i> , 2011
MK <sup>2</sup> , EGAF <sup>1</sup> e CVMP <sup>3</sup>	NBR 12006/90	Cura em temp. ambiente	Bigno <i>et al.</i> , 2005
EGAF <sup>1</sup>	0.4	Cura em temp.: 25, 35,45 e 60°C.	Fernández-Jiménez <i>et al.</i> , 1997.
EGAF <sup>1</sup>	NBR 7215 0.48 (argamassa) 0.55 (pasta)	Cura úmida e seca	John, 1995.
EGAF <sup>1</sup>	0.5 (solução ativador/escória) (pasta)	Cura úmida	Puertas <i>et al.</i> , 2004.
EGAF <sup>1</sup>	Relação a/c determinada pelo escoamento da argamassa (UNE 80 116- 86)	Cura imersa (UNE-EN 196-1)	Puertas <i>et al.</i> , 2007

<sup>1</sup>EGAF = Escória granulada de alto forno

<sup>2</sup>MK = Metacaulim

<sup>3</sup>CVMP = Cinza volante micropulverizada

<sup>4</sup>CP = Cimento Portland

**Fonte:** Langaro, 2016.

Outro aspecto de grande importância para a durabilidade dos CAT's é a reação álcali-agregado, que pode ser influenciada com o tipo de ativador empregado, e conseqüentemente com a expansão apresentada.

## 2.7 CURA DO CONCRETO

A cura do concreto é um procedimento de elevada importância para que não ocorra perda prematura de água e haja um controle da sua temperatura, até que alcançar-se certo grau de hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento do concreto. Segundo Levy e Helene (1996) a cura pode ser feita por imersão, aspersão, cobrimento com mantas impermeáveis, por revestimentos saturados de água ou ainda por produtos químicos formadores de membrana de cura.

Esse procedimento pode ocorrer em temperatura ambiente ou elevada (cura térmica), quando deseja-se acelerar a hidratação do cimento.

Para que as reações de hidratação ocorram, necessita-se que a umidade do concreto esteja igual ou superior a 80%, o que naturalmente é de difícil concepção, devido aos ventos incidentes e a temperatura ambiente (Neville, 1997). A finalidade da cura é manter o concreto saturado até que os espaços ocupados pela água sejam ocupados pelos produtos da hidratação do aglomerante (BARDELLA, 2005).

Problemas como perda de resistência à compressão, retração plástica, aumento da permeabilidade, são causados pela deficiência ou falta de cura, nesse caso, não apenas a água de amassamento irá evaporar como também a água responsável pela hidratação (LORENZETTI et al., 2000).

### 2.7.1 Cura térmica

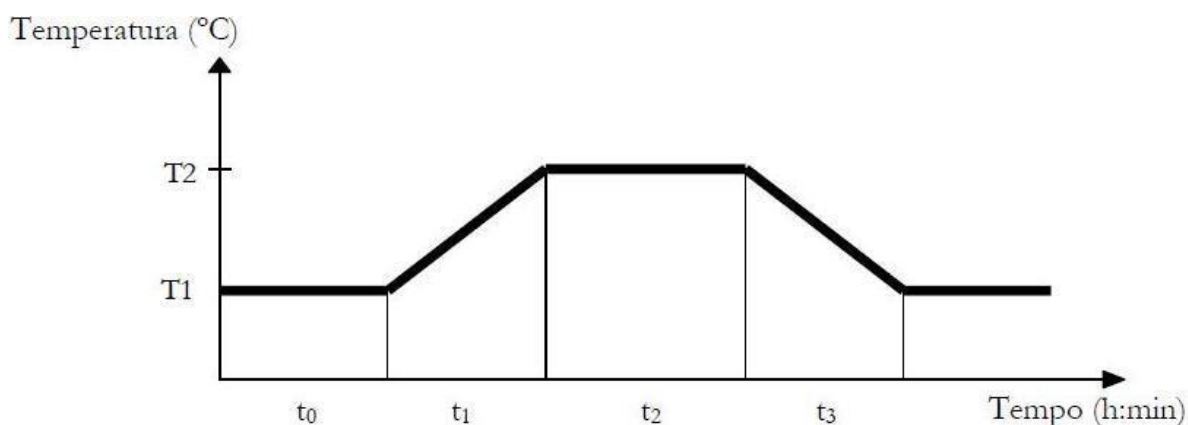
Conforme Camarini (1995) apud Bardela (2005) a cura térmica tem como principal objetivo acelerar as reações de hidratação do cimento, para obter-se uma resistência mínima desejada em um menor intervalo de tempo.

A indústria de pré-fabricados é a maior interessada nesse recurso, pois o calor atua como catalizador das reações de hidratação, aumentando a resistência inicial, o que agiliza o processo de fabricação, levando menos tempo para desmolde, reuso das formas e menor área de estocagem das peças.

De acordo com o autor anteriormente citado, a cura térmica, contém quatro períodos, que estão apresentados na figura 9:

- Período de espera ( $t_0$ ): tempo necessário para que ocorra a mistura do aglomerante com água até o início do aquecimento;
- Período de elevação da temperatura ( $t_1$ ): tempo em que ocorre o aumento gradual da temperatura até a máxima desejada;
- Período isotérmico ( $t_2$ ): período em que a temperatura se mantém constante na máxima desejada, depende da reatividade de cada cimento;
- Período de esfriamento ( $t_3$ ): tempo em que ocorre a diminuição gradual de temperatura, deve ter duração necessária para evitar choques térmicos.





**Figura 9** - Esquema do ciclo adequado de cura térmica

**FONTE:** CAMARINE, 1995

### 2.7.2 Efeitos da temperatura nos cimentos de escória

Camarini & Cincotto (1996), em estudos realizados sobre o efeito da cura térmica em cimentos de escória, constataram que as temperaturas mais elevadas tem efeito nas resistências das primeiras idades, e que há uma tendência de que a cura em temperaturas mais baixas influencie na resistência em idades mais avançadas.

Também foi constatado a formação de etringita secundária em concretos com cimentos de escória, curados à temperatura de 60<sup>o</sup> e 90<sup>o</sup>. Essa reação pode causar danos ao concreto função da presença ou não de vazios ou microfissuras capazes de acomodar seus cristais.

Os cimentos de escória apresentam uma sensibilidade em relação à variação de temperatura. Conforme aumenta-se a quantidade de escória a taxa de liberação de calor diminui. Em análise calorimétrica representada na figura 10 nota-se que a hidratação apresenta dois picos: o primeiro referente a hidratação do cimento e o segundo referente aos compostos de escória. Quando curados termicamente a uma temperatura de 60<sup>o</sup> a calorimetria apresentou um único pico e a taxa de liberação de calor é maior em um tempo menor (Camarini & Cincotto, 1996).

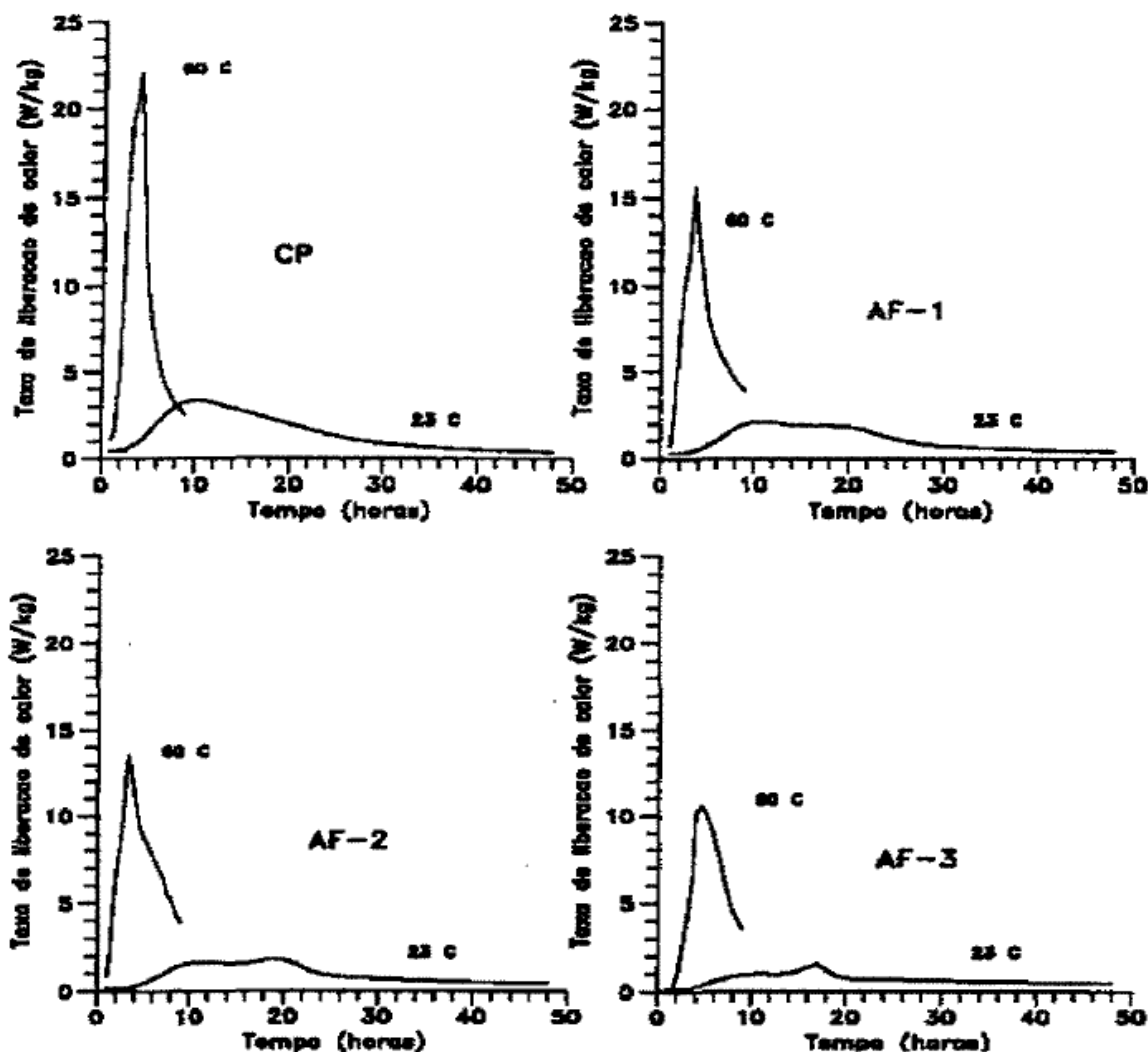


Figura 10 - Curvas calorimétricas dos cimentos Portland comum e de alto-forno, a 23 e 60°C.  
AF-1: 35% de escória; AF-2: 50% de escória; AF-3: 70% de escória

FONTE: CAMARINI & CINCOTTO, 1996.

Em outro estudo de cura realizado por Angulski da Luz e Hooton (2015), levou em consideração a influência da temperatura nos cimentos supersulfatados. Nesse trabalho utilizou-se duas escórias com teores de alumínio diferentes, (13,74% e 8,15%), e cura por um período de 24h iniciais, nas temperaturas de 13<sup>o</sup>, 23<sup>o</sup>, 38<sup>o</sup> e 50<sup>o</sup> C. onde observou-se que pra a escória de alta alumina o desempenho foi melhor para todas as temperaturas de cura quando comparadas com a de baixa alumina. Também notou-se que para a escória de baixa alumina quanto maior a temperatura de cura melhor as resultados à compressão, já para a escória de alta alumina os melhores resultados foram observados a temperatura de 13<sup>o</sup> C, porém em temperaturas mais altas os resultados foram superiores ainda do que quando curado aos 23<sup>o</sup> C.

Já em estudos recentes realizados por Suwan (et al., 2016), onde desenvolveu-se pesquisa relacionada à cura térmica do CAT, e variou-se a temperatura de 10<sup>0</sup> C a 70<sup>0</sup> C durante um período inicial de 24h e após o desmolde das amostras, mantidas e câmara com temperatura controlada de 20<sup>0</sup> C.

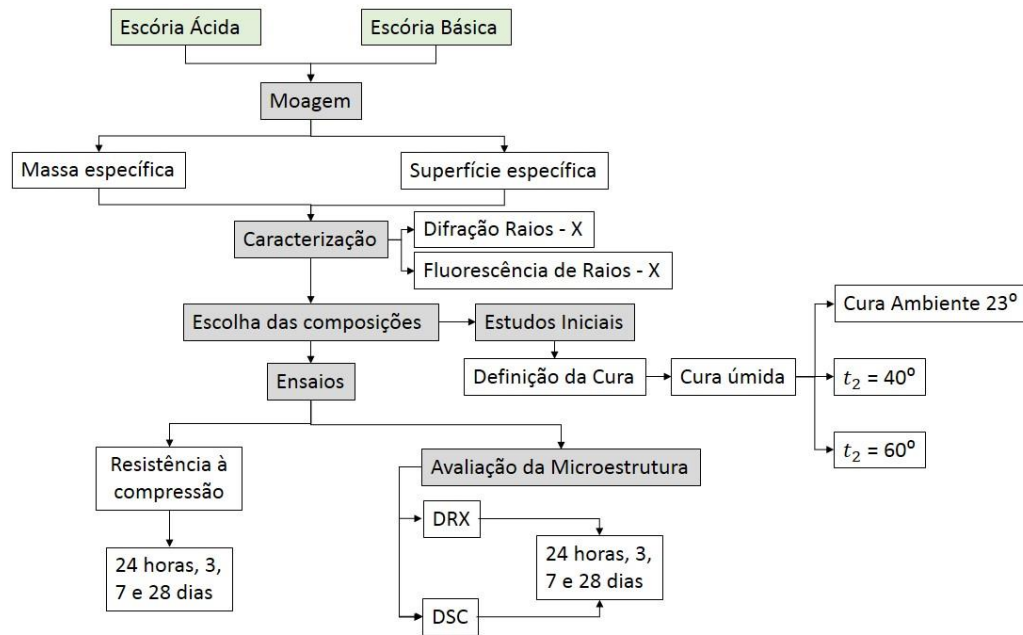
Nesse estudo Suwan (et al., 2016) ressaltou que materiais pozolânicos, melhoram suas propriedades mecânicas quando expostas a temperaturas mais elevadas, o que interfere na cinética de hidratação e produção de C-S-H adicional. O que foi notado também na cura do CAT, onde sua resistência aumentou, quando a temperatura de cura aumentou. Os efeitos da temperatura se dão pela aceleração do processo de hidratação que fornece o Ca(OH)<sub>2</sub> para a reação pozolânica e então produz-se um C-S-H secundário que proporciona mais resistência mecânica ao sistema.

Suawan (et al., 2016) observou também que estruturas mais homogêneas e compactas foram obtidas quando curada a temperaturas de 10<sup>0</sup> a 40<sup>0</sup> C e pareceu mais densa a temperaturas de 50<sup>0</sup> a 70<sup>0</sup> C. Em relação a resistência à compressão, a temperatura de cura ideal foi encontrada entre 30<sup>0</sup> a 40<sup>0</sup> C, que alcançaram resistência de aproximadamente 40 Mpa.

### **3. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O objetivo deste estudo é analisar a influência da temperatura no ganho de resistência e formação de compostos do cimento álcali-ativado.

Neste capítulo estão apresentados o preparo e caracterização das matérias-primas e análises empregadas, com o intuito de comparar a resistência à compressão do CAT em diferentes temperaturas.



**Figura 11** - Diagrama do programa experimental.

**FONTE:** Autoria própria

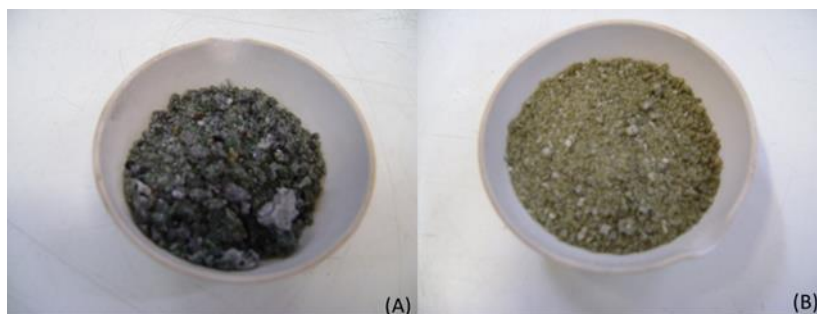
Na figura 11 tem-se o diagrama do programa experimental desenvolvido para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados.

A metodologia empregada para a caracterização das matérias-primas, moldagem e ensaios foi baseada em normas e procedimentos usualmente empregados para materiais à base de cimento Portland.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Escórias

Na figura 12 aparece os dois tipos de escória utilizados, no trabalho. A escória (A) vinda de forno de alto forno com utilização de carvão vegetal e a outra de alto forno a coque (B).

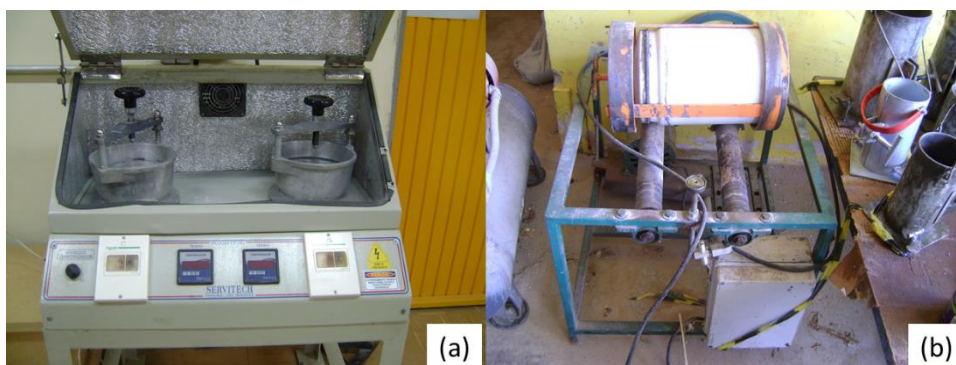


**Figura 12 - (A) Escória granulada de alto forno a carvão vegetal (B) Escória granulada de alto forno a coque**

**FONTE:** Autoria própria

### 3.1.1.1 Preparação

Primeiramente seca-se a escória em estufa por aproximadamente 24h em temperatura de 105<sup>o</sup>. Após moeu-se em moinho de bolas (figura 13a) por 2 horas a escória B e escória A por 10horas em outro moinho (figura 13b).



**Figura 13 - Moinho de bolas**

**FONTE:** Autoria própria

A diferença de tempos de moagem em que as escórias foram submetidas, tem interferência na finura apresentada, pois desejou-se que as finuras das duas escórias estivessem parecidas para melhor análise de resultados.

### 3.1.1.2 Caracterização

Para a determinação das finura da escória realizou-se o ensaio de permeabilidade ao ar (Blaine), e a massa específica, conforme a tabela 4.

**Tabela 4:** Caracterização física da escória

Escória	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)
<b>A</b>	2,85	4361,26
<b>B</b>	2,92	4677,24

**FONTE:** Autoria própria

### 3.1.1.3 Espectroscopia por Fluorescência de Raios – X

A composição química da escória representada na tabela 5, foi realizada por análise semi quantitativa por fluorescência de raios – X no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas - LAMIR do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

**Tabela 5:** Composição química da escória A e escória B

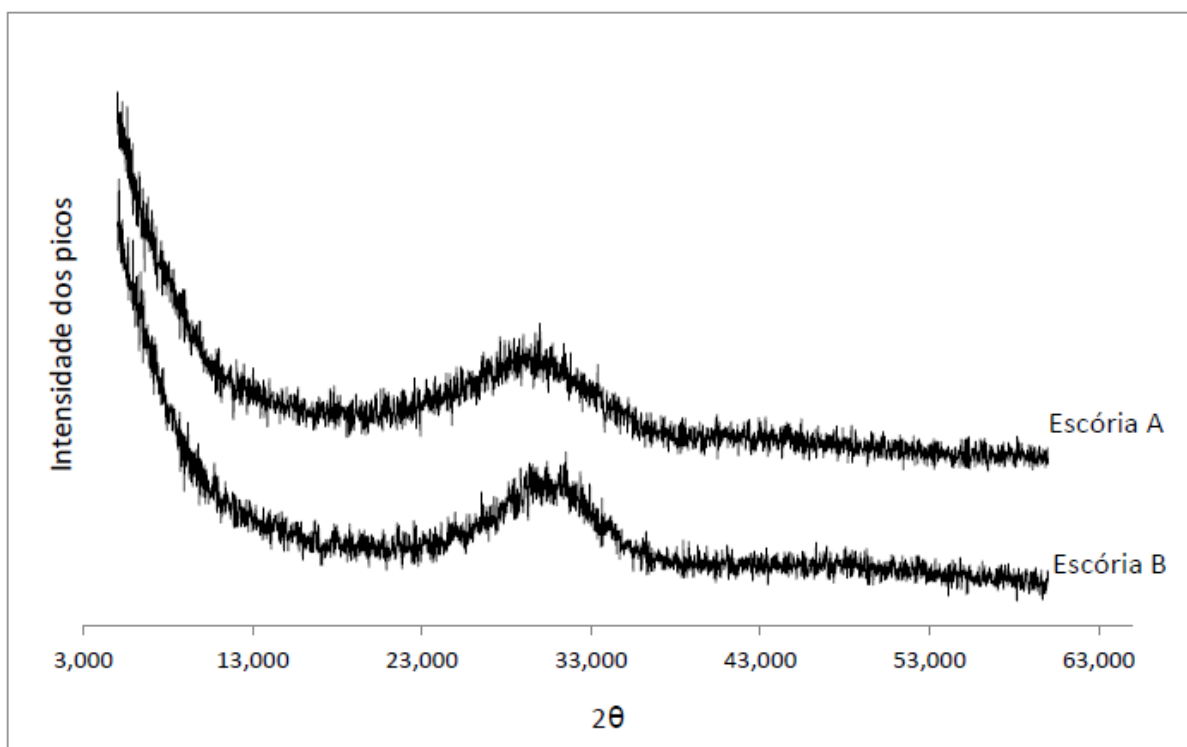
Componente	Escória A	Escória B
SiO <sub>2</sub>	38.1	32.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>13.9</b>	<b>8.2</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.3	0.8
CaO	37.0	49.5
MgO	6.2	5.0
SO <sub>3</sub>	0.1	1.4
Na <sub>2</sub> O	0.2	0.1
TiO <sub>2</sub>	0.8	0.6
MnO	1.1	1.3
CaO/SiO <sub>2</sub>	0.97	1.54

**FONTE:** Autoria própria

Para a relação CaO/SiO<sub>2</sub>, que classifica as escórias como ácidas e básicas, verifica-se que a escória A apresenta valor de 0,97, sendo assim, considerada escória ácida e a escória B apresenta o valor de 1,54 para a relação, considerada assim escória básica.

## Difração de Raios – X

De acordo com a análise de difração de raios – X, apresentada na figura 14 a escória não apresenta picos característicos, podendo ser classificada como um material amorfo e com ausência de um arranjo ordenado de átomos.



**Figura 14** - Difração de raios – X da escória ácida (A) e (B).

**FONTE:** Autoria própria

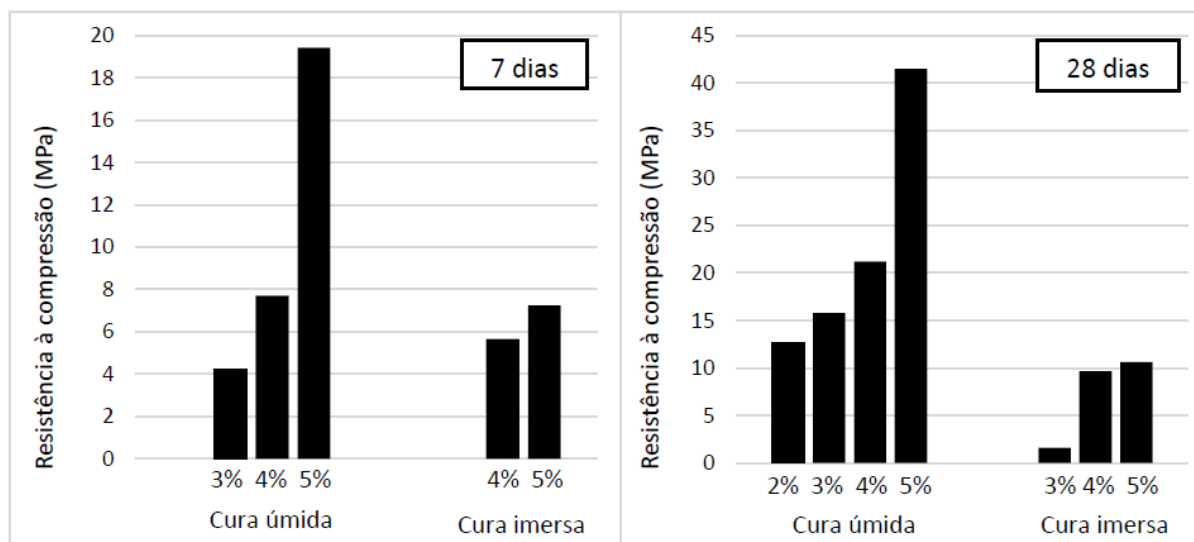
### 3.1.2 Ativador alcalino

Conforme a indicação de diversas literaturas e por apresentar bons resultados o ativador alcalino utilizado foi o hidróxido de sódio (NaOH).

## 3.2 MÉTODOS

### 3.1.2 Definição dos teores de ativador

Em estudo realizado por Langaro (2016) (figura 15), onde foram avaliados diversas proporções de ativador para a composição do CAT, obteve-se melhores resultados com teores de 5% de ativador, por isso, para o presente estudo decidiu-se manter a proporção de 5% para melhor comparativo de resultados.



**Figura 15** - Resistência à compressão (7 e 28 dias) escória ativada com NaOH (cura imersa e úmida).

**FONTE:** LANGARO, 2016

### 3.2.2 Definição do processo de cura

Baseado na literatura constata-se que processo de cura térmica nas primeiras idades, proporcionam maiores ganhos de resistência, o que contribui na utilização desse processo na indústria de pré-moldados.

Dessa forma, utilizou-se variação de temperatura para avaliar o ganho de resistência do CAT nas primeiras idades, e a interferência nas idades mais avançadas.

Conforme apresentado anteriormente na figura 17, Langaro (2016) observou que a cura úmida apresentou melhores resultados, assim o processo de cura utilizado foi cura úmida e térmica.

A cura úmida se dá por corpos de prova suspensos, sem contato direto com a água, sendo que a umidade se mantém constante aproximadamente 80%.

O processo de cura térmica utilizada baseou-se no processo realizado por Suawan (et al., 2016), onde as amostras foram submetidas a várias temperaturas pelo



período de 24h iniciais. E como os melhores resultados para resistência à compressão foram em temperaturas mais altas utilizou-se apenas temperaturas superiores a temperatura ambiente e a temperatura ambiente para comparativo.

Assim o processo de cura térmica ficou definido por:

- Submissão das amostras pelo período inicial de 24h em estufa pré aquecida nas temperaturas de 40<sup>o</sup> e 60<sup>o</sup> C, em cura seca.

-Submissão de amostras pelo período inicial de 24h em câmara úmida na temperatura de 23<sup>o</sup>, em cura seca.

- Desmolde das amostras e submissão das mesmas em câmara úmida em temperatura de 23<sup>o</sup>, com cura úmida até a idade de rompimento.

### 3.2.3 Preparação das pastas e argamassas

Como Langaro (2016), o preparo das argamassas seguiu o traço, 1: 2,75: 0,485 (aglomerante: agregado: água).

Dessa forma, realizou-se a pesagem dos materiais, e a diluição do ativador em água. A mistura dos materiais se dará pelo seguinte processo:

- Água, ativador e escória, por 30 segundos em velocidade baixa;
- Adição gradual de areia por 30 segundos em velocidade baixa;
- Aumento de velocidade por 30 segundos;
- Deixar a argamassa em descanso por 1minuto e 30 segundos;
- Agitação em velocidade alta por 1 minuto.

Depois de produzida a argamassa, será despejada em moldes prismáticos 40x40x16mm, em duas camadas com 30 golpes cada camada.

Para os ensaios com pastas o traço ficou de 1:0,4 (aglomerante: água), seguindo o mesmo processo de cura das argamassas.

### 3.2.4 Caracterização das pastas e argamassas

#### 3.2.4.1 Resistência à compressão

Para os ensaios de resistência à compressão utiliza-se um aparelho da marca EMIC (DL-30000, EMIC, Brasil), disponível no laboratório de materiais da UTFPR – Campus Pato Branco, com taxa de aplicação de carga de 1mm/min.

Para esses ensaios confeccionou-se 12 corpos de prova para cada temperatura de cura, sendo 6 para cada tipo de escória, assim rompeu-se os corpos de prova para idades de 24 horas, 3, 7 e 28 dias.

#### 3.2.4.2 Avaliação da microestrutura

##### - *Processo de interrupção da hidratação*

O processo de interrupção de da hidratação das pastas se faz necessário pra todos os ensaios de avaliação de microestrutura.

Quando as amostras atingem a idade de ensaio, elas serão colocadas submersa em acetona por 2h, e após esse período a acetona é retirada por meio de filtro buchner acoplado a bomba a vácuo.

Para as análises de DRX e DSC, é necessário que as amostras sejam moídas, já para o MEV, somente trituradas em pequenos fragmentos.

##### - *Difração de raios – X ( DRX)*

O ensaio de espectroscopia por difração de raios – X, será realizado na UTFPR – Campus Pato branco, por meio do equipamento da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, serão avaliadas as amostras de acordo com o comprimento de onda, ângulo de varredura, passo, idade de 24 horas,3, 7 e 28 dias.

##### - *Análise térmica (DSC- Calorimetria Exploratória Diferencial)*

O ensaio de calorimetria exploratória diferencial, será realizado na central de análises da UTFPR, Campus Pato Branco, com o equipamento da marca TA *Instruments*, modelo SDT Q20 nas seguintes condições:

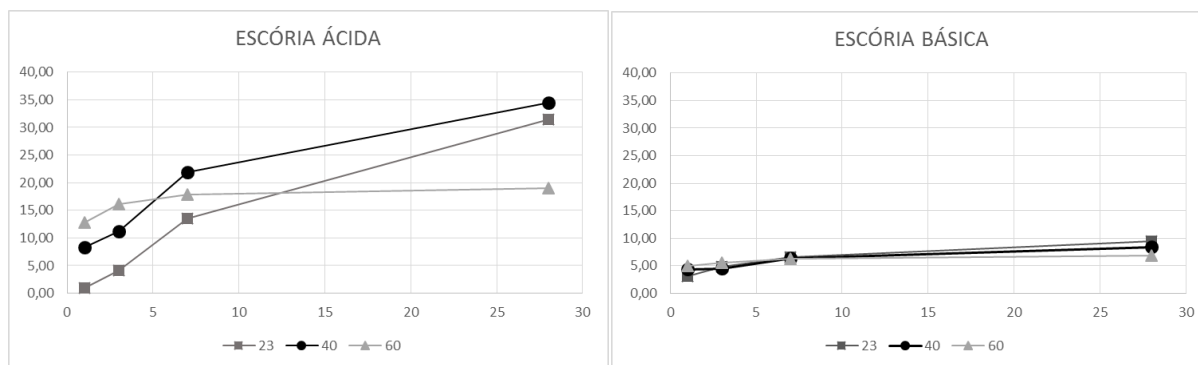
Faixa de aquecimento de 30 °C a 600 °C;

- Taxa de aquecimento de 10°C min<sup>-1</sup>;
- Atmosfera inerte: nitrogênio,
- Fluxo de 100mL min<sup>-1</sup>;
- Porta amostra de alumínio hermeticamente fechado com um furo na tampa;
- Idades: 24 horas, 3, 7 e 28 dias.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

##### 4.1 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão para as escórias A e B, para cura úmida térmica (40°C e 60°C), para as idades de 24 horas, 3, 7 e 28 dias estão representados na figura 16.



**Figura 16** - Resistência à compressão escória A e B, respectivamente.

**Fonte:** Autoria própria

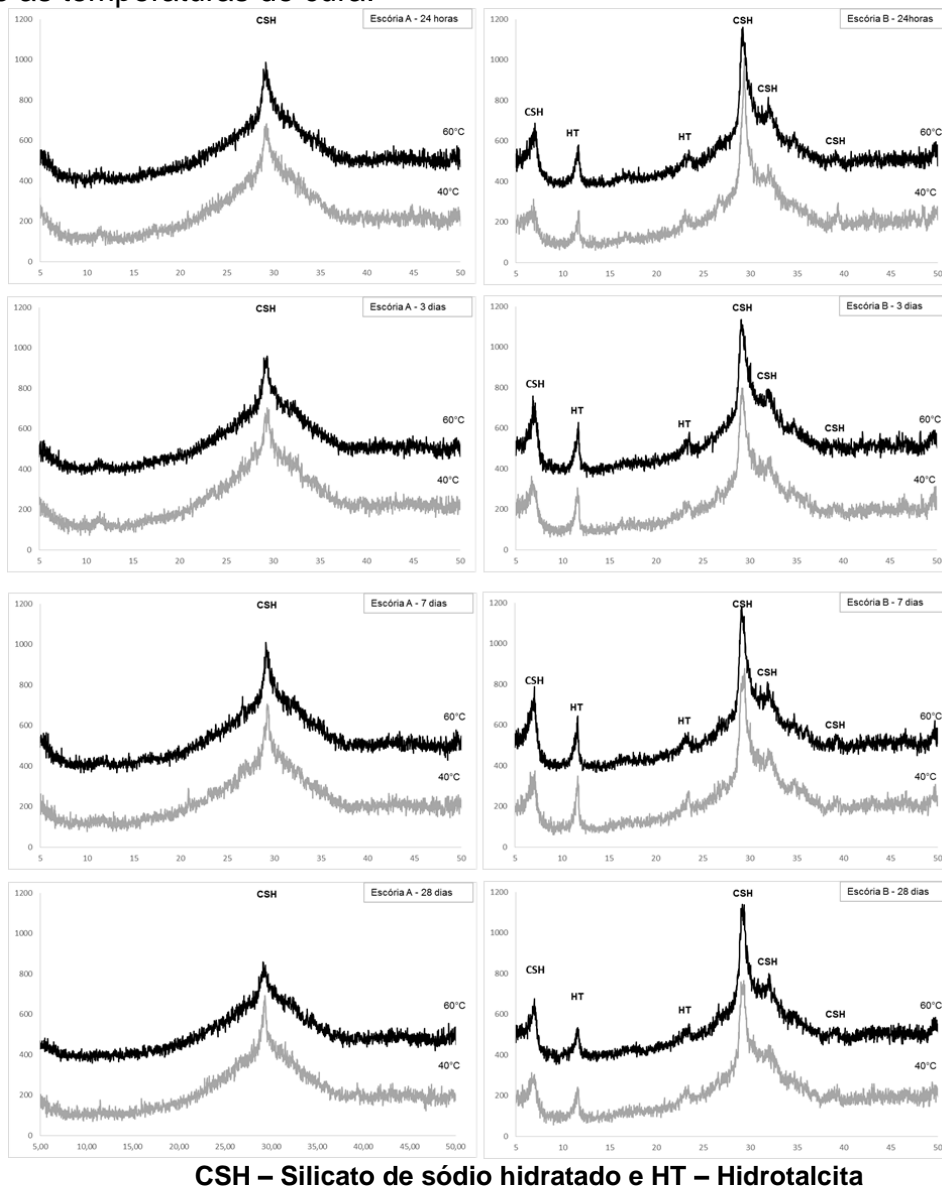
Conforme bibliografia anteriormente citada e em análise aos resultados de resistência à compressão obtidos pode –se notar que a cura úmida interfere positivamente na resistência mecânica nas primeiras idades, sendo que para a escória A, a resistência obtida foi significativamente maior que para a escória B. Nota-se ainda que para a idade de 24 horas a escória A, curada à temperatura de 60°C, obteve o melhor resultado, porém sua resistência aos 28 dias não foi tão satisfatória.

Assim, verifica-se que o melhor processo de cura térmica se deu aos 40°C. Já para a escória B a cura térmica não teve grande importância no ganho de resistência.

## 4.2 Análise microestrutural

### - Difração por Raio-X

Os difratogramas da figura 17 estão representados de acordo com o tipo de escória e as temperaturas de cura.



**Figura 17 -** Difratogramas das pastas de escórias ativadas A e B, submetidas a cura térmica de 40°C e 60°C.

Fonte: Autoria Própria.

Os difratogramas da escória A apresentou um pico principal em torno de 25° e 35°, o qual se refere à fase C-S-H, o que apresenta uma estrutura amorfa.

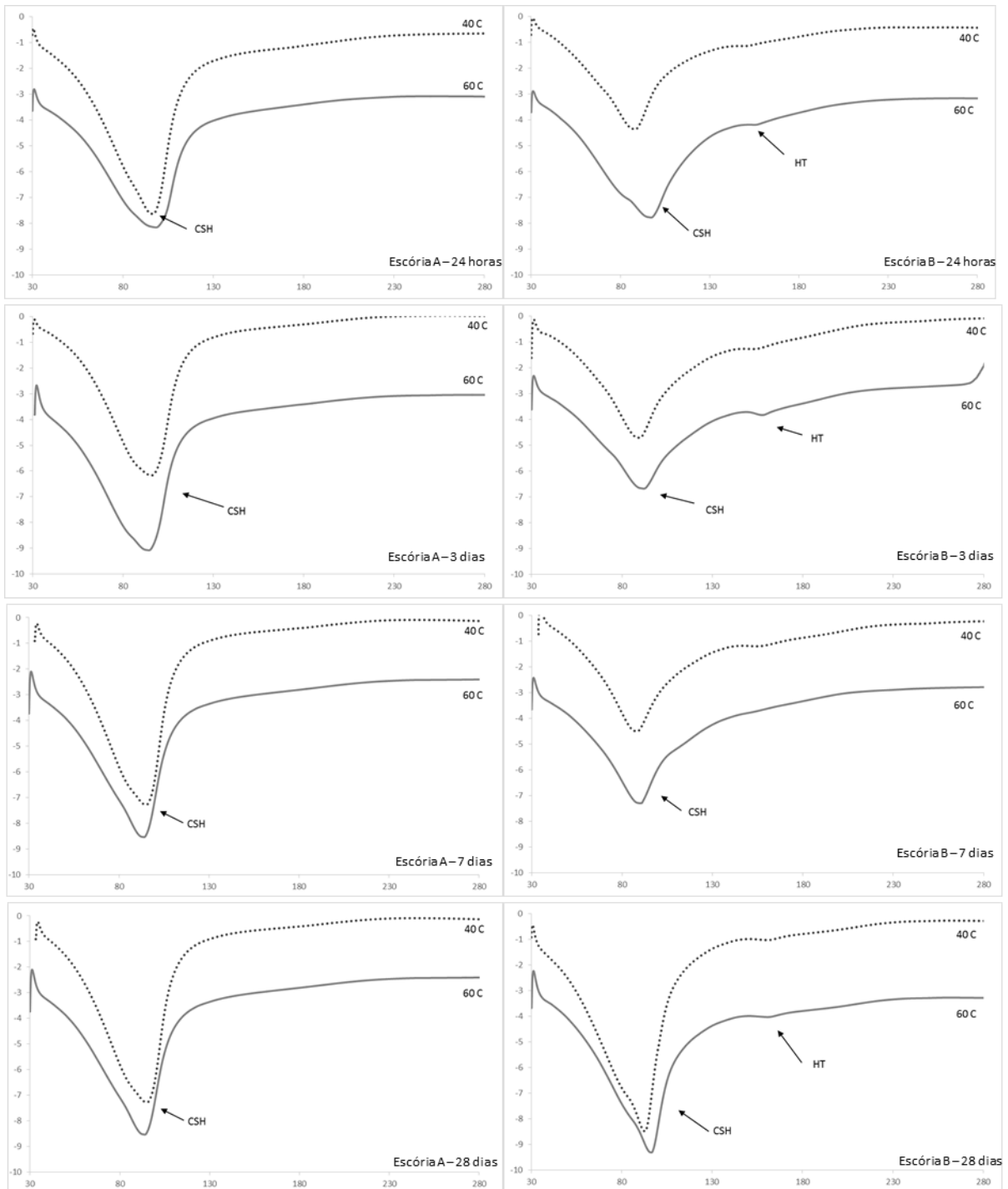
Já para os difratogramas de escória B, nota-se picos mais bem definidos e regulares, formando não apenas C-S-H, como também Hidrotalcita.

A temperatura também influenciou na quantidade de compostos formados, sendo que para a escória A, houve a formação de maior quantidade C-S-H, para cura de 40°C aos 28 dias.

Nesse contexto, nota-se que para a escória B a temperatura influenciou mais nas primeiras 24 horas, onde apresentou os maiores picos.

#### - Análise Térmica (DSC)

A partir das análises de DSC representadas na figura 18, observa-se a formação dos compostos hidratados de forma a confirmar as demais análises (DRX), do mesmo modo que nas análises de DRX, nota-se que a escória A, apresentou um pico definido, referente ao C-S-H e para a escória B, apresenta-se também o pico referente a hidrotalcita.



**Figura 18 - Análise térmica escória A e B e temperaturas de cura de 40<sup>o</sup> e 60<sup>o</sup>.**

**CSH – Silicato de sódio hidratado e HT – Hidrotalcita**

**Fonte: Autoria própria.**

## 5 CONCLUSÕES

Neste estudo apresentou-se a análise da temperatura na cura de escórias de composição química distintas, visando a obtenção de melhores resultados de resistência à compressão para idades iniciais. Bem como, a influência da cura nos mecanismos de hidratação.

Analisando as técnicas aplicadas conclui-se que a escória básica utilizada na produção de CAT não desenvolve bons resultados para resistência à compressão mesmo quando submetida a cura térmica. Notou-se ainda que para a escória ácida a resistência à compressão foi superior ao da escória básica, sofrendo grande influência com o efeito da temperatura.

A temperatura de cura, influenciou positivamente nas resistências à compressão nas primeiras idades, sendo para a escória ácida com maior intensidade que para a escória básica.

Considerando as temperaturas de cura, os melhores resultados se deu aos 40°C, onde a resistência inicial se fez superior ao da cura em temperatura ambiente e manteve-se com melhores resultados aos 28 dias.

Em relação a microestrutura do CAT, o composto C-S-H foi observado em ambas as escórias, pelas análises de DSC e DRX, e identificação de hidrotalcita para as análises da escória básica, não havendo grande distinção entre as temperaturas de cura. A escória ácida apresentou-se mais amorfa, o que pode ter influenciado no desenvolvimento de resistência mecânica.

## **SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS**

Com o intuito de analisar a influência da temperatura na cura dos CAT's, surgiram alguns questionamentos o que sugere-se novos estudos:

- Influência da cura térmica na durabilidade dos CAT's;
- Influência da cura térmica na variação dimensional dos Cat's;
- Comportamento dos CAT's quando submetidos a temperaturas mais baixas.



## REFERÊNCIAS

ANGULSKI DA LUZ, C.; HOOTON, R. D. Influence of curing temperature on the process of hydration of supersulfated cements at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 69–75, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991, 6 p.

\_\_\_\_\_. NBR 13276:2005: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005, 3 p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA de CIMENTO PORTLAND - ABCP. “Guia básico de utilização do Cimento Portland.” Boletim técnico 106, São Paulo, 2002.

ACTIVATED MATERIALS – RESEARCH, PRODUCTION AND UTILIZATION. 293-302. 2007.

AITCIN, P. C. Binders for Durable and Sustainable of Concrete. USA e Canada: Taylor & Francis, 2008.

AITCIN, P. C.; MINDESS, S. Sustainability of Concrete. USA e Canada: Spon Press, 2011.

ALONSO, S.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, v. 47, 55–62 p., 2001b.

BEN HABA, M.; LOTHENBACH, B.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag – Part II: Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Cement and Concrete Research*, v. 42, ed. 1, 74-83 p., 2012.

BILIM, C. et. al. Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 2012.

BARDELLA, P. S. 1º Encontro nacional de pesquisa projeto produção em concreto pré moldado. *Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa*. São Carlos – SP, nov. 2005.

BATTAGIN, A. F.; ESPER, M.W. Contribuição ao conhecimento das propriedades do cimento portland de alto-forno. ABCP - Associação brasileira de Cimento Portland, 1988: 123.

BINA, P.; CASTRO, P. R. F, YOSHIMURA, H. N. Metodologia de análise e aprovação de utilização de rejeitos industriais na construção civil: estudo de casos de uso de fundição de descarte na construção civil. IBRACON- 44º CONGRESSO BRASILEIRO, 2002.

CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland e escória de alto-forno submetidas a cura térmica. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995. Tese de Doutorado- EPUSP, 1995.

CAMARINI, G & CINCOTTO, M. A. Cura térmica: características do início de hidratação dos cimentos com escórias. In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, São Paulo, 1996. Anais ... São Paulo: ABCP, 1996a. v 1, p. 21 - 36.

CHEN, W.; BROUWERS, H. J. H. The hydration of slag, part 1: reaction models for alkali-activated slag. *Journal of Materials Science*, v.42, ed. 2, 428-443 p., 2007. DOI 10.1007/s10853-006-0873-2. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2000, Fortaleza. Anais ... Fortaleza, IBRACON, 2000. 9 pp.

ESCALANTE-GARCÍA, J. I.; SHARP, J. H. The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. *Cement and Concrete Research*. 695-702. 2001.

GRUSKOVNJAK, A. et al. "Hydration mechanisms of super sulphated slag cement." *Cement and Concrete Research*. 983–992. 2008.

HEWLETT, P. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 4 ed. Elsevier Science & Technology Books. 2004. ISBN: 0750662565.

INSTITUTO BRASILEIRO de MEIO AMBIENTE – IEMA. Nota metodológica processos industriais. Sistema de estimativa de emissão de gases do efeito estufa, Novembro 2013.

JOHN, M. V. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. 1995. 199f. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

JOHN, V. M. Cimento de escória ativada com silicatos de sódio. 1995. 199 p. Tese de Doutorado em Engenharia. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo–USP. São Paulo – SP. 1995.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduo na construção civil: construção à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 p. Tese (livre docência). Escola politécnica da Universidade de São Paulo. 2000.

JUENGER, M.C.G. et al. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*. 1232–1243. 2011.

KAVALEROVA, E. Alkaline cements, and concretes: economical, ecological and legislative aspects. INTERNATIONAL CONFERENCE ALKALI

LANGARO, E. A. Cimento álcali ativado a partir da valorização da escória de alto forno a carvão vegetal. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2016.

LEVY, S. & HELENE, P. Cura. Como, quando e por que. *Techne*. n 20, p. 18-21, jan/ fev 1996.

LORENZETTI, U. V., FREDEL, M. C. & GLEIZE, P. Efeitos dos procedimentos de cura no comportamento do concreto: resistência a compressão e perda de massa. In: 4i

MALARD, A. A. M. Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais. 2009. 216f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

MASSUCATO, C. J. Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto. 2005. 122f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, São Paulo, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 674 p. São Paulo: IBRACON, 2008.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, IDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). Nota Técnica Plano Indústria Subsetor Cimento. Disponível em :< [http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl\\_1352304842.pdf](http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1352304842.pdf)>. Acesso em: jan. de 2016.

NORMA EUROPEIA - EN 15743. Supersulfated cement — Composition, specifications and conformity criteria. 2010.

NEVILLE, A.M. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do Concreto. 2 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013. 472 p.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2015.

O'ROURKE, B.; MCNALLY, C.; RICHARDSON, M. G. Development of calcium sulfate-ggbs-Portland cement binders. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 340–346, 2009.

PUERTAS F. et. al. Morteros de Escoria Activada Alcalinamente. *Propiedades y Durabilidad*, 2003.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, v. 22, ed. 7, 1305–1314 p. 2008a.

PAL, S. C; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 33, ed. 9, 1481–1486 p. 2003.

PINTO, T. A. Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2006. Disponível em: <[http://www.geopol.com.br/def\\_ault.asp?area= 01](http://www.geopol.com.br/def_ault.asp?area= 01)>. Acesso em: maio de 2016.

PROVIS, J.; DEVENTER, J. V. Alkali activated materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM. v. 13. Springer Netherlands, 2014. ISBN: 978-94-007-7671-5.

SHI, C.; DAY, R. L.; A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cements, *Cement and Concrete Research*, v. 25, ed. 6, 1333-1346 p., 1995.

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Resultados preliminares até dez.2015. Rio de Janeiro. 1 p., 2015.

SINDIFER, Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário. Belo Horizonte. 22 p., 2014.

SOUZA JÚNIOR, D. S. de S. Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente. 2007. 127f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

SUWAN, T.; FAN, M.; BRAIMAH, N. Micro-mechanisms and compressive strength of Geopolymer-Portland cementitious system under various curing temperatures. *Materials Chemistry and Physics* 180 (2016) 219e225.

THOMAZ, E. C. S. Hidratação do Cimento Portland. Notas de aula. 14 p. Disponível em: <  
[http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos\\_concretos/hidratacao\\_csh.pdf](http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/cimentos_concretos/hidratacao_csh.pdf) >. Acesso em: maio, 2016.

VIEIRA, A. A. P. Estudo do aproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha como substituição pozolânica em argamassas e concretos. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2005.