

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
CAMPUS AVANÇADO DE POÇOS DE CALDAS**

**DÉBORAH CAROLINE DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE TURFA EM CIMENTO  
PORTLAND**

Poços de Caldas/MG

2017

**DÉBORAH CAROLINE DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE TURFA EM CIMENTO  
PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação no Curso de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas, *Campus* de Poços de Caldas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de concentração: Materiais e compósitos cerâmicos.

Orientadora: Prof. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Co-orientadora: Prof. Dra. Carolina Del Roveri

Poços de Caldas/MG

2017

O48a Oliveira, Déborah Caroline de.  
Avaliação da atividade pozolânica de turfa em cimento Portland /  
Déborah Caroline de Oliveira. – Poços de Caldas, 2017.  
97 f. –

Orientadora: Sylma Carvalho Maestrelli.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –  
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2017.  
Bibliografia.

1. Cimento portland. 2. Pozolanas. 3. Turfa. I. Maestrelli, Sylma  
Carvalho. II. Título.

CDD: 620.11

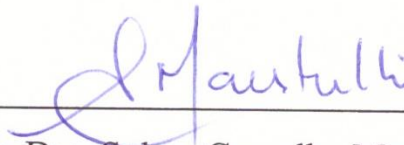
**DÉBORAH CAROLINE DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DE TURFA EM  
CIMENTO PORTLAND**

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 21 de julho de 2017.

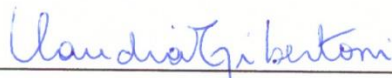
Área de Concentração: Materiais e compósitos cerâmicos.



---

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli

Instituição: Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG



---

Profa. Dra. Cláudia Gibertone

Instituição: UNIARARAS



---

Prof. Dra. Ana Olívia Barufi Franco de Magalhães

Instituição: Universidade Federal de Alfenas- UNIFAL-MG

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho para chegar até aqui e por sempre me fortalecer para que eu pudesse seguir em frente.

Agradeço aos meus pais por sempre estarem ao meu lado me apoiando em todas as situações e não medindo esforços para sempre me ajudar. Ao meu irmão por sempre poder compartilhar todas as dificuldades e conquistas durante este trajeto. Ao meu namorado por me ouvir e por ser companheiro, sempre tentando me direcionar para a melhor solução.

Às amigas que já tinha e que fiz ao longo dessa etapa que contribuíram muito para que tudo isso fosse possível, especialmente Ana Gabriela e Angélica, que compartilharam comigo momentos de alegria e desespero, sempre dispostas a me ajudar no que fosse preciso.

Em especial, agradeço às minhas orientadoras, Dra. Sylma Carvalho Maestrelli e Dra. Carolina Del Roveri, por acreditarem em mim e por sempre me incentivarem e exigirem o meu melhor, o que fez com que eu crescesse e aprendesse muito durante o mestrado.

Agradeço ao Instituto Federal do Sul de Minas, *Campus Pouso Alegre* e ao Prof. Rodolfo Grillo, por acreditar nesta pesquisa e por não medir esforços para que eu pudesse realizar os ensaios, sempre disposto a ajudar.

Agradeço à CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- pelo suporte financeiro.

Agradeço à ABCP- Associação Brasileira de Cimento Portland- em especial ao Flávio Munhoz, pela realização da caracterização física e mecânica do cimento. À Togni S/A, especialmente à Caroline Moraes, pelo fornecimento de matéria-prima e realização de ensaios de análise química.

## RESUMO

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo, sendo amplamente empregado no setor de construção civil. Dentre os tipos de cimento Portland existentes, há o tipo pozolânico, em que um material pozolânico é adicionado ao cimento, cuja principal característica é reagir com o hidróxido de cálcio gerado nas reações de hidratação e formar compostos com propriedades aglomerantes, semelhantes aos compostos gerados na hidratação. A turfa é um composto orgânico formado pela decomposição de matéria vegetal e é amplamente utilizada na agricultura, na indústria metalúrgica e como combustível, e possui uma composição química semelhante às pozolanas usuais, podendo assim, apresentar potencial para ser utilizada como pozolana. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial pozolânico da turfa quando adicionada ao cimento, nas proporções de 5, 10, 15 e 20% em peso, e correlacionar as propriedades finais com as características apresentadas pelos materiais puros, utilizando três cimentos de fabricantes e composições diferentes. Ensaio de fluorescência e difração de raios X foram realizados para a caracterização dos três cimentos em estudo e da turfa isoladamente e além dos ensaios de finura, água na pasta de consistência normal, início e fim de pega, permeabilidade ao ar, massa específica, expansibilidade e resistência à compressão. Já para as composições, foram feitos os ensaios de porosidade e fluorescência de raios X foram realizados a partir das composições envolvendo cimento e turfa para a idade de 28 dias. Foram feitos também ensaio de resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que a combinação das propriedades químicas e físicas de cada um dos cimentos estudados corroboram seu comportamento mecânico e as propriedades finais adquiridas ao longo do processo de cura; os três cimentos, sem adição, apresentam propriedades superiores aos valores estabelecidos por norma. Para o ensaio de resistência à compressão das composições, notou-se que para todos os teores analisados há, independentemente do cimento usado e da idade de rompimento, uma redução de cerca de 70% no valor da resistência mecânica (ao comparar os teores de 5 e 20%), resultando em valores inferiores aos apresentados pelos cimentos puros. Tendo em vista que os valores de porosidade permanecem constantes (em torno de 17%) para todas as composições, pode-se considerar que a turfa, mesmo tendo algumas características químicas semelhantes às pozolanas usuais e apresentando granulometria de acordo com a norma, age como um material inerte, não possuindo atividade pozolânica. Tal fato pode ser explicado pelo teor de sílica presente na turfa (inferior a 30%) que está, parcialmente, em seu estado cristalino, como mostra o DRX, afetando de forma negativa a reação pozolânica. A microscopia eletrônica de varredura confirma os resultados de resistência mecânica obtidos: para o teor de 5% de turfa adicionado ao cimento é possível identificar os produtos da hidratação a partir da microestrutura e da composição química apresentada e quando a adição de turfa é de 20%, há uma mudança drástica na microestrutura para os três cimentos, apresentando áreas que não passaram pelo processo de hidratação.

**Palavras-chave:** Cimento. Pozolana. Reação de hidratação. Turfa. Resistência mecânica.

## ABSTRACT

Cement is one of the most used materials in the world, being widely used in the civil construction sector. Among the existing types of Portland cement there is the pozzolanic type, in which a pozzolanic material is added to the cement, whose main characteristic is to react with calcium hydroxide generated in the hydration reactions and to form compounds with binder properties, similar to the compounds generated in the hydration. Peat is an organic compound formed by the decomposition of plant material and is widely used in the agriculture, metallurgical industry and as fuel. The peat chemical composition is similar to usual pozzolans, which may present potential to be used as pozzolana. The present work aims to evaluate the pozzolanic potential of peat when it is added to the cement, in the content of 5, 10, 15 and 20% by weight and to correlate the final properties with the characteristics present by the pure materials, using three different cements. X-ray fluorescence and diffraction tests were performed for the characterization of the cements and peat separately, and also fineness tests, water in the paste of normal consistency, start and finish of the handle, air permeability, specific mass, expandability and mechanical resistance for the three cements. On the other hand, X-ray fluorescence and compressive strength tests were performed from the cement and peat compositions for the age of 28 days. In addition, tests of porosity and scanning electron microscopy were made. The results showed that the combination of chemical and physical properties of each studied cement corroborates its mechanical behavior and the final properties acquired during the cure process, all the cements present properties superior to the values established by standard. For the compressive strength of compositions, for every content studied, regardless of age or cement used, there is a reduction of 70% in the mechanical resistance (analyzing contents of 5 and 20%), resulting in values lower than those presented by pure cements. Considering that the porosity values remain constant, around 17%, for all compositions, it can be considered that peat, although having some chemical characteristics similar to usual pozzolans and presenting granulometry according to the standard, acts as an inert material, having no pozzolanic activity. That can be explained by the silica content in the peat (less than 30%) that is partially in the crystalline state, as shown by the XRD, negatively affecting the pozzolanic reaction. Scanning electron microscopy confirms the results of mechanical resistance obtained: for the content of 5% of peat added to the cement it is possible to identify the hydration products, by the microstructure and chemical composition presented and when the addition of peat is 20%, the microstructure changes drastically for the three cements, presenting areas that did not go through the hydration process.

**Keywords:** Cement. Pozzolan. Hydration reactions. Peat. Mechanical resistance.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b>	Principais reações que ocorrem no forno durante o processo de clínquerização. ....	17
<b>Tabela 2-</b>	Limites aproximados da composição do cimento Portland.....	18
<b>Tabela 3-</b>	Principais compostos do cimento Portland.....	18
<b>Tabela 4-</b>	Aplicações para os diversos tipos de cimento.....	24
<b>Tabela 5-</b>	Exigências físicas e mecânicas.....	26
<b>Tabela 6-</b>	Principais produtos da hidratação do cimento Portland. . . . .	29
<b>Tabela 7-</b>	Calor de hidratação dos compostos de cimento Portland. ....	37
<b>Tabela 8-</b>	Exigências químicas para os materiais pozolânicos. . . . .	44
<b>Tabela 9-</b>	Exigências físicas para materiais pozolânicos. . . . .	44
<b>Tabela 10-</b>	Composições das argamassas. ....	47
<b>Tabela 11-</b>	Massa de cimento e turfa utilizadas nas composições. ....	49
<b>Tabela 12-</b>	Resultados da análise química quantitativa para cada fabricante. ....	52
<b>Tabela 13-</b>	Compostos de Bogue para os três cimentos.....	54
<b>Tabela 14-</b>	Resultados da quantificação dos três cimentos. . . . .	54
<b>Tabela 15-</b>	Caracterização física dos três cimentos.....	56
<b>Tabela 16-</b>	Resistência mecânica à compressão média dos trcementos.....	58
<b>Tabela 17-</b>	Análise quantitativa da turfa. . . . .	60
<b>Tabela 18-</b>	Caracterização granulométrica da turfa. ....	63
<b>Tabela 19-</b>	Resistência mecânica das composições com cimento Cauê.....	65
<b>Tabela 20-</b>	Resistência mecânica das composições com cimento Holcim.....	65
<b>Tabela 21-</b>	Resistência mecânica das composições com cimento Lafarge. ....	65
<b>Tabela 22-</b>	Perda de resistência mecânica apresentada pelas composições.....	69
<b>Tabela 23-</b>	Queda de resistência mecânica com base no valor de referência dos cimentos sem adição.....	70
<b>Tabela 24-</b>	Composição química após 28 dias de hidratação para o cimento Cauê. ....	72
<b>Tabela 25-</b>	Composição química após 28 dias de hidratação para o cimento Holcim.....	73
<b>Tabela 26-</b>	Composição química após 28 dias de hidratação para o cimento Lafarge. ....	73



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b>	Representação dos estágios de hidratação do cimento.....	28
<b>Figura 2-</b>	Modelo de pasta de cimento Portland bem hidratada. ....	32
<b>Figura 3-</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura (a) da etringita e (b) de cristais hexagonais característicos dos monossulfato hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha. ....	33
<b>Figura 4-</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura da fratura de uma pasta de cimento Portland aos 3 dias de idade.. ....	34
<b>Figura 5-</b>	Detalhe do silicato cálcico hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha.....	34
<b>Figura 6-</b>	Grão de clínquer não hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha.....	35
<b>Figura 7-</b>	Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento. ....	36
<b>Figura 8-</b>	Aspectos gerais da frente de lavra onde a turfa é coletada em Poços de Caldas/MG. ....	38
<b>Figura 9-</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura das três classes de turfa.....	40
<b>Figura 10-</b>	Representação esquemática de pastas de cimento bem hidratadas feitas com cimento Portland pozolânico. ....	43
<b>Figura 11-</b>	Misturador mecânico e pá de metal. ....	49
<b>Figura 12-</b>	Corpos de prova pós moldagem. ....	50
<b>Figura 13-</b>	Resistência mecânica para os cimentos puros, sem adição de turfa. ....	58
<b>Figura 14-</b>	Resultado da determinação de fases utilizando o software Match!.....	61
<b>Figura 15-</b>	Identificação de fases da turfa.....	62
<b>Figura 16-</b>	Curva de Distribuição granulométrica da turfa. ....	63
<b>Figura 17-</b>	Resultado do peneiramento durante a realização do ensaio. . ....	64
<b>Figura 18-</b>	Resistência mecânica para as composições de turfa para cada um dos cimentos. ....	66
<b>Figura 19-</b>	Comparação entre resistência mecânica e cimento utilizado para cada teor de turfa. ....	68

<b>Figura 20-</b>	Porosidade aparente para cada um dos cimentos em função do teor de turfa.....	71
<b>Figura 21-</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura para a composição com 5% de turfa, aumento de x3000, para os três cimentos. ....	74
<b>Figura 22-</b>	Detalhes da microestrutura da (a) etringita e C-S-H e do (b) C-S-H para o cimento Lafarge com adição de 5% de turfa.....	75
<b>Figura 23-</b>	Mapeamento de componentes por EDS da composição de cimento Lafarge e 5% de turfa. ....	75
<b>Figura 24-</b>	Análise de EDS pontuais para diferentes fases, para a composição de 5% de turfa e cimento Lafarge. ....	76
<b>Figura 25-</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura para a composição com 20% de turfa, aumento de x3000, para os três cimentos. ....	77
<b>Figura 26-</b>	Microestruturas com 20% de adição de turfa (a) cimento Cauê e (b) cimento Lafarge. ....	78
<b>Figura 27-</b>	Análise de EDS pontuais para a composição de 20% de turfa e cimento Holcim.....	79

## LISTA DE ABREVIações

<b>ABCP-</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland.
<b>ABNT-</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
<b>ABNT NM-</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas- Norma Mercosul.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-</b>	Alumina.
<b>CaO-</b>	Óxido de cálcio.
<b>CP II E 32-</b>	Cimento Portland composto por escória de alto forno com resistência mecânica de 32 MPa aos 28 dias.
<b>CSH-</b>	Silicato de cálcio hidratado.
<b>CH-</b>	Portlandita ou hidróxido de cálcio.
<b>C<sub>3</sub>S-</b>	Silicato tricálcico, alita.
<b>C<sub>2</sub>S-</b>	Silicato dicálcico, belita.
<b>C<sub>3</sub>A-</b>	Aluminato tricálcico.
<b>C<sub>4</sub>AF-</b>	Ferro aluminato tetracálcico.
<b>DRX-</b>	Difração de Raios X.
<b>EDS-</b>	Energia dispersiva de raios X.
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-</b>	Óxido de ferro.
<b>K<sub>2</sub>O-</b>	Óxido de potássio, álcalis.
<b>Na<sub>2</sub>O-</b>	Óxido de sódio, álcalis.
<b>MEV-</b>	Microscopia eletrônica de varredura.
<b>SINC-</b>	Sindicato das Indústrias de Cimento.
<b>SO<sub>3</sub>-</b>	Trióxido de enxofre.
<b>SiO<sub>2</sub>-</b>	Sílica.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
4.1	CIMENTO PORTLAND .....	15
4.1.1	<i>Processo de fabricação do cimento</i> .....	16
4.1.2	<i>Composição química do cimento</i> .....	17
4.1.3	<i>Compostos mineralógicos do cimento e suas características</i> .....	19
4.1.3.1	Alita e belita.....	20
4.1.3.2	Aluminato e ferroaluminato de cálcio .....	21
4.1.3.3	Óxido de magnésio e óxido de cálcio.....	22
4.1.4	<i>Tipos de cimento e aplicações</i> .....	22
4.1.5	<i>Características e Propriedades dos Cimentos</i> .....	25
4.1.6	<i>Processo de hidratação</i> .....	27
4.1.6.1	Mecanismos de hidratação .....	29
4.1.6.2	Hidratação dos compostos do cimento .....	30
4.1.6.3	Microestrutura dos compostos de hidratação.....	32
4.1.6.4	Calor de hidratação .....	36
4.2	TURFA .....	37
4.3	POZOLANAS .....	40
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>46</b>
5.1	MATERIAIS .....	46
5.2	MÉTODOS .....	46
5.2.1	<i>Caracterização dos cimentos e da turfa</i> .....	47
5.2.2	<i>Determinação da resistência mecânica à compressão das composições</i> .....	48
5.2.3	<i>Análise química das composições</i> .....	50
5.2.4	<i>Medição da porosidade dos produtos finais</i> .....	50
5.2.5	<i>Análise das composições por microscopia eletrônica de varredura</i> .....	51

<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	52
6.1.1	<i>Caracterização dos cimentos .....</i>	<i>52</i>
6.1.2	<i>Caracterização da turfa .....</i>	<i>59</i>
6.2	RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CIMENTO E TURFA .....	64
6.3	ANÁLISE DA POROSIDADE DAS COMPOSIÇÕES DE CIMENTO E TURFA.....	71
6.4	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS COMPOSIÇÕES APÓS 28 DIAS DE HIDRATAÇÃO.....	72
6.5	ANÁLISES DAS COMPOSIÇÕES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS COM 91 DIAS DE CURA .....	73
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>
	APÊNDICE A- Análise de variância da porosidade das composições.....	89
	ANEXO A- Análise qualitativa de fases dos cimentos .....	91
	ANEXO B- Análise quantitativa de fases dos cimentos.....	94
	ANEXO C- Análise de EDS para 5% de turfa e cimento Lafarge .....	97

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é vastamente aplicado em construção civil, tanto para produção de argamassa quanto para a produção de concreto (SOUZA, 2007). Conhecido simplesmente por cimento, o cimento Portland é um material com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que, ao ser misturado com água, reage formando diversas fases hidratadas, endurecendo e, a partir de então, não sofre mais decomposição, mesmo que seja exposto à ação da água, conforme a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002).

A composição e a origem do cimento influenciam diretamente em suas propriedades finais; dessa forma, o cimento é classificado em diferentes tipos, os quais são definidos a partir destes fatores. O cimento Portland pozolânico, conhecido também como CP IV, é um tipo de cimento em que materiais com atividade pozolânica são adicionados ao clínquer, resultando em uma maior produtividade e consequente redução de custo do processo de fabricação do cimento. Os materiais pozolânicos são aqueles que reagem com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento, processo conhecido como reação pozolânica, que gera produtos com propriedades aglomerantes, como os silicatos e aluminatos, semelhantes aos produtos da hidratação. Esta capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e produzir compostos estáveis é a principal característica das pozolanas (OLIVEIRA et al., 2004). Atualmente, são realizados muitos estudos a fim de descobrir e caracterizar novos materiais que possuem atividade pozolânica, com o objetivo de reduzir os custos da produção bem como minimizar impactos ambientais.

A decomposição de material vegetal em ambientes que possuem baixo nível de oxigênio, elevada umidade e acidez, gera um sedimento orgânico denominado turfa, que é um material polar, poroso e com grande potencial de adsorção. Por possuir uma composição química semelhante à das pozolanas usuais, apresenta potencial para ser aplicada como adição pozolânica no cimento Portland, podendo assim reagir com o hidróxido de cálcio. Entretanto, um estudo detalhado das reações envolvendo esse material e o cimento Portland se faz necessário no sentido de avaliar as características do produto e as suas propriedades durante as reações de hidratação e após secagem completa, de modo a estabelecer um comparativo com os materiais geralmente utilizados no setor de construção civil.

## 2 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de atividade pozolânica de turfa, associada, em diferentes proporções, a três marcas distintas de cimento Portland, relacionando a ação do material em estudo em cimentos Portland de origem e composições diferentes, a partir da análise das características e propriedades iniciais de cada material utilizado e também após a reação de hidratação e endurecimento do produto.

Para que tal objetivo fosse cumprido, os objetivos específicos deste projeto foram:

- a) Caracterizar os cimentos Portland de três fabricantes (no presente trabalho serão utilizados os cimentos Cauê, Holcim e Lafarge) quanto ao tempo de pega, análise química antes e após hidratação e análise física e de resistência mecânica;
- b) Caracterizar a adição mineral em estudo de forma semelhante aos cimentos Portland utilizados a fim de comparar suas propriedades;
- c) Testar a adição de turfa no cimento Portland em diversas proporções, a fim de se avaliar a influência desse material nas propriedades finais do cimento e também estudar seu potencial para ser utilizado como pozolana, através de ensaios de resistência à compressão, porosidade, análise química e microestrutural;
- d) Identificar as fases formadas após a reação de hidratação e estabelecer uma relação entre estas e as características físicas, mecânicas e microestruturais dos corpos de prova obtidos.

### 3 JUSTIFICATIVA

O cimento Portland é um dos materiais mais utilizados mundialmente e é considerado o principal material para a civilização humana devido à sua vasta aplicação na construção civil (RODRIGUES, 2012). Segundo Zampieri (1993), o cimento Portland era inicialmente composto por clínquer finamente dividido e de uma substância responsável por regular o tempo de pega do cimento; porém, a busca por menores custos para a produção tem gerado interesse para o estudo de “adições ativas”, como é o caso dos materiais pozolânicos, os quais apresentam vantagens em sua utilização, como maior durabilidade em ambiente agressivos e maior resistência mecânica em longas idades.

Dessa forma, torna-se interessante estudar materiais que apresentem potencial para serem aplicados como pozolanas e que são normalmente denominados resíduos ou são materiais pouco utilizados, tais como a turfa.

A turfa é normalmente utilizada na agricultura a fim de fixar os fertilizantes, mas também pode ser utilizada como combustível para gerar energia térmica e elétrica, como matéria prima na obtenção de carvão ativado e também na indústria metalúrgica (CUEVAS, 2011). Uma substituição do cimento por esse material, ainda que parcial, poderia gerar um menor custo para a fabricação do cimento com consequente aumento da produtividade, além de minimizar os impactos ambientais decorrentes da produção do cimento, diminuindo a emissão de gás carbônico e também reduzindo a utilização de combustíveis durante o processo de fabricação do cimento.



## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento tem sua origem no latim, “*caementum*”, e foi utilizada, inicialmente, para referenciar um material com propriedades aglomerantes formado por cinza vulcânica e cal, descoberto pelos romanos (SOUZA, 2007). Em meados de 1756, um material composto por calcário calcinado e argila que endurecia com a adição de água foi desenvolvido por John Smeaton. Tal material foi aperfeiçoado pelo construtor inglês Joseph Aspdin, em 1824, e recebeu o nome Portland por apresentar cor e dureza semelhantes a uma pedra muito utilizada na região de Portland, na Inglaterra (SOUZA, 2007).

De acordo com Neville (2016), Joseph Aspdin obteve, então, a patente para “Cimento Portland”. A obtenção deste material se dava por meio do aquecimento, em um forno, de uma mistura finamente dividida composta por argila e calcário até a eliminação do gás carbônico, processo que ocorria em temperaturas inferiores à temperatura de clinquerização. Em 1845 foi fabricado, por Isaac Johnson, o cimento moderno, em que uma mistura de argila e giz foi calcinada até a temperatura de clinquerização, possibilitando a formação dos compostos com alto poder cementante (NEVILLE, 2016).

A ABNT NBR 5732/1991, p.2, define cimento Portland como:

Aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos (...).

O clínquer é obtido pelo processo de clinquerização, em que uma mistura de calcário, argila ou diferentes materiais silicosos, alumina e óxidos de ferro é submetida à queima em um forno rotativo (NEVILLE; BROOKS, 2010). Segundo Moreno (2001), os variados tipos de cimento, que possuem características e aplicações específicas, são resultado de diferentes teores destes componentes presentes na mistura, sendo o clínquer o principal componente do cimento, pois é a partir de seus constituintes que serão determinadas as propriedades aglomerantes e hidráulicas do cimento Portland.

Segundo o Sindicato Nacional de Indústria e Cimentos (SINC, 2016), existem cerca de 100 fábricas de cimento instaladas no Brasil, sendo esse o quinto maior produtor de cimento e o quarto maior consumidor. De acordo com resultados preliminares do SINC para o ano de 2016, as vendas internas no mês de outubro somaram 4,6 milhões de toneladas, apresentando uma queda de 18,1% com relação a outubro de 2015, sendo que a venda acumulada de janeiro a outubro de 2016 atingiu 47,9 milhões de toneladas, com queda de 13,4% com relação ao mesmo período do ano anterior. A produção nacional no período de janeiro a março de 2016 somou 13,8 milhões de toneladas, sendo a região sudeste a maior produtora (6,35 milhões de toneladas). A Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC, 2016) relata que o preço do cimento Portland atingiu o valor de US\$133,50 por tonelada.

#### *4.1.1 Processo de fabricação do cimento*

O cimento é constituído por uma mistura de calcário e argila, em proporções pré-definidas, que passam por processos físico-químicos e são convertidos em uma mistura de minerais sintéticos que, ao sofrerem hidratação, passam pelo endurecimento e desenvolvem boas propriedades, dentre elas a boa resistência à compressão (MORENO, 2001).

A produção do cimento Portland pode ser resumida da seguinte maneira: o processo tem início na extração das matérias-primas (calcário e argila); a fim de reduzir o tamanho das rochas extraídas, as matérias-primas passam pelo processo de britagem e posterior pré-homogeneização. A próxima etapa é a moagem do cru, em que a mistura crua (denominada também de farinha) é colocada em um moinho de bolas a fim de reduzir a granulometria do material (fator de extrema importância no processo de clínquerização), passando, posteriormente, para a homogeneização da farinha. Este material então, passa pela torre de ciclones para que haja um aquecimento prévio para ser então enviada para o forno rotativo, onde ocorre a transformação química das matérias-primas. O material que sai do forno é denominado clínquer, e passa por um processo de resfriamento e posteriormente para o processo de moagem; é nesta etapa que são adicionados o gesso, calcário, escória e pozolanas. Dessa forma, o cimento está pronto para ser embalado e distribuído (MORENO, 2001; MATOS NETO, 2013).

A clinquerização é a etapa que garante que os silicatos cálcicos, aluminatos cálcicos e os ferroaluminatos, que serão discutidos adiante, sejam formados. Centurione (1993) cita, de forma mais detalhada, as reações que ocorrem no forno, mostradas na Tabela 1.

Tabela 1- Principais reações que ocorrem no forno durante o processo de clinquerização.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Reação</b>
<b>100-200</b>	Liberação de água livre, particularmente dos argilominerais.
<b>500-700</b>	Desidroxilação dos argilominerais com deslocamento acentuado da estrutura cristalina e consequente elevação da reatividade.
<b>700-900</b>	Decomposição dos carbonatos, com liberação de CO <sub>2</sub> ; colapso completo das estruturas dos argilominerais. Os óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro liberados encontram-se em um estado ativo devido ao aumento da entropia e às áreas superficiais muito grandes; as primeiras reações de estado sólido ocorrem, conduzindo à formação de aluminatos e ferroaluminatos cálcicos e, de modo incipiente, da belita.
<b>900-1200</b>	Até essa faixa de temperatura as reações que ocorrem são de estado sólido, salientando-se a conversão dos ferritos e aluminatos em C <sub>4</sub> AF e C <sub>3</sub> A, além da formação de belita a partir da sílica remanescente e dos cristais de cal livre.
<b>1200-1350</b>	Por volta de 1200°C já ocorre a cristalização das primeiras alitas, a partir de cristais pré-existentes de belita e cal livre. Ao redor de 1280°C essa reação é incrementada com a formação de fase líquida a partir dos aluminatos e ferroaluminatos cálcicos, com consequente nodulização do clínquer.
<b>Acima de 1350</b>	Desenvolvimento dos cristais de alita e, dependendo do tipo de combustível, assimilação de cinzas.

Fonte: Adaptado de CENTURIONE (1993).

#### 4.1.2 Composição química do cimento

De acordo com Herfort et al. (2010), a mistura inicial de cimento Portland pode ser descrita como um sistema constituído essencialmente por quatro óxidos: óxido de cálcio (CaO), sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O óxido de cálcio está presente no calcário sob a forma de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), a sílica é fornecida pela argila ou areia, que também possui alumina e o óxido de ferro (SILVA, 1994).

Existem ainda outros componentes que podem estar presentes no cimento em menores proporções, como é o caso do óxido de magnésio (MgO, que pode formar periclásio) e a presença de álcalis, como K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O, que são compostos solúveis e reativos, encontrados em todos os materiais usados na produção do cimento, além de

elementos sulfurosos presentes na argila (MORENO, 2001). Os limites dos componentes, em forma de óxidos, do cimento Portland são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2- Limites aproximados da composição do cimento Portland.

Óxido	Abreviação	Teor (%)
CaO	C	60 – 67
SiO <sub>2</sub>	S	17 – 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3 – 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0,5 – 6
MgO	M	0,1 – 4
Álcalis	-	0,2 - 1,3
SO <sub>3</sub>	S̄	1 – 3

Fonte: Adaptado de NEVILLE; BROOKS (2000).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os resultados das análises químicas do cimento apresentam o resultado na forma de óxidos, conhecida como composição elementar, porém é complicado ter uma conclusão sobre as propriedades do cimento, que estão intimamente relacionadas com a sua composição, somente por meio desta análise.

Conforme citado por Melo (2009), os compostos fundamentais de maior complexidade do cimento, resultantes do processo de clinquerização, são derivados dos quatro óxidos mais importantes quimicamente (cal, sílica, alumina e óxido de ferro). Dessa forma são obtidos os compostos do clínquer, principais componentes do cimento Portland, mostrados na Tabela 3.

Tabela 3- Principais compostos do cimento Portland.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Fonte: NEVILLE; BROOKS (2000, p.10).

O teor destes principais compostos pode ser calculado a partir da análise química dos óxidos por meio da utilização de equações desenvolvidas por R.H. Bogue, conhecido por “composição de Bogue” (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Estas

equações, estimam a composição potencial dos compostos do cimento a partir das hipóteses de que as reações de clínquerização tenham ocorrido de forma completa e que não há presença de impurezas. Este cálculo considera ainda as aproximações: todo o óxido de ferro se converte em ferroaluminato tetracálcico estequiométrico, a alumina restante é transformada em aluminato tricálcico e o óxido de cálcio que não reagiu é transformado em silicatos cálcicos (GOBBO, 2009). Os erros apresentados pela equação de Bogue podem ser ainda derivados da variabilidade química do clínquer em relação às composições assumidas (STUTZMAN, 2004). Tais suposições não são totalmente válidas, sendo assim, os teores calculados podem se desviar de maneira considerável dos teores calculados de maneira direta (com equipamentos especiais), contudo estas equações (equações de 1 a 4) são úteis no sentido de fornecer uma estimativa inicial do teor destes compostos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

$$\%C_3S = 4,071(CaO) - 7,600(SiO_2) - 6,718(Al_2O_3) - 1,430(Fe_2O_3) - 2,850(SO_3) \quad (1)$$

$$\%C_2S = 2,867(SiO_2) - 0,7544(C_3S) \quad (2)$$

$$\%C_3A = 2,650(Al_2O_3) - 1,692(Fe_2O_3) \quad (3)$$

$$\%C_4AF = 3,043(Fe_2O_3) \quad (4)$$

Vale ressaltar, segundo Neville (2016), que pelo cálculo da composição de Bogue, o teor de  $C_2S$  é superestimado e o de  $C_3S$  é subestimado, pois outros óxidos podem substituir parte do óxido de cálcio na composição do  $C_3S$ , e não existem silicatos quimicamente puros, comprometendo a análise por Bogue. De acordo com Gobbo (2009), este cálculo considera que a composição do  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  são puras, sem considerar a presença de elementos menores (como o  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ , dentre outros) que podem constituir de 8 a 9% do clínquer, o que afeta de forma considerável o resultado final dos cálculos, porém a simplicidade e a rapidez fazem com que este método seja bastante utilizado, sendo estas as suas principais vantagens.

#### 4.1.3 Compostos mineralógicos do cimento e suas características

Centurione (1993), divide os constituintes mineralógicos do cimento Portland em três grupos, detalhados na sequência:

- a) Silicatos cálcicos: não sofrem fusão durante o processo de clínquerização e são formados nas últimas etapas do processo, em grande maioria são cristais bem formados;
- b) Fase intersticial: são os aluminatos e ferroaluminatos, que correspondem ao material que se funde na temperatura em que ocorre a clínquerização e onde os silicatos cálcicos se cristalizam;
- c) Componentes menos frequentes: destacam-se o periclásio (MgO) e a cal livre.

#### 4.1.3.1 Alita e belita

A alita e belita, formas impuras do  $C_3S$  e  $C_2S$ , respectivamente, são os silicatos normalmente encontrados nos cimentos, e possuem uma quantidade mínima de íons de magnésio, alumínio, ferro, potássio, sódio e enxofre (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A alita está presente no clínquer em teores de 40 a 70%, sendo assim um dos principais constituintes do cimento (CENTURIONE, 1993). Segundo Gobbo (2003), o  $C_3S$  possui um grande número de polimorfos, contudo a variação na estrutura cristalina é pequena. As principais formas cristalinas da alita são triclinica, monoclinica e romboédrica (trigonal), que são uma distorção da estrutura ideal da alita, composta por tetraedros de  $SiO_4$  e íons de cálcio e oxigênio, tal arranjo gera grandes vazios na estrutura resultando em uma alta energia e reatividade da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Como citado por Gobbo (2003), o  $C_3S$  possui transições de fases reversíveis em temperaturas variadas, a temperatura de conversão monoclinica M3 é  $1060\text{ }^\circ\text{C}$  e da monoclinica M1 é  $980\text{ }^\circ\text{C}$ , sendo essas as duas formas que normalmente a alita é encontrada.

Geralmente a alita é formada por meio de reação sólido-sólido que ocorre entre a cal livre e a belita a partir do processo de difusão iônica (CENTURIONE, 1993). A taxa de reação de alita com a água é média e a contribuição para a resistência mecânica em idades iniciais é ótima e para idades posteriores é relativamente boa.

O silicato dicálcico, denominado belita, é também um constituinte muito importante do cimento, mesmo ocorrendo em quantidades inferiores, cerca de 20%, quando comparado à alita (CENTURIONE, 1993). De acordo com Gobbo (2003), os polimorfos da belita ( $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ ) são bastante definidos apresentando estruturas cristalinas distintas. O beta silicato dicálcico ( $\beta$ - $C_2S$ ) é a estrutura cristalina mais

encontrada, cujo sistema cristalino é o monoclinico, e se assemelha à estrutura da alita, em formas de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  ligados por cátions de cálcio, ou seja, uma estrutura irregular que gera vazios intersticiais menores quando comparados aos vazios da alita, o que faz com que a belita tenha sua reatividade reduzida (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os cristais de belita se formam a partir da reação entre a sílica e o óxido de cálcio encontrados na matéria-prima (CENTURIONE, 1993). Segundo Zampieri (1993), a taxa de reação da belita com a água é lenta, sendo assim a contribuição deste componente na resistência mecânica inicial é pouca e para idades posteriores é excelente, visto que a reação de hidratação é lenta.

#### 4.1.3.2 Aluminato e ferroaluminato de cálcio

Tanto o aluminato tricálcio quanto o ferroaluminato apresentam em sua estrutura cristalina uma certa quantidade de magnésio, sódio, potássio e sílica (MEHTA; MONTEIRO, 2008), e, como já comentado, são fases formadas através da cristalização dos materiais fundidos no processo de cliquerização (CENTURIONE, 1993).

A estrutura cristalina para o  $\text{C}_3\text{A}$  puro é a cúbica enquanto para o  $\text{C}_3\text{A}$  que possui quantidades consideráveis de álcalis são ortorrômnicos, os vazios presentes nessas estruturas são grandes, o que resulta em maior reatividade deste componente (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os cristais de  $\text{C}_3\text{A}$  são constituídos por seis tetraedros de  $\text{AlO}_4$  e os vazios são preenchidos por íons de cálcio, formados na etapa final do processo de clinquerização, e seu desenvolvimento está relacionado com o resfriamento do clínquer, quanto mais rápido resfriar, menor será seu desenvolvimento (CENTURIONE, 1993). De acordo com Zampieri (1993), a taxa de reação com a água é rápida, sendo sua contribuição para a resistência mecânica excelente nos primeiros dias de cura e pouco expressivas para idades mais longas. Estão presentes no cimento em proporções que variam de 6 a 10% (MELO, 2009).

Do mesmo modo que o  $\text{C}_3\text{A}$ , o  $\text{C}_4\text{AF}$  (também conhecido como ferrita) possui estrutura cristalina ortorrômnica, está presente no clínquer em teores que variam de 3 a 8% (MELO, 2009). Possui uma estrutura complexa, onde camadas de octaedros se intercalam com camadas de tetraedros, que compartilham os oxigênios de seus vértices, gerando grandes vazios na estrutura (CENTURIONE, 1993). Mesmo com a

presença destes grandes vazios, o  $C_4AF$  é considerado uma fase de baixa reatividade hidráulica, ou seja, possui uma taxa de reação lenta com a água, e de uma forma geral pouco contribui para a resistência mecânica tanto em idades iniciais quanto em idades posteriores (ZAMPIERI, 1993). A característica mais importante da ferrita é a boa resistência à corrosão que este componente fornece ao cimento (CENTURIONE, 1993).

#### 4.1.3.3 Óxido de magnésio e óxido de cálcio

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o óxido de magnésio no cimento é originado da dolomita e parte deste óxido pode entrar em solução sólida com os demais componentes (até 2%) ou aparecer na forma de MgO cristalino (superior a 2%), conhecido como periclásio. O óxido de magnésio possui estrutura cristalina cúbica e apresenta uma hidratação lenta, agindo como um material inerte tornando-se indesejável por não contribuir positivamente nas propriedades do cimento (CENTURIONE, 1993), mas em determinadas condições pode gerar degradação, por ter um processo de hidratação expansivo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A presença de óxido de cálcio livre, que possui estrutura cristalina cúbica, no cimento é resultado de uma homogeneização falha ou até mesmo temperatura ou tempo insuficiente no processo de clínquerização, de forma semelhante ao óxido de magnésio, o CaO possui uma hidratação lenta e pode causar deterioração nos produtos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 4.1.4 Tipos de cimento e aplicações

De acordo com Silva (1994), a classificação de cimentos adotada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é baseada nos tipos e teores de aditivos, na quantidade de componentes básicos, relacionadas com propriedades específicas, enfatizando assim as propriedades do cimento.

Existem cinco tipos de cimentos Portland, definidos pela ABNT, amplamente empregados na construção civil: comum, composto, alto-forno, pozolânico e alta resistência inicial (MORENO, 2001).

O cimento Portland comum é um ótimo cimento para aplicações gerais, a principal especificação que há para este tipo de cimento é que seja composto por 95-



100% de clínquer Portland e gesso, além de 0-5% de constituintes secundários, a fim de melhorar a trabalhabilidade ou retenção de água (NEVILLE; BROOKS, 2000). São definidos por CPI (cimentos sem adições) e CPI-S (cimento com aditivos). Segundo Silva (1994), os aditivos podem ser escória, pozolana ou calcário, sendo assim o teor de clínquer e gesso deve ser de 95 a 99%, sendo que as adições devem estar em proporções de 1 a 5% (ABNT NBR 5732/1991). Os demais tipos de cimento foram obtidos graças ao conhecimento científico e tecnológico do cimento comum; a princípio, o intuito era serem utilizados em aplicações especiais, mas com o decorrer dos estudos, foi possível perceber que os cimentos até então considerados especiais atendiam de forma semelhante ao cimento Portland comum às aplicações usuais e, muitas vezes, apresentavam alguma vantagem adicional, surgindo então o cimento Portland composto (ABCP, 2002).

O cimento Portland composto, que é o mais utilizado dentre os tipos de cimento, apresenta uma composição intermediária entre o cimento comum e o cimento com adições (alto-forno e pozolânico) e corresponde a 75% da produção industrial brasileira, sendo os mais encontrados no mercado (ABCP, 2002). São designados, segundo a norma ABNT NBR 11578/1991, como CP II-E (cimento Portland composto com escória, em teores que variam de 6 a 34% de escória), CP II-Z (cimento Portland composto com pozolana, contendo de 6 a 14% de pozolana) e CP II-F (cimento Portland composto com material carbonático, cujo teor varia de 6 a 10%). Este tipo de cimento produz uma geração de calor mais lenta quando comparado ao tipo I e são bastante indicados para obras que utilizam grande quantidade de concreto (SILVA, 1994).

De acordo com Silva (1994), no cimento Portland de alto forno, conhecido como CP III, o aditivo utilizado é a escória granulada de alto-forno, que precisa de um elemento catalisador, que, no caso, são a cal e o gesso, para apresentar as características aglomerantes. As reações de hidratação das escórias são lentas, o que tornaria inviável sua aplicação; a cal que é liberada no processo de hidratação do clínquer é o principal ativador químico da escória (ABCP, 2002). A escória possui óxido de cálcio, sílica e alumina em proporções diferentes do cimento Portland e é um resíduo gerado na fabricação de ferro-gusa, o que reduz significativamente o gasto de energia para a produção do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2000).

O cimento Portland pozolânico, denominado CP IV, é uma mistura homogênea de cimento Portland e um material pozolânico de granulometria fina (MEHTA;

MONTEIRO, 2008), em teores que variam de 15 a 50% (ABNT NBR 5736/1991). Segundo Neville e Brooks (2000), pozolana é um material silico ou silico-aluminoso que não apresenta um valor cimentício; porém, quando é finamente dividido e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, que foi liberado no processo de hidratação do cimento, em temperatura ambiente e produz compostos com características cementantes. As pozolanas serão tratadas detalhadamente no tópico 4.3 deste trabalho. As vantagens deste tipo de cimento são o baixo calor de hidratação, resistência a meios agressivos e inibição da reação entre álcalis do cimento e agregados considerados reativos. Como desvantagem, apresenta um endurecimento lento, mas pode apresentar resistência superior ao cimento Portland comum em idades mais avançadas (SILVA, 1994).

Já o CP V, cimento Portland de alta resistência inicial, apresenta um endurecimento rápido e, como o próprio nome já diz, possui um desenvolvimento rápido de resistência mecânica, o que não significa que este tipo de cimento possui uma pega rápida, pois na verdade seu tempo de início e fim de pega se assemelham ao tempo de pega do cimento comum. É por meio do aumento do teor de alita e por possuir uma maior finura, quando comparado ao cimento Portland comum, que a velocidade de ganho de resistência mecânica aumenta (NEVILLE, 2016).

A Tabela 4 mostra algumas das aplicações dos diferentes tipos de cimento Portland utilizados (MORENO, 2001).

Tabela 4- Aplicações para os diversos tipos de cimento.

Aplicações	Tipos de cimento						
	CP I	CP II			CP III	CP IV	CP V
	CP I-S	F	E	Z			
Fundações	P	P	MI	MI	I	I	-
Estrutura	P	P	P	P	P	P	MI
Assentamento	I	P	P	P	-	-	MI
Tubos concreto	I	P	P	I	-	-	MI
Concreto protendido	-	-	I	I	MI	MI	-
Obras marítimas e barragens	-	P	I	I	MI	MI	-
Concreto projetado	P	P	P	P	P	P	P
Argamassa armada	P	P	P	P	P	P	P

Em que: P- possível utilização, I- indicado e MI- mais indicado.

Fonte: Adaptado de MORENO (2001).

#### 4.1.5 Características e Propriedades dos Cimentos

Segundo Silva (1994), muitos fatores como o processo de fabricação, as matérias-primas utilizadas e sua origem e as adições empregadas são causa de variação das propriedades físicas e químicas do cimento, por isso são feitos ensaios com o produto final a fim de verificar suas propriedades finais.

Uma das propriedades comumente analisada é a finura do cimento, que afeta tanto a resistência mecânica quanto a velocidade das reações, visto que maiores resistências são atingidas em cimentos mais finos (SILVA, 1994). Esta propriedade afeta diretamente a reatividade do cimento com a água; quanto mais fino for o cimento, mais rápida será a reação de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A finura pode ser determinada pela distribuição do tamanho de partículas por sedimentação ou decantação (método que se baseia na lei de Stokes, o qual fornece a velocidade terminal da queda pela ação da gravidade da partícula em um fluido) ou pelo método de permeabilidade ao ar (mede a queda de pressão existente quando o ar seco flui a uma velocidade constante por meio de uma camada de cimento com porosidade e espessura determinados) (NEVILLE; BROOKS, 2000).

Outra propriedade importante é o tempo de pega, pois ela determina a trabalhabilidade do cimento. A perda de água livre presente na pasta de cimento, devido à formação dos produtos gerados na hidratação e à evaporação, faz com que a pasta de cimento perca consistência e, conseqüentemente, sofra o processo de enrijecimento, atingindo, posteriormente, a pega e o endurecimento.

A solidificação da pasta plástica de cimento recebe o nome de pega, sendo que o início da pega é marcado pelo ponto em que a pasta se torna não trabalhável. O processo de solidificação ocorre gradualmente; dessa forma, o fim de pega é o tempo gasto para que haja a solidificação completa da pasta de cimento. Com o tempo, os produtos de hidratação são formados e, como conseqüência, o cimento vai adquirindo resistência mecânica, processo chamado de endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Para determinar o tempo de pega é preciso preparar a pasta de cimento pura, que apresentará uma consistência padrão, determinando a quantidade de água necessária para produzir a pasta. O ensaio é feito com o aparelho de Vicat, onde, sob a ação de um peso padronizado, uma agulha penetra na pasta de cimento, e o início da pega ocorre quando a agulha não penetra mais que 5mm a partir do fundo do

molde. O tempo de pega varia de 45 a 60 minutos, dependendo da classe de resistência do cimento. O final da pega é encontrado quando a agulha marca a superfície da pasta, porém a borda cortante não marca a pasta (NEVILLE; BROOKS, 2010).

É de extrema importância que a pasta de cimento depois da pega não apresente alterações significativas no seu volume, para que não haja a desagregação da pasta enrijecida. As possíveis causas desta expansão são as reações com cal livre, magnésio e sulfato de cálcio (NEVILLE, 2016). A expansibilidade pode ser determinada pelo princípio de Le Chatelier (SILVA, 1994).

A resistência mecânica, determinada através de ensaio de compressão, é uma das propriedades mais importantes do cimento Portland. O procedimento para o ensaio é descrito pela norma ABNT NBR 7215/1996. De acordo com a norma, os corpos de prova são cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura e são moldados com argamassa na proporção de uma parte de cimento para três de areia padronizada, com relação água/cimento de 0,48. Ainda segundo a referida norma, são feitos quatro corpos de prova para cada idade de cura do cimento (3, 7 e 28 dias para os tipos de cimento com exceção do cimento Portland de alta resistência inicial) e são ensaiados em uma máquina de compressão. Na Tabela 5 são mostrados os valores esperados para algumas propriedades de cada tipo de cimento.

Tabela 5- Exigências físicas e mecânicas.

Tipo de cimento portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CP I	25		≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1	≤ 10 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E	25		≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1	≤ 10 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-Z	25		≥ 240						≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 <sup>(1)</sup>
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1	≤ 10 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 <sup>(1)</sup>
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0 <sup>(1)</sup>
CP III <sup>(2)</sup>	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 <sup>(1)</sup>
	32	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 <sup>(1)</sup>
	40								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 <sup>(1)</sup>
CP IV <sup>(2)</sup>	25								≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 <sup>(1)</sup>
	32	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 <sup>(1)</sup>
CP V-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 <sup>(1)</sup>	≤ 5 <sup>(1)</sup>	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

(1) Ensaio facultativo (2) Outras características podem ser exigidas, como calor de hidratação, inibição da expansão devida à reação álcali-agregado, resistência a meios agressivos, tempo máximo de início de pega.

Fonte: ABCP (2002, p.19).

De acordo com Silva (1994), as propriedades químicas analisadas para determinar a qualidade do cimento são:

- a) Perda ao fogo: aponta a hidratação prematura, adições, materiais carbonáticos e outras impurezas presentes;
- b) Resíduo insolúvel: com teor máximo de 1% para a maioria dos tipos de cimento. Como os componentes do clínquer bem como os aditivos são solúveis, tais resíduos são oriundos de outras fontes;
- c) Trióxido de enxofre: a fim de se regular o tempo de pega do cimento, é adicionado uma determinada quantidade de gesso, que também pode interferir nas demais propriedades. O trióxido de enxofre é determinado a partir do controle do teor de gesso adicionado;
- d) Óxido de magnésio: em elevadas quantidades podem formar o hidróxido de magnésio que pode, em alguns casos, provocar fissuras quando em contato frequente com a água, comprometendo a resistência mecânica, assim o teor máximo permitido é 6,5% (valor estabelecido pela norma ABNT NBR 5732/1991).

#### 4.1.6 Processo de hidratação

Hidratação é o termo utilizado para se referir às reações entre o cimento e a água que ocorrem com o passar do tempo, originando uma matriz forte e resistente. O estudo deste processo é realizado a partir da observação do comportamento de cada um dos compostos potenciais de forma isolada em contato com a água (FREITAS, 2001). O cimento Portland anidro não apresenta propriedades aglomerantes, mas suas propriedades são adquiridas quando se adiciona água, devido à série de reações químicas que ocorrem e tem, como produto, compostos com características de pega e endurecimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Trata-se de um processo complexo em que a fase hidratada mais importante, o silicato de cálcio hidratado, deve manter a coesão entre os grãos; ou seja, mantém unidas as fases não reagidas, os preenchimentos inertes e os produtos cristalinos da hidratação (RIDI; FRATINI; BAGLIONI, 2013).

As reações de hidratação podem ser divididas em quatro períodos diferentes, cujas etapas são mostradas na Figura 1, onde a reação inicial ocorre seguida por um período de baixa reação e posterior aceleração do processo de hidratação até a fase

de desaceleração (BULLARD et al., 2011; MCCARTER; AFSHAR, 1988; ZAMPIERI, 1993). O primeiro é denominado período inicial, em que há a ocorrência de reações instantâneas dos compostos do cimento e a água, e com muita intensidade, que duram somente alguns minutos. Posteriormente, ocorre uma fase que possui uma baixa atividade em que as alterações na pasta de cimento são mínimas, este período recebe o nome de indução e tem duração de 2 a 3 horas. Este período justifica o estado plástico que argamassas e concretos apresentam durante algum tempo.

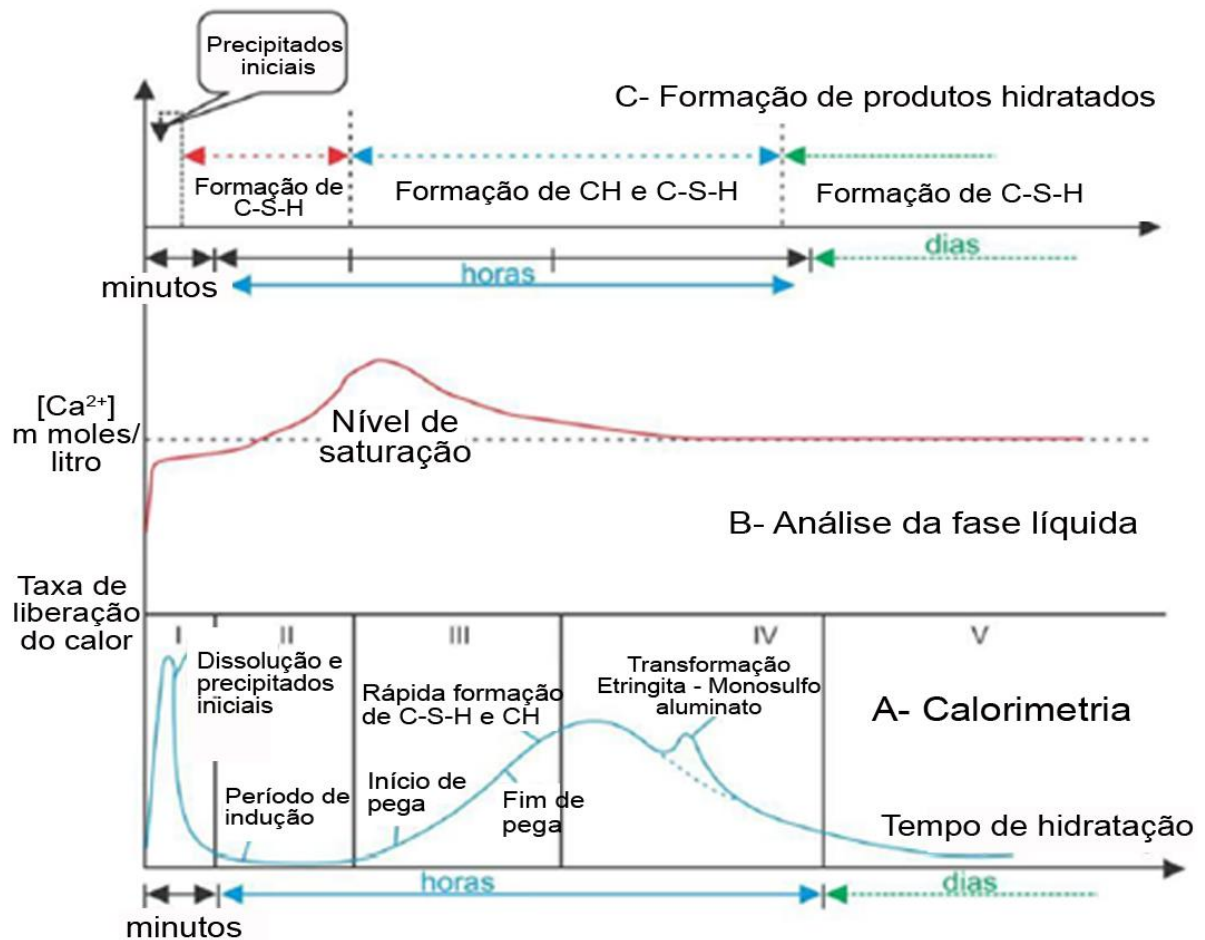


Figura 1- Representação dos estágios de hidratação do cimento  
Fonte: SILVA (2000, p.31).

Segundo Silva (2000), a característica que marca o fim deste estágio é o aumento da velocidade de hidratação, resultando no início da pega. O próximo estágio é denominado período de aceleração onde há a intensificação das reações de hidratação, como consequência, a mistura passa a adquirir coesão e resistência mecânica de forma gradual, denominado “pega”, devido à ocorrência destas reações e dos produtos gerados (ZAMPIERI, 1993). Este período dura de 4 a 8 horas e, ao

final, ocorre o fim do processo de pega e tem início a fase de endurecimento (SILVA, 2000). Geralmente após 12 horas, há a redução da velocidade das reações de hidratação, caracterizando o último período que é a desaceleração (ZAMPIERI, 1993).

De acordo com Silva (2000), há ainda um quinto estágio, onde as reações continuam ocorrendo lentamente e há uma redução da velocidade de forma gradativa, esta fase dura até o 28º dia (GRILLO, 2014).

#### 4.1.6.1 Mecanismos de hidratação

Conforme citado por Mehta e Moteiro (2008), existem dois mecanismos para a hidratação do cimento Portland. No primeiro ocorre a dissolução dos compostos anidros em seus constituintes iônicos, depois são formados hidratos em solução e sua posterior precipitação devido à solução sólida supersaturada, reorganizando, assim, os constituintes originais durante a hidratação, esse mecanismo é conhecido por dissolução-precipitação. O outro mecanismo proposto é o topoquímico, também denominado hidratação no estado sólido, em que a hidratação ocorre na superfície dos compostos anidros do cimento, ou seja, sem que os constituintes do cimento formem uma solução sólida. Nos estágios iniciais da hidratação, há a predominância do mecanismo de dissolução-precipitação e, em estágios posteriores, pode ocorrer a hidratação pelo meio topoquímico.

A Tabela 6 mostra os principais produtos de hidratação do cimento Portland.

Tabela 6- Principais produtos da hidratação do cimento Portland.

<b>Fase</b>	<b>Simbologia da indústria do cimento</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume molar (cm<sup>3</sup>/mol)</b>
Silicato de Cálcio hidratado	C-S-H	1,85	124,0
Hidrato de cálcio (portlandita)	CH	2,24	33,1
Etringita	C <sub>6</sub> A $\bar{3}$ S <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	1,75	715,0
Monossulfato	C <sub>4</sub> A $\bar{1}$ S <sub>1</sub> H <sub>18</sub>	1,99	313,0
Hidrogranada	C <sub>3</sub> AH <sub>6</sub>	2,52	150,0
Hidróxido de ferro	FH <sub>3</sub>	2,20	95,2

Fonte: MELO (2009, p.26).

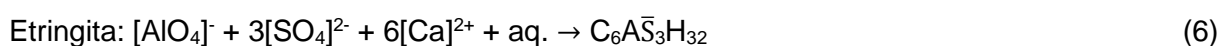
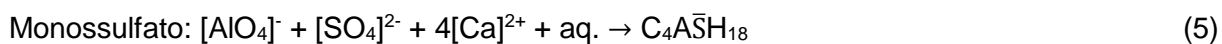
#### 4.1.6.2 Hidratação dos compostos do cimento

Aqui será detalhado o processo de hidratação de cada um dos componentes principais do cimento Portland.

##### a) C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF

O aluminato tricálcico é altamente reativo na presença de água, dessa forma a reação de hidratação é rápida e há uma grande liberação de calor, fato que é controlado pela adição de gipsita (sulfato de cálcio CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), a fim de retardar o tempo de pega do material caso contrário o cimento não poderia ser utilizado em suas principais aplicações, este composto atua na resistência mecânica nos primeiros dias de cura (KANNING, 2013). Dessa forma, são importantes as reações de hidratação com ou sem a presença de gipsita e ainda a hidratação do aluminato tricálcico junto com o ferroaluminato, pois quando este reage com a água na presença de sulfato os produtos obtidos são similares aos produtos geradas pela hidratação do aluminato, sendo C<sub>4</sub>A $\bar{S}$ H<sub>18</sub> e C<sub>6</sub>A $\bar{S}$ H<sub>32</sub> (MEHTA; MONTEIRO, 2008). O ferroaluminato de cálcio, C<sub>4</sub>AF, tem reação de hidratação rápida, porém não é instantânea (KANNING, 2013).

Durante o processo de hidratação do C<sub>3</sub>A quando há a gipsita, a solubilidade do aluminato tende a reduzir na presença de íons hidroxila, sulfato e álcalis, devido a rapidez que a gipsita e os álcalis entram em solução. De acordo com a concentração, tanto de aluminato quanto de íons sulfato em solução, o produto da precipitação pode ser o baixo-sulfato (monossulfoaluminato de cálcio hidratado, ou monossulfato) mostrados na equação 5, ou o alto-sulfato (denominação mineralógica: etringita) mostrado na equação 6 (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Segundo Faria (2004), a formação de etringita cessa quando não há mais íons sulfato (quando todo o gesso é consumido), fato que faz com que a etringita fique instável, com partes que não reagiram. A etringita então se desintegra e os elementos que foram dissolvidos reagem com os íons de aluminato tricálcico e ferroaluminato que não reagiram, convertendo-se então em monossulfato (FARIA, 2004).





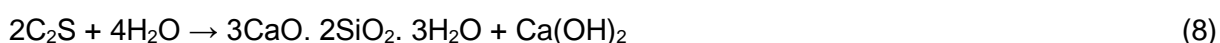
A adição de gipsita, como mostrado, altera a reatividade do aluminato tricálcico pois a etringita forma-se na superfície do  $C_3A$ , gerando, então, uma barreira, retardando o processo de hidratação (BULLARD et al., 2011).

De acordo com Neville (2016), o aluminato tricálcico é importante no cimento pois age como fundente e reduz a temperatura de clinquerização, além de tornar a combinação do óxido de cálcio com a sílica mais fácil. Quanto ao ferroaluminato, sua reação com o sulfato de cálcio geram o sulfoferrito de cálcio e o sulfoaluminato de cálcio, que tornam a hidratação dos silicatos mais rápida.

#### b) $C_3S$ e $C_2S$

Dentre os compostos presentes no clíquer o  $C_3S$ , também conhecido como alita, possui processo de hidratação rápida gerando um considerável calor de hidratação, e é responsável pela resistência mecânica até os 28 dias de cura. Já o  $C_2S$ , denominado também por belita, sofre uma hidratação mais lenta, atuando na resistência mecânica após 28 dias de cura (KANNING, 2013).

O processo de hidratação para os silicatos cálcicos ocorre por meio dos mecanismos químicos mostrados abaixo (SANTOS, 1975). As reações de hidratação para o silicato tricálcico e dicálcico são detalhadas nas equações 7 e 8, respectivamente.



Conforme citado por Melo (2009), ambos os silicatos ao reagirem com água formam o silicato de cálcio hidratado, o C-S-H (raramente chamado de gel de tobermorita), e o hidróxido de cálcio, CH, também chamado de portlandita. Mehta e Monteiro (2008) citam que ambos os silicatos geram silicatos hidratados com similaridade estrutural; contudo, apresentam variações na relação cálcio/sílica e no teor de água que é combinada quimicamente, possuindo características de um gel rígido. Esses silicatos hidratados podem apresentar tanto densidades altas como baixas (BULLARD et al., 2011). Cerca de 55% dos sólidos presentes na pasta de cimento hidratado são compostos por silicato cálcico hidratado enquanto, aproximadamente, 25% corresponde ao hidróxido de cálcio (GRILLO, 2014).

Nota-se, pelas equações, que o teor de portlandita liberado pela hidratação do silicato tricálcico é superior ao liberado pelo silicato dicálcico, segundo Mehta e Monteiro (2008), a hidratação do  $C_3S$  gera 39% de hidróxido de cálcio enquanto a do  $C_2S$ , 18%, sendo assim o esperado é que cimentos com altos teores de alita apresentem resistência mecânica inferior do que os cimentos com altos teores de belita, visto que neste último há uma maior formação de C-S-H, principal responsável pela resistência do cimento. Outro fator é que cimentos com maiores proporções de belita possuem maior durabilidade, pois o hidróxido de cálcio reduz a durabilidade, assim menor quantidade de portlandita garante melhora nesta propriedade.

#### 4.1.6.3 Microestrutura dos compostos de hidratação

Segundo Silva (2000), a pasta de cimento hidratada é composta por fases que não apresentam tamanho e morfologia uniformes e nem são distribuídas de forma homogênea, sendo que as principais são o silicato de cálcio hidratado, o hidróxido de cálcio, os sulfoaluminatos de cálcio e os grãos de clínquer que não foram hidratados.

A Figura 2 mostra um modelo de microestrutura de uma pasta de cimento bem hidratada: A é a representação da agregação de partículas de C-S-H pouco cristalina, H representa os produtos cristalinos hexagonais (hidróxido de cálcio, por exemplo), C representa cavidades e espaços vazios (que surgem quando espaços inicialmente ocupados pela água não estão preenchidos pelos produtos de hidratação) (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

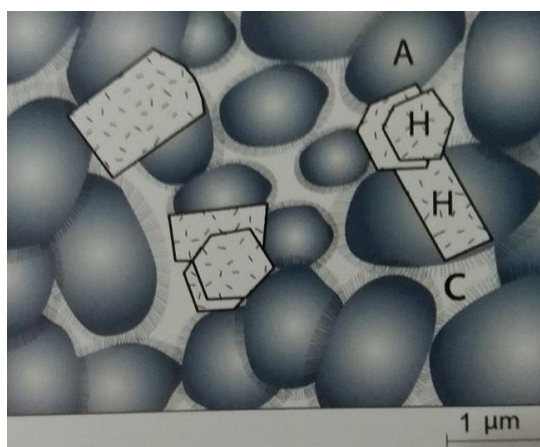


Figura 2- Modelo de pasta de cimento Portland bem hidratada. Em que: A é a agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas, H representa os produtos cristalinos hexagonais (como o CH) e C é a representação de cavidades ou vazios capilares. Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.28).

Cerca de 30 minutos após a adição de água ao cimento, forma-se uma camada gelatinosa na parte superficial do grão anidro do cimento (FREITAS, 2001). O sulfato de cálcio, os aluminatos e os compostos de cálcio entram em solução e interagem entre si, resultando no aparecimento de cristais aciculares (filamentos finos) de etringita, mostrada na Figura 3.

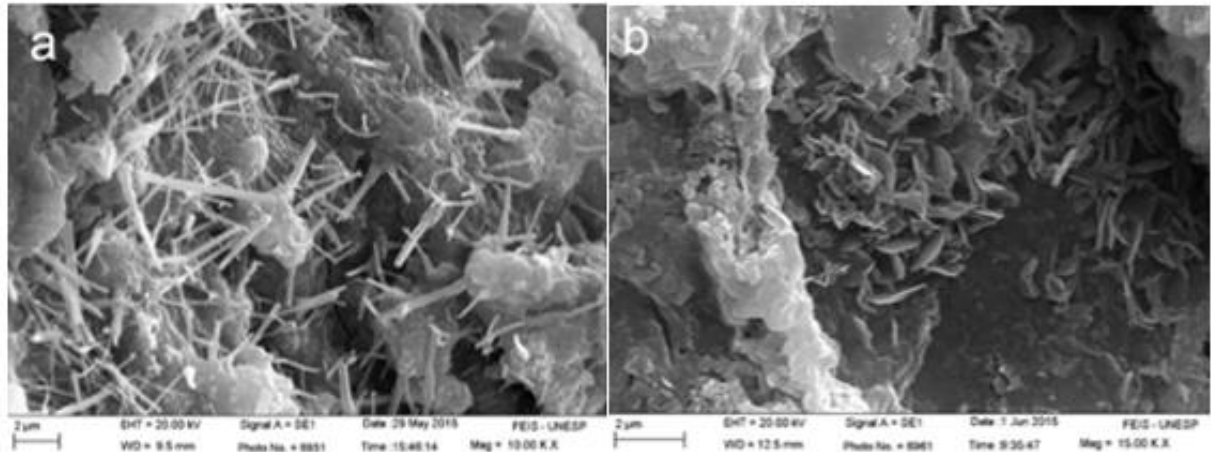


Figura 3- Microscopia Eletrônica de Varredura (a) da etringita e (b) de cristais hexagonais característicos dos monossulfato hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha.

Fonte: CASSOL (2015, p.67).

Após alguns dias, a etringita pode apresentar instabilidade e sofrer decomposição, dependendo da relação alumina-sulfato, gerando o monossulfato hidratado, cuja morfologia é de cristais hexagonais (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Outro resultado da hidratação dos aluminatos é o aluminato de cálcio hidratado, que também apresenta morfologia de placas hexagonais (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A formação de silicato de cálcio hidratado ocorre a partir da reação entre os grãos. A cristalização inicia-se na superfície e as camadas que são formadas vão se desprendendo do grão, assim a água o atinge e há a formação de novos silicatos cálcicos hidratados e, à proporção que a hidratação prossegue, há o aumento de C-S-H presente na pasta de cimento (FREITAS, 2001). Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a morfologia do C-S-H pode ser diversificada, desde fibras pouco cristalinas até redes reticulares, sendo que a sua estrutura cristalina ainda é indefinida e as forças de Van der Waals são responsáveis pela resistência apresentada pelo C-S-H.

Segundo Kanning (2013), o preenchimento dos espaços que a água ocupa é realizado pelo hidróxido de cálcio. A estequiometria deste constituinte é definida, sendo assim, a tendência é o surgimento de grandes cristais que possuem uma morfologia prismática hexagonal que são diretamente influenciados pelo espaço disponível, temperatura de hidratação e impurezas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A morfologia do C-S-H e do CH são mostrados na Figura 4; a Figura 5 mostra em detalhe o C-S-H.

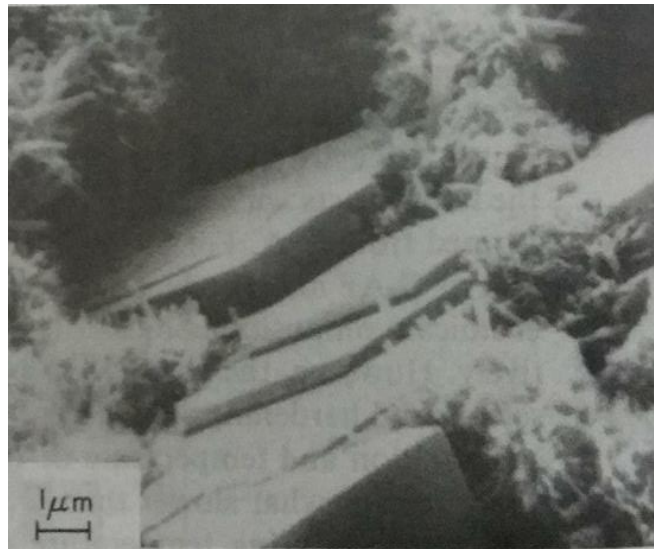


Figura 4- Microscopia Eletrônica de Varredura da fratura de uma pasta de cimento Portland aos 3 dias de idade. Nota-se cristais de CH maciços e cristais de CSH pouco cristalinos com morfologia fibrosa.  
Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.218).

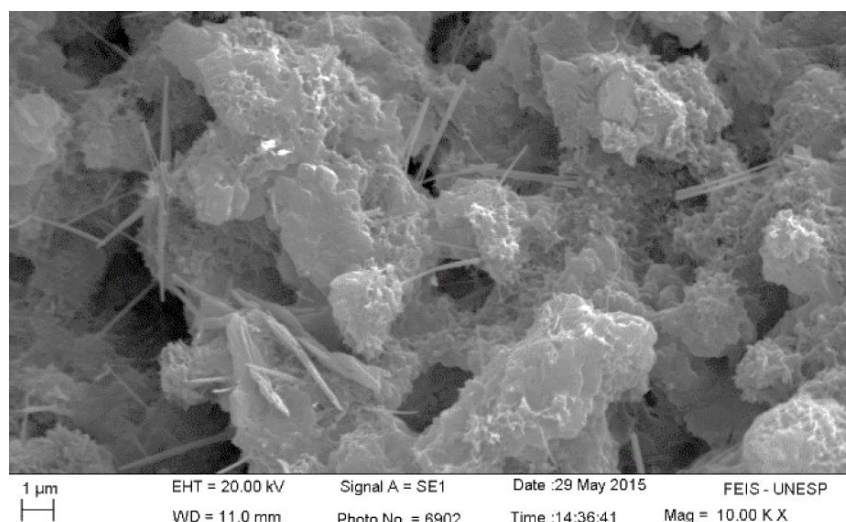


Figura 5- Detalhe do silicato cálcico hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha.  
Fonte: CASSOL (2015, p.67).

As partículas que compõem o clínquer apresentam tamanhos que variam na faixa de 1 a 50  $\mu\text{m}$ , sendo assim, as partículas menores tendem a sofrer hidratação mais rápida que as partículas maiores, o que pode gerar grãos de clínquer não hidratados (Figura 6), mesmo após um longo período de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

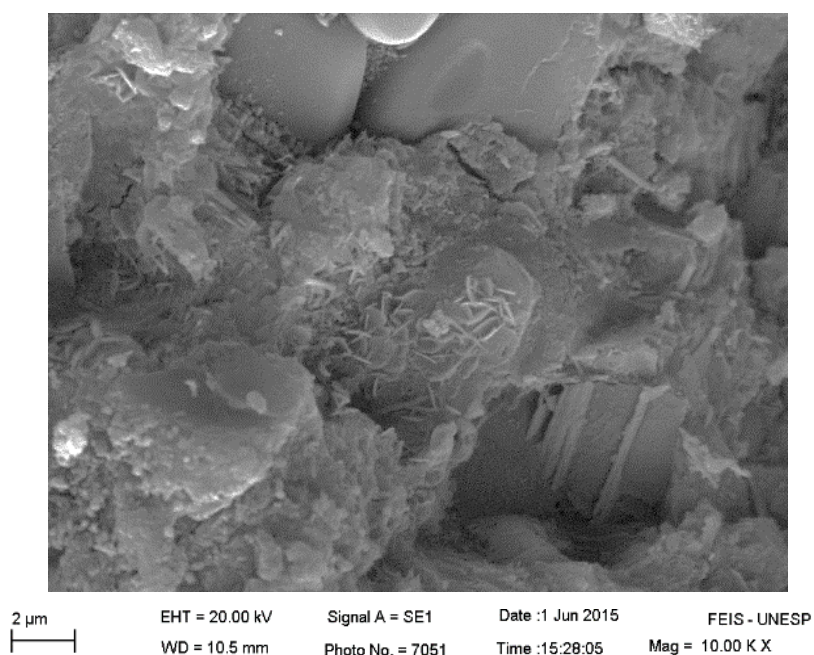


Figura 6- Grão de clínquer não hidratado, em pasta de cimento aos 7 dias de idade, com adição de resíduo de cerâmica vermelha.

Fonte: CASSOL (2015, p.68).

De acordo com Grillo (2014), as propriedades do cimento podem ser influenciadas pelos vazios na pasta de cimento, podendo causar redução da resistência mecânica, perda da durabilidade do cimento bem como o aumento da permeabilidade. Existem três tipos de poros que podem ocorrer na pasta de cimento.

Neville (2016) afirma que o C-S-H pode apresentar certa quantidade de água evaporável, o que leva à afirmação de que o C-S-H é poroso, sendo que esse tipo de poro, denominado espaço interlamelar, ocupa 28% do volume deste componente, porém o tamanho deste vazio é pequeno e não causa grandes perdas nas propriedades do cimento. Outro tipo de poro é o vazio capilar, que compreende os espaços que não foram preenchidos pelos componentes originados pelo processo de hidratação e apresentam formato irregular (NEVILLE, 2016). Por último, tem-se o ar

incorporado, que gera vazios esféricos, que são resultados do ar que fica retido na pasta de cimento durante o processo de mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 4.1.6.4 Calor de hidratação

Melo (2009) afirma que as reações de hidratação do cimento são exotérmicas, sendo então as medidas calorimétricas um meio muito utilizado para acompanhar o desenvolvimento das reações, considerando a quantidade de calor liberada com o decorrer do tempo.

De acordo com Neville (2016), o calor de hidratação pode atuar de forma positiva ou negativa. Um exemplo de influência negativa é quando a parte exterior do concreto perde uma parte do calor e gera um gradiente de temperatura, que posteriormente resfria podendo culminar em fissuração, enquanto o lado positivo é que o cimento atua como isolante proporcionando o aumento da temperatura no interior do material durante a hidratação.

Os constituintes do cimento possuem reatividades diferentes, logo suas velocidades de hidratação são distintas, a velocidade da liberação de calor é dependente da proporção destes compostos no cimento (NEVILLE, 2016). A liberação de calor é representada por uma curva típica relacionando a taxa da evolução de calor com o tempo de reação (RODRIGUES, 2012).

A Figura 7 mostra uma curva típica da liberação de calor no período de pega e endurecimento inicial.

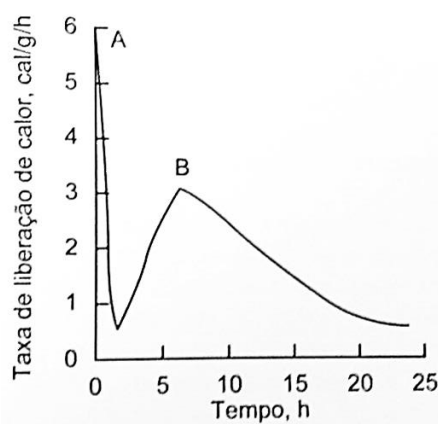


Figura 7- Taxa de liberação de calor de uma pasta de cimento Portland durante a pega e o período inicial de endurecimento.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.225).

Ao adicionar água ao cimento nota-se um grande desprendimento de calor (pico A), o que pode representar a dissolução de aluminatos e sulfatos. A parte decrescente do pico A representa a redução da solubilidade dos aluminatos devido à presença de sulfato em solução. A parte ascendente do pico B representa a formação de etringita e a evolução do calor envolve a dissolução de silicato tricálcico e o calor de formação de silicatos cálcico hidratado, o fim da pega ocorre exatamente no ponto B (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A Tabela 7 mostra o calor de hidratação para cada componente do cimento Portland.

Tabela 7- Calor de hidratação dos compostos de cimento Portland.

Composto	Calor de hidratação a uma dada idade (cal/g)		
	3 dias	90 dias	13 anos
C <sub>3</sub> S	58	104	122
C <sub>2</sub> S	12	42	59
C <sub>3</sub> A	212	311	324
C <sub>4</sub> AF	69	98	102

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.225).

Nota-se que os calores de hidratação com valores maiores correspondem ao aluminato e ao silicato tricálcico, que são os compostos de maiores reatividades e maior velocidade de hidratação, fatos que justificam tal liberação de calor.

De acordo com Silvos (2003), além da liberação de calor gerada pela reação de hidratação há também um aquecimento da pasta de cimento normalmente de 40 a 65°C, em condições adiabáticas e partindo da temperatura inicial. Todavia, poucas pesquisas são encontradas no que se refere às temperaturas envolvidas durante o processo de hidratação do cimento.

## 4.2 TURFA

A turfa é um material inconsolidado orgânico oriundo da decomposição de matéria vegetal em ambientes com pouca oxigenação, úmidos e ácidos. Do ponto de vista físico-químico, a turfa é um material poroso, altamente polar e com grande capacidade de adsorção de metais de transição e moléculas orgânicas polares (FRANCH, 2004; KAZEMIAN et al., 2011; PETRONI; PIRES, 1999).



De acordo com Girardello et al. (2013), grandes depósitos de turfa localizam-se no hemisfério norte; contudo, no Brasil, Indonésia e outras regiões subtropicais, apresentam reservas bastante significativas, sendo que a área correspondente à turfa no Brasil é de cerca de 16000 km<sup>2</sup> (MOAYEDI et al., 2014). A Figura 8 mostra o depósito onde é feita a extração de argila, na região da cidade de Poços de Caldas/MG, em que a turfa é um subproduto da mineração (MAESTRELLI et al., 2013).



Figura 8- Aspectos gerais da frente de lavra onde a turfa é coletada em Poços de Caldas/MG, a turfa é a porção mais escura.

Fonte: Adaptado de MAESTRELLI et al. (2013).

A turfa é uma estrutura complexa formada por quatro grupos principais, a saber: os betumes (ácidos graxos, ceras e esteróides), substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas), carboidratos (celulose e proteínas) e ligninas (substância fenólica), cuja composição elementar média é de 35 a 49% de carbono, 43 a 59% de oxigênio, 0,6 a 1,9% para o nitrogênio e teor de hidrogênio inferior a 6% e, ainda, contém muitos grupos funcionais (álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos, hidroxilas fenólicas e éteres). Os teores de C e H tendem a aumentar à medida em que o grau de decomposição aumenta, enquanto o O tende a diminuir (CARVALHO, 2011; CUEVAS, 2011; FERNANDES, 2007; KOPANITSA et al., 2016).

Além da variação na composição química, as turfas diferenciam-se entre si devido ao tipo de material vegetal, o clima, acidez, grau de decomposição e humificação (CARVALHO, 2011; CUEVAS, 2011; FERNANDES, 2007; KOPANITSA



et al., 2016). Sua coloração varia de marrom claro a preta (relacionada com o grau de decomposição), apresentando consistência esponjosa e odor orgânico. (FERNANDES, 2007; KALANTARI; PRASAD; HUAD, 2013; MOAYEDI et al., 2014).

Por ser um material originado a partir da decomposição de materiais vegetais em áreas com elevada presença de água, apresenta uma elevada quantidade de matéria orgânica, acima de 70% (GROVER; BALDOCK, 2013; TOLEDO, 1999; WONG; HASHIM; ALI, 2013). A turfa apresenta baixos valores em termos de propriedades mecânicas, por ser um solo orgânico e, conseqüentemente, ser altamente compressível e extremamente macia (KALANTARI; PRASAD; HUAD, 2010; KALANTARI; PRASAD; HUAD, 2013; KAZEMIAN et al., 2011; WONG et al., 2016).

Dependendo do tipo de plantas formadoras, sua origem e o grau de decomposição (em que se usa o método de Von Post, que identifica o grau de humificação por meio de análise visual) são formadas três classes de turfa, mostradas na Figura 9 (FERNANDES, 2007; FRANCH, 2004; KALANTARI; PRASAD; HUAT, 2013; KAZEMIAN et al., 2011; TOLEDO, 1999):

- a) Turfa fibrosa: conhecida também por turfa leve, é menos decomposta com elevada presença de fibras (mais de 2/3 de fibras vegetais reconhecíveis, em sua fração orgânica, ou seja, mais que 67%), normalmente marrom avermelhada, alto teor de orgânicos, extremamente ácida e mais compressiva dentre as três classes;
- b) Turfa hêmica: também denominada turfa escura, possui decomposição intermediária, saturada de água e presença intermediária de fibras (semi-fibrosa, de 1/3 a 2/3 correspondente à porção orgânica), com coloração variável de marrom a preto, possui comportamento intermediário entre turfa fibrosa e sáprica;
- c) Turfa sáprica: chamada também de turfa preta (pois é bastante escura), possui 1/3 de fibras reconhecíveis (inferior à 33%), é altamente decomposta e saturada de água.

De maneira geral, a turfa é empregada como combustível para aquecimento doméstico em países como Irlanda e Finlândia; na agricultura para a fixação de fertilizantes, na indústria metalúrgica por meio do coque de turfa, matéria prima para a produção do carvão ativado usado em tratamento de água e na adsorção de íons metálicos, podendo ainda ser utilizada como condicionador de solos, armazenador de nutrientes, para a recuperação de áreas degradadas e remoção de poluentes. A turfa

fibrosa é utilizada na horticultura e agricultura, a hêmica é usada tanto para fins energéticos quanto para a agricultura e a sáprica é aplicada, principalmente, para fim energético (CUEVAS, 2011; FERNANDES, 2007).

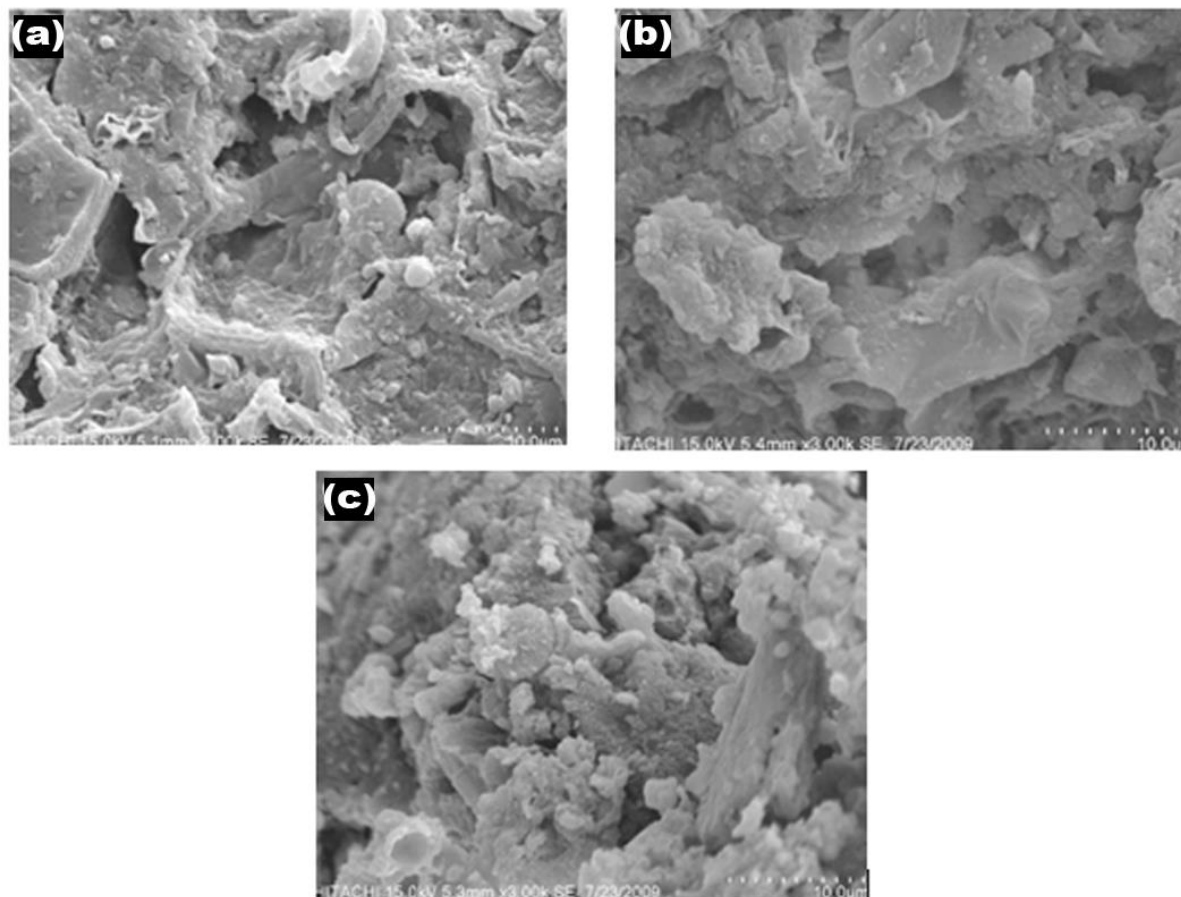


Figura 9- Microscopia Eletrônica de Varredura das três classes de turfa, em que (a) fibrosa, (b) hêmica e (c) sáprica.  
Fonte: KAZEMIN et al. (2011, p.3).

#### 4.3 POZOLANAS

De acordo com Gobbi (2014), há algumas décadas as adições minerais vem sendo bastante utilizadas no intuito de atuar na heterogeneidade das pastas de cimento, fator que afetava a resistência mecânica dos concretos. Segundo o referido autor, existem três grupos de adições minerais, sendo eles: os materiais cementantes que não precisam de hidróxido de cálcio para formar produtos aglomerantes; os materiais pozolânicos que reagem com o hidróxido de cálcio e geram produtos com propriedades cementantes e o fíler, que atua de forma física gerando maior empacotamento devido à sua granulometria finamente dividida.

De acordo com a norma ABNT NBR 12653/1992, p.2, os materiais pozolânicos são:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem ser divididas em três classes, a saber: N (pozolanas naturais e artificiais), C (cinza volante) e E (qualquer pozolana cujos requisitos são diferentes das classes anteriores) (ABNT NBR 12653/1992). Segundo esta norma, pozolanas naturais apresentam origem vulcânica e, na maioria dos casos, possuem caráter petrográfico ácido (65% de SiO<sub>2</sub>), já a pozolana artificial são os materiais que passaram por tratamento térmico ou são subprodutos industriais. São exemplos de pozolana natural os tufos vulcânicos e terras diatomáceas e pozolanas artificiais são cinzas volantes e argilas calcinadas (CASSOL, 2015). Há ainda a utilização de resíduos agroindustriais ou biomassas como pozolanas, caso da casca de arroz (RODRIGUES, 2012).

As pozolanas podem ser divididas em altamente reativas, comuns e pouco reativas. As pozolanas altamente reativas são constituídas, em sua maioria, por sílica pura na forma não cristalina, são exemplos a sílica ativa e a cinza de casca de arroz. As pozolanas comuns possuem uma pequena parte de matéria cristalina e as pouco reativas são formadas principalmente por materiais de silicato cristalino e uma quantidade muito pequena de componentes amorfos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Kanning (2013), a substituição do cimento por quantidades calculadas de pozolana controlam a formação dos cristais de hidróxido de cálcio, gerando o aumento da densidade da pasta. A formação dos compostos aglomerantes, resultados da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, ocorre devido à estrutura amorfa do silício e do alumínio, sendo a reação pozolânica mais intensa quanto maior for a instabilidade em meio básico e mais amorfo for o material (CASSOL, 2015). No caso das pozolanas artificiais, é o tratamento térmico que garante a reatividade do material, visto que, com o resfriamento, as fases cristalinas são transformadas em fases amorfas (GOBBI, 2014).

A utilização de pozolanas como adições minerais no cimento Portland apresentam vantagens como o retardamento ou inibição de reações álcali-agregado,

redução na geração de calor pelas estruturas maciças, aumento da resistência ao ataque por águas naturais e o custo do cimento podem ser reduzidos. Já as desvantagens compreendem o aumento da quantidade de água a ser usada e as velocidades, tanto de endurecimento quanto do desenvolvimento de resistência mecânica, podem ser reduzidas (SANTOS,1975).

As reações pozolânicas (equação 9), são aquelas que ocorrem entre a pozolana adicionada ao cimento e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), produto resultante da hidratação dos silicatos e que forma produtos como os silicatos e aluminatos hidratados que possuem poder aglomerante (MEHTA; MONTEIRO, 2008). De acordo com Paula (2006), a diferença entre os produtos da reação de hidratação e os produtos da reação pozolânica é a variação tanto na quantidade quanto na natureza das fases presente. É a sílica presente na pozolana que reage com o hidróxido de cálcio (MATOS NETO, 2013).



Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o uso de pozolanas é importante devido à três aspectos da reação pozolânica:

- a) São reações que ocorrem de forma lenta, bem como a taxa de liberação de calor, o que conseqüentemente afeta a velocidade do desenvolvimento da resistência mecânica. Segundo Zampieri (1993), esse menor desprendimento de calor no processo de hidratação reduz o aparecimento de fissuras térmicas, que comprometeriam a durabilidade do material;
- b) Os produtos desta reação causam o preenchimento dos espaços capilares trazendo melhorias à resistência mecânica e impermeabilidade do sistema, visto que a porosidade do material é reduzida, como mostra a Figura 10;
- c) A reação utiliza o hidróxido de cálcio, consumindo-o, afetando a durabilidade da pasta de cimento quando está em ambientes ácidos. De acordo com Sales (2014), como os poros são reduzidos há uma distribuição mais homogênea dos produtos da hidratação do cimento e reduz o transporte de fluido para o interior do material.

Comparando-se a Figura 10 com a Figura 2, nota-se uma redução dos vazios capilares e os cristais de CH foram substituídos por C-S-H adicional de pequena densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

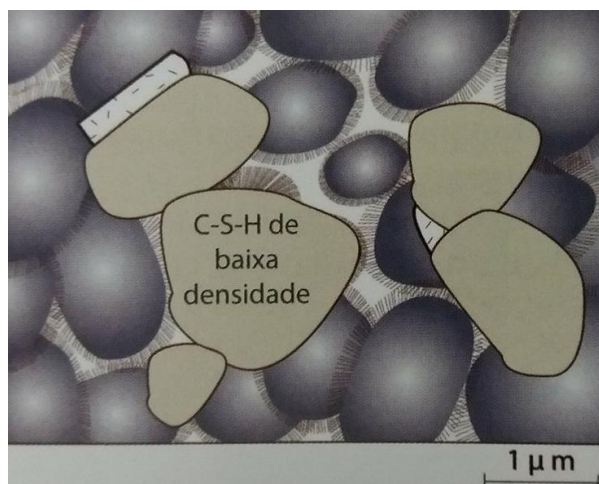


Figura 10- Representação esquemática de pastas de cimento bem hidratadas feitas com cimento Portland pozolânico.  
Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008, p.238).

Depois de 28 dias de cura, o teor de hidróxido de cálcio das pastas é cerca de 20% da massa inicial de cimento. Como discutido por Zampieri (1993), o hidróxido de cálcio pode afetar de forma negativa a qualidade e a durabilidade das pastas de cimento, por ser um composto de fácil solubilização e lixiviação e também não contribui de forma significativa para a resistência mecânica. A reação pozolânica gera ligantes adicionais que se assemelham aos produtos da hidratação do cimento, como resultado tem-se uma estrutura mais compacta e mais resistente, química e mecanicamente, fato que justifica os altos valores de resistência mecânica em longas idades (ZAMPIERI, 1993).

De acordo com Sales (2014), a sílica e a alumina são as principais fases ativas das pozolanas. As propriedades químicas requeridas para os materiais pozolânicos são mostradas na Tabela 8, conforme prescrições da ABNT NBR 12653/1992.

Segundo Santos (1975), quanto maior for o teor de sílica amorfa, maior é a atividade pozolânica do material. Matos Neto (2013) afirma que os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio em condições normais de temperatura e pressão pelo fato do silício e o alumínio que compõem a pozolana estarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômica. Porém, a constituição química de um material pozolânico não é um bom índice da sua capacidade de se combinar com

o hidróxido de cálcio. Segundo Medina (2011) este fato ocorre, pois, somente a composição química não possibilita diferenciar a sílica cristalina e a sílica amorfa.

Tabela 8- Exigências químicas para os materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
<b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> , %mín.	70	70	50
<b>SO<sub>3</sub></b> , %máx.	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade, %máx.	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo, %máx.	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em <b>Na<sub>2</sub>O</b> , %máx.	1,5	1,5	1,5

Fonte: ABNT NBR 12653/1992, p.2.

As propriedades físicas requeridas para os materiais pozolânicos são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9- Exigências físicas para materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45µm, %máx.	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, %mín	75	75	75
- Com a cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0
- Água requerida, %máx.	115	110	75

Fonte: ABNT NBR 12653/1992, p.2.

Como mostrado na Tabela 9, para que um material seja utilizado como pozolana é necessário que as partículas apresentem uma granulometria fina, o que pode causar o “efeito filler”, em que há a redução dos poros e consequente aumento de densidade. O processo de hidratação dos componentes do cimento somados à reação pozolânica e ao efeito filler culminam em um efeito sinérgico que garantem o aumento significativo da resistência mecânica (RÊGO et al., 2015).

Existem diferentes métodos para determinar a atividade pozolânica de um material. Um deles é medir o índice de atividade pozolânica com cimento Portland, que é definido como a relação do valor da resistência à compressão dos corpos de prova com 35% de pozolana e cimento e corpos de prova constituídos somente por cimento, ambos com idades de 28 dias, como definido na ABNT NBR 5751/1992

(ZAMPIERI, 1993), sua principal desvantagem é o tempo necessário para a obtenção dos resultados.

Existem ainda outras técnicas para obtenção dos valores de atividade pozolânica, onde essa é medida por meio da diferença de condutividade elétrica entre uma solução saturada de hidróxido de cálcio e depois da adição, sob agitação constante, de certa quantidade do material com potencial para agir como pozolana; como o material pozolânico reage com o hidróxido de cálcio, a quantidade de íons de cálcio dispersa em solução é reduzida, causando a redução da condutividade elétrica (MATOS NETO, 2013).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos detalhadamente os materiais utilizados bem como os métodos empregados para a obtenção dos resultados.

### 5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesse trabalho foram:

- a) Cimento Portland: Para fazer a argamassa foram utilizados os cimentos Portland dos fabricantes Cauê, Holcim e Lafarge, todos do tipo CP II E 32 devido à sua ampla utilização no mercado, ao seu baixo custo e disponibilidade;
- b) Turfa: A turfa foi utilizada como adição mineral, tendo sido fornecida pela indústria Togni Refratários S/A, localizada na cidade de Poços de Caldas/MG;
- c) Agregado miúdo: Em todas as argamassas foram utilizados areia e pó de brita (ambas sem fornecedores específicos) como agregado miúdo. O método de peneiramento foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7214/1982.

### 5.2 MÉTODOS

Primeiramente foram feitas as análises dos cimentos Cauê, Holcim e Lafarge quanto às suas composições químicas, propriedades físicas (finura, água na pasta de consistência normal, início e fim de pega, permeabilidade ao ar, massa específica, expansibilidade) e mecânicas (resistência à compressão) e também de tempo de pega.

Foi realizada também a caracterização da turfa (composição química e densidade real), a qual foi usada como adição mineral. Antes desta caracterização, a turfa passou por um processo de secagem em estufa a  $110^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas. Em seguida, foi moída por 2 horas (em moinho tipo galga construído em laboratório) até a obtenção de material passante na peneira nº 200 ( $75\mu\text{m}$ ) para que estivesse na granulometria adequada para as formulações a serem desenvolvidas no trabalho.



Foram moldados então, para os três tipos de cimentos, corpos de prova com adições de turfa (Tabela 10), de modo a se ter diferentes proporções de cimento e turfa; o teor de agregado miúdo foi mantido constante, bem como o teor de água adicionado durante o preparo das composições das argamassas. As mesmas proporções entre cimento e turfa foram investigadas para os diferentes tipos de cimento. Posteriormente, foram realizados os ensaios de análise química e porosidade aparente das composições de cimento e turfa após 28 dias de hidratação.

Tabela 10- Composições das argamassas.

Cimento Portland	Porcentagem de substituição	
	Cimento (%)	Turfa (%)
Cauê	95	5
Holcim	90	10
Lafarge	85	15
	80	20

Fonte: Da autora.

### 5.2.1 Caracterização dos cimentos e da turfa

A caracterização dos cimentos Cauê, Holcim e Lafarge foi realizada na Bruker-Atibaia/SP por meio da análise química quantitativa utilizando-se espectrômetro de fluorescência de Raios X por energia dispersiva, equipamento EDXRF S2 RANGER e o método Cement-Quant. Foi realizada, também na Bruker, a análise qualitativa de fases de amostras (DIFFRAC. EVA), determinando-se a seguir as quantidades de fases presentes nestes três cimentos através do Método de Rietveld (DIFFRAC.TOPAS), utilizando o difratômetro de Raios X de bancada D2 PHASER.

Já os ensaios para a determinação da resistência mecânica dos cimentos foram realizados na ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland- São Paulo. Os ensaios foram realizados em concordância à norma ABNT NBR 7215/1996.

Para a caracterização da turfa foi realizada a análise química semiquantitativa (fluorescência de Raios X) pela empresa de refratários Togni S/A em Poços de Caldas, equipamento Axios PW 4400/40 DY 1686.

A densidade real foi determinada através de Picnometria a Hélio no DEMa – UFSCar em quintuplicata através do equipamento Micromeritics AccuPyc 1330 com taxa de equilíbrio de gás  $5,0 \cdot 10^{-3}$  psig.min<sup>-1</sup>. Foi realizada também a difração de Raios

X da turfa na Universidade Federal de Alfenas - *Campus* de Alfenas, no Laboratório de Cristalografia, com varredura angular de 15 a 75 graus, passo de 0,1; a identificação das fases foi feita utilizando o programa Match!. A amostra enviada para a análise de DRX foi previamente preparada com a adição de água oxigenada (Farmax, volume 10), a fim de ocasionar uma reação entre o oxigênio proveniente da água oxigenada e o carbono presente na turfa devido à matéria orgânica, gerando gás carbônico, reduzindo assim a quantidade de orgânicos presentes e, conseqüentemente, facilitando a identificação dos minerais presentes na turfa, uma vez que a presença de compostos orgânicos dificulta a identificação dos picos.

A distribuição do tamanho de partículas de turfa via peneiramento foi executada no Laboratório de Engenharia da UNIFAL-MG, *campus* de Poços de Caldas. O procedimento foi realizado com base nas normas ABNT NBR 7211/2005 e ABNT NBR NM 248/2003. Foram pesados 300g de turfa para realização de peneiramento mecânico com o conjunto de peneiras das séries normal e intermediária, com abertura nominal variando de 9,5mm a 0,15mm por um período de 5 minutos. Posteriormente, foram pesadas as massas de turfa retida em cada uma das peneiras. Este procedimento foi realizado em triplicata.

### 5.2.2 *Determinação da resistência mecânica à compressão das composições*

O ensaio mecânico das composições (Tabela 10) foi realizado conforme norma ABNT NBR 7215/1996. O teor de turfa a ser adicionado na argamassa foi substituído na massa de cimento indicada pela norma (624g). As massas de cimento e turfa usadas no preparo da argamassa são mostradas na Tabela 11. A relação água/cimento utilizada foi 0,48, sendo 300g de água; a quantidade de areia normal utilizada foi 468 g para cada uma das frações (grossa, média grossa, média fina e fina). Todos estes valores foram calculados em conformidade à norma ABNT NBR 7215/1996.

O preparo das argamassas foi realizado no Instituto Federal do Sul de Minas, Campi de Pouso Alegre e de Poços de Caldas. Para promover a mistura da argamassa foi utilizado um misturador mecânico (argamasseira) da marca Solotest com cuba em aço inox e capacidade aproximada de 5L composto por uma pá de metal tipo raquete e motor com duas velocidades, mostrados na Figura 11.

Tabela 11- Massa de cimento e turfa utilizadas nas composições.

Porcentagem de turfa (%)	Massa de turfa (g)	Massa de cimento (g)
5	31,2	592,8
10	62,4	561,6
15	93,6	530,4
20	124,8	499,2

Fonte: Da autora.



Figura 11- Misturador mecânico e pá de metal.

Fonte: Da autora.

A norma ABNT NBR 7215/1996 prevê a consolidação dos corpos de prova na forma cilíndrica, com 50mm de diâmetro e 100mm de altura, os moldes eram feitos de aço com tratamento anticorrosivo. Assim, a argamassa colocada em moldes, de acordo com a norma, previamente untados com óleo vegetal (Figura 12), em quatro camadas, onde cada camada recebeu 30 golpes com o soquete normal, de forma homogênea. Após 24 horas de cura, os corpos de prova foram desmoldados e colocados em tanques com água.

Os corpos de prova foram rompidos com as idades de 7, 14, 28 e 91 dias; foram feitos 6 corpos de prova para cada uma das idades, sendo 24 corpos de prova para cada composição, totalizando 288 corpos de prova. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Instituto Federal do Sul de Minas, Campus de Pouso Alegre. Para este ensaio foi usada uma prensa hidráulica da marca Solotest com capacidade de 100 toneladas.



Figura 12- Corpos de prova pós moldagem.  
Fonte: Da autora.

A unidade dos valores obtidos é tonelada, dessa forma, utiliza-se a equação 10 para calcular a resistência à compressão (GRILLO, 2014).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \left( \frac{4F}{\pi \cdot d^2} \right) \cdot 10 \quad (10)$$

Em que:  $\sigma_{m\acute{a}x}$  é a resistência mecânica à compressão; F é a força máxima alcançada; d é o diâmetro do corpo de prova. O valor 10 (arredondamento de 9,81 m/s<sup>2</sup>) é acrescido à equação para conversão de massa para força.

### 5.2.3 *Análise química das composições*

Para a análise dos produtos formados durante o processo de hidratação das argamassas, foi feita a análise química semiquantitativa (fluorescência de Raios X) dos corpos de prova com idade de 28 dias, pela empresa de refratários Togni Refratários S/A em Poços de Caldas, o equipamento usado para as análises foi Axios PW 4400/40 DY 1686.

### 5.2.4 *Medição da porosidade dos produtos finais*

Foram usados os corpos de prova com idade de 28 dias para cada uma das composições e foram realizadas 6 medidas. Inicialmente, as amostras foram colocadas na estufa por 24 horas, a uma temperatura de aproximadamente 100 °C.

Posteriormente, as amostras foram pesadas para a obtenção da massa seca e colocadas imersas em água por um período de 24 horas. Após este período, os valores de peso imerso e peso úmido para cada uma das amostras foram coletados. O procedimento foi realizado com base na norma ABNT NBR 9778/1987. A porosidade aparente ou índice de vazios (NOCHAIYA et al., 2015) foi calculada, em porcentagem, pela equação 11:

$$PA = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} \cdot 100\% \quad (11)$$

Em que: Mu é a massa úmida; Ms é a massa seca e Mi é a massa imersa.

Para a análise de dados foi utilizada a ferramenta estatística de análise de variância, a Anava, com o uso do software Sisvar a um nível de significância de 5%.

#### *5.2.5 Análise das composições por microscopia eletrônica de varredura*

Para analisar a influência da turfa na microestrutura oriunda do processo de hidratação foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos corpos de prova rompidos com 91 dias de cura. Foram analisadas as composições contendo o menor e o maior teor de turfa (5% e 20%). A análise foi realizada no laboratório de Microscopia Eletrônica na Unesp Campus Rio Claro, utilizando o microscópio JSM-6010LA da marca Jeol. Para observação e análise da amostra com 20% de turfa e cimento Lafarge, foi necessária a metalização, utilizando o equipamento JEE-420, também da marca Jeol.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são mostrados os resultados obtidos a partir da metodologia proposta no presente trabalho.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 6.1.1 Caracterização dos cimentos

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos para a análise química quantitativa por fluorescência de raios X.

Tabela 12- Resultados da análise química quantitativa para cada fabricante.

Compostos e propriedades (%)	Cimentos		
	Cauê	Holcim	Lafarge
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,27	0,27
MgO	3,51	3,13	2,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,49	7,39	6,21
SiO <sub>2</sub>	19,29	22,91	24,31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,18	0,16
SO <sub>3</sub>	2,76	2,57	2,33
K <sub>2</sub> O	0,80	0,59	0,86
CaO	58,98	54,81	53,69
TiO <sub>2</sub>	0,24	0,34	0,30
MnO	0,21	0,27	0,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,48	1,90	2,71
SrO	0,13	0,20	0,16
Perda ao fogo	5,26	5,37	5,65

Fonte: Da autora.

A partir do resultado da análise quantitativa para os óxidos presentes no cimento, nota-se que o cimento Lafarge possui uma maior quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>), um dos óxidos essenciais na composição dos silicatos dicálcicos e tricálcicos; sendo assim, o esperado é que este cimento apresente uma maior quantidade de silicatos, os quais garantem o ganho de resistência mecânica, resultando, assim, em um valor de resistência mecânica superior quando comparado aos outros dois cimentos estudados que apresentam menor quantidade de sílica.

Ao comparar o teor de óxido de cálcio, é observado que o cimento Cauê apresenta uma quantidade maior deste óxido em sua composição, seguido pelo cimento Holcim e Lafarge. Tal óxido também é constituinte essencial dos silicatos dicálcicos e tricálcicos, responsáveis pelo ganho de resistência mecânica. Como o cimento Cauê apresenta uma maior quantidade deste óxido, o esperado é que ele apresente uma maior quantidade de silicato tricálcico, podendo ter um bom ganho de resistência no começo da hidratação, visto que este componente contribui significativamente para a resistência em idades iniciais.

Já o cimento Lafarge possui menor teor de óxido de cálcio; assim, a tendência é que ele apresente uma boa quantidade de silicato dicálcico ao invés do tricálcico em sua composição, o que resultaria em altos valores de resistência mecânica em idades mais avançadas, por volta de 28 dias.

Quanto à alumina, o cimento Holcim apresenta maior teor, seguido pelo Lafarge e Cauê. Sendo assim, a tendência seria que o cimento Holcim apresente maior quantidade de aluminato tricálcico e, conseqüentemente, boa resistência mecânica em idade iniciais, uma vez que este composto atua na resistência mecânica em idades iniciais (do primeiro ao terceiro dia) devido à sua alta reatividade.

Uma maior quantidade de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) afeta de forma negativa a resistência mecânica do produto, pois dependendo do teor de álcalis pode ocorrer sua combinação com o  $\text{SO}_3$  e gerar sulfatos alcalinos que agem de maneira negativa nas resistências mecânicas em idades superiores a 28 dias (CENTURIONE, 1993). Neste caso, os cimentos Cauê e Lafarge, apresentam valores próximos (1,18% e 1,13% respectivamente) de álcalis total, sendo um valor maior do que o apresentado pelo o cimento Holcim (0,86%), logo, o esperado é que haja uma menor resistência adquirida ao longo dos dias nos dois primeiros cimentos. Além disso, o cimento Lafarge apresenta maior quantidade de óxido de ferro, cuja presença diminui a pega do cimento.

É difícil relacionar a composição do cimento e suas propriedades com sua composição química na forma de óxidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Para isso, são usadas as equações de Bogue, já comentadas anteriormente, para determinar a composição potencial do cimento, fornecendo dados sobre a presença de alita, belita, aluminato tricálcio e brownmillerita. A Tabela 13 mostra os compostos de Bogue; as equações de 1 a 4 foram utilizadas para a realização dos cálculos.

Tabela 13- Compostos de Bogue para os três cimentos.

Compostos de Bogue	Cimento		
	Cauê	Holcim	Lafarge
Silicato tricálcico	45,21	-10,67	-18,42
Silicato dicálcico	21,20	66,49	79,58
Aluminato tricálcico	10,35	16,37	11,87
Ferroaluminato tetracálcico	7,55	5,78	8,25

(\*) o teor determinado para o silicato tricálcico foi negativo, o que não possui significado físico, indica o excesso de óxido de cálcio na composição química do cimento.

Fonte: Da autora.

Como já discutido anteriormente, a composição de Bogue fornece uma estimativa da quantidade dos compostos fundamentais do cimento, porém seu valor pode ser diferente do valor real, visto que para a realização deste cálculo são consideradas algumas hipóteses que dificilmente ocorrem em condições reais da produção de cimento. Os valores mostrados na Tabela 13 corroboram os comportamentos esperados ao analisar a composição em óxidos: como o cimento Lafarge tem menor quantidade de óxido de cálcio, ele apresenta maior quantidade de silicato dicálcico enquanto o cimento Cauê, que possui maior quantidade deste mesmo óxido, possui maior quantidade de silicato tricálcico; já o Holcim, que possui maior teor de alumina, apresenta também o maior teor de aluminato tricálcico.

Com o ensaio de difração de Raios X utilizando o Método de Rietveld (Anexos A e B) foi possível determinar as diferentes estruturas cristalinas para o silicato tricálcico (alita) e o aluminato tricálcico, presentes nos três cimentos em estudo (Tabela 14).

Tabela 14- Resultados da quantificação dos três cimentos.

Componentes	Valor em peso (%)		
	Cauê	Holcim	Lafarge
Alita (M3)	30,00	27,73	32,31
Alita (M1)	18,15	16,26	18,67
Calcita	12,99	18,41	14,61
Belita ( $\beta$ )	10,61	8,64	9,36
Ferrita	4,87	8,18	7,42
Aluminato (ortorrômbico)	4,83	1,06	0,26
Aluminato (cúbico)	3,73	3,94	3,15
Portlandita	3,53	1,98	2,33
Periclásio	1,83	0,44	0,26
Quartzo	0,54	2,28	1,86

Fonte: Da autora.



Os valores obtidos pela difração de Raios X diferem dos valores obtidos utilizando as equações de Bogue, como era esperado. Como as estruturas polimorfos do silicato tricálcico (M3 e M1) possuem pouca variação na estrutura cristalina e não possuem variação de reatividade evidente, o maior teor de formas monoclinicas M3 não exerce influência significativa nas propriedades finais do cimento, sendo que a variação presente tanto na atividade hidráulica quanto nas propriedades da alita são resultantes dos defeitos e desordens estruturais e não das estruturas polimorfos estabilizadas (CENTURIONE, 1993; GOBBO, 2003). Por este resultado, nota-se que o cimento Cauê apresenta os maiores teores de belita (10,61) e aluminato tricálcico total (8,56%) e uma boa quantidade de alita total (48,15%), diferindo do comportamento esperado.

Já para o cimento Lafarge era esperado que apresentasse o maior teor de belita e um menor teor de alita, contudo os resultados também são diferentes do esperado, pois apresenta maior quantidade de silicato tricálcico e quantidade intermediária de belita, dentre os três cimentos. Os valores apresentados pelo cimento Holcim são condizentes com o resultado esperado a partir da análise dos óxidos presentes no que diz respeito à quantidade intermediária de sílica e óxido de cálcio que ele apresenta, gerando valores consideráveis de alita total e belita, enquanto que para o aluminato tricálcico o valor encontrado não é o esperado, pois este cimento apresenta o maior teor de alumina.

Estas diferenças nos resultados podem estar relacionadas com as impurezas presentes nestes compostos, visto que a alita, belita, aluminato tricálcico e ferroluminato tetracálcico não são componentes totalmente puros. Para o cálculo a partir das equações de Bogue estas impurezas não são consideradas, ou seja, os compostos são considerados puros, o que não ocorre na prática, apresentando então diferenças entre o teor calculado pelas equações de Bogue e o calculado de maneira direta pela difração de Raios X (GOBBO, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O valor de perda ao fogo está relacionado à presença de impurezas e de orgânicos (SILVA, 1994). De acordo com a Tabela 12, o valor de perda ao fogo do Lafarge e do Cauê são os maiores, podendo justificar a presença de materiais em menor quantidade que afetam a formação dos compostos fundamentais do cimento, resultando em um teor diferente do teoricamente esperado.

A portlandita não atua significativamente na resistência mecânica do cimento (ZAMPIERI, 1993); sendo assim, um maior teor de portlandita pode implicar em menor

valor de resistência mecânica já que essa não participa do processo de hidratação do cimento; assim, o cimento Cauê tende a ter seu valor de resistência reduzido por apresentar o maior teor de portlandita dentre os três.

A Tabela 15 mostra a caracterização física dos três cimentos. O valor de massa específica é muito próximo para os três cimentos, o que torna difícil afirmar se há diferença significativa sob o ponto de vista estatístico.

A finura na peneira de 75 $\mu$ m para os cimentos Cauê e Holcim também apresentam valores muito próximos, sendo difícil afirmar através destes dois dados que há diferença entre eles. Entretanto, ao analisar o cimento Holcim, nota-se que ele apresenta tempo de hidratação (tempo de início e fim de pega) inferior ao do cimento Cauê, já que o tempo em aberto para o cimento Holcim de 1h15min enquanto que para o cimento Cauê o valor é de 1h25min, sendo este comportamento característico de cimentos mais finos, os quais tendem a apresentar tempo de pega menor (BENTZ, 2010). Este fato pode estar relacionado ao resultado da permeabilidade ao ar, que fornece uma noção sobre a superfície específica dos cimentos, sendo expressa em área superficial (BENTZ et al., 1999).

Tabela 15- Caracterização física dos três cimentos.

Ensaio	Normas	Resultados			Limites da NBR 11578/91
		Cauê	Holcim	Lafarge	
Finura na peneira 75 $\mu$ m (%)	NBR 11579/91	4,3	4,4	2,2	$\leq 10$
Água de pasta de consistência normal (%)	NBR NM 43/03	28,2	25,0	29,0	-
Início de pega (h:min)	NBR NM 65/03	5:05	3:45	4:05	$\geq 1h$
Fim de pega (h:min)	NBR NM 65/03	6:30	5:00	5:45	$\leq 10h$
Permeabilidade ao ar pelo aparelho de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	NBR NM 76/98	357	385	360	$\geq 380$
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 23/01	2,99	3,00	2,98	-
Expansibilidade (mm)	NBR NM 11582/91	0,0	0,5	0,0	$\leq 5,0$

Fonte: Da autora.

Nota-se que o cimento Holcim apresenta a maior permeabilidade ao ar quando comparado aos outros dois cimentos, tendo, portanto, uma área superficial maior que os outros cimentos em estudo, que afeta a velocidade da reação de hidratação, fazendo com que esta aconteça mais rápido. Este fato é explicado pela maior reatividade do cimento com a água devido ao menor tamanho médio de partículas e

consequente maior área superficial; ou seja, a reação de hidratação ocorre de forma mais rápida (maior taxa de hidratação), iniciando-se na superfície do grão e intensificando-se, de modo a aumentar a resistência mecânica do corpo de prova mais rapidamente, influenciando esta propriedade de forma significativa em idades iniciais (BENTZ et al., 1999; KANNING, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2000; TERMKHAJORNKIT; BARBARULO, 2012), ressaltando ainda que cimentos mais finos tendem a apresentar maiores valores de resistência mecânica inicial, pois a reação ocorre de forma mais rápida.

Ao analisar os resultados de finura na peneira de 75 $\mu$ m para o cimento Lafarge, é observado que este é o cimento mais fino dentre os cimentos analisados, pois possui finura na peneira de 75 $\mu$ m de 2,2%, que é praticamente a metade do apresentado pelos demais. O tempo de pega deste cimento (tempo em aberto de 1h40min), indica menor reatividade quando comparado ao cimento Holcim, devido à menor área superficial (com valor similar ao apresentado pelo cimento Cauê), implicando em um menor valor de resistência em idades iniciais. Porém, o início de pega do cimento Lafarge se inicia antes do cimento Cauê devido à maior finura na peneira de 75 $\mu$ m apresentada por este cimento. Vale ressaltar que as composições químicas afetam também este comportamento dos cimentos.

Normalmente, materiais cimentícios que possuem maior finura requerem maior quantidade de água para que a reação de hidratação ocorra (AIQUIN; CHENGZHI; NIGSHENG, 1999; SAJEDI; RAZAK, 2011). Ao observar os resultados para o ensaio de porcentagem de água da pasta de consistência normal, é observado que o cimento Holcim apresentou necessidade de uma menor quantidade de água (25%) que os outros dois cimentos para obterem a mesma consistência, o que mostra, pelo ensaio de finura na peneira de 75 $\mu$ m, que este cimento é o mais “grosso” e requer menor quantidade de água para a reação, sendo seguido pelo cimento Cauê (com valor intermediário para finura na peneira de 75 $\mu$ m) que possui valor intermediário dentre os três para a quantidade de água utilizada (28,2%) e por último o Lafarge, que apresenta maior finura na peneira 75 $\mu$ m e consequente maior necessidade de água (29%) para adquirir a mesma consistência.

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos de resistência mecânica à compressão dos três cimentos investigados. A Figura 13 mostra o comportamento mecânico nas idades de 3, 7 e 28 dias dos cimentos puros, sem adição de turfa.

Tabela 16- Resistência mecânica à compressão média dos três cimentos.

Cimento	Idade (dias)	RM (MPa)	Limites NBR 11578/91
Cauê	3	20,2 ± 0,40	≥10
	7	28,4 ± 0,28	≥20
	28	35,9 ± 1,62	≥32
Holcim	3	21,4 ± 0,49	≥10
	7	28,9 ± 1,01	≥20
	28	38,7 ± 1,08	≥32
Lafarge	3	19,2 ± 1,00	≥10
	7	26,2 ± 1,50	≥20
	28	38,8 ± 4,10	≥32

\*média de resistência mecânica à compressão para 4 corpos de prova, segundo ABNT NBR 7215/1996.  
Fonte: Da autora.

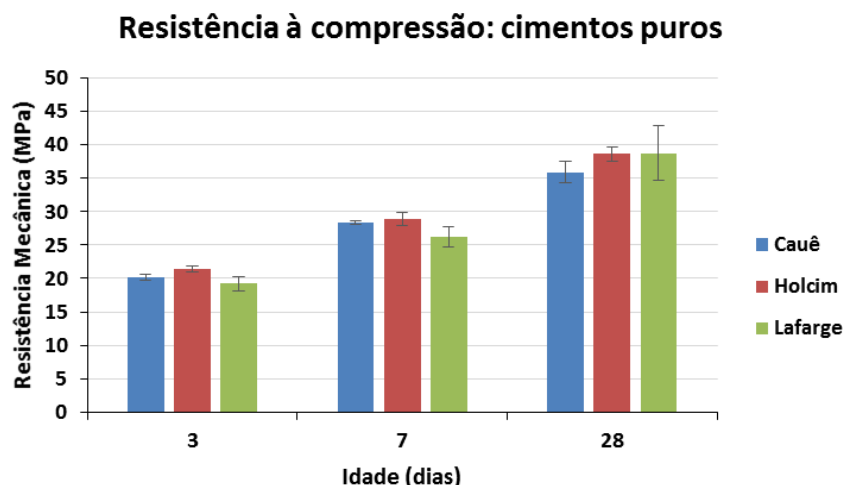


Figura 13- Resistência mecânica para os cimentos puros, sem adição de turfa.  
Fonte: Da autora.

Vale ressaltar que todos os cimentos utilizados neste estudo apresentam valores de propriedades químicas, físicas e mecânicas em conformidade com os valores estabelecidos pela norma ABNT NBR 11578/1991, possuindo valores de resistência mecânica significativamente superior aos valores prescritos na norma.

Os valores de resistência mecânica corroboram tanto o efeito da composição química quanto das características físicas nas propriedades finais apresentadas pelos três cimentos. O cimento Holcim apresenta maiores valores de resistência na idade de 3 dias, fato explicado pela maior permeabilidade ao ar aliado à quantidade significativa de alita total e de aluminato tricálcico presente em sua composição e ao baixo teor de álcalis, pois nestas condições a reação de hidratação ocorre de forma mais rápida e, conseqüentemente, o ganho de resistência também é maior nas

primeiras idades. Possui, também, uma quantidade bastante significativa de belita, o que garante boas resistências em idades avançadas.

Para o cimento Lafarge, que possui uma maior finura, mas apresenta uma permeabilidade ao ar relativamente inferior ao cimento Holcim e uma baixa quantidade de aluminato tricálcico, o ganho de resistência nas primeiras idades é o menor, quando comparado aos outros dois cimentos, mesmo apresentando uma boa quantidade de alita total, fato que pode estar relacionado ao teor de óxido de ferro presente, maior dentre os três cimentos, o que retarda o processo de pega. Contudo, a resistência mecânica aos 28 dias possui valor semelhante à do cimento Holcim, sendo explicado pelo teor de belita presente, que desenvolve resistência mecânica em idades superiores. Cimentos com maiores quantidades de belita tendem a apresentar maior valor de resistência mecânica em idades de 28 dias ou mais. Essa interferência na resistência mecânica se deve ao fato de que o  $C_2S$  gera cerca de 82% de C-S-H na hidratação, enquanto o  $C_3S$  produz 61% de C-S-H e gera mais hidróxido de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Pelo ensaio de resistência mecânica, nota-se que o cimento Cauê possui um bom ganho de resistência inicial por conter em sua composição teores consideráveis de alita e aluminato tricálcico total. Aos 28 dias ele possui o menor valor de resistência dentre os três, mesmo apresentando o maior teor de belita, o que pode ser justificado pelo maior teor de álcalis presente e também ao maior teor de portlandita (3,53%) que podem afetar de forma negativa a resistência mecânica, como já discutido anteriormente.

Pode ser percebido que o aumento da resistência mecânica é diretamente proporcional à idade dos corpos de prova, o que se deve ao processo de hidratação contínua durante anos a uma taxa decrescente (SAJEDI; RAZAK, 2011).

### 6.1.2 Caracterização da turfa

A densidade real encontrada para a turfa foi de  $1,87 \text{ g/cm}^3$ , obtida através de Picnometria a Hélio, como já mencionado anteriormente, sendo este valor relativamente baixo quando comparado a outros materiais encontrados na região (argilas, por exemplo); na Tabela 17 é mostrado o resultado da análise química quantitativa por fluorescência de raios X.

Tabela 17- Análise quantitativa da turfa.

<b>Composição e Propriedade</b>	<b>Teor (%)</b>
Perda ao fogo	32,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,36
SiO <sub>2</sub>	27,79
TiO <sub>2</sub>	1,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,00
CaO	0,13
MgO	0,16
Na <sub>2</sub> O	0,02
K <sub>2</sub> O	0,88
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,21
ZrO <sub>2</sub>	0,02

Fonte: Da autora.

As exigências químicas estabelecidas pela norma ABNT NBR 12653/1992 indicam que a soma dos teores de alumina, sílica e óxido de ferro sejam superiores à 50% para a classe E das pozolanas. Logo, a turfa atende a estes requisitos pois a somatória destes compostos corresponde à 64,15% da composição da turfa.

Quanto à porcentagem máxima de álcalis disponíveis em Na<sub>2</sub>O, o teor apresentado pela turfa é muito inferior ao limite máximo estabelecido pela norma, que é 1,5%. Contudo, a perda ao fogo é maior que 30% (o que está relacionado à presença de elevada quantidade de material orgânico), valor muito maior do que o estabelecido pela norma que é de, no máximo, 6%.

Como as maiores temperaturas atingidas durante a reação de hidratação estão em torno de 65°C (SILVOSO, 2003), o calor de hidratação não é suficiente para causar perdas de orgânicos. Assim, a elevada presença de carbono e voláteis pode afetar de forma negativa as propriedades finais adquiridas, porque o carbono não participa da reação de hidratação e quanto maior seu teor menor será o teor real de pozolana que estará presente para participar da reação (PAULA, 2006).

O alto teor de orgânico presente na turfa (confirmado pelo valor de perda ao fogo) desfavorece a hidratação do cimento, pois uma quantidade de água fica retida na matéria orgânica, fato que provoca a adsorção das partículas orgânicas na superfície do cimento. Uma vez que o processo de hidratação se inicia na superfície das partículas do cimento, observa-se maior dificuldade na formação dos produtos de hidratação, comprometendo o desenvolvimento de resistência mecânica (KAZEMIAN;

MOAYEDI; MOSALLANEZHAD, 2015; MOAYEDI et al., 2014; SAJEDI; RAZAK, 2011). Além disso, a turfa normalmente possui pH baixo e o pH ácido inibe a reação de hidratação do cimento, comprometendo o processo de hidratação (LAMIN et al., 2001; MOAYEDI et al., 2014).

As Figuras 14 e 15 mostram os difratogramas de Raios X, ambos para a turfa.

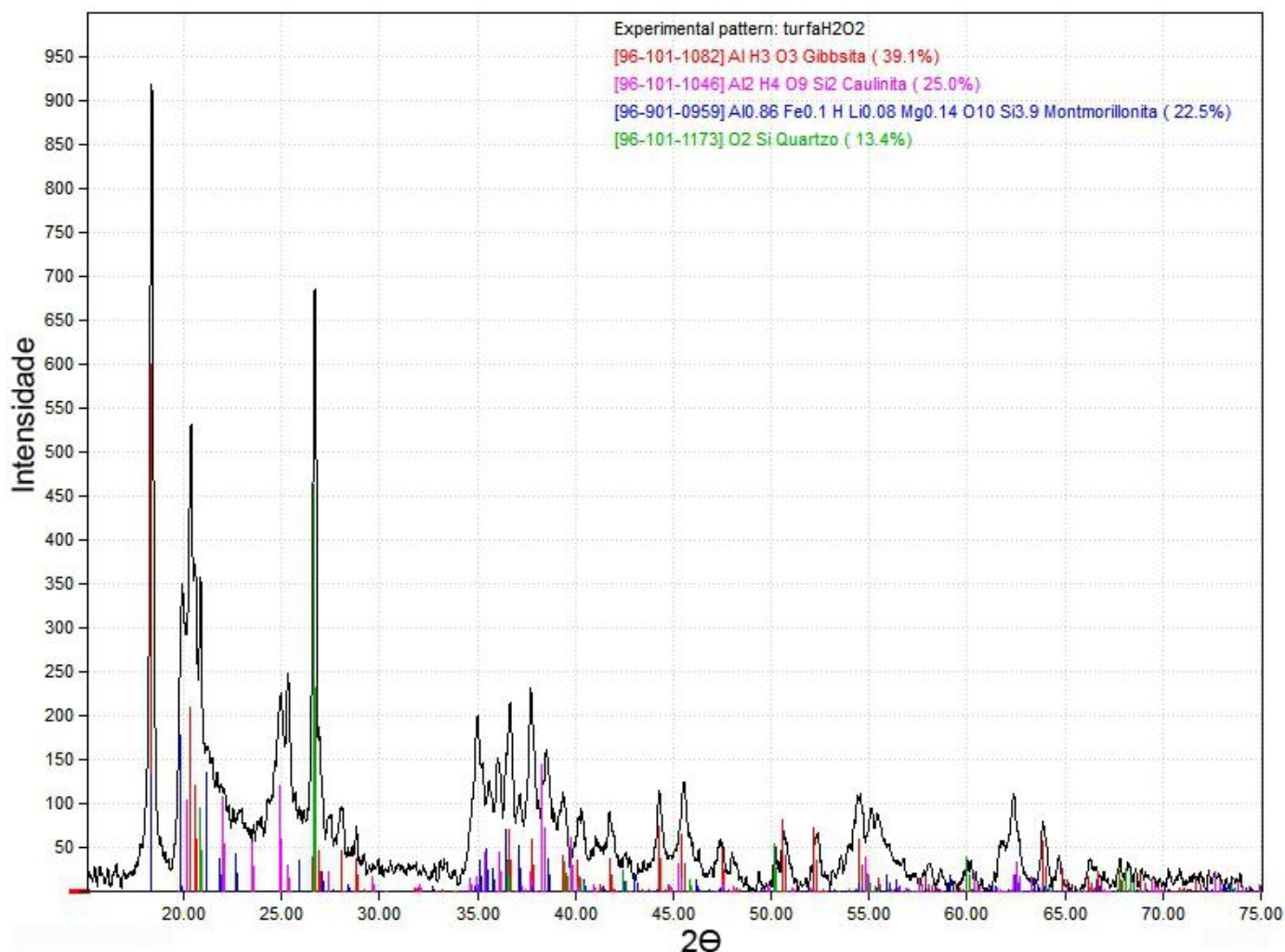


Figura 14- Resultado da determinação de fases utilizando o software Match!.

Fonte: Da autora.

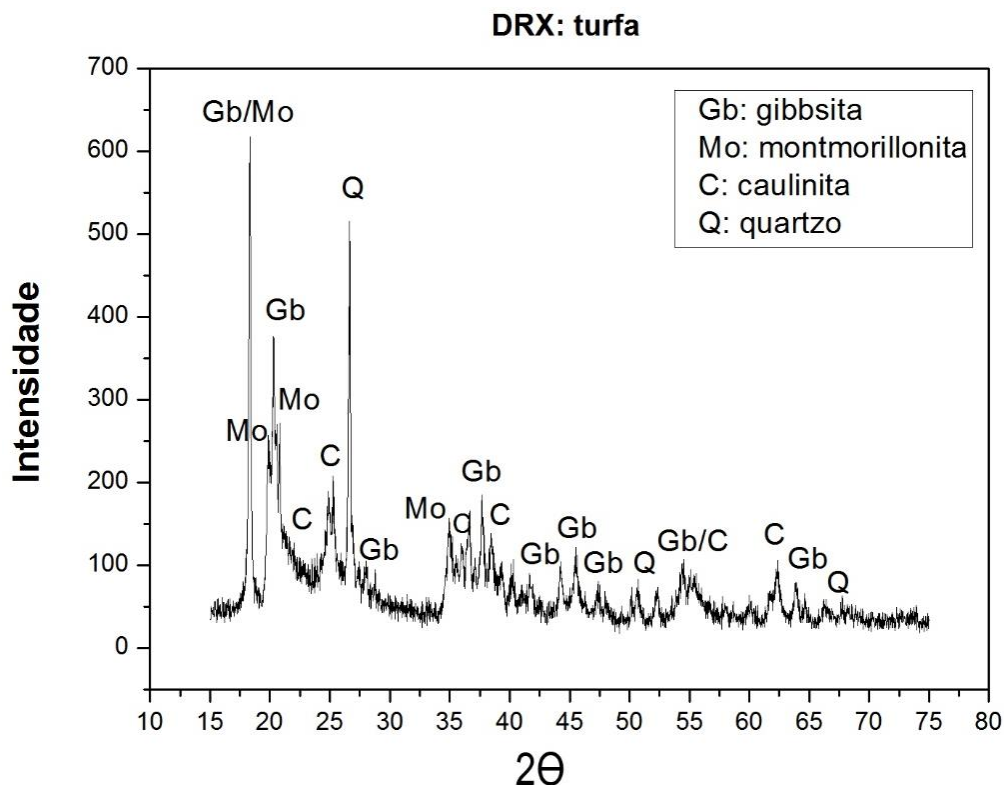


Figura 15- Identificação de fases da turfa.  
Fonte: Da autora.

Como a turfa é um material orgânico, não foi possível obter um difratograma mais “limpo”, mas ainda assim foi possível realizar a identificação de fases. Os minerais presentes na turfa utilizada são a gibbsita, a montmorillonita, a caulinita e o quartzo, cujos principais picos são destacados na Figura 15. Cabe ressaltar que em outra pesquisa do grupo utilizando turfa como matéria prima, foi feita uma difração de raios X de um outro lote da mesma turfa (MAESTRELLI et al., 2013) e são encontrados os mesmos minerais, além de feldspatos (podendo ser potássico ou sódico) (MAESTRELLI et al., 2013). Entretanto, não foi possível encontrá-los utilizando o software Match!.

O difratograma obtido (Figuras 14 e 15) é típico de um material cristalino, porém, apresenta fases amorfas. De acordo com Santos (2006), quanto maior o teor de sílica amorfa, mais reativo será o material, conferindo assim boas propriedades pozolânicas. A turfa em questão apresenta teor de sílica inferior a 30% e não se encontra em estado totalmente amorfo (como mostra o difratograma), o que pode afetar negativamente sua atividade pozolânica.



A Tabela 18 e a Figura 16 mostram os resultados obtidos para a caracterização granulométrica da turfa. A Figura 17 mostra as frações de turfa retida em cada peneira durante o ensaio.

Tabela 18- Caracterização granulométrica da turfa.

Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	Massa Acumulada (g)	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0	0	0
6,3*	0	0	0	0
4,8	0	0	0	0
2,4	2,63	2,63	0,88	0,88
1,2	5,37	8,00	1,79	2,67
0,6	31,17	39,17	10,39	13,06
0,3	57,10	96,27	19,03	32,09
0,15	61,07	157,33	20,36	52,44
Fundo	142,62	299,97	47,54	99,99
Total	299,97	-	99,99	-

\*peneira intermediária

Fonte: Da autora.

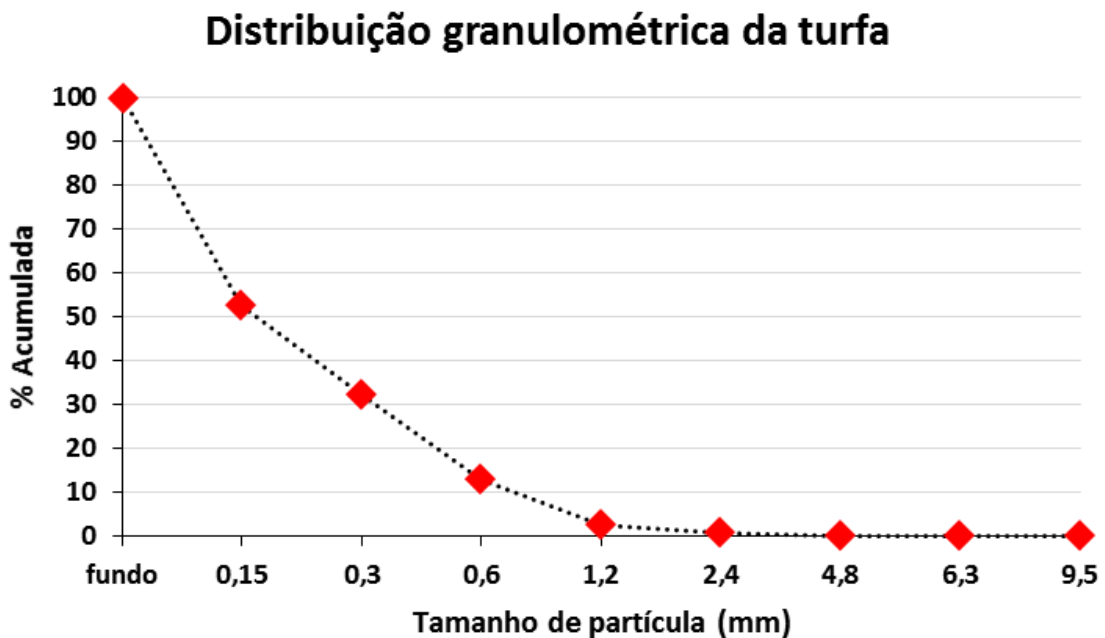


Figura 16- Curva de Distribuição granulométrica da turfa.

Fonte: Da autora.

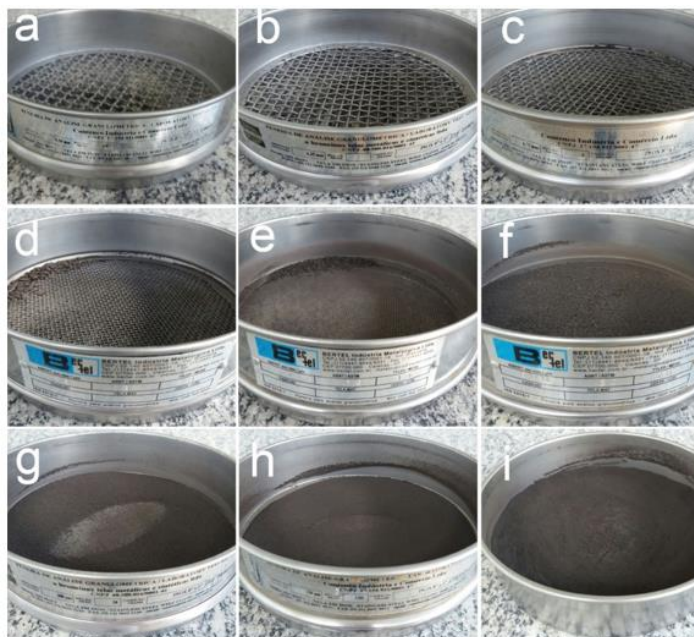


Figura 17- Resultado do peneiramento durante a realização do ensaio. São as peneiras, em mm: (a) 9,5; (b) 6,3; (c) 4,8; (d) 2,4; (e) 1,2; (f) 0,6; (g) 0,3; (h) 0,15 e (i) fundo. Fonte: Da autora.

Para as três primeiras peneiras da série não houve material retido, indicando, portanto, que a granulometria da turfa é mais fina. A maior quantidade da turfa ficou no fundo (47,54%) indicando que a maior parte do material apresenta tamanho de partículas inferior a  $150\mu\text{m}$ . Ao analisar a Figura 16, observa-se que o  $D_{10}$  é 0,8 mm, sendo que 10% das partículas estão abaixo deste valor, já o  $D_{50}$  é 0,15mm, aproximadamente, o que indica que 50% das partículas apresentam tamanho inferior a 0,15mm ( $150\mu\text{m}$ ). Para o  $D_{90}$  é encontrado o valor de 0,04 mm ( $40\mu\text{m}$ ), que mostra que 90% das partículas são inferiores a este valor, fato que favorece a atividade pozolânica deste material, visto que o valor indicado na norma ABNT NBR 12653/1992 é 76% de material passante na peneira de  $45\mu\text{m}$ .

## 6.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CIMENTO E TURFA

Os valores médios de resistência à compressão para os diferentes teores de turfa adicionados aos três cimentos em questão são mostrados nas Tabelas de 19 a 21.

Tabela 19- Resistência mecânica média das composições com cimento Cauê.

Teor de turfa (%)	Resistência mecânica média (MPa)			
	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
5	14,01 ± 2,16	17,02 ± 1,28	19,89 ± 2,30	21,97 ± 1,13
10	12,72 ± 0,70	14,17 ± 1,69	17,41 ± 2,34	18,02 ± 1,91
15	7,05 ± 0,93	13,2 ± 0,77	14,29 ± 8,46	14,69 ± 1,02
20	4,44 ± 0,79	5,68 ± 0,44	5,92 ± 2,74	5,95 ± 0,47

Fonte: Da autora.

Tabela 20- Resistência mecânica média das composições com cimento Holcim.

Teor de turfa (%)	Resistência mecânica média (MPa)			
	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
5	17,81 ± 1,38	19,97 ± 0,48	21,09 ± 3,07	24,51 ± 1,64
10	12,79 ± 1,19	14,63 ± 1,52	15,45 ± 1,79	18,58 ± 1,25
15	7,18 ± 1,09	13,6 ± 0,97	14,68 ± 1,11	15,95 ± 1,48
20	4,81 ± 1,00	6,09 ± 0,45	6,20 ± 0,37	6,52 ± 0,55

Fonte: Da autora.

Tabela 21- Resistência mecânica média das composições com cimento Lafarge.

Teor de turfa (%)	Resistência mecânica média (MPa)			
	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
5	18,05 ± 1,16	25,99 ± 3,19	27,39 ± 2,10	30,00 ± 1,83
10	13,1 ± 1,10	14,95 ± 2,15	18,95 ± 2,12	20,42 ± 1,16
15	8,37 ± 1,02	13,85 ± 2,11	15,45 ± 0,99	16,35 ± 2,20
20	5,2 ± 0,89	6,33 ± 4,55	6,67 ± 0,43	6,91 ± 0,58

Fonte: Da autora.

Quando os valores obtidos para cada uma das composições dos três cimentos são comparados com os valores de referência da Tabela 16, nota-se que para as idades de 7, 14 e 28 dias, os valores obtidos para todas as composições são inferiores aos valores de referência dos cimentos sem adição e são inversamente proporcionais ao teor de turfa adicionado; ou seja, quanto maior o teor de turfa, menor a resistência mecânica adquirida, como pode ser notado na Figura 18, cujos gráficos indicam os resultados obtidos para os quatro teores de turfa adicionados e os cimentos em estudo (CASSOL, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2008; ZAMPIERI, 1993).

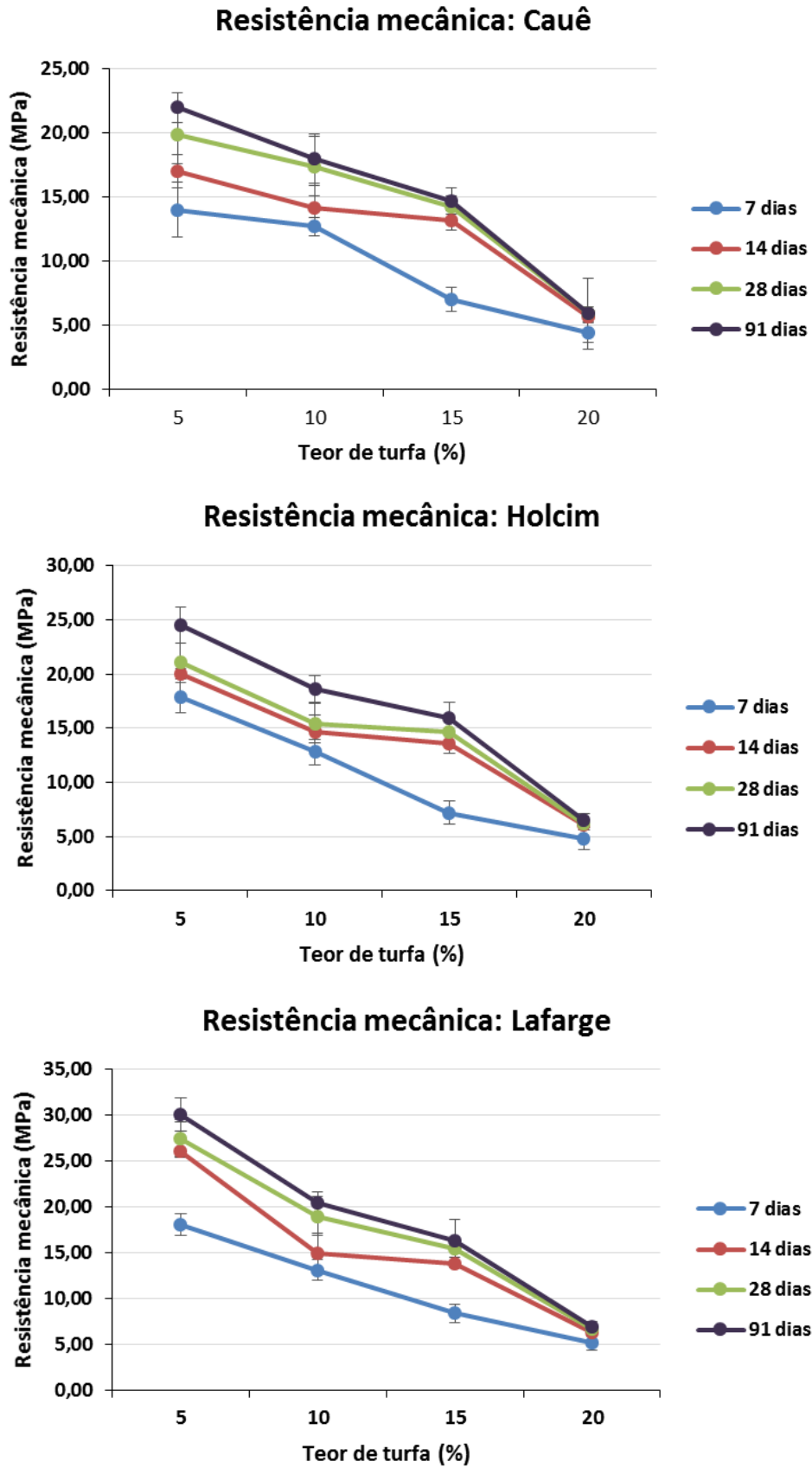


Figura 18- Resistência mecânica para as composições de turfa para cada cimento: Cauê (gráfico superior), Holcim (gráfico do meio) e Lafarge (gráfico inferior), por idade.  
 Fonte: Da autora.

A cristalinidade da turfa, como já mencionado, pode afetar diretamente a atividade pozolânica; sendo assim, é provável que a turfa investigada (com partes cristalinas), apresente baixa ou nenhuma reação com o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação dos cimentos, passando a se comportar como um material quase inerte (ZAMPIERI, 1993). Os resultados de resistência mecânica corroboram tal afirmativa, pois para materiais que agem como pozolanas, o valor de resistência mecânica aos 28 dias deve ser similar ou superior à referência (só o cimento).

No presente trabalho, os valores de resistência mecânica obtidos para o cimento Cauê puro foi de 35,9 MPa; com a adição de 5% de turfa, esse valor decresce aproximadamente 38% (22 MPa) e com a adição de 20% de turfa o valor cai ainda mais (cerca de 83% - 5,95 MPa); já para o cimento Holcim puro foi obtido o valor de 38,7 MPa, 24,51 MPa para a adição de 5% de turfa (redução de aproximadamente 36%) e 6,52 MPa com 20% de adição (queda de cerca 83%); para o cimento Lafarge há uma queda de aproximadamente 22% para o teor de 5% de turfa (de 38,8 para 30,0 MPa) e reduziu cerca de 82% para o teor de 20% (de 38,8 para 6,91 MPa), enfatizando que os valores obtidos são inferiores ao esperado, o que pode estar associado a uma baixa atividade pozolânica da turfa.

A resistência de cimentos pozolânicos é a soma das resistências geradas pelos produtos cimentícios do clínquer e das resistências dos compostos gerados pela reação pozolânica (ZAMPIERI, 1993). À medida em que o teor de turfa aumenta, a quantidade de cimento utilizada é menor, o que reduz bastante a resistência gerada pelos materiais cimentícios; como a turfa pouco age como pozolana, a tendência é que os valores de resistência diminuam, o que pode ser melhor observado no valor de adição de 20% de turfa, onde a resistência mecânica obtida é muito mais baixa.

Mesmo com teores baixos de adição - 5% - não há melhora no valor de resistência mecânica. Para este teor de turfa os valores obtidos aos 28 dias de cura foram 19,89 MPa, 21,09 MPa e 27,39 MPa, para os cimentos Cauê, Holcim e Lafarge, respectivamente, que são valores bastante inferiores quando comparados ao valor de resistência esperado para os cimentos puros, todos CII E 32, que é superior ou igual a 32MPa (aos 28 dias de cura), mesmo valor esperado para o cimento CII Z 32 (que também possui pozolana em sua composição), indicando que a turfa afeta negativamente a reação de hidratação. O esperado é que com o passar dos dias o valor de resistência mecânica aumente devido à hidratação do cimento, o que ocorre em todas as composições estudadas, mostrando uma coerência nos resultados.

Como as reações pozolânicas se processam de forma lenta, foram realizados o ensaio de resistência mecânica à compressão aos 91 dias como registrado na norma a fim de confirmar a perda no valor de resistência. O esperado, quando há a adição de pozolanas ao cimento, seria que, aos 91 dias, os valores de resistência fossem superiores aos valores de referência encontrados para os 28 dias de hidratação, contudo não é isso que ocorre. Há um aumento da resistência aos 91 dias quando comparada ao valor aos 28 dias, devido ao processo de hidratação do cimento que ainda ocorre; entretanto, o valor de resistência obtido é inferior ou pouco superior aos valores de referência na idade de 3 dias. Este fato confirma o comportamento esperado: um aumento na resistência devido à hidratação que ainda está ocorrendo e a queda nos valores à proporção que a turfa é adicionada. Vale ressaltar que o valor de resistência mecânica para o cimento pozolânico (CP IV 32) é superior a 40 MPa para os 91 dias de cura, mostrando, mais uma vez, que a turfa não age de forma positiva na resistência mecânica, visto que aos 91 dias os valores obtidos neste estudo são muito inferiores ao valor esperado. A Figura 19 mostra o comportamento dos três cimentos em função do teor de turfa.

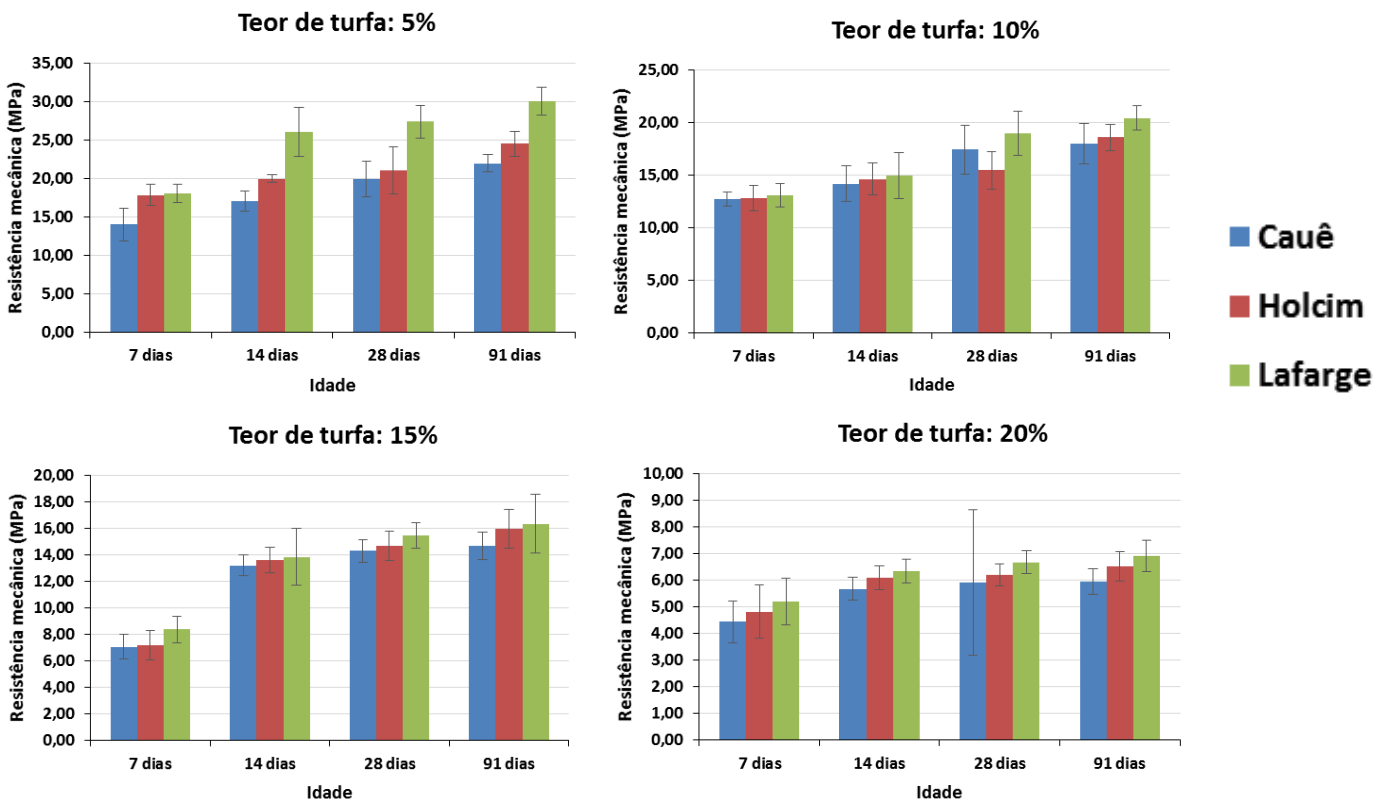


Figura 19- Comparação entre resistência mecânica e cimento utilizado para cada teor de turfa. Fonte: Da autora.

A partir da análise da Figura 19, pode-se perceber que o comportamento mecânico é o mesmo para todos os cimentos: a resistência mecânica devido ao processo de hidratação do cimento aumenta com a idade e o valor da resistência diminui à proporção que a turfa é adicionada para todas as idades. O cimento Lafarge apresenta uma melhor resposta devido às suas características químicas e físicas discutidas anteriormente.

A Tabela 22 indica a queda de resistência mecânica apresentada para cada um dos cimentos nas idades analisadas. Foi analisada a perda de resistência apresentada pela composição à medida em que a turfa foi adicionada à mistura, considerando os valores de menor (5%) e maior (20%) adição de turfa.

Tabela 22- Perda de resistência mecânica apresentada pelas composições.

Cimento	Perda de resistência mecânica (%)			
	7 dias	14 dias	28 dias	91 dias
Cauê	68,31	66,98	70,24	72,92
Holcim	72,99	69,50	70,60	73,40
Lafarge	71,19	75,64	75,65	76,97

Fonte: Da autora.

Nota-se que para os três fabricantes de cimento, independentemente da idade, a perda de resistência apresentada com o aumento do teor de adição de turfa é praticamente a mesma, permanecendo em torno de 70%. Sendo assim, o fato de que a turfa age como inerte na composição pode ser comprovado, pois se todos os cimentos apresentaram a mesma queda da resistência à proporção que a turfa é adicionada, a resistência mecânica apresentada ao final de 91 dias é correspondente à resistência gerada pela reação de hidratação do cimento remanescente.

Islam et al. (2014) estudou a adição de turfa, utilizando diferentes teores (5, 10, 15, 20 e 25%), em cimento para a produção de tijolos, a fim de utilizar a turfa em construção civil. Os resultados obtidos nessa pesquisa corroboram os resultados encontrados no presente trabalho, visto que com o aumento da adição de turfa na mistura há uma redução significativa nos valores de resistência mecânica à compressão.

Os valores encontrados por Islam et al. (2014) são significativamente inferiores aos obtidos na presente pesquisa. A Tabela 23 mostra a porcentagem de queda dos valores encontrados no presente estudo e o encontrado por Islam et al. (2014).

Nota-se que a queda de resistência para os três cimentos em estudo é, em maioria, similar para todos os teores analisados e que a redução no valor de resistência mecânica é maior no estudo de Islam et al. (2014), principalmente para os teores de 10 e 15%, em que a queda do valor desta propriedade é praticamente 20% superior à redução encontrada para os três cimentos.

Tabela 23- Queda de resistência mecânica com base no valor de referência dos cimentos sem adição.

<b>Teor (%)</b>	<b>Cauê</b>	<b>Holcim</b>	<b>Lafarge</b>	<b>Islam et al. (2014)</b>
5	44,60%	45,50%	29,41%	48,26%
10	51,50%	60,10%	51,16%	71,36%
15	60,19%	62,07%	60,18%	87,95%
20	83,51%	83,98%	82,81%	89,37%

Fonte: Da autora.

As diferenças encontradas podem estar relacionadas ao tipo de cimento e turfa utilizados (Islam et al. utilizaram o cimento Portland comum, CP I). Contudo, vale ressaltar que o comportamento mecânico foi o mesmo em ambos os estudos, pois houve uma queda significativa nos valores de resistência mecânica à compressão quando adicionada turfa à mistura.

Há ainda estudos referentes à utilização de cimento para a estabilização de solos de turfa para suportar projetos de engenharia (como estradas, por exemplo). Nestes estudos são realizadas adições de cimento em turfa, em diferentes teores, e o resultado obtido é que quanto maior a proporção de cimento adicionado à mistura (turfa e cimento), maior a resistência à compressão apresentada pelo material, devido ao processo de hidratação e ao endurecimento do cimento bem como a interação entre os substratos presentes no solo e os produtos da hidratação, resultando ainda em uma redução de vazios nos produtos finais (KALANTARI; PRASAD; HUAT, 2010; KALANTARI; PRASAD; HUAT, 2013; KAZEMIAN; MOAYEDI; MOSALLANEZHAD, 2015; KOPANITSA et al., 2016; MOAYEDI et al., 2014; WONG et al., 2016; WONG; HASHIM; ALI, 2013). Esses fatos comprovam, mais uma vez, os resultados encontrados, em que as maiores resistências mecânicas são encontradas nas misturas que contém menor teor de turfa, ou seja, maior proporção de cimento.



### 6.3 ANÁLISE DA POROSIDADE DAS COMPOSIÇÕES DE CIMENTO E TURFA

A Figura 20 mostra o resultado obtido para a porosidade aparente de cada uma das composições estudadas.

A porosidade afeta diretamente nas propriedades macroscópicas do cimento, como a resistência mecânica (RIDI; FRATINI; BAGLIONI, 2013). Ao observar os valores de porosidade aparente, nota-se que para o cimento Cauê há uma variação mínima na porosidade à medida que a proporção de turfa na composição aumenta, enquanto para o cimento Holcim a variação é um pouco maior e o Lafarge apresenta uma maior variação. Ao aplicar a Anava (análise de variância, apêndice A), para os fabricantes de cimento Cauê e Holcim, o valor-p é superior ao nível de significância usado (5%), dessa forma aceita-se a hipótese de que todos os tratamentos (teores de turfa) são iguais estatisticamente, não influenciando, portanto, na porosidade aparente do material. Já para o fabricante Lafarge o valor-p é menor que 5%, dessa forma rejeita-se a hipótese inicial, logo, ao menos um tratamento é estatisticamente diferente dos demais. Com o teste de Scott-Knott foi possível identificar quais os tratamentos eram diferentes: os teores 5 e 10% são estatisticamente iguais e os teores 15 e 20% são diferentes. Assim, pode-se concluir que o efeito da porosidade gerada pela adição de turfa nesse cimento pode ter contribuído para a queda da resistência mecânica, visto que o maior teor de turfa apresenta uma maior porosidade aparente.

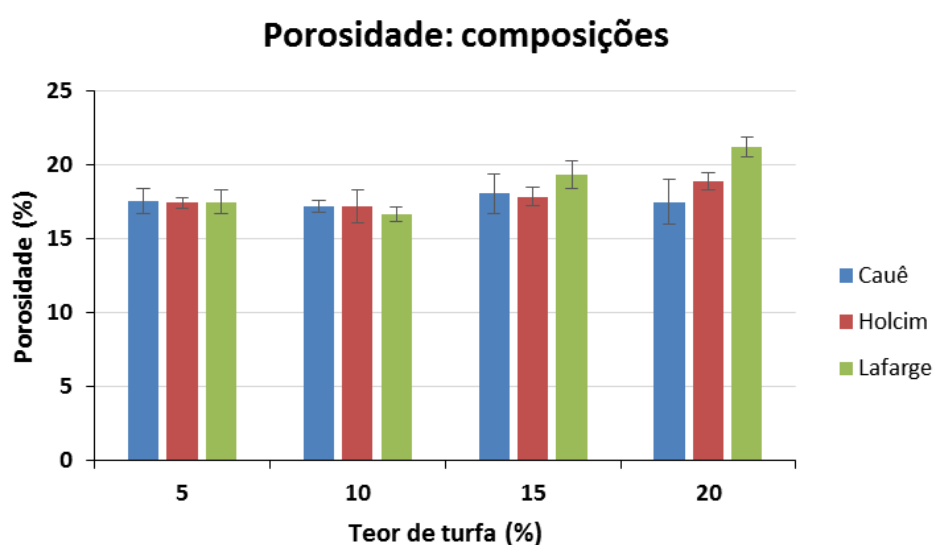


Figura 20- Porosidade aparente para cada um dos cimentos em função do teor de turfa.  
Fonte: Da autora.

De modo geral, a turfa não afeta de forma significativa a porosidade das composições de cimento e turfa, mesmo sendo um material poroso, e, conseqüentemente, não afeta a resistência à compressão, que poderia ser reduzida pela maior porosidade do material. A redução da resistência mecânica é, então, devido à substituição de parte do cimento por turfa, que não apresenta propriedades pozolânicas e age como inerte.

#### 6.4 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS COMPOSIÇÕES APÓS 28 DIAS DE HIDRATAÇÃO

As Tabelas 24 a 26 mostram o resultado da análise química para as composições dos cimentos Cauê, Holcim e Lafarge para os diferentes teores de turfa. Nota-se que para todos os componentes, os valores encontrados são relativamente próximos, considerando a precisão do equipamento, dificultando encontrar resultados conclusivos sobre a variação na composição química das composições que corroborem os resultados anteriores.

Tabela 24- Composição químicas após 28 dias de hidratação para cimento Cauê.

<b>Composição e Propriedade</b>	<b>Teor nas composições (%)</b>			
	<b>Cauê 5%</b>	<b>Cauê 10%</b>	<b>Cauê 15%</b>	<b>Cauê 20%</b>
Perda ao Fogo	6,02	5,84	7,10	7,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,76	7,63	7,81	8,08
SiO <sub>2</sub>	61,61	62,46	62,87	63,21
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,19	0,14	0,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,88	1,93	1,82	1,85
CaO	16,17	15,81	15,79	14,75
MgO	1,04	1,02	1,03	0,90
Na <sub>2</sub> O	2,71	2,67	1,64	1,39
K <sub>2</sub> O	2,49	2,23	1,60	1,49
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,02	0,02	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,08	0,08	0,09
ZrO <sub>2</sub>	0,02	0,03	0,03	0,05

Fonte: Da autora.

Tabela 25- Composição químicas após 28 dias de hidratação para cimento Holcim.

Composição e Propriedade	Teor nas composições (%)			
	Holcim 5%	Holcim 10%	Holcim 15%	Holcim 20%
Perda ao Fogo	5,56	6,23	6,25	7,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,80	8,73	9,10	9,13
SiO <sub>2</sub>	64,04	60,90	61,16	61,36
TiO <sub>2</sub>	0,12	0,16	0,16	0,17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,74	1,81	1,87	1,81
CaO	14,66	15,68	15,06	14,18
MgO	0,87	0,92	0,91	0,85
Na <sub>2</sub> O	2,65	2,90	2,91	2,77
K <sub>2</sub> O	2,37	2,47	2,38	2,43
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,02	0,02	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,07	0,07	0,06
ZrO <sub>2</sub>	0,04	0,04	0,03	0,05

Fonte: Da autora.

Tabela 26- Composição químicas após 28 dias de hidratação para cimento Lafarge.

Composição e Propriedade	Teor nas composições (%)			
	Lafarge 5%	Lafarge 10%	Lafarge 15%	Lafarge 20%
Perda ao Fogo	5,99	5,67	6,65	6,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,79	8,09	8,58	8,17
SiO <sub>2</sub>	61,15	64,49	61,37	64,89
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,05	0,15	0,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,21	1,76	1,99	1,82
CaO	16,38	13,89	15,07	13,54
MgO	0,88	0,72	0,91	0,70
Na <sub>2</sub> O	2,64	2,80	2,78	1,78
K <sub>2</sub> O	2,44	2,37	2,28	1,72
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08	0,02	0,02	0,02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,07	0,09	0,09
ZrO <sub>2</sub>	0,06	0,00	0,05	0,07

Fonte: Da autora.

## 6.5 ANÁLISES DAS COMPOSIÇÕES POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS COM 91 DIAS DE CURA

Os produtos de hidratação apresentam microestruturas características. O produto responsável pela resistência mecânica adquirida pelo cimento é o C-S-H, gel praticamente amorfo que garante a coesão entre as outras fases presentes. Já o hidróxido de cálcio (que não contribui para a resistência mecânica) apresenta formato

de placas cristalinas hexagonais e a etringita (contribui para a resistência mecânica nas primeiras idades; aos 91 dias apresenta menor contribuição) é cristalina, com morfologia acicular (agulhada) (ALAWAD et al., 2014; FORMOSA et al., 2012; RIDI; FRATINI; BAGLIONI, 2013; ROSTAMI et al., 2011).

A Figura 21 apresenta a microestrutura para os três cimentos, para o teor de adição de 5% de turfa. Nota-se que há a formação dos produtos da hidratação para todos os cimentos, sendo que a influência da presença de turfa na microestrutura ainda é pequena. As fases geradas no processo de hidratação responsáveis pela resistência mecânica (C-S-H e etringita) foram mais facilmente identificadas nos cimentos Holcim e Lafarge, o que justifica a maior resistência mecânica obtida para estes dois cimentos em relação ao cimento Cauê, onde a fase etringita não foi identificada. Observa-se ainda que, de acordo com a Figura 21 (b), o cimento Holcim apresenta baixa quantidade de hidróxido de cálcio, não sendo possível sua localização na referida figura.

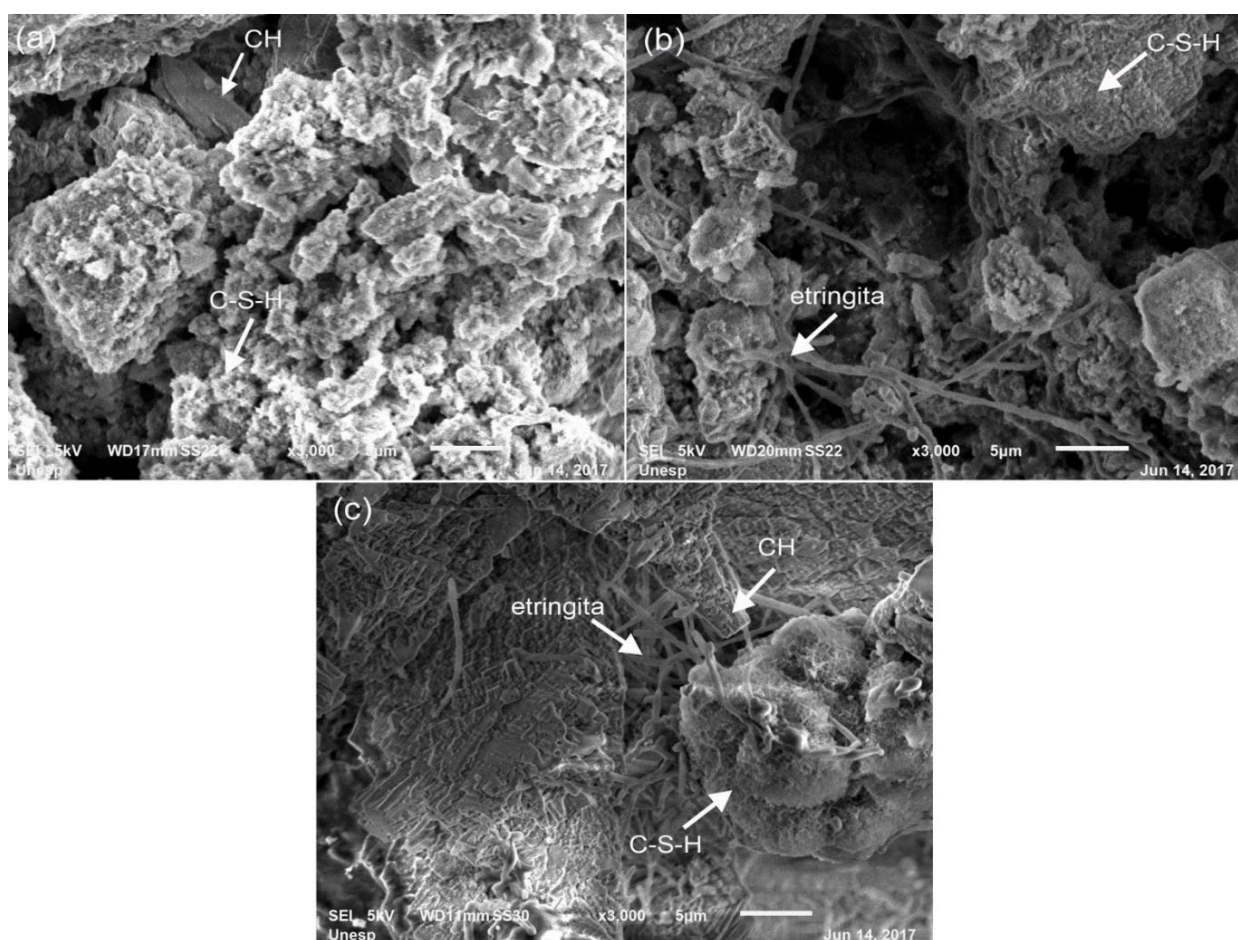


Figura 21- Microscopia Eletrônica de Varredura para a composição com 5% de turfa, aumento de x3000, para os cimentos (a) Cauê, (b) Holcim e (c) Lafarge.

Fonte: Da autora.

Os detalhes dos produtos da hidratação que conferem resistência mecânica tanto para o cimento Lafarge são mostrados nas Figuras 22 (a) e 22 (b), respectivamente.

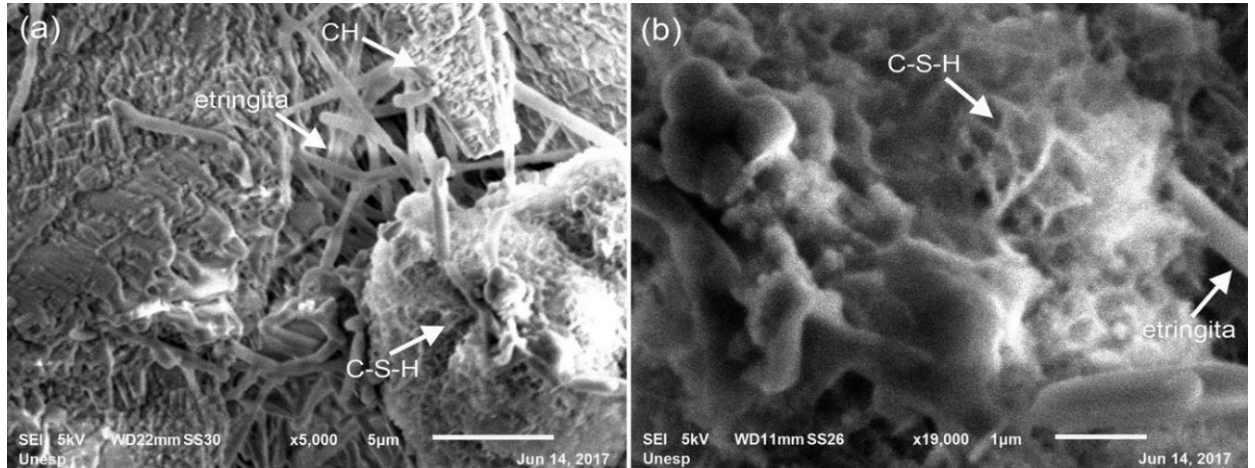


Figura 22- Detalhes da microestrutura da (a) etringita e C-S-H e do (b) C-S-H para o cimento Lafarge com adição de 5% de turfa.

Fonte: Da autora.

Para o cimento Lafarge foi realizado o mapeamento de componentes (por elemento químico) a partir do EDS (espectroscopia por dispersão de energia de raios X), mostrado na Figura 23.

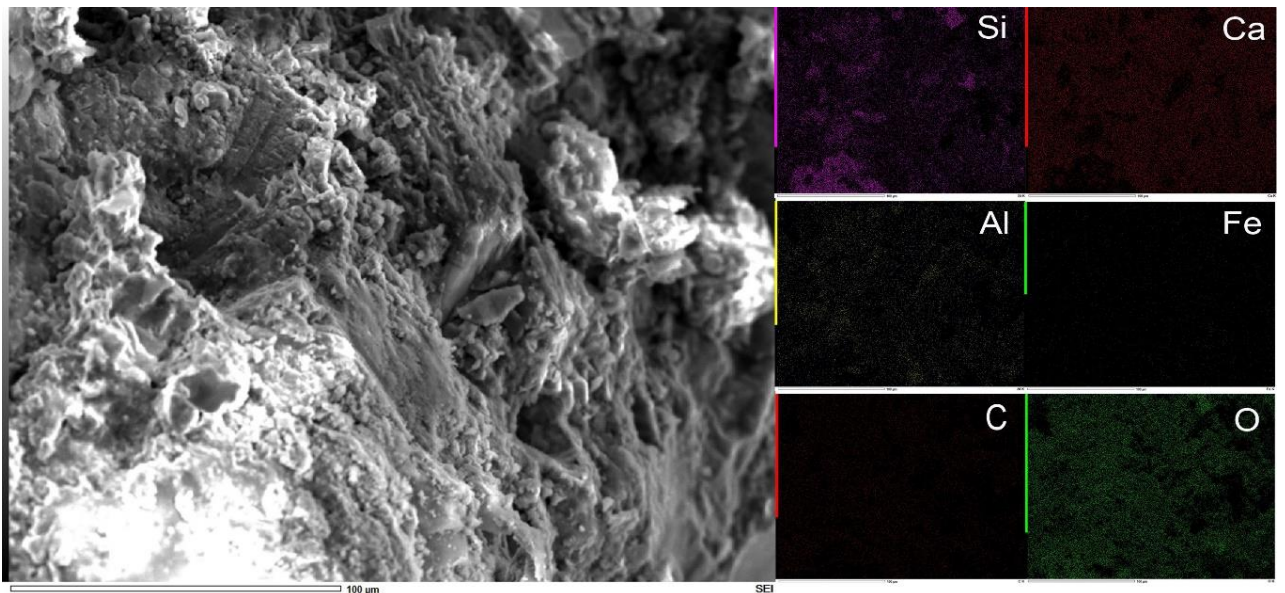


Figura 23- Mapeamento de componentes por EDS da composição de cimento Lafarge e 5% de turfa.

Fonte: Da autora.



Pela análise da Figura 23, nota-se que a distribuição dos componentes da mistura da argamassa (cimento e areia) e turfa é homogênea em toda a extensão da amostra analisada. Há também a confirmação da grande quantidade de silício e cálcio (componentes essenciais dos silicatos de cálcio hidratados) e também do alumínio (constituente da etringita juntamente com o cálcio), corroborando os resultados já apresentados.

Ainda para o cimento Lafarge, foi feita a análise em EDS pontuais para uma determinada parte da microestrutura para confirmar as fases geradas pelo processo de hidratação. Esta análise, para os principais pontos, é mostrada na Figura 24. As demais análises encontram-se disponíveis no Anexo C.

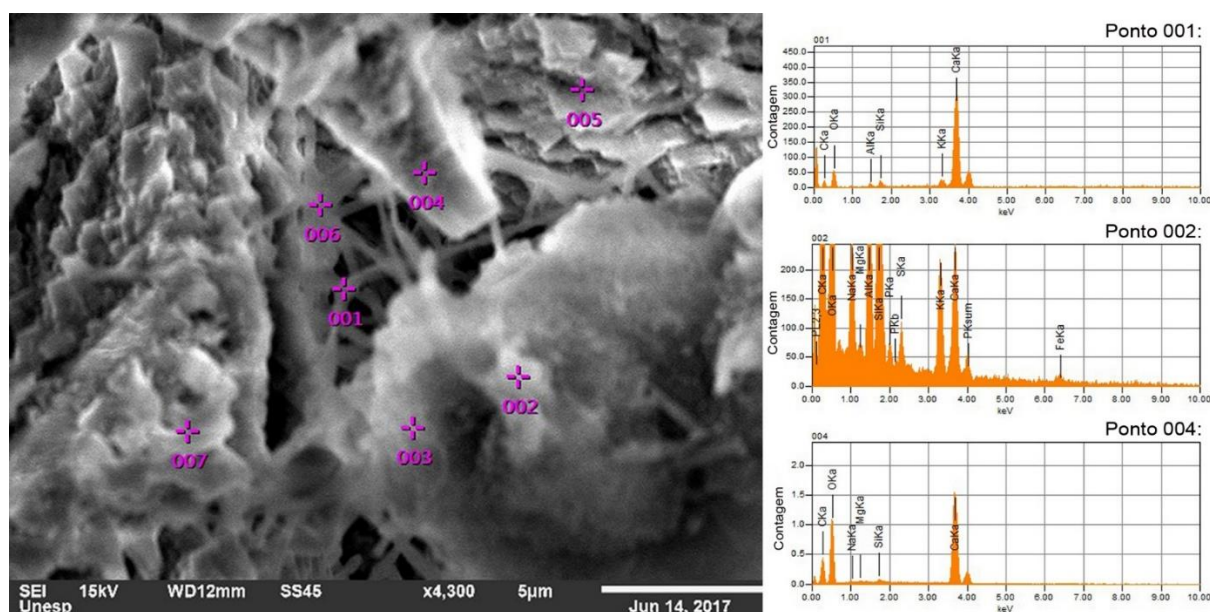


Figura 24- Análise de EDS pontuais para diferentes fases, para a composição de 5% de turfa e cimento Lafarge.

Fonte: Da autora.

A microestrutura no ponto 001 é característica da etringita; a presença de Ca e Al confirmam a ocorrência desta fase; já para o ponto 002, a microestrutura apresentada é referente ao gel de C-S-H, que possui elevada presença de cálcio, silício e oxigênio, confirmados pelo EDS e para o ponto 004 há uma grande presença de cálcio e oxigênio, o que indica a formação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

A Figura 25 mostra a microestrutura para os três cimentos com adição de 20% de turfa à mistura. É nítida a diferença entre as microestruturas apresentadas entre os três cimentos. Para o cimento Cauê ainda é mais difícil a identificação das fases

formadas durante a hidratação, sendo observada a presença de hidróxido de cálcio enquanto que para o cimento Lafarge ainda é possível identificar fases como a etringita, além do hidróxido de cálcio. O cimento Cauê apresenta também uma microestrutura menos coesa, Figura 26 (a), quando comparado à microestrutura obtida no cimento Lafarge, Figura 26 (b), o que justifica o menor valor de resistência obtido para a composição com cimento Cauê (20% de turfa na mistura).

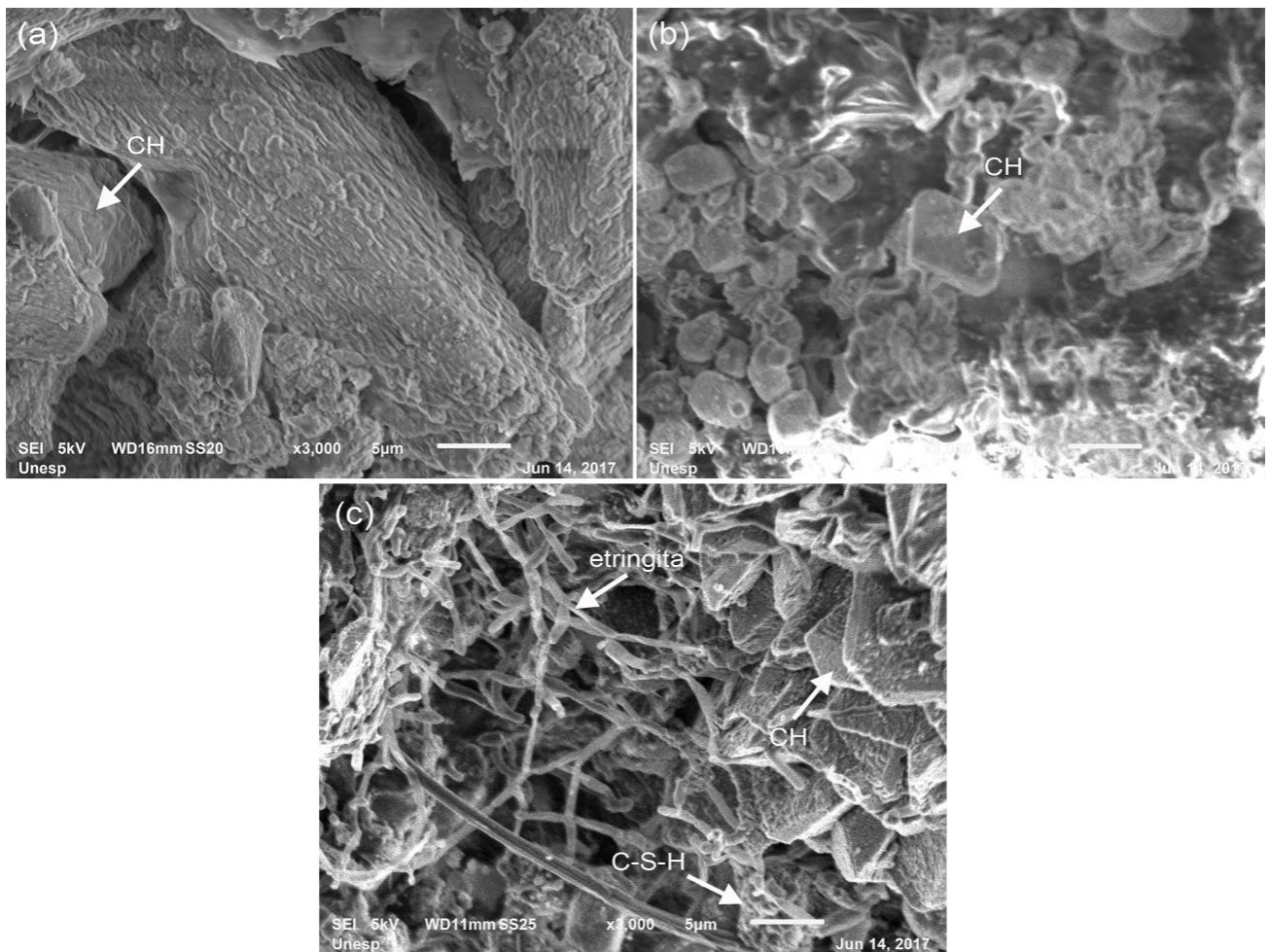


Figura 25- Microscopia Eletrônica de Varredura para a composição com 20% de turfa, aumento de x3000, para os cimentos (a) Cauê, (b) Holcim e (c) Lafarge.

Fonte: Da autora.

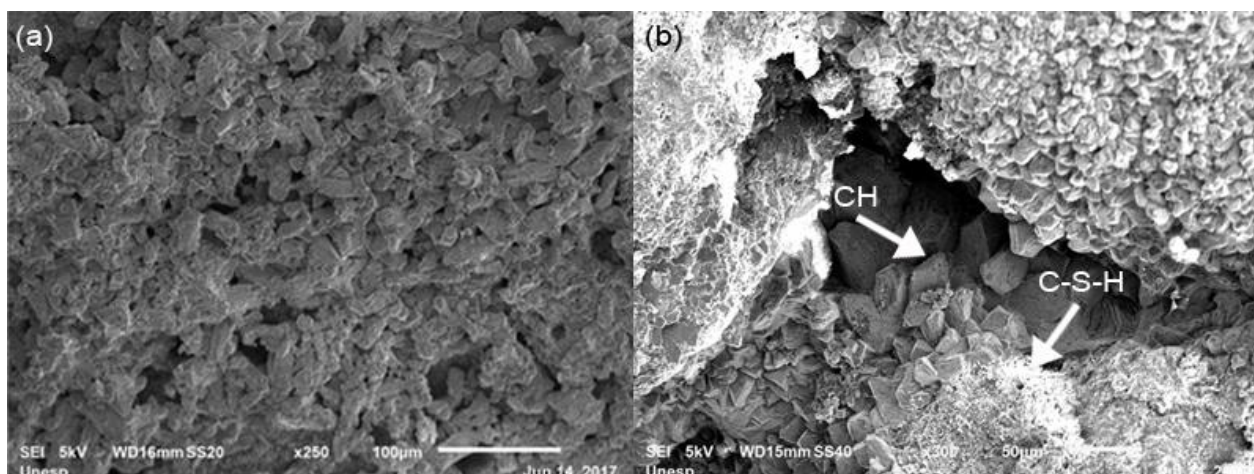


Figura 26- Microestruturas com 20% de adição de turfa (a) cimento Cauê e (b) cimento Lafarge.

Fonte: Da autora.

A maior coesão no cimento Lafarge resulta em maiores valores de resistência mecânica quando comparados aos outros dois cimentos, porém apresenta ainda cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que afetam de forma negativa o valor de resistência mecânica, o que pode ser uma das justificativas para a redução do valor de resistência quando comparado ao cimento sem adição de turfa, comprovando que a turfa não age como pozolana e não reage com o hidróxido de cálcio.

Para as composições com 20% de adição de turfa e cimentos Cauê e Holcim não foi possível identificar a presença da microestrutura de C-S-H, o que também justifica a queda de resistência quando comparado ao cimento puro. Tais fatores indicam que a turfa afeta de forma negativa resistência mecânica do cimento. Além de agir como material inerte, ela ainda dificulta o processo de hidratação e de formação das fases que garantem maior resistência mecânica do produto (etringita e C-S-H).

Para a composição de 20% de adição de turfa em substituição ao cimento Holcim, foi realizado o EDS em três pontos distintos a fim de identificar os componentes presentes. A Figura 27 mostra o resultado obtido.



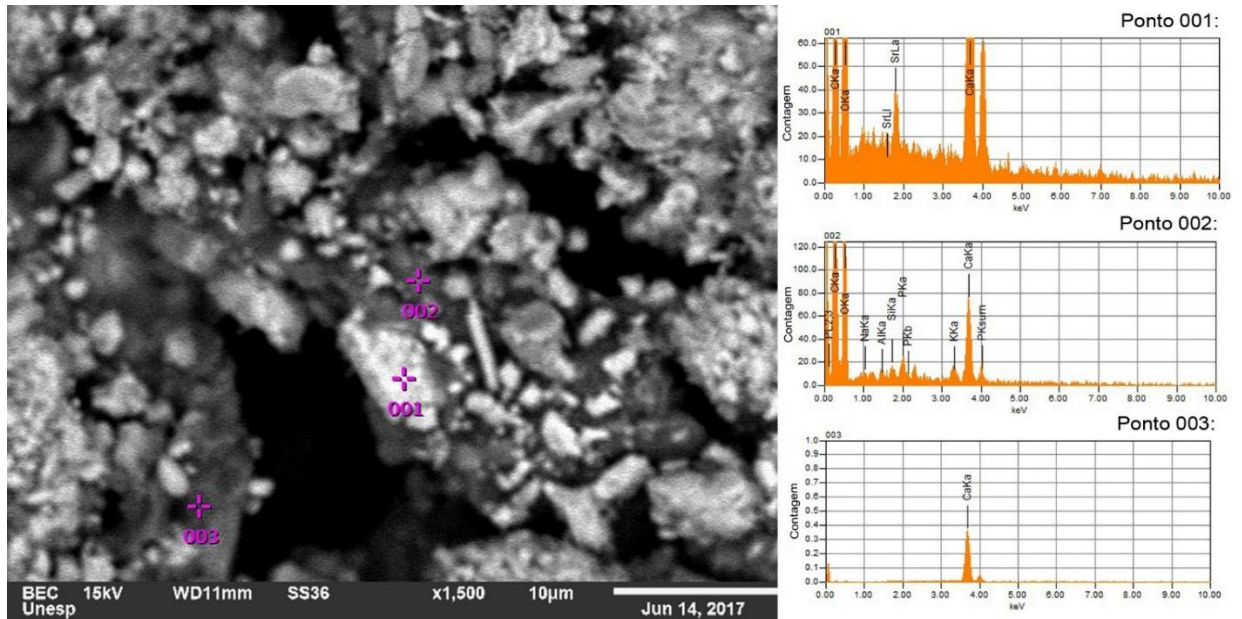


Figura 27- Análise de EDS pontuais para a composição de 20% de turfa e cimento Holcim.  
Fonte: Da autora.

Ao analisar o EDS, nota-se que para os pontos 001 e 002 há a presença significativa de cálcio e oxigênio, o que pode indicar silicatos dicálcicos e tricálcicos não reagidos (visto que não apresenta microestrutura de C-S-H), além da grande quantidade de carbono, oriundo da turfa, que compromete todo o processo de hidratação. Para o ponto 003 há presença de basicamente cálcio, que indica mais componentes não hidratados, afetando também os valores de resistência mecânica finais.

## 7 CONCLUSÕES

Os valores de resistência mecânica apresentados pelos cimentos sem adição de turfa estão diretamente relacionados à composição química e às propriedades físicas. O cimento Holcim tem boa resistência mecânica em idades iniciais (devido à combinação de maior permeabilidade ao ar, quantidades significativas de alita e belita e baixo teor de álcalis) e em idades avançadas devido à presença significativa de belita. O cimento Cauê possui boa quantidade de alita e aluminato tricálcico, que favorece as propriedades em idades iniciais, mas o teor de álcalis e portlandita compromete a resistência final em idades superiores. Já o cimento Lafarge é mais fino; contudo, a menor permeabilidade ao ar aliada à baixa quantidade de aluminato tricálcico e maior teor de óxido de ferro presente não apresenta um valor de resistência mecânica elevado nos primeiros dias de cura quando comparado aos demais cimentos estudados, porém o alto teor de belita presente garante boas propriedades mecânicas finais.

A turfa atende aos requisitos químicos estabelecidos pela norma ABNT NBR 12653/1992 para classe E de pozolanas e sua granulometria também atende à referida norma. Contudo, possui valor de perda ao fogo superior a 30% o que indica presença de material orgânico (carbono) e impurezas, o que pode afetar de forma negativa o processo de hidratação. Os resultados de DRX indicam a presença de composto cristalinos e amorfos (pela análise do difratograma é observado que a sílica presente na turfa, inferior a 30%, não está em seu estado amorfo, fato que também compromete o processo de hidratação).

Para os três cimentos em estudo há a redução no valor de resistência mecânica à medida que ocorre a adição de turfa na mistura. Com a idade, há um aumento de resistência devido ao processo de hidratação que ainda continua, o que já era esperado. Entretanto, aos 91 dias, esperava-se um maior ganho de resistência mecânica, o que não ocorreu devido à presença de turfa, que não possui atividade pozolânica, agindo como um material inerte, o que justifica a grande queda no valor de resistência mecânica à medida em que se acrescenta turfa nas composições. Tal redução não pode ter sido afetada pela porosidade pois esta propriedade permanece praticamente com valores constantes para todos os teores.

A microscopia eletrônica de varredura corrobora os resultados de resistência mecânica obtidos. Para o teor de 5% de turfa adicionado ao cimento é possível

identificar as fases resultantes da hidratação tanto pela microestrutura quanto pela composição química apresentada. Quando a adição de turfa é de 20%, há uma mudança drástica na microestrutura para os três cimentos, apresentando áreas que não passaram pelo processo de hidratação.

Dessa forma, fica comprovado que a turfa não possui atividade pozolânica, agindo como um material inerte cuja quantidade de carbono, devido ao material orgânico, afeta negativamente a reação de hidratação, visto que à proporção que o teor de turfa aumenta na mistura, há a redução no valor de resistência mecânica, independentemente da idade de cura.

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para continuidade do trabalho:

- a) Caracterização térmica da turfa utilizada por meio de DSC (calorimetria exploratória diferencial);
- b) Realização de um tratamento prévio da turfa utilizada para redução do teor de material orgânico e consequente aumento do seu potencial pozolânico;
- c) Análise da atividade pozolânica de outros tipos de turfa (diferentes regiões e composições);
- d) Análise de outros resíduos para serem utilizados como pozolana.

## REFERÊNCIAS

- AIQIN, W.; CHENGZHI, Z.; NINGSHENG, Z. The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. **Cement and Concrete Materials**, China, v. 29, p. 1721–1726, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ALAWAD, O.A. et al. Microstructure analyses of autoclaved ground dune sand-Portland cement paste. **Construction and Building Materials**. v.65, p.14-19, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: cimento portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento. Rio de Janeiro, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: cimento portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: cimento portland: determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.
- BENTZ, D.P. Blending different fineness cements to engineer the properties of cement-based materials. **Magazine of Concrete Research**, United State of America, v. 62, n. 5, p. 327–338, 2010.
- BENTZ, D.P. et al. Effects of cement particle size distribution on performance properties of Portland cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1663–1671. 1999.
- BULLARD, J. W. et al. Mechanisms of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v.41, p.1208-1223, 2011.

CARVALHO, V.M.C. **Caracterização e avaliação da interação entre espécies metálicas e substâncias húmicas da turfa: uma alternativa para remediação de solos e águas superficiais na região do agreste sergipano**. 2011. 73f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

CASSOL, G. **Caracterização e utilização do resíduo de cerâmica vermelha como material pozolânico em matrizes cimentantes**. 2015. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2015.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **Evolução do valor médio/mediano do cimento Portland 32 (em US\$/ton)- UF e média Brasil**. Disponível em: <<http://www.cbicdados.com.br/menu/materiais-de-construcao/cimento>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

CENTURIONE, S.L. **Influência das características das matérias-primas no processo de sinterização do clínquer Portland**. 1993. 155f. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CUEVAS, L.A.S. **Adsorção de corantes em turfa de origem magalhânica**. 2011. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

FARIA, E.F. **Predição da exotermia da reação de hidratação do concreto através de modelo termoquímico e modelo de dados**. 2004. 145f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FERNANDES, A.N. **Caracterização química e reatividade de substâncias húmicas, solos e turfas**. 2007. 149f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

FORMOSA, L.M.; MALLIA, B.; BULL, T.; CAMILLERI, J. The microstructure and surface morphology of radiopaque tricalcium silicate cement exposed to different curing conditions. **Dental Materials**, v.28, p.584-595, 2012.

FRANCHI, J.G. **A utilização de turfa como adsorvente de metais pesados**. 2004. 198f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FREITAS, F.A.E. **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio da análise de imagens**. 2001. 207f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

GIRARDELLO, F. et al. Characterization of Brazilian Peat Samples by Applying a Multimethod Approach. **Spectroscopy Letters**, Brasil, v.46, p. 201–210, 2013.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares.** 2014. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOBBO, L.A. **Aplicação da difração de raios-X e método de Rietveld no estudo de cimento Portland.** 2009. 273f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOBBO, L.A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld.** 2003. 132f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GROVER, S.P.P.; BALDOCK, J.A. The link between peat hydrology and decomposition: Beyond von Post. **Journal of Hydrology**, Austrália, v. 479, p. 130-138, 2013.

GRILLO, R.H.F. **Estudo da influência de aditivos redutores de água em concretos da construção civil.** 2014. 72f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

HERFORT, D. et al. The chemistry of Portland cement clinker. **Advances in Cement Research**, México, v. 22, n. 4, p. 187–194, 2010.

ISLAM, S.M. et al. Effect of Peat on Physicomechanical Properties of Cemented Brick. **The Scientific World Journal**, Malásia, v. 2014, p. 1-8, 2014.

KALANTARI, B.; PRASAD, A.; HUAT, B.B.K. Stabilising peat soil with cement and silica fume. **Geotechnical Engineering**, Malásia, v.164, p. 33-39, 2010.

KALANTARI, B.; PRASAD, A.; HUAT, B.B.K. Cement and Silica Fume Treated Columns to Improve Peat Ground. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Malásia, v. 38, p. 805–816, 2013.

KANNING, R.C. **Utilização da cinza de folha de bananeira como adição em argamassas de cimento Portland.** 2013. 194f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KAZEMIAN, S. et al. Influence of Peat Characteristics on Cementation and Pozzolanic Reactions in the Dry Mixing Method. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 36, p. 1189–1202, 2011.

KAZEMIAN, S.; MOAYEDI, H.; MOSALLANEZHAD, M. The Effect of Cement–Sodium Silicate Grout Compounds on Void Ratio and the Coefficient of Secondary Compression of Treated Fibrous Peat. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 43, n. 2, 7 f., 2015.

KOPANITSA, N. et al. Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat. **Advanced Materials in Technology and Construction**, Rússia, 6f, 2016.

LAMIM, A.P.B. et al. Caracterização química e física de turfa litorânea e avaliação da adsorção competitiva por cobre e zinco. **Química Nova**, Brasil, v. 24, n. 1, p. 18-23, 2001.

MAESTRELLI, S.C. et al. Estudo de caracterização de argilas não plásticas da região de Poços de Caldas, MG. **Revista Cerâmica**, n. 59, p. 242-248, 2013.

MATOS NETO, J.A. **Caracterização de estéril argiloso para utilização como pozolana**. 2013. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em engenharia de materiais (UFOP-CETEC-UEMG), Ouro Preto, 2013.

McCARTER, W.J.; AFSHAR, A.B. Monitoring the early hydration mechanisms of hydraulic cement. **Journal of Material Science**, v. 23, p. 488-496, 1988.

MEDINA, E.A. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2008.

MELO, A.L. **Análise do comportamento reológico de pastas de cimento contendo resíduos de pneu para poços de petróleo**. 2009. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MOAYEDI, H. et al. Improvement of Peat Using Portland Cement and Electrokinetic Injection Technique. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, p. 6851-6862, 2014.

MORENO, F.A.C. **Predição à resistência à compressão de um cimento industrial utilizando técnicas de redes neurais artificiais**. 2001. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda., 2016.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2010.

NOCHAIYA, T. et al. Microstructure, characterizations, functionality and compressive strength of cement-based materials using zinc oxide nanoparticles as an additive. **Journal of Alloys and Compounds**, v.630, p.1-10, 2015.

OLIVEIRA, M.P. et al. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: CONFERENCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS: HABITAÇÃO E INFRA-ESTRUTURA DE



INTERESSE SOCIAL, 2004, Pirassununga, SP. **Anais...** Pirassununga: NOCMAT, 2004. p. 15 – 30.

PAULA, M.O. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland.** 2006. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

PETRONI, S.L.G.; PIRES, M.A.F.; MUNITA, C.S. Adsorção de zinco e cádmio em colunas de turfa. **Química Nova**, v.23, n.4, 2000.

RÊGO, J.H.S. et al. Microstructure of cement pastes with residual rice husk ash of low amorphous silica content. **Construction and Building Materials**, v.80, p.56-68, 2015.

RIDI, F.; FRATINI, E.; BAGLIONI, P. Fractal structure evolution during cement hydration by differential scanning calorimetry: effect of organics additives. **The Journal of Physical Chemistry**, v.117, p. 25478-25487, 2013.

RODRIGUES, M.S. **Avaliação de cinzas de palha de cana-de-açúcar e sua utilização como adição mineral em matrizes cimentíceas.** 2012. 173f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

ROSTAMI, V.; SHAO, Y.; BOYD, A.J.; HE, Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. **Cement and Concrete Research**, v.42, p.186-193, 2012.

SAJEDI, F.; RAZAK, H.A. Effects of curing regimes and cement fineness on the compressive strength of ordinary Portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, Malásia, v. 25, p 2036–2045, 2011.

SALES, F.A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland.** 2014. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras.** 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1975.

SANTOS, S. **Produção e avaliação de uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 288f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SILVA, I.J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura.** 2000. 303f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

SILVA, R.J. **Análise energética de plantas de produção de cimento Portland**. 1994. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

SILVOSO, M.M. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos**. 2003. 186f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2013**. 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Resultados preliminares 2016**. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/numeros\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/numeros_dinamico.asp)>. Acesso em: 28 nov. 2016.

SOUZA, P.A.B.F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 232f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

STUTZMAN, P. Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement microstructure. **Cement and concrete composites**, v.26, p.957-966, 2004.

TERMKHAJORNKIT, P.; BARBARULO, R. Modeling the coupled effects of temperature and fineness of Portland cement on the hydration kinetics in cement paste. **Cement and Concrete Research**, França, v. 42, p. 526-538, 2012.

TOLEDO, L.M.A. Considerações sobre a turfa no Brasil. **Revistas Científicas da UNIPAR**, v.7, n. 28, p. 27-41. 1999.

WONG, L.S. et al. Comparative measurement of compaction impact of clay stabilized with cement, peat ash and silica sand. **Measurement**, Malásia, v. 94, p. 498–504, 2016.

WONG, L.S.; HASHIM, R.; ALI, F. Utilization of sodium bentonite to maximize the filler and pozzolanic effects of stabilized peat. **Engineering Geology**, Malásia, v. 152, p. 56–66, 2013.

ZAMPIERI, V.A. **Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico**. 1993. 251f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

## APÊNDICE A- Análise de variância da porosidade das composições.

Tabela A 1: Anava para porosidade cimento Cauê.

TABELA DE ANALISE DE VARIANCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
teor	3	2.325646	0.775215	0.627	0.6058
erro	20	24.714550	1.235727		
Total corrigido	23	27.040196			
CV (%) =	6.32				
Média geral:	17.5845833	Número de observações:		24	

-----

Teste Scott-Knott (1974) para a FV teor

-----

NMS: 0,05

-----

Média harmonica do número de repetições (r): 6  
 Erro padrão: 0,453822193522235

-----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	17.198333	a1
20	17.510000	a1
5	17.563333	a1
15	18.066667	a1

-----

Tabela A 2: Anava para porosidade cimento Holcim.

TABELA DE ANALISE DE VARIANCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
teor	3	13.679250	4.559750	0.237	0.8696
erro	20	384.835133	19.241757		
Total corrigido	23	398.514383			
CV (%) =	24.67				
Média geral:	17.7808333	Número de observações:		24	

-----

Teste Scott-Knott (1974) para a FV teor

-----

NMS: 0,05

-----

Média harmonica do número de repetições (r): 6  
 Erro padrão: 1,79079854937523

-----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	16.881667	a1
5	17.438333	a1
15	17.861667	a1
20	18.941667	a1

-----

Tabela A 3: Anava para porosidade cimento Lafarge

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
teor	3	73.323900	24.441300	45.232	0.0000
erro	20	10.807033	0.540352		
Total corrigido	23	84.130933			
CV (%) =	3.93				
Média geral:	18.6933333	Número de observações:		24	

-----

Teste Scott-Knott (1974) para a FV teor

-----

NMS: 0,05

-----

Média harmônica do número de repetições (x): 6  
 Erro padrão: 0,300097669286369

-----

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
10	16.695000	a1
5	17.520000	a1
15	19.325000	a2
20	21.233333	a3

-----

## ANEXO A- Análise qualitativa de fases dos cimentos.

Relatório N°: XRD 015/2015 – Rev.00



## b) Amostra\_de\_Cimento\_CPIIE32\_CAUE

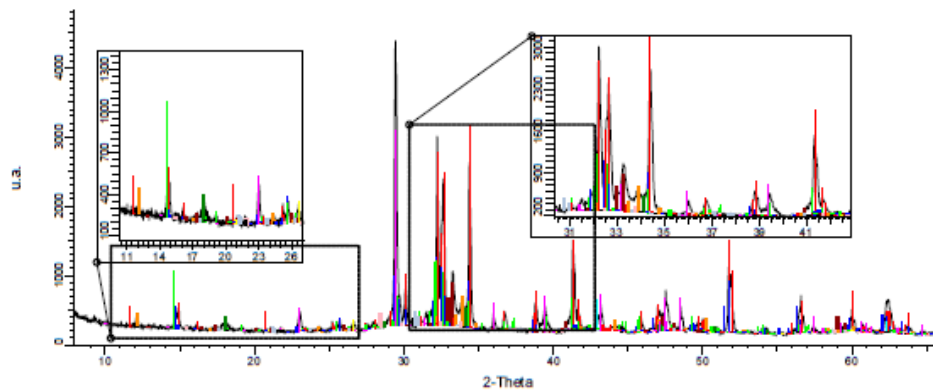


Figura 6: Identificação no DIFFRAC.EVA, de todas as fases nas amostras de Cimento\_CPIIE32\_CAUE.

## Amostra\_CPIIE32\_CAUE

Color	Pattern #	Compound Name	Formula
Red	PDF 00-042-0551	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Purple	PDF 00-005-0586	Calcite, syn	Ca C O <sub>3</sub>
Blue	PDF 00-049-0442	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Green	PDF 00-033-0302	Larnite, syn	Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Light Green	PDF 04-011-1764	Anhydrite III, syn	Ca ( S O <sub>4</sub> )
Brown	PDF 00-032-0150	Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Pink	PDF 00-038-1429	tricalcium aluminate   Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Orange	PDF 00-030-0226	Brownmillerite, syn	Ca <sub>2</sub> ( Al , Fe +3 ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Cyan	PDF 00-045-0946	Periclase, syn	Mg O
Dark Blue	PDF 00-041-0224	Bassanite, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 0.5 H <sub>2</sub> O
Red	PDF 00-033-0311	Gypsum, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
Dark Green	PDF 00-044-1481	Portlandite, syn	Ca ( O H ) <sub>2</sub>
Pink	PDF 00-019-0974	Langbeinite, syn	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Light Blue	PDF 00-005-0613	Arcanite, syn	K <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>
Yellow	PDF 00-046-1045	Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>
Black	PDF 01-074-1742	Aphthalite	Na K <sub>3</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>

Tabela 1: Resumo das fases identificadas no DIFFRAC&gt;EVA na amostra de Cimento\_CPIIE32\_CAUE.



### c) Amostra\_de\_Cimento\_CPIIE32\_HOLCIN

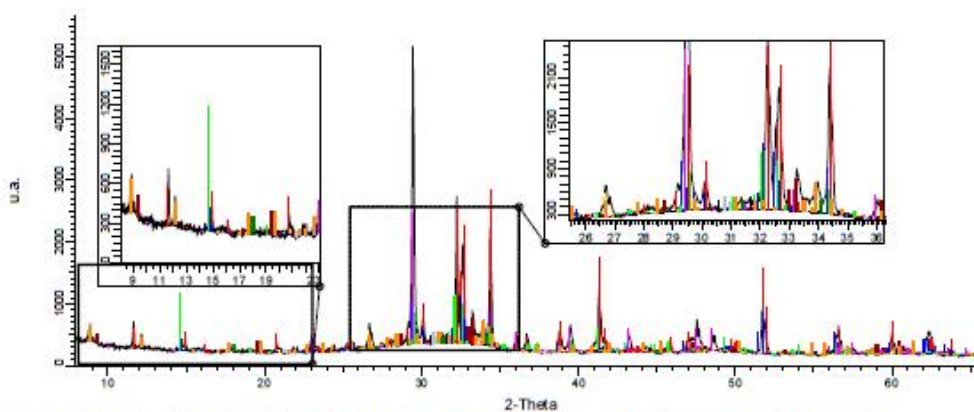


Figura 7: Identificação no DIFFRAC.EVA, de todas as fases nas amostras de Cimento\_CPIIE32\_HOLCIN

### Amostra\_CPIIE32\_HOLCIN

Color	Pattern #	Compound Name	Formula
Red	PDF 00-042-0551	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Purple	PDF 00-005-0586	Calcite, syn	Ca C O <sub>3</sub>
Green	PDF 04-011-1764	Anhydrite III, syn	Ca ( S O <sub>4</sub> )
Blue	PDF 00-049-0442	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Light Green	PDF 00-033-0302	Larnite, syn	Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Brown	PDF 00-032-0150	Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Orange	PDF 00-030-0226	Brownmillerite, syn	Ca <sub>2</sub> ( Al , Fe +3 ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Red	PDF 00-033-0311	Gypsum, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
Yellow	PDF 00-046-1045	Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>
Purple	PDF 00-038-1429	tricalcium aluminate   Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Orange	PDF 00-002-0055	Muscovite	H <sub>2</sub> K Al <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>
Brown	PDF 00-003-0887	Talc	Mg <sub>3</sub> ( Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ) ( O H ) <sub>2</sub>
Blue	PDF 00-041-0224	Bassanite, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 0.5 H <sub>2</sub> O
Pink	PDF 00-019-0974	Langbeinite, syn	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Orange	PDF 00-019-0974	Langbeinite, syn	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Green	PDF 00-044-1481	Portlandite, syn	Ca ( O H ) <sub>2</sub>
Grey	PDF 00-005-0613	Arcanite, syn	K <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>
Black	PDF 01-074-1742	Aphthitalite	Na K <sub>3</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Cyan	PDF 00-045-0946	Periclase, syn	Mg O
Green	PDF 04-001-3758	Oldhamite, syn	Ca S

Tabela 2: Resumo das fases identificadas no DIFFRAC>EVA na amostra de Cimento\_CPIIE32\_HOLCIN



## d) Amostra\_de\_Cimento\_CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO

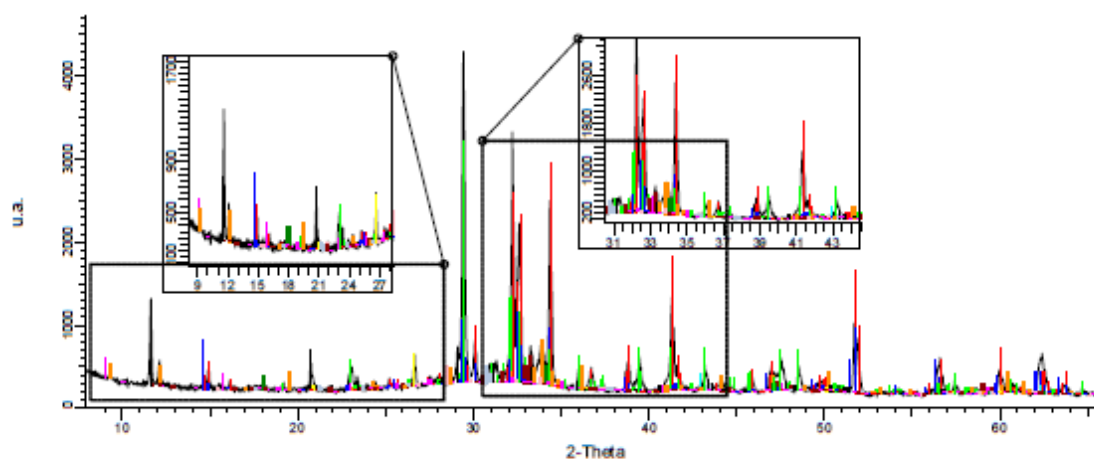


Figura 8: Identificação no DIFFRAC.EVA, de todas as fases nas amostras de Cimento\_CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO

### Amostra\_CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO

Color	Pattern #	Compound Name	Formula
Red	PDF 00-042-0551	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Blue	PDF 00-049-0442	Calcium Silicate	Ca <sub>3</sub> Si O <sub>5</sub>
Green	PDF 00-033-0302	Larnite, syn	Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>
Purple	PDF 00-038-1429	tricalcium aluminate   Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Brown	PDF 00-032-0150	Calcium Aluminum Oxide	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
Orange	PDF 00-030-0226	Brownmillerite, syn	Ca <sub>2</sub> ( Al, Fe +3 ) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Dark Green	PDF 00-044-1481	Portlandite, syn	Ca ( O H ) <sub>2</sub>
Cyan	PDF 00-045-0946	Periclase, syn	Mg O
Yellow	PDF 00-046-1045	Quartz, syn	Si O <sub>2</sub>
Grey	PDF 00-005-0613	Arcanite, syn	K <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>
Pink	PDF 00-019-0974	Langbeinite, syn	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Black	PDF 00-033-0311	Gypsum, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O
Red	PDF 00-041-0224	Bassanite, syn	Ca S O <sub>4</sub> · 0.5 H <sub>2</sub> O
Blue	PDF 04-011-1764	Anhydrite III, syn	Ca ( S O <sub>4</sub> )
Green	PDF 00-005-0586	Calcite, syn	Ca C O <sub>3</sub>
Brown	PDF 01-074-1742	Aphthalite	Na K <sub>3</sub> ( S O <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>

Tabela 3: Resumo das fases identificadas no DIFFRAC>EVA na amostra de Cimento\_CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO

## ANEXO B- Análise quantitativa de fases dos cimentos.

Relatório N°: XRD 015/2015 – Rev.00



## 5.2. Refinamento e Quantificação no DIFFRAC TOPAS

## a) Amostra\_Cimento\_CPIIE32\_CAUE

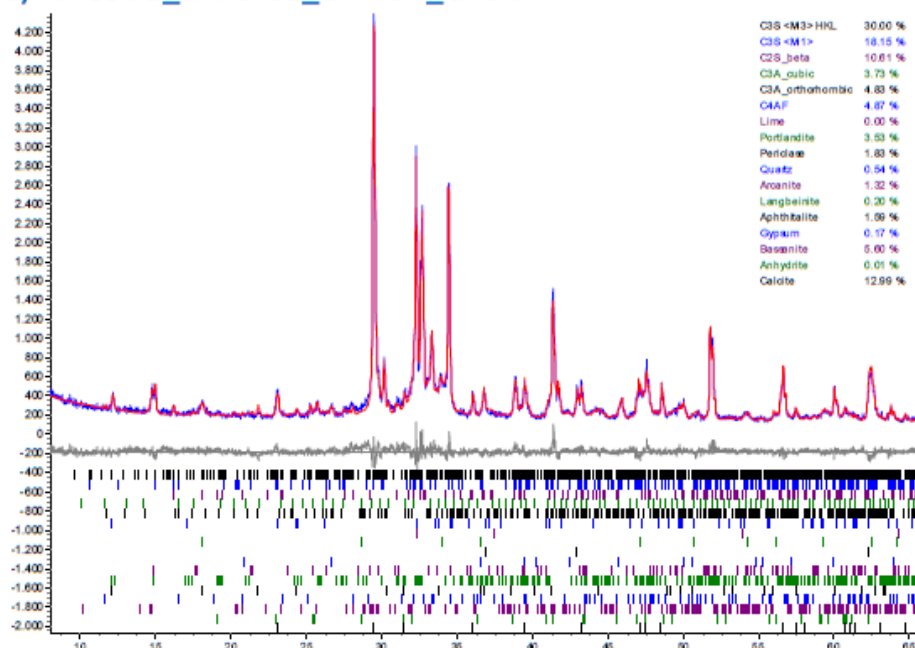


Figura 9: Quantificação por TOPAS da Amostra CPIIE32\_CAUE . A curva azul evidencia a curva relacionada à cada pico da amostra, mostrando que este fármaco é formado apenas por uma única forma cristalina.

Tabela 4: Resultados da Quantificação da Amostra CPIIE32\_CAUE (peso%)

Amostra CPIIE32_CAUE	Valores em peso%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M3>	30,00%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M1>	18,15%
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	12,99%
Belita (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> S), Beta	10,61%
Bassanita (CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O)	5,60%
Ferrita (Ca <sub>2</sub> AlFeO <sub>5</sub> , C <sub>4</sub> AF)	4,87%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Ortorrômbico	4,83%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Cúbico	3,73%
Portlandita (Ca(OH) <sub>2</sub> )	3,53%
Periclásio (MgO)	1,83%
Aphthitalita ((K,Na) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	1,59%
Arcanite (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	1,32%
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	0,54%
Langbeinita (K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	0,20%
Gipso (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O)	0,17%
Anidrita (CaSO <sub>4</sub> )	0,01%





## b) Amostra\_Cimento\_CPIIE32\_HOLCIN

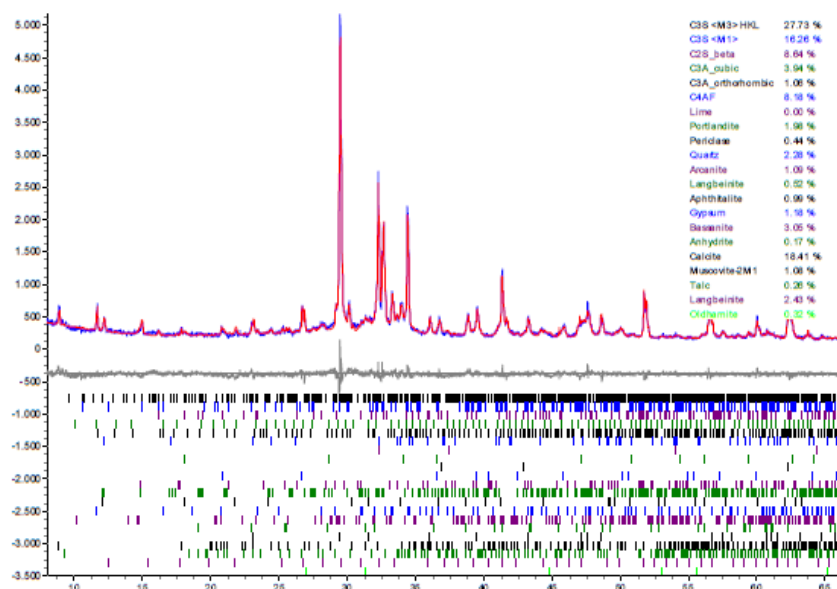


Figura 10: Quantificação por TOPAS da Amostra CPIIE32-HOLCIN . A curva azul é o difratograma medido. A curva vermelha é o difratograma calculado. A diferença entre ambas é dada em cinza. As marcas abaixo indicam as posições dos possíveis picos de cada fase.

Tabela 5: Resultados da Quantificação da Amostra CPIIE32\_HOLCIN (peso%)

Amostra CPIIE32_HOLCIN	Valores em peso%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M3>	27,73%
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	18,41%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M1>	16,26%
Belita (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> S), Beta	8,64%
Ferrita (Ca <sub>2</sub> AlFeO <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> AF)	8,18%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Cúbico	3,94%
Bassanita (CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O)	3,05%
Langbeinita I (K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	2,43%
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	2,28%
Portlandita (Ca(OH) <sub>2</sub> )	1,98%
Gipso (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O)	1,18%
Arcanita (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	1,09%
Muscovita (KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> )	1,08%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Ortorrômbico	1,06%
Aphthitalita ((K,Na) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	0,99%
Langbeinita II (K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	0,52%
Periclásio (MgO)	0,44%
Oldhamita (Ca,Mg,Fe,Mn)S	0,32%
Talco (Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> )	0,26%
Anidrita (CaSO <sub>4</sub> )	0,17%



## c) Amostra\_Cimento\_CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO

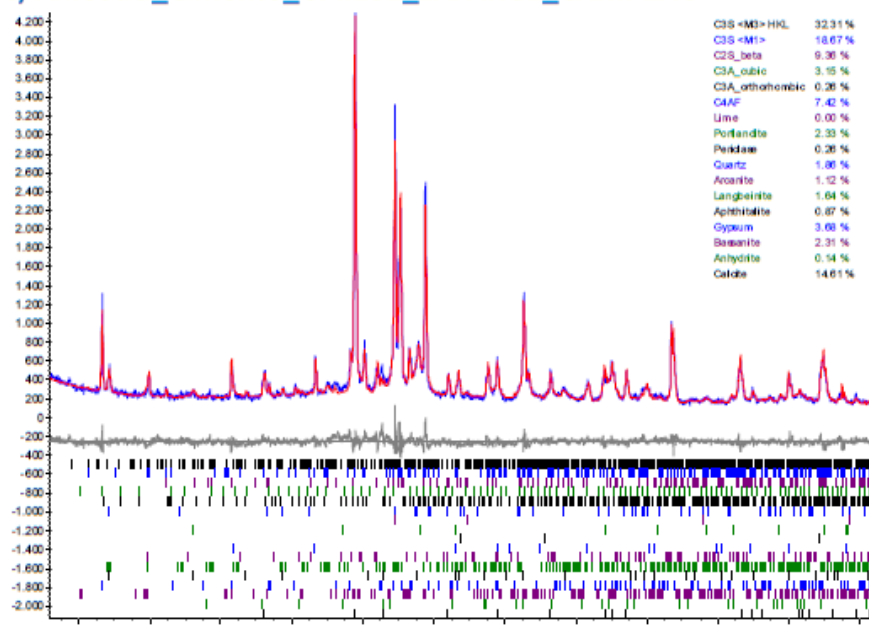
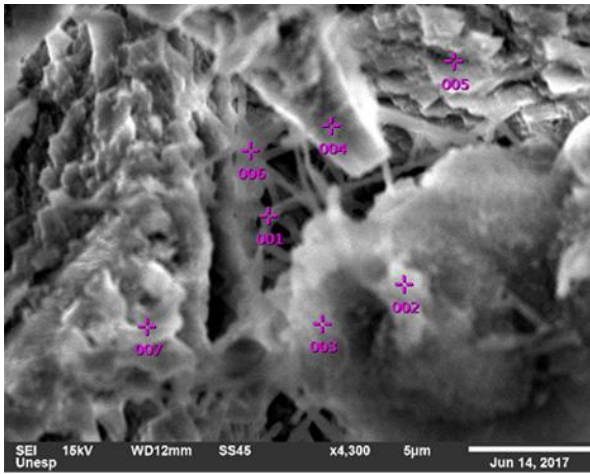


Figura 11: Quantificação por TOPAS da Amostra CPIIE32-LAFARGE CAMPEAO . A curva azul é o difratograma medido. A curva vermelha é o difratograma calculado. A diferença entre ambas e dada em cinza. As marcas abaixo indicam as posições dos possíveis picos de cada fase.

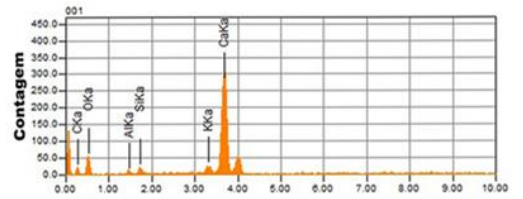
Tabela 6: Resultados da Quantificação da Amostra CPIIE32\_LAFARGE\_CAMPEAO (peso%)

Amostra CPIIE32_LAFARGE_CAMPEAO	Valores em peso%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M3>	32,31%
Alita (Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub> , C <sub>3</sub> S) <M1>	18,67%
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	14,61%
Belita (Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> S), Beta	9,36%
Ferrita (Ca <sub>2</sub> AlFeO <sub>5</sub> , C <sub>4</sub> AF)	7,42%
Gipso (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O)	3,68%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Cúbico	3,15%
Portlandita (Ca(OH) <sub>2</sub> )	2,33%
Bassanita (CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O)	2,31%
Quartzo (SiO <sub>2</sub> )	1,86%
Langbeinita (K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	1,64%
Arcanite (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	1,12%
Aphthitalite ((K,Na) <sub>3</sub> Na(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> )	0,87%
Periclásio (MgO)	0,26%
Aluminato (Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> A), Ortorrômbico	0,26%
Anidrita (CaSO <sub>4</sub> )	0,14%

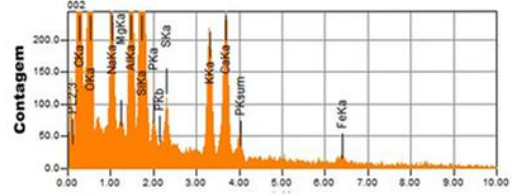
ANEXO C- Análise de EDS pontuais para 5% de turfa e cimento Lafarge.



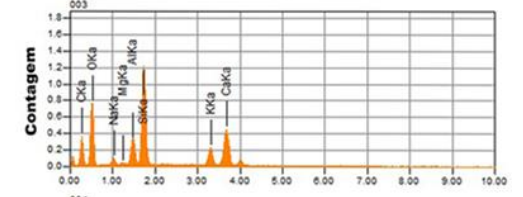
Ponto 001



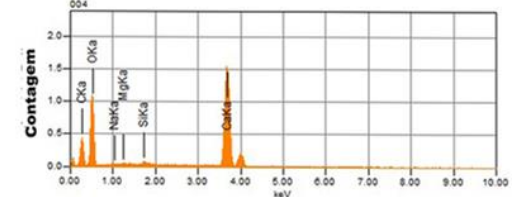
Ponto 002



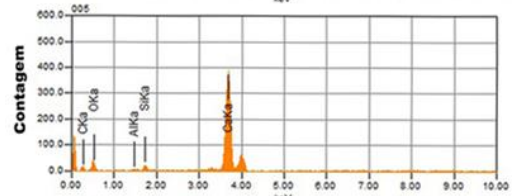
Ponto 003



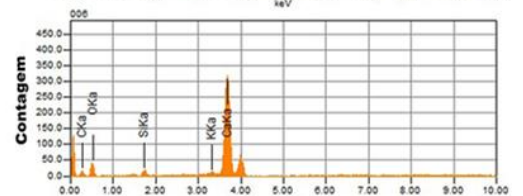
Ponto 004



Ponto 005



Ponto 006



Ponto 007

