



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X
E ANÁLISE TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA
PARA CARACTERIZAÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND**

ANNE KELLY DE SOUZA MACHADO BORGES

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 30/Julho/2018.

**UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X E ANÁLISE
TERMODIFERENCIAL E TERMOGRAVIMÉTRICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE
CIMENTOS PORTLAND**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 30/07/2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

ANNE KELLY DE SOUZA MACHADO BORGES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Área de habilitação: Materiais de
Construção.

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Julho/2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu preciso agradecer à Deus, por sempre pôr em meu caminho as pessoas certas para todas as situações, e que todas elas me guiaram pelo caminho do bem. Agradeço aos meus pais, Gilvânia Moreira de Souza e Marcos Antônio Machado Borges, pelas lutas diárias na tentativa de mudar os rumos da nossa história e por depositarem essa confiança em mim. Especialmente, agradeço ao meu padrinho Felismar Nunes Reis, por ter me proporciona essa conquista, pois sem sua generosidade, nada disso teria sido possível. A todos os meus amigos que durante essa jornada, contribuíram de alguma forma, mas principalmente agradeço à Adriana Albuquerque Ferreiro e Mila Thaís Rezende e Silva, pois foram as que sempre estiveram comigo em todas as situações, me dando força, principalmente nos momentos mais difíceis. Não poderia deixar de agradecer à professora Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, que com toda a sua dedicação e sensibilidade me deu todo suporte à realização desse trabalho.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais e ao meu padrinho que, diante de todas as dificuldades, tornaram esse sonho possível. Dedico também à minha professora orientadora Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, por sua disponibilidade e sua atenção durante a realização desse trabalho.

Epígrafe

"O mundo da habilidade e o mundo da ciência são mundos diferentes, cuja fronteira não é suficientemente definida"

Lichtenstein, Norberto B.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).....	22
Figura 2: Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.....	22
Figura 3: Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.....	23
Figura 4: Silos verticais.	26
Figura 5: Moinhos de cru verticais.....	26
Figura 6: Definição de nomenclatura.....	27
Figura 7: Fluxograma das etapas da pesquisa.....	31
Figura 8: Equipamento utilizado para realização do ensaio de DTA e TG	32
Figura 9: Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fluorescência de raios-X.....	33
Figura 10: Curvas de análise térmica do Cimento CPV - ARI	34
Figura 11: Curvas de análise térmica do Cimento CPIV – RS	35
Figura 12: Curvas de análise térmica do Cimento CPII-E	35
Figura 13: Curvas de análise térmica do Cimento CPIII.....	36

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Principais compostos do cimento e evolução da resistência.....	21
Tabela 2: Fluorescência de raios-x dos cimentos Portland em estudo	37

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

CP	Cimento Portland
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CSH	Silicato de cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
DTA	Análise termodiferencial.
TG	Termogravimétrica.
C ₃ A	Tri-cálcio Aluminato
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₂ S	Silicato dicálcico
Mpa	Megapascal
J	Joule
J/g	Joule por grama
CaO	Óxido de Cálcio
NBR	Norma Brasileira

RESUMO

Cimento Portland é a denominação utilizada mundialmente para o insumo empregado na construção civil, tendo suas propriedades de início e fim de pega, finura, resistência, durabilidade, etc, definidas por sua composição química, atribuindo a este, alguns usos específicos. A caracterização química de um material é importante devido a necessidade de seleção adequada baseada no desempenho do sistema em estudo, podendo descrever aspectos de composição, estrutura, visando principalmente estimar o desempenho no período de vida útil do material, minimizando a possibilidade de degradação e falhas indesejáveis durante a utilização do produto. Neste estudo foram coletados quatro tipos de cimentos Portland, beneficiados em peneira ABNT 200 (abertura de 0,074mm) e submetidos aos ensaios através de análise termodiferencial e termogravimétrica e fluorescência de raios-x, identificando o comportamento térmico dos cimentos Portland frente a elevação da temperatura e foi determinada que composição química majoritária de todas as amostras é o Óxido de Cálcio(CaO), assim como os demais constituintes. Observou-se que os resultados obtidos corroboram com as normas técnicas e estudos existentes, indicando que as perdas de massa ocorrem em faixas de temperatura fixas e que é muito importante a caracterização minuciosa do cimento, por permitir reconhecer o comportamento de elementos e componentes produzidos com esse material.

Palavras-chave: aglomerante, caracterização, propriedades.

ABSTRACT

Portland cement is the name used worldwide for the input used in construction, having its properties of start and ending of casting, fineness, strength, durability, etc., defined by its chemical composition, attributing to it some specific uses. The chemical characterization of a material is important due to the need of adequate selection based on the performance of the studied system, being able to describe aspects of composition, structure, aiming mainly to estimate the performance during the useful life of the material, minimizing the possibility of degradation and undesirable faults during the use of the product. In this study four types of Portland cements were collected in the ABNT 200 sieve (0.074 mm aperture) and submitted to the tests through thermody- gravimetric and thermogravimetric analysis and x-ray fluorescence, identifying the behavior of Portland cements against temperature rise and it was determined that the major chemical composition of all samples is Calcium Oxide (CaO), as well as the other constituents. It was observed that the results obtained corroborate with the technical norms and existing studies, indicating indicating that mass losses occur in fixed temperature ranges and that it is very important the detailed characterization of the cement, since it allows to recognize the behavior of elements and components produced with this material.

Keywords: binder; characterization; properties

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. HIPÓTESE DA PESQUISA.....	16
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. <i>Objetivo Geral</i>	16
1.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	16
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC 16	
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. PRODUÇÃO DO CIMENTO (CLÍNQUER).....	18
2.2. MECANISMOS DE REAÇÃO E PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO.....	20
2.3. PROPRIEDADES DOS CIMENTOS	23
2.3.1. <i>Densidade</i>	23
2.3.2. <i>Finura</i>	24
2.3.3. <i>Tempo de pega</i>	24
2.3.4. <i>Resistência</i>	24
2.4.1. <i>Extração da matéria prima</i>	25
2.4.2. <i>Britagem</i>	25
2.4.3. <i>Moedura e mistura</i>	25
2.4.4. <i>Queima, moagem e expedição</i>	27
2.5. CLASSIFICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND	27
2.5.1. <i>CPII-Z – Cimento Portland composto com pozolana</i>	28
2.5.2. <i>CP II E – Cimento Portland composto com escória</i>	28
2.5.3. <i>CP II F – Cimento Portland composto com Fíler</i>	28
2.5.4. <i>CP III – Cimento Portland de Alto Forno</i>	28
2.5.5. <i>CP IV – Cimento Portland pozolânico</i>	29

2.5.6.	<i>CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial</i>	29
2.5.7.	<i>CP- RS – Cimento Portland resistente a sulfatos</i>	29
2.5.8.	<i>CP-BC – Cimento Portland de baixo calor de hidratação</i>	30
2.5.9.	CPB - Cimento Portland Branco	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1.	MATERIAIS.....	31
3.2.	METODOLOGIA	31
3.2.1	Coleta e seleção dos Cimentos Portland.....	32
3.2.3	Caracterização química dos cimentos Portland utilizados neste estudo	32
3.2.3.1	<i>Análise Térmica Diferencial (DTA) e Termogravimétrica (TG)</i>	32
3.2.3.2	<i>Fluorescência de raios-x</i>	33
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	39
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	39
	REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

É crescente o interesse pela área de análise e caracterização de materiais devido à necessidade de seleção adequada do material baseado no desempenho do sistema em estudo. Dependendo das solicitações a que o material ou sistema será submetido, a caracterização poderá abranger a avaliação de propriedades mecânicas, elétricas, bioatividade, imunogenicidade, eletrônicas, magnéticas, ópticas, químicas, térmicas e até mesmos a combinação de duas ou mais destas propriedades (OREFICE et al., 2006).

O cimento Portland é um produto que se obtém pela pulverização do clínquer, constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos, a que não se fizeram adições subsequentes, exceto a de água e/ou a de sulfato de cálcio bruto, além de outros materiais, que podem ser intercominuídos com o clínquer, em teor que não exceda a 1,0 %.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, no Brasil, o cimento começou a ser produzido em escala industrial a partir de 1926. Na década de 70, a produção cresceu intensamente, com uma elevação do patamar de 9,8 milhões de toneladas por ano para 27,2 milhões de toneladas no início dos anos 80, período em que a recessão da economia nacional provocou queda no consumo.

Atualmente, o cimento é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo componente básico de concretos e argamassas. E, o conhecimento de sua composição química e mineralógica, permite obter propriedades físicas e mecânicas específicas.

A caracterização de um material descreve os aspectos de composição e estrutura (incluindo defeitos), dentro de um contexto de relevância para um processo, produto ou propriedade em "particular" e visa principalmente estimar o desempenho no período de "vida útil" do material, minimizando a possibilidade de degradação e falhas indesejáveis durante a utilização do produto.

O desenvolvimento sistemático de novos materiais depende fortemente de sua caracterização em diversos níveis de resolução (VAN VLACK, 1997). Estrutura, microestrutura e geometria de defeitos, assim como composição

química e distribuição espacial são parâmetros importantes para se determinar o comportamento de materiais em aplicações específicas (AMELINCKX et al., 2007).

Caracterizar um material, consiste em analisar o seu comportamento no tocante as suas partículas sub-atômicas, aos seus átomos, aos seus arranjos atômicos e, finalmente, ao nível macroscópico, apresentando assim, dados sobre suas características básicas e também sobre o processamento até o momento de ser empregado (SCHACKELFORD, 1995).

1.1. JUSTIFICATIVA

Os materiais estão intimamente ligados à existência e a evolução da espécie humana e desde o início da civilização são usados com o objetivo de melhorar a qualidade de vida do ser humano. Para que estes sejam utilizados na construção civil, devem atender as exigências físicas e mecânicas de acordo com a normalização, como resistência, durabilidade, trabalhabilidade, dentre outras, visto que, o setor da construção civil necessita oferecer para o mercado, materiais que tenham boa qualidade e vida útil.

Neste sentido, como o Cimento Portland é o elemento mais utilizado na construção civil, o conhecimento de suas propriedades químicas e microestruturais são necessárias para compreender o comportamento e as propriedades de produtos que o tenham em sua composição, deste modo, a realização deste estudo é de fundamental importância para justificar o comportamento físico e mecânico dos elementos e artefatos da construção civil que tem como componente o cimento Portland.

Desse modo, para atender às exigências, uma caracterização microestrutural desejável envolve a determinação da estrutura cristalina, composição química, quantidade, tamanho, forma e distribuição das fases. A determinação da natureza, densidade e distribuição dos defeitos cristalinos também é em muitos casos necessária. Além disso, a orientação preferencial das fases (textura e microtextura) e suas diferenças de orientação também têm estreita relação com o comportamento mecânico dos materiais e os constituintes

presentes na sua microestrutura apresentam estruturas diferenciadas e exigem um número diversificado de técnicas para a sua análise e compreensão.

1.2. HIPÓTESE DA PESQUISA

Considera-se a seguinte afirmativa: *“O cimento Portland possui características químicas e térmicas muito distintas e significativas de fundamental importância para as propriedades de concretos e argamassas”*. Partindo-se dessa afirmação, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas que possibilitam a caracterização de cada tipo de cimento, possibilitando uma melhor compreensão das propriedades físicas e mecânicas de concretos, argamassa e outros produtos que fazem uso de cimento em sua composição.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. *Objetivo Geral*

Realizar a caracterização química de cimentos Portland, CPII-E, CPIII, CPIV, CPV.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- ✓ Determinar a composição química dos cimentos Portland através do ensaio de Fluorescência de Raio – X.
- ✓ Investigar o comportamento térmico dos cimentos Portland através das curvas termogravimétricas e termodiferenciais frente à elevação da temperatura.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

Introdução – Introdução, Justificativa, Hipótese da pesquisa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos tipos de cimentos que fazem parte desse estudo. O conteúdo é referente à composição, os mecanismos de reações, propriedades, metodologia de produção, classificação e aplicação prática de cada tipo de cimento.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.

Resultados e Discussões – São apresentados os resultados obtidos para a caracterização dos cimentos em estudo.

Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações sobre o estudo, bem como sugere-se estudos complementares para maior aprofundamento

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas neste estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O cimento Portland é um produto de uso consagrado na indústria da construção civil. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP 2002) é o material de construção de mais extenso uso no mundo.

Por definição, o cimento é um “aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea, clínquer Portland, gesso e adições normatizadas finamente moídas” (MARTINS et al., 2008).

Segundo Bauer (2005) o cimento Portland é obtido pela pulverização de *clinker* constituído essencialmente de silicatos hidratados de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego.

De acordo a ABCP, uma das melhores maneiras de conhecer as características e propriedades dos diversos tipos de Cimento Portland é estudar sua composição.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) reconhece 11 tipos de cimento e embora todos sejam indicados para uso geral na construção civil, há diferenças entre eles. Estas diferenças se dão de acordo com a proporção de clínquer e sulfatos de cálcio, material carbonático e de adições presentes em sua composição e podem diferir também em função de propriedades intrínsecas a cada tipo de cimento.

2.1. PRODUÇÃO DO CIMENTO (CLÍNQUER)

É o resultado da calcinação da mistura de calcário e argila e outros componentes químicos como silício, alumínio e ferro. Ele é matéria prima básica comum a todos os tipos de cimento.

Este material em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência a durabilidade. Essa característica adquirida é que faz dele um ligante hidráulico muito resistente (MODRO, 2008).

Para que o cimento apresente as propriedades desejáveis para uso em concreto, argamassa, faz-se necessário o uso de componentes, como:

- *Gesso*: É uma família de aglomerantes simples constituídos de sulfatos mais ou menos hidratados e anidros de cálcio, obtido a partir do aquecimento da gipsita. Este tem como função básica controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando misturado com água. Caso não se adicionasse o gesso à moagem do clínquer, o cimento, quando entrasse em contato com a água, endureceria quase que instantaneamente, o que inviabilizaria seu uso nas obras e por isso é uma adição presente em todos os tipos de cimento Portland (ABCP, 2002).
- *Escória de alto forno*: São obtidas nas indústrias siderúrgicas durante a produção de ferro. Quando resfriada lentamente, a escória se cristaliza, tomando uma forma mineralógica e química estável, sem atividade aglomerante (JOHN, 1995). Entretanto, se a temperatura for reduzida bruscamente, não há tempo para formação de cristais, transformando-se em estrutura vítrea, com poder aglomerante. Antigamente, as escórias de alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas, quando na presença de água, reagem e desenvolvem características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. A escória, por ter baixo calor de hidratação, faz com que as reações liberem menos calor, fazendo dela um aglomerante ideal para evitar problemas de durabilidade de concretos. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, e obter como resultados, melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final.
- *Material Pozolânico*: Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros (ABCP, 2002). São materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que,

quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

- *Materiais carbonáticos:* Os materiais carbonáticos são moídos e calcinados para formar o material fíller que possui uma granulometria muito fina. Esse material serve para ocupar os espaços vazios entre as demais partículas do cimento, servindo como um lubrificante entre as partículas do cimento. A adição desse componente proporciona uma melhor trabalhabilidade assim com diminui a permeabilidade das argamassas.

2.2. MECANISMOS DE REAÇÃO E PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO

Os compostos anidros do cimento Portland reagem com a água, num processo conhecido por hidrólise, dando origem a compostos hidratados de duas categorias: compostos cristalinos e o gel.

Segundo Varela (2008), resumidamente, o que ocorre é que um grão de cimento que tenha cerca de 50 μ de diâmetro médio, entrando em contato com a água, começa, no fim de algum tempo, a apresentar, em sua superfície, sinais de atividade química, pelo aparecimento de cristais que vão crescendo lentamente e pela formação de uma substância gelatinosa que o envolve. O componente que se forma inicialmente possui uma porcentagem muito elevada de água e é designada por gel.

Os compostos cristalinos, para desenvolverem-se, necessitam da presença de água, que em tempo exíguo é inteiramente transformada em gel. O processo de desenvolvimento dos cristais se faz retirando a água do gel instável, que à medida que vai perdendo água, transforma-se em gel estável e torna-se responsável, em grande parte, pelas propriedades mecânicas de resistência das pastas hidratadas – endurecidas.

Em uma análise mais detalhada, detecta-se que os principais compostos, silicatos tricálcicos e dicálcicos, durante a reação com água, liberam hidróxido de cálcio (CaOH_2).

Os cristais que se formam apresentam-se com formas alongadas, prismáticas, ou em agulhas de monossilicatos de cálcio hidratados e de aluminatos hidratados.

Esses cristais aciculares acabam se entrelaçando à medida que avança o processo de hidratação, criando a estrutura que vai assegurar a resistência típica das pastas, argamassas e concretos. Os espaços vazios são preenchidos principalmente pelo gel, hidróxido de cálcio e água.

Inicialmente o aluminato entra em atividade e, logo a seguir, o C_3S ; esses dois elementos, para se hidratarem, retiram a água que necessitam do gel instável e a formação de cristais hidratados se inicia.

À medida que o tempo passa, o gel vai cedendo cada vez mais água até transformar-se, como já foi dito, em gel estável, como uma estrutura sub-cristalina que impede a saída de novas quantidades de água (VARELA, 2008). A Tabela 2 apresenta os principais compostos do cimento, bem como a atuação destes na evolução da resistência de concretos e argamassas.

Tabela 1: Principais compostos do cimento e evolução da resistência.

Tempo	C₃A	C₃S	C₂S
3 horas	4,35	1,68	-
1 dia	-	2,25	0,28
3 dias	5,68	-	-
7 dias	-	4,32	0,62
28 dias	5,68	4,44	0,83
5 meses	-	-	3,5

FONTE: Varela (2008).

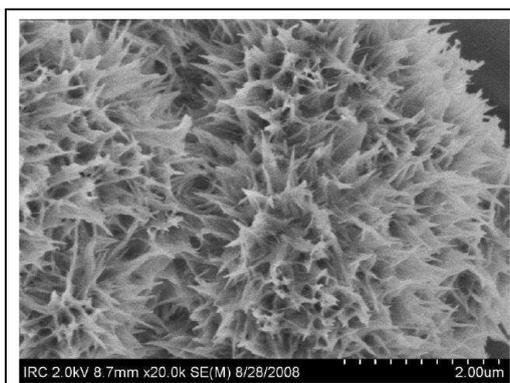
Desta forma, conforme apresentado na Tabela 1, evidencia que a resistência do cimento Portland:

- a) Até os 3 dias: é assegurada pela hidratação dos aluminatos e silicatos tricálcicos;
- b) Até os 7 dias: praticamente pelo aumento da hidratação de C_3S ;
- c) Até os 28 dias: continua a hidratação do C_3S responsável pelo aumento de resistência, com pequena contribuição; e,
- d) Acima de 28 dias: o aumento de resistência passa a ser devido à hidratação de C_2S .

Mehta e Monteiro (2008) citam os principais produtos das reações de hidratação do cimento (sólidos da pasta):

- Silicato de cálcio hidratado (C-S-H): estruturas pequenas e fibrilares que constituem de 50 a 60% do volume dos sólidos da pasta, com morfologia variando de fibras pouco cristalinas até redes reticulares. A excelente resistência mecânica e química do material é atribuída principalmente às forças de Van der Waals. A Figura 1 ilustra uma micrografia do cimento apresentando cristais de silicato de cálcio hidratado.

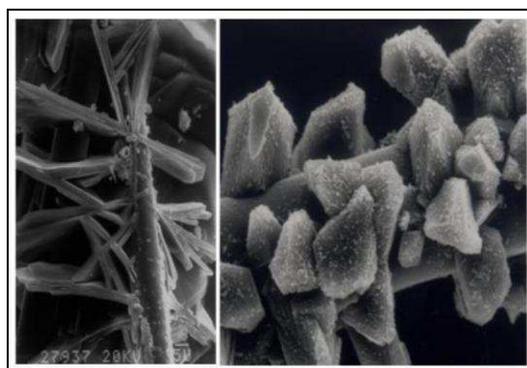
Figura 1: Cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).



FONTE: Alizadeh (2011).

- Hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$: os grandes cristais de hidróxido de cálcio (portlandita) constituem de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta, tendendo a formar cristais grandes sob forma de prismas hexagonais, cuja morfologia depende da disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e impurezas do sistema. A Figura 2 ilustra as placas hexagonais de hidróxido de cálcio.

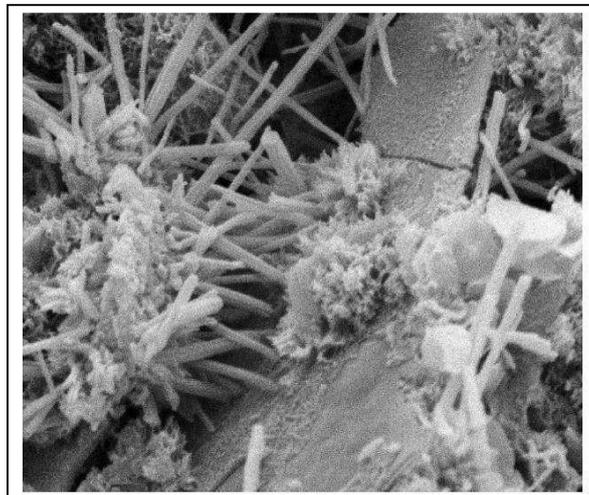
Figura 2: Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.



FONTE: Alizadeh (2011).

- Sulfoaluminato de cálcio: ocupa de 15 a 20% do volume de sólidos na pasta. Durante os primeiros estágios da hidratação, a relação iônica sulfato/alumina favorece a formação de trissulfoaluminato de cálcio hidratado (etringita), na forma de cristais prismáticos aciculares (formato de agulha).
- A etringita se transforma eventualmente em monossulfoaluminato de cálcio hidratado que cristaliza em placas hexagonais. A Figura 3 ilustra a etringita em formato de agulhas.

Figura 3: Placas hexagonais de hidróxido de cálcio.



FONTE: Alizadeh (2011).

- Grãos de clínquer não hidratado: em idades avançadas, devido à falta de espaço disponível, a hidratação *in loco* de partículas do clínquer resulta na formação de um produto de hidratação muito denso, de morfologia parecida com a partícula do clínquer original.

2.3. PROPRIEDADES DOS CIMENTOS

2.3.1. Densidade

A densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada 3,15, embora, na verdade possa variar para valores ligeiramente inferiores. Nas compactações usuais de armazenamento e manuseio do produto, a densidade aparente do mesmo é da ordem de 1,5. Na pasta do cimento, a densidade é um valor variável com o tempo, aumentando à medida que progride o processo de

hidratação. Tal fenômeno é conhecido como retração, esta ocorre nas pastas, argamassas e concretos (BAUER, 2012).

2.3.2. *Finura*

O índice de finura é a propriedade relacionada à dimensão dos grãos do produto e está diretamente ligada ao seu desempenho, isto é, quanto maior for a finura, menor será sua exsudação e os tipos de segregação que ocorrem com o mesmo, melhorando a sua resistência e elevando sua trabalhabilidade, impermeabilidade e coesão dos concretos feitos a partir dele.

Exsudação é o fenômeno migratório da água existente na composição para a superfície deste material, pelo efeito conjunto da diferença de densidades entre o cimento e a água e o grau de permeabilidade que prevalece na pasta, levando consigo uma nata de cimento. Isto provoca no concreto uma fraca ligação entre seus materiais, deixando-o suscetível a uma segregação.

2.3.3. *Tempo de pega*

A Norma Brasileira NBR NM 65:2003 – Cimento Portland – Determinação do tempo de pega, utiliza a pasta de consistência normal (NM 43:2002) e o aparelho de Vicat para determinar o conceito de tempo de início e fim de pega. Início de pega é, em condições de ensaio normalizadas, o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra na pasta até uma distância de (4 ± 1) mm da placa base. Já o fim de pega, este tempo ocorre quando a agulha estabiliza a 0,5 mm na pasta.

Na prática, os tempos de pega referem-se às etapas do processo de endurecimento, solidificação ou enrijecimento do cimento e, em consequência, do concreto.

2.3.4. *Resistência*

Essa propriedade é determinada sob o aspecto de argamassa e está mais relacionada com o comportamento do cimento quando utilizado na prática.

A resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos de prova realizados com argamassas. Para o Brasil, a

norma utilizada para esse ensaio é a NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

2.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CIMENTO

O processo de fabricação de cimento é feito basicamente através das seguintes etapas: extração, britagem, armazenamento, dosagem, moinho de cru, silos de homogeneização, cozedura, resfriador e embalagem.

2.4.1. *Extração da matéria prima*

O calcário é a principal matéria prima para a fabricação do cimento e pode ser encontrado em jazidas subterrâneas ou a céu aberto, situação mais comum no Brasil. A extração da matéria-prima se faz pela técnica usual de exploração de pedreiras com uso de explosivos, quando se trata de rochas, por escavação, segundo a técnica usual de movimentação de terras, quando se trata de argila, e por dragagens, quando é o caso.

2.4.2. *Britagem*

O processo de britagem tem como propósito, reduzir a granulometria da rocha até tamanhos convenientes para o processamento industrial. Os materiais britados são encaminhados a depósitos, onde são processados segundo duas linhas principais de operação: via seca e via úmida.

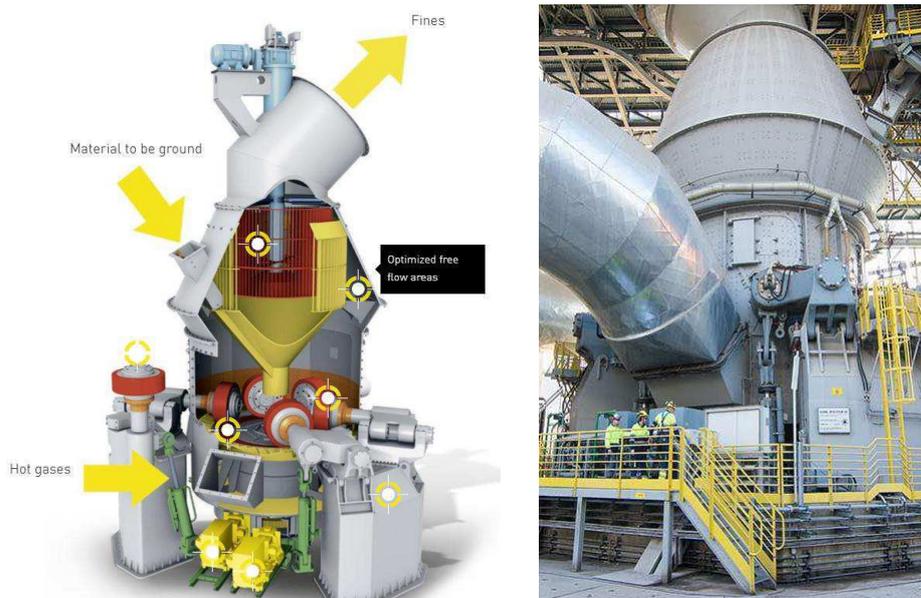
2.4.3. *Moedura e mistura*

No processamento por via seca, a matéria-prima é inicialmente conduzida a uma estufa, onde é convenientemente secada. Depois os materiais são proporcionados e conduzidos aos moinhos e silos (Figura 4), onde se reduzem a grãos de pequeno tamanho em mistura homogênea e são feitas as eventuais correções e aguardam o momento de ser conduzida ao forno para a queima.

Figura 4: Silos verticais.

FONTE: <http://static.paraiba.pb.gov.br/2014/02/fabrica-de-cimento-elizabeth-em-alhandra-foto-antonio-david-19.jpg>

No processo por via úmida, a argila natural é matéria-prima e é inicialmente misturada com água, formando uma lama. O calcário britado proveniente dos silos é proporcionado e misturado com essa lama e conduzido para os moinhos (Figura 5) e reduzido a grãos de tamanho muito pequeno. A mistura, devidamente controlada e homogeneizada, é conduzida para os silos de armazenamento do cru.

Figura 5: Moinhos de cru verticais.

FONTE: <http://www.gebr-pfeiffer.com/en/products/mvr-vertical-roller-mill-multidrive/>

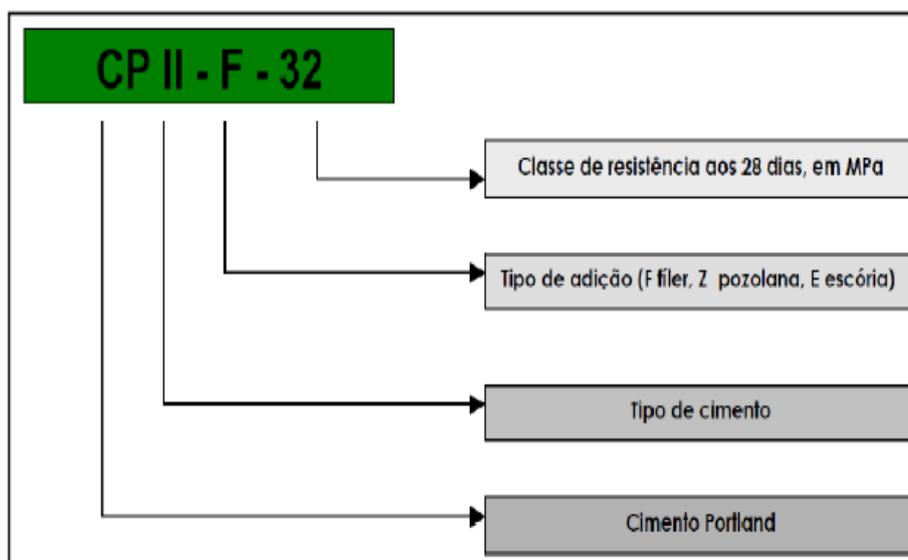
2.4.4. Queima, moagem e expedição

A operação de queima da mistura crua é controlada por combustão a níveis de temperaturas elevados o suficiente para a transformação química que conduz a produção do clínquer, subseqüentemente resfriado. O resfriamento é, talvez, a mais importante fase na fabricação do cimento. O clínquer resfriado é conduzido a depósitos apropriados de onde partirá para a moagem. Após a moagem, o material pulverizado é conduzido para separadores de ar onde serão retirados os grãos de maiores dimensões e posteriormente ensacados e transportados.

2.5. CLASSIFICAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Os cimentos Portland normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo CP acrescido do algarismo romano I ou II, sendo as classes de resistência indicadas pelos números 25, 32 e 40, como mostra a Figura 6. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão (expressos em megapascal – MPa), garantidos pelos fabricantes, após 28 dias de cura (ABCP, 2002).

Figura 6: Definição de nomenclatura.



FONTE: Martins et al. (2008).

Atualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) reconhece 11 tipos de cimento onde cada um apresenta composições diferentes de forma a fornecer aos concreto e argamassas características distintas, como

maior trabalhabilidade, durabilidade, resistência, etc. Neste projeto, serão estudados os seguintes tipos: CII-Z, CII-E, CII-F, CIII, CIIV, CPV, CP-RS, CPBC, CPB.

2.5.1. CII-Z – Cimento Portland composto com pozolana

O CII-Z-32, é um tipo de cimento composto com adição de material pozolânico variando de 6% a 14% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade, sendo ideal para diversas possibilidades de aplicação, como por exemplo, obras subterrâneas. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimento, sendo um dos cimentos mais utilizados no Brasil.

2.5.2. CP II E – Cimento Portland composto com escória

A adição de escória granulada de alto-forno lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. O CP II-E é composto de 94% à 56% de clínquer+gesso e 6% à 34% de escória. Ele é recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos maciços de concreto, onde o grande volume da concretagem e a superfície relativamente pequena reduzem a capacidade de resfriamento da massa. Este cimento também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo.

2.5.3. CP II F – Cimento Portland composto com Fíler

Assim como os demais cimentos Portland compostos, o CP-II-F-32 é um tipo de cimento para uso e aplicação em geral. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimento, porém não é o mais indicado para aplicação em meios muito agressivos.

2.5.4. CP III – Cimento Portland de Alto Forno

Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação geral, mas é particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, tais como

barragens, obras em ambientes agressivos como tubos e canaletas para condução de esgotos e efluentes industriais.

O CPIII é o cimento mais ecológico de todos os produzidos no Brasil, pois além da preservação das jazidas naturais de calcário e menor lançamento de CO₂ na atmosfera, aproveita o rejeito das siderúrgicas, a escória.

2.5.5. CP IV – Cimento Portland pozolânico

O cimento Portland Pozolânico tem baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. Além disso, o alto teor de pozolana, entre 15 e 50%, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. É altamente eficiente em argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento.

2.5.6. CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial

O cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) tem a peculiaridade de atingir altas resistências já nos primeiros dias da aplicação. O desenvolvimento da alta resistência inicial é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, de modo que, ao reagir com a água, ele adquira elevadas resistências, com maior velocidade.

É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, onde se exige deforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação, não é indicado para concreto massa. Contém adição de até 5% de fíler calcário. A ausência de pozolana não o recomenda para concretos com agregados reativos.

2.5.7. CP- RS – Cimento Portland resistente a sulfatos

Como o próprio nome já diz, é o que tem a propriedade de oferecer resistência aos meios agressivos sulfatados, tais como os encontrados nas redes de esgotos de águas servidas ou industriais, na água do mar e em alguns tipos de solos.

2.5.8. CP-BC – Cimento Portland de baixo calor de hidratação

Diz respeito a uma categoria extra que os cimentos anteriores podem alcançar se tiverem baixo calor de hidratação. Tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em grandes peças, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica.

De acordo com a ABNT NBR 13116:1994, os CP-BC's são aqueles que geram até 260 J/g e até 300 J/g aos 3 dias e 7 dias de hidratação respectivamente, e podem ser qualquer um dos tipos básicos.

2.5.9. CPB - Cimento Portland Branco

Sua principal característica é ser da cor branca. A coloração é atingida pela utilização de matérias-primas com baixo teor de óxidos de manganês e ferro, além de caulim no lugar da argila.

Pode ser usado como cimento estrutural ou não estrutural em rejuntas de cerâmicas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

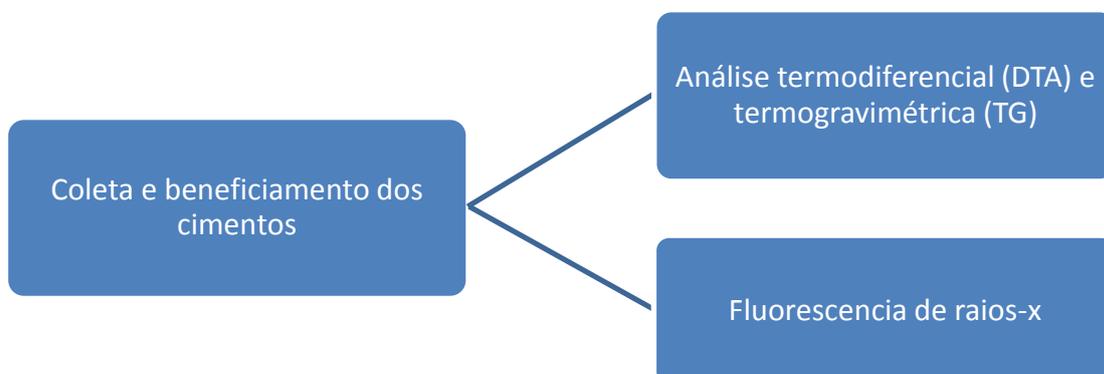
Para realização deste estudo foram utilizados os seguintes tipos de cimento:

- Cimento Portland CPV – ARI: Cimento de Alta Resistência Inicial, da marca Zebu, cedido por empresa local;
- Cimento Portland CP IV 32 RS: Cimento resistente a sulfatos, possui adição de pozolana, fabricado pela Poty, empresa Votorantim Cimentos S/A, localizada em Paulista-PE;
- Cimento Portland CP II E 32: Cimento composto por escória granulada de alto forno, da marca Cimpor, cedido pela empresa InterCement;
- Cimento Portland CP III 40 R S: Cimento resistente a sulfatos, apresenta escória granulada de alto-forno em sua composição, marca Cimpor, cedido pela empresa InterCement, localizado em João Pessoa-PB;

3.2. METODOLOGIA

Para realização deste estudo foram utilizadas três etapas distintas. A Figura 7 ilustra o fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 7: Fluxograma das etapas da pesquisa



3.2.1 Coleta e seleção dos Cimentos Portland

Nesta etapa foi realizada a coleta de quatro tipos de Cimentos Portland, a saber: Cimento CPV – ARI, Cimento CPII E 32, Cimento CP III, Cimento CPIV RS.

3.2.2 Beneficiamento dos Cimentos Portland utilizados neste estudo

Foi realizado o beneficiamento em peneira nº 200 (0,074mm) de acordo com a ABNT NBR 11579:2012 e acondicionamento em porta amostra específico para o material, objetivando impedir o contato com a umidade.

3.2.3 Caracterização química dos cimentos Portland utilizados neste estudo

Foram realizados ensaios de caracterização química e mineralógica do cimento Portland, destacando-se: Fluorescência de raios-x- EDX, e análise termodiferencial e termogravimétrica.

3.2.3.1 Análise Térmica Diferencial (DTA) e Termogravimétrica (TG)

As análises térmicas diferenciais (DTA) e termogravimétricas (TG) dos cimentos Portland foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas será de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. A Figura 8 ilustra o equipamento utilizado para realização do ensaio.

Figura 8: Equipamento utilizado para realização do ensaio de DTA e TG



3.2.3.2 Fluorescência de raios-x

As análises dor fluorescência de raios-x foram realizadas em equipamento EDX 720 da Shimadzu, objetivando identificar a composição química majoritária para os cimentos em estudo. A Figura 9 ilustra o equipamento utilizado para realização dos ensaios de fluorescência de raios-X.

Figura 9: Equipamento utilizado para realização dos ensaios de fluorescência de raios-X



Os ensaios de caracterização química e mineralógica dos cimentos em estudo foram realizados no Laboratório de Caracterização dos Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG.

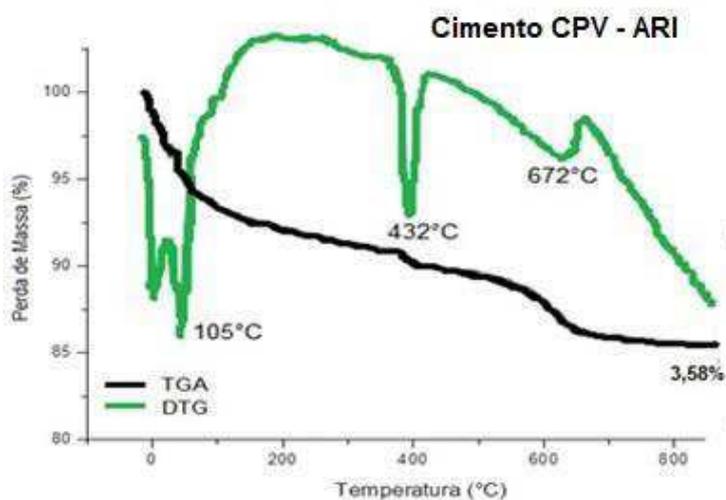
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS CIMENTOS EM ESTUDO.

4.1.1 Análise Termodiferencial-DTA e termogravimétrica-TG dos Cimentos Portland em estudo

A Figura 10 ilustra as curvas de análise térmica do Cimento CPV – ARI, utilizado neste estudo.

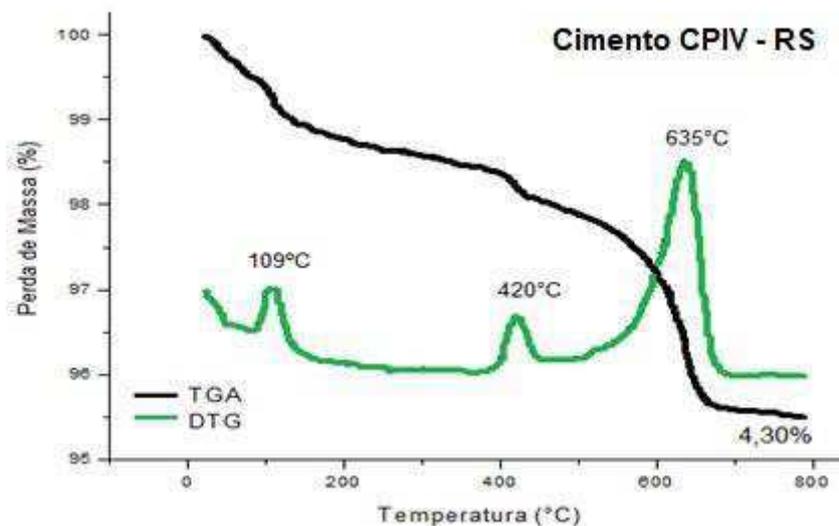
Figura 10: Curvas de análise térmica do Cimento CPV - ARI



Conforme resultados obtidos, verifica-se a presença de um pico intenso em aproximadamente 105°C, correspondente a perda de água livre e combinada presente no cimento; pico endotérmico a 432°C, correspondente a desidratação da Portlandita e pico endotérmico em 672°C correspondente a decomposição do Carbonato de Cálcio (CaCO_3 em $\text{CaO} + \text{CO}_2$ - desidratação). De acordo com a curva termogravimétrica do cimento CPV ARI, observou-se uma perda de massa de 3,58%.

A Figura 11 ilustra as curvas de análise térmica do Cimento CPIV-RS, utilizado neste estudo.

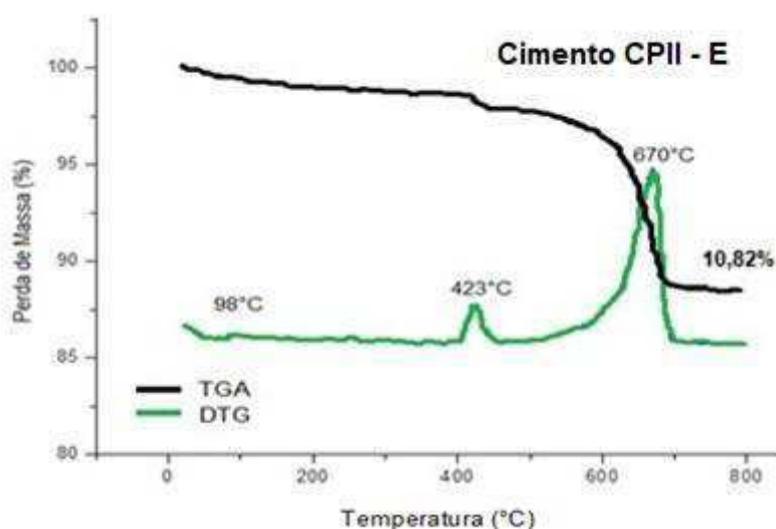
Figura 11: Curvas de análise térmica do Cimento CPIV – RS



De acordo com os resultados obtidos, verifica-se a ocorrência de pico exotérmico em 109°C, referente a perda de água livre; pico exotérmico a 420°C proveniente da decomposição do hidróxido de cálcio e pico exotérmico em 635°C correspondente a decomposição do carbonato de cálcio. A curva termogravimétrica indica uma perda de massa total de 4,30%.

A Figura 12 ilustra as curvas de análise térmica do Cimento CII-E, utilizado neste estudo.

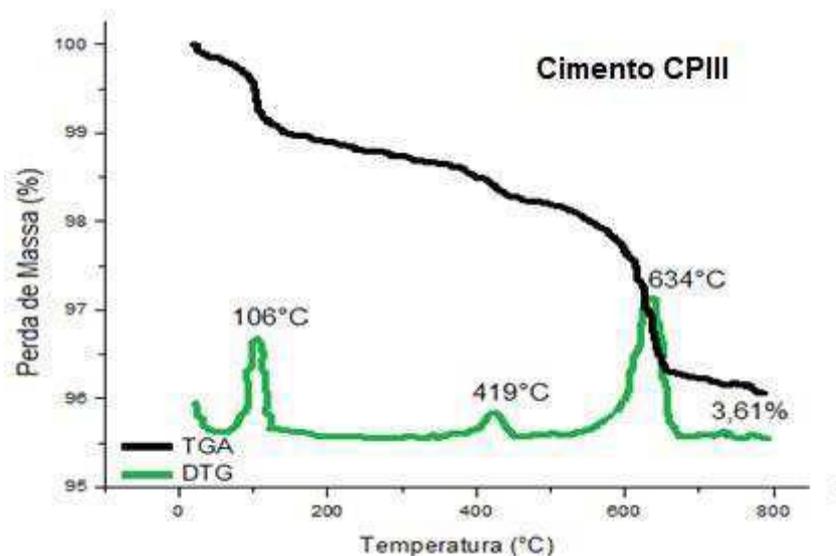
Figura 12: Curvas de análise térmica do Cimento CII-E



Conforme resultados obtidos e ilustrados na Figura 13 a existência de um pico a 98°C, correspondente à água livre e adsorvida; Pico exotérmico a 423°C referente a decomposição do hidróxido de cálcio formado provavelmente durante o período de estocagem do material, corroborando os resultados obtidos por (TAYLOR, 2003; NASCIMENTO, 2006); pico exotérmico a temperatura de 670°C, correspondente a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3 em $\text{CaO} + \text{CO}_2$), obtendo-se uma perda de massa total de 10,82%, conforme curva termogravimétrica.

A Figura 13 ilustra as curvas de análise térmica do Cimento CP III, utilizado neste estudo.

Figura 13: Curvas de análise térmica do Cimento CP III



Conforme resultados ilustrados na Figura 13, observa-se a presença de pico exotérmico por volta de 106°C, correspondente a perda de água livre de material, totalizando uma perda de massa de 1,5%; pequeno pico exotérmico aproximadamente a temperatura de 419°C, referente a decomposição do Ca(OH)_2 , com perda de massa de 0,54% e pico exotérmico em 634°C, referente ao processo de descarbonatação (CaCO_3 em $\text{CaO} + \text{CO}_2$), proporcionando uma perda de massa de 2,02%.

A curva termogravimétrica do cimento em estudo indica uma perda de massa total de 3,61% equivalente a 0,152mg do material.

Esses resultados corroboram os estudos realizados por de Taylor (2003), que menciona que para o cimento anidro, as perdas de massa ocorrem geralmente acontecem nos seguintes intervalos de temperatura: entre 100°C e 200°C correspondem à decomposição do gesso; as que acontecem entre 400°C e 500°C corresponde a decomposição do hidróxido de cálcio; e entre 500°C e 800°C a decomposição do CaCO_3 .

4.1.2 Fluorescência de raios-x – EDX dos Cimentos Portland em estudo

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a fluorescência de raios-x dos cimentos Portland em estudo.

Tabela 2: Fluorescência de raios-x dos cimentos Portland em estudo

Cimentos	Determinações (%)								
	PF	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Outros
CPV - ARI	3%	64,505	16,987	6,879	3,372	2,688	0,856	1,269	0,404
CP IV	3,82	45,68	29,11	9,75	2,95	1,87	4,30	1,84	0,70
CP III	3,30	59,12	21,15	6,63	3,17	3,15	2,25	0,57	0,66
CP II E	10,63	62,32	12,87	4,25	3,44	2,75	2,23	1,01	0,54
CPE	1,08	62,37	20,64	4,19	2,81	3,19	2,48	0,53	0,74

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que o cimento CPV - ARI é constituído por óxido de cálcio (64,505%), óxido de silício (16,987%), óxido de alumínio (6,879%), SO₃ (3,372%), Fe₂O₃ (2,688%) e baixos teores de K₂O (1,269%).

Para o cimento CPIV observa-se uma composição majoritária de CaO (45,6%), óxido de silício (29,11%) e Al₂O₃ com (9,75%) e teores de MgO (4,3%) e SO₃ (2,95%), com perda de massa de 3,82%.

Observa-se que o cimento CP III, é constituído por uma maior quantidade de óxido de cálcio (59,12%), 21,15% de dióxido de silício (SiO₂). Apresenta 6,63% de Al₂O₃; 3,17% de SO₃; 3,15% de Fe₂O₃; 2,23% de MgO e 1,55% dos demais óxidos.

Verifica-se que o cimento CP II E, é constituído basicamente de óxido de cálcio (CaO) com 62,35%, dióxido de silício (SiO₂) com 12,84%. A perda ao fogo (massa total do cimento, calculada pela diferença entre a massa a 105°C e a 1.000°C (TOLEDO FILHO e FAIRBAIRN, 2006) foi superior ao especificado por norma. Esta característica pode estar associada ao grau de carbonatação e hidratação do óxido de cálcio e de magnésio livres devido a exposição atmosférica (NEVILLE, 1995) e podem estar associados à deterioração durante o armazenamento do cimento ou utilização de clínquer demasiado alterado por armazenamento prolongado no exterior (COUTINHO, 2006). Pode ser atribuído também a perda devido à descarbonatação de algum carbonato de cálcio, que por falha no processo de fabricação do cimento, porventura ocasionou deficiências no produto.

Neste caso, não se pode atribuir a elevada perda ao fogo apresentada pelo CP II E à umidade decorrente da falta de cuidados no armazenamento, pois o mesmo encontrava-se acondicionado em sacos plásticos e dentro de baldes plástico vedados, além de não apresentarem sinais de hidratação como a formação de grumos.

Conforme resultados obtidos, observa-se que a cal (CaO) é o componente maioritário para todos os cimentos em estudo, apresentando-se em maior quantidade estando de acordo com as especificações das normas vigentes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos objetivos propostos e nos resultados obtidos neste estudo, pode considerar que:

- Para a análise térmica: observou-se que todas as amostras apresentaram perdas de massa dentro de uma mesma faixa de temperatura, bem como as perdas de massa ocorreram para três estágios distintos;
- Para a composição química dos cimentos em estudo, observou-se que a cal (CaO) é o componente maioritário para todos, estando de acordo com as especificações das normas vigentes.
- A importância de uma caracterização química mais profunda, reside no fato de conhecer todos os componentes químicos de cada tipo de cimento em estudo, permitindo deste modo justificar o comportamento físico e mecânico de concretos, argamassas e artefatos produzidos com cimento Portland.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Caracterizar mineralogicamente os cimentos estudados nesta pesquisa;
- Realizar a caracterização química e mineralógica dos demais tipos de cimento não contemplados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653/92. Materiais pozolânicos – Especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579 - Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13116 – Cimento Portland de baixo calor de hidratação. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 65 - Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 43 – Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.
- ALIZADEH, M. Effect of SiC particles on the microstructure evolution and mechanical properties of aluminum during ARB process. Materials Science and Engineering A, v. 540, p.13-23, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento portland. 7.ed. São Paulo: ABCP, 2002.
- ASTM International Standards. C 125 – 03 : Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. United States.
- BAUER, L.A Falcão. Materiais de construção. Vol. 1. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC. 2012.
- COUTINHO, J. S. Materiais de construção 2: 1ª Parte – ligantes e caldas. Tese de doutorado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2006.
- FELTRE, Ricardo. Química Orgânica, vol. 1,2 e 3, Editora Moderna, 5ª edição, São Paulo, 2002.
- JOHN, V. M. Cimentos de Escória Ativada com Silicatos de Sódio. São Paulo: Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 1995.
- LICHTENSTEIN, N. B. Patologia das construções. Boletim técnico n. 06. São Paulo: USP, 1986.
- MARTINS, A. et al. Apostila de treinamento de mão de obra para construção civil: Cimento. Cia. de Cimento Itambé. Curitiba, 2008.
- Material de apoio à disciplina de Laboratório de Materiais de Construção I - Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/ Centro de Ciências Tecnológicas – CCT Departamento de Engenharia Civil – DEC. (MODRO, 2008).
- METHA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. Ed. PINI. São Paulo, 2008.

MODRO, N. L. R.; Desenvolvimento e caracterização de concreto de cimento Portland contendo resíduo polimérico de PET. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos), Universidade da região de Joinville, fls 102, Santa Catarina, 2008.

NASCIMENTO, J. H.O. Adição de poliuretana não iônica a Cimento Portland Especial para cimentação de poço de petróleo. Dissertação de mestrado, UFRN, Natal, Brasil, 2006.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete, 4ed. New York: Wiley, 1995.

OREFICE, R. L.; PEREIRA, M. M.; MANSUR, H. S. Biomateriais: Fundamentos e Aplicações. Cultura Médica, Rio de Janeiro, 2006.

S. AMELINCKX, D. VAN DYCK, J. VAN LANDUYT, G. VAN TENDELOO, Handbook of Microscopy – Applications in Materials Science, Solid-state Physics and Chemistry, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, Weinheim, Alemanha (1997)

SHACKELFORD, C.D. Cumulative mass approach for column testing. Journal of Geotechnical Engineering, American Society for Civil Engineers, Reston, v.121. n.10. p.696-703, 1995.

SIQUEIRA, Lígia Vieira Maia. Laboratório de materiais de construção - I. 19 feb. 2008, 19 jun. 2008. 38 p. Notas de Aula.

SNIC. Press KIT 2013. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Rio de Janeiro, 2013.

TAVARES, L. M; COSTA, E. M. Estudo da influência do tipo de cimento usado em poços de petróleo na carbonatação acelerada por CO₂ supercrítico. III Mostra de Pesquisa da Pós-Graduação – PUCRS, 2008.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. 2 ed. New York: Thomas Telford, 2003.

VAN VLACK L. H., Princípios de Ciência dos Materiais, Ed. Edgard Blücher, S.P.1997.

VARELA, Márcio. Apostila de Materiais de Construção – Instituto Federal do Rio Grande do Norte – IFRN, 2008.

VERÇOZA, E. J. Materiais de Construção. 2ed. Porto Alegre: Sagra, 1984.