



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Júlia Franca Toledo

ESTUDO DA REATIVIDADE DO RESÍDUO DE ARDÓSIA COMO ADIÇÃO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Ouro Preto
2016

Júlia Franca Toledo

**ESTUDO DA REATIVIDADE DO RESÍDUO DE ARDÓSIA COMO ADIÇÃO EM
MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva

Ouro Preto
2016

T649e

Toledo, Júlia Franca.

Estudo da reatividade do resíduo de ardósia como adição em matrizes cimentícias. [manuscrito] / Júlia Franca Toledo. – 2016.

60f.: il., color., graf., tab.

Orientadores: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil.
Área de concentração: Engenharia Civil.

1. Engenharia civil. 2. Construção civil – Resíduos. 3. Resíduos – Ardósia. 4. NBR 5751 (ABNT, 2012). 5. Cimento Portland. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU:624

Fonte de catalogação: bibem@sisbin.ufop.br

Júlia Franca Toledo

**ESTUDO DA REATIVIDADE DO RESÍDUO DE ARDÓSIA COMO ADIÇÃO EM
MATRIZES CIMENTÍCIAS**

Monografia de conclusão de curso para
obtenção do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto, defendida
e aprovada em 13 de abril de 2016, pela banca
examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva (D.Sc.) – Orientador – UFOP



Prof Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto (D. Sc.) – UFOP



Prof Dr. Geraldo Donizetti de Paula (D. Sc.) – UFOP

Dedico este trabalho à toda minha família
principalmente aos meus pais e à Paula.

Agradecimento

Agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades. Aos meus pais, meus maiores exemplos de vida, pelo amor e incentivo. À Paula, pela amizade e compreensão nos momentos de ausência. À Sâmyla Lana pelo apoio durante a realização deste trabalho. Ao professor Guilherme Jorge Brigolini, pela orientação.

Resumo

Este trabalho propõe estudar a reatividade do resíduo de ardósia em matrizes cimentícias. Foram analisadas as características físicas e químicas do resíduo de ardósia através dos ensaios de granulometria à laser, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, além da análise térmica da pasta de cimento produzida à partir da substituição de 35% de cimento Portland por resíduo de ardósia após 28 dias de cura. Propôs ainda o estudo da atividade pozolânica do resíduo de ardósia pelo método preconizado na norma ABNT NBR 5751 (ABNT,2012). A grande quantidade de resíduos gerados pelas mineradoras e sua deposição em lugares inadequados, torna de grande importância e notoriedade estudos que contemplem a substituição de rejeitos minerais na construção civil, que além de contribuir para a redução de resíduo gerado alinha-se ao bom desempenho que podem oferecer em matrizes cimentícias.

Palavras chave: resíduo de ardósia, atividade pozolânica, NBR 5751(ABNT,2012), difração de raios-X, análise térmica, cimento Portland.

Abstract

This work proposes to study the reactivity of slate residue in cementitious matrices. Were analyzed the chemical and physical characteristics of the slate residue by granulometry laser, X-ray Fluorescence, X-ray Diffraction, besides the thermal analyses of the cement paste produced from the replacement of 35% of Portland cement per residue slate in a folder cement after 28 days of curing. It also proposed the study of the pozzolanic activity of the residue of the slate method recommended in the standard NBR 5751 (ABNT,2012). The large amount of residue generated by mining and its deposition in inappropriate places, makes it of great importance and notoriety studies that include the replacement of mineral waste in construction, which also contributes to the waste reduction generated aligns with the good performance they can offer in cementitious matrices.

Key words: residue slate, pozzolanic activity, NBR 5751 (ABNT,2012), diffraction X-ray, thermal analysis, Portland cement.

Lista de Figuras

Figura 1- Pedreira em Paraopeba – MG.	17
Figura 2- Pedreira em Martinho Campos-MG	18
Figura 3- Fenômeno de difração de raios-X (Lei de Bragg).	21
Figura 4- Curva TGA em vermelho e DTG em azul.	23
Figura 5- Desenho detalhado de um aparelho de termogravimetria.	25
Figura 6- Curva típica de uma análise térmica diferencial.	26
Figura 7- Representação do princípio da fluorescência de raios-X.	27
Figura 8- Tipos de Cal.....	32
Figura 9- Ciclo da cal aérea	32
Figura 10- Fluxograma do preparo do resíduo de ardósia.	34
Figura 11- Moinho de bolas horizontal da marca Marconi.	35
Figura 12- Fluxograma da caracterização do resíduo de ardósia.	36
Figura 13- Fluxograma da determinação do Índice de Atividade Pozolânica.....	37
Figura 14- Granulômetro a Laser.	38
Figura 15- Espectrômetro de raios-X - PANalytical Epsilon 3 ^x	39
Figura 16- Parâmetros da difração de raios-X	40
Figura 17- Mistura homogênea de cal e resíduo de ardósia em recipiente fechado.	42
.....	42
Figura 18- Índice de consistência.....	43
Figura 19- Moldagem dos corpos de prova.....	43
Figura 20- Medida inicial da condutividade elétrica.....	45
Figura 21- Medida final da condutividade elétrica	45
Figura 22- Amostra de referência e amostras de substituição de 35% de cimento por resíduo de ardósia.....	47
Figura 23- Corpos de prova devidamente desmolados após 28 dias de cura.	47
Figura 24- Equipamento de Análise Termogravimétrica	48
Figura 25- Almofariz e postilo para moer a pasta de cimento.	48
Figura 26- Difratoograma de raios-X.....	51
Figura 27- Padrão difratométrico de cada composto do resíduo de ardósia.....	51
Figura 28- Resultado da espectrometria de raios-X	52
Figura 29- TG/DTG da pasta com 100% de cimento Portland.....	55
Figura 30- TG/DTG da pasta com 35% de substituição com resíduo de ardósia .	55

Lista de Tabelas

Tabela 1- Exigências físicas.....	29
Tabela 2-Tipos de cimento.....	30
Tabela 3- Frações granulométricas de areia.....	41
Tabela 4- Dosagem dos materiais – Ensaio NBR 5751 (ABNT, 2012).	42
Tabela 5-Dosagem da pasta de cimento e da pasta com 35% de substituição. ...	46
Tabela 6- Diâmetro das partículas (μm).....	49
Tabela 7 – Índice de Atividade Pozolânica com cal do resíduo de ardósia.....	53
Tabela 8- Condutividade Elétrica	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Principais Pozolanas	15
3.2. Ardósia	16
3.3. Aplicações da Ardósia	18
3.3.1 Aplicações da ardósia como revestimento	18
3.3.2 Aplicação da ardósia na construção civil	19
3.4. Caracterização do resíduo de ardósia	20
3.4.1 Difração de Raios-X (DRX)	20
3.4.2 Análise Térmica	22
3.4.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)	22
3.4.2.2 Análise Térmica Diferencial (DTA)	25
3.4.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)	27
3.5. Índice de Atividade Pozolânica	28
3.5.1 Método de Luxan	28
3.5.2 Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal - NBR 5751 (ABNT, 2012)	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 Cimento Portland	30
4.2 Cal	31
4.2.1 Cal aérea	32
4.2.1.1 Cal virgem	33
4.2.1.2 Cal hidratada	33
4.2.2 Cal hidráulica	34
4.3 Resíduo de Ardósia	34
4.3.1 Caracterização do resíduo de ardósia	37
4.3.1.1 Granulometria a laser	37
4.3.1.2 Fluorescência de raios-X- Análise Química	38

4.3.1.3 Difração de raios-X – Análise Mineralógica	39
4.3.2 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica do residuo de ardósia ..	40
4.3.2.1 NBR 5751 (ABNT, 2012) Materiais Pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com a cal	40
4.3.2.1 Ensaio de Luxan	44
4.3.3 Análise Térmica da pasta de cimento referência e de substituição	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1 Caracterização do residuo de ardósia	49
5.1.1 Granulometria a laser	49
5.1.2 Difração de raio-X do residuo de ardósia	50
5.1.3 Fluorescência de raios-X	52
5.2. Índice de Atividade Pozolânica do resíduo de ardósia	53
5.2.2 Índice de Atividade Pozolânica com a cal NBR 5751 (ABNT,2012)	53
5.2.2 Ensaio de Luxan	53
5.3 Análise Térmica da pasta de cimento referência e de substituição	54
6. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental diz respeito, entre outras coisas, ao consumo excessivo ou ineficiente de recursos naturais não-renováveis (LEITE,2001). A indústria da construção civil é considerada a maior consumidora de matérias-primas naturais e uma das maiores geradoras de resíduos, fazendo que os mesmos sejam descartados indiscriminadamente no meio ambiente ou depositados em aterros, contribuindo assim, de maneira relevante para maior degradação do meio ambiente. No entanto, alternativas de reutilização e reciclagem devem ser sempre estudadas como as principais alternativas para o seu gerenciamento.

Nos últimos anos a reciclagem de resíduos tem sido incentivada mundialmente, seja por razões políticas, econômicas ou ecológicas (LEITE, 2001), fazendo com que pesquisas sejam realizadas buscando materiais resistentes e capazes de proporcionar melhoria das características e dos desempenhos de alguns produtos.

Dessa maneira, percebe-se que a utilização de materiais alternativos na construção civil é cada vez mais empregada e recebe destaque nesse trabalho a utilização do resíduo proveniente do corte refrigerado da ardósia, uma rocha metamórfica amplamente utilizada na construção civil.

As maiores vantagens da utilização de resíduos minerais na produção de materiais de construção são: a sua abundância, particularmente nas regiões que concentram empresas mineradoras e de beneficiamento mineral; a diversificação de matérias-primas e a possibilidade de redução de custos (MENEZES et al 2002). Além disso, é uma alternativa de reciclagem e reutilização desses materiais, abrangendo o aspecto ambiental, econômico e social, buscando o desenvolvimento sustentável, possibilitando a economia das matérias-primas não renováveis e reduzindo os impactos ambientais dos resíduos gerados pela sociedade.

O resíduo fino do corte de ardósia surge na fase de corte dos blocos de rochas nas dimensões comerciais e é oriundo da abrasão do disco de corte diamantado na rocha que é carregado pela água utilizada na refrigeração e lubrificação do disco, sendo descartados em efluentes ou depositados nas serrarias de rochas ornamentais, resultando em problemas de deposição de lixo e assoreamento de rios.

Desta forma, viu-se a possibilidade da adição mineral em matrizes de cimento Portland do resíduo de ardósia, atendendo a quesitos de qualidade, durabilidade, sustentabilidade e ecologia.

Segundo a FEINAR (2006) o Brasil ocupa o segundo lugar mundial em termos de produção e consumo de ardósias, além de ser o segundo maior exportador, posição que alcançou em apenas vinte e cinco anos de atividades mínero-industriais do setor de ardósias de Minas Gerais, que responde por 90% da produção e processa a quase totalidade das exportações brasileiras. A produção de ardósia do estado de Minas Gerais totaliza cerca de 500 mil toneladas/ano, seja em chapas, ladrilhos, tampos de bilhar, telhas e outros produtos, movimentando cerca de 400 empresas de lavra e beneficiamento, gerando de seis a sete mil empregos diretos.

Prezando pelo meio ambiente e aliado com questões econômicas o reaproveitamento de resíduos minerais na construção civil vem tomando espaço, uma vez que as adições podem apresentar pozolanicidade, ou seja, formar compostos cimentantes na presença de água. Os ensaios e técnicas para avaliação do Índice de Atividade Pozolânica são determinados pela ABNT a partir de métodos indiretos de quantificação do potencial reativo.

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo avaliar a reatividade e a atividade pozolânica do resíduo de ardósia, bem como estudar a viabilidade e eficiência de sua utilização em matrizes cimentícias.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a reatividade e a atividade pozolânica do resíduo de ardósia quando aplicada como adição mineral em pastas de cimento Portland, bem como melhorias de desempenho que a mesma possa agregar às pastas.

2.2. Objetivos Específicos

Caracterização física do resíduo do corte de ardósia por Granulometria a Laser;

Análise mineralógica pela Difração de Raio-X;

Análise química do resíduo pela Fluorescência de Raio-X;

Análise térmica da pasta de cimento com 35% de substituição de cimento Portland por resíduo de ardósia após 28 dias de cura;

Avaliação da atividade pozolânica pelo Método de Luxan;

Determinação do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) do resíduo de ardósia com cal pelo método disposto na NBR 5751 (ABNT, 2012) .

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Principais Pozolanas

Materiais Pozolânicos, segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), são definidos como aqueles que possuem em sua composição silicatos ou sílico-aluminatos amorfos com nenhuma ou pouca atividade aglomerante, mas que quando em contato com água e em temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio formando componentes com propriedades cimentantes. A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio resulta na produção de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos responsáveis pela resistência e durabilidade das argamassas e concretos (OLIVEIRA et al., 2004).

As pozolanas são utilizadas em substituição parcial do cimento Portland e sua adição apresenta alguns benefícios como: redução de custo, redução do calor de hidratação, melhoria da resistência à fissura térmica, diminuição de permeabilidade, melhoria de plasticidade e de resistência às águas sulfatadas e à compressão, além de minimizar ou retardar a reação álcali-agregado.

É importante lembrar que cerca de 20 a 40% do cimento pode ser substituído por pozolana nos concretos sem que afete significativamente a resistência mecânica final do produto e que, ainda assim, agregue melhorias na qualidade do mesmo. Outro ponto que merece destaque é o fato de que se faz necessários tratamentos prévios em materiais pozolânicos para que seu uso se torne apropriado, por meio de processos que englobam desde a moagem até processos mais complexos como os térmicos.

A NBR 12653 (ABNT, 1992) classifica as pozolanas em função da origem e em função das suas características físicas e químicas. Quanto à origem as pozolanas se classificam em:

- Pozolanas naturais

São originários de rochas metamórficas, de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2) e de origem sedimentar ricos em sílica.

- Pozolanas artificiais

São os subprodutos industriais e materiais submetidos a tratamento térmico.

- Argilas calcinadas

São argilas caulínicas, que para que possam desenvolver atividade pozolânica devem ser submetidas a temperatura entre 500°C a 800°C e posterior moagem. (SOUZA; DAL MOLIN, 2002)

- Cinzas volantes

Resíduos essencialmente sílico-aluminosos, que resultam da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulado.

- Outros materiais

Materiais não tradicionais que também desempenham atividade pozolânica como escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral.

Quanto as características físicas e químicas os materiais pozolânicos dividem-se em três classes a saber:

- Classe N

São as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas (NETTO, 2006).

- Classe C

Nessa categoria estão as cinzas volantes obtidas a partir da combustão do carvão mineral em usinas termoelétricas.

- Classe E

Segundo estabelecido na NBR 12653 (ABNT, 1992) nessa classe se encaixam as pozolanas cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Segundo Tiboni (2007), a superfície específica dos resíduos tem grande influência na atividade pozolânica em virtude de estar correlacionada à finura do material, afetando o grau de atividade pozolânica, podendo ter o efeito secundário de fíler. Dessa forma, conclui-se que os aditivos minerais influenciam as propriedades das argamassas e concretos através de sua distribuição, forma, textura e distribuição de poros. Segundo Almeida (2008) as pozolanas mais utilizadas atualmente têm sido a microssílica, o carvão ativado e a escória de alto-forno básica.

3.2 Ardósia

A ardósia é uma rocha metamórfica, de derivação sedimentar que desenvolve planos preferenciais de partição designados de clivagem ardosiana. Essa clivagem é criada pelas pressões mecânicas, por recristalização mineralógica ou por rotação dos cristais, possuindo escamas de mica, quartzo, óxido de titânio, clorita e outros (SOUZA et. al, 2000).

Apresenta propriedades físicas como clivagem preferencial, alta resistência mecânica, baixa porosidade, dureza média, além de ser constituída de minerais resistentes, o que faz com que seu uso possa ser amplo na construção civil, como em coberturas e revestimentos de paredes e pisos.

Além das vantagens estéticas proporcionadas pela ardósia, como a possibilidade de uso tanto na face polida quanto natural, a mesma ainda apresenta as vantagens como durabilidade e facilidade de manutenção e limpeza, assegurando grande confiabilidade.

No Brasil, o estado de Minas Gerais é o maior centro de extração e beneficiamento de ardósia, possuindo uma região produtora focada que compreende uma área de 7000 km² e que é designada como “Província de Ardósia de Minas Gerais”. Os principais municípios mineradores estão situados no centro do estado a uma distância de aproximadamente 150 km da capital, abrangendo totalmente o município de Papagaio e parcialmente os municípios de Caetanópolis, Felixlândia, Pompéu, Paraopeba (Figura 1), Curvelo, Martinho Campos (Figura 2) e Leandro Ferreira. Os materiais extraídos são beneficiados e comercializados nos mercados interno e externo (MPM SLATE, 2012).

Figura 1- Pedreira em Paraopeba – MG.



Fonte: Página Altivo Pedras.

Figura 2- Pedreira em Martinho Campos-MG



Fonte: Página Altivo Pedras.

A extração dos blocos de ardósia com disco diamantado e água para refrigeração gera grande quantidade de rejeito em virtude da baixa recuperação de placas com aproveitamento industrial inferior a 15% do volume extraído. A falta de pesquisas, estudos, tecnologias e planejamentos geológicos vêm agravando esse quadro e contribuindo para acentuar os problemas ambientais.

Em contrapartida algumas pesquisas tem utilizado ardósia na produção de materiais cimentícios e contribuindo para redução do impacto ambiental. Segundo Furquim (2006), os minerais veem sendo empregados em concretos com o objetivo de melhorar suas propriedades contribuindo para menor porosidade, maior resistência mecânica, proporcionando um concreto de baixa permeabilidade, assegurando às estruturas proteção contra agentes agressivos.

De acordo com Dos Santos et al. (2013) a utilização de rejeito de ardósia em porcentagens de até 15% é favorável, podendo aumentar a resistência da argamassa.

3.3 Aplicações da Ardósia

3.3.1 Aplicações da ardósia como revestimento

A ardósia devido à suas características mineralógicas favorece a sua exploração e seu corte em placas de espessuras variadas (fissilidade) (OLIVEIRA, 1998 apud CUNHA, 2007).

É uma pedra decorativa aplicada em pavimentos, fachadas, tampos de laboratórios e mesas de bilhar, decorações de interiores e exteriores, podendo ser trabalhada em diversas dimensões. Além disso, é encontrada em banheiros, revestimento de pisos, paredes e até telhados em países de clima frio por apresentarem alta resistência mecânica e isolamento térmico. No entanto, não é muito indicada para pisos de áreas externas por propagar muito calor e quando molhada, torna-se escorregadia. Seu acabamento pode ser natural ou polido e sua espessura pode variar de 2,0cm a 3,0cm.

3.3.2 Aplicação da ardósia na construção civil

Atualmente, com a grande geração de resíduos nas mineradoras e nas empresas de beneficiamento mineral, aliado à preocupação do impacto ambiental que geram, pensa-se muito na reutilização desses resíduos na construção civil, uma vez que eles podem apresentar atividade pozolânica podendo ser utilizados em substituição ao cimento, diversificando, portanto as matérias primas e contribuindo para redução de custos de produção e melhoria das características dos materiais (MENEZES et al., 2002). Assim, grande parte dos rejeitos da mineração podem ser reciclados, transformados, reutilizados e incorporados, resultando em novos materiais de modo a atender às tecnologias mais simples, eficientes e econômicas de construção (LANA, 2014).

Durante a extração e mineração da ardósia os resíduos são caracterizados como pó, cascalho e lama, e quando jogados indiscriminadamente na natureza causam grande impacto. Em consequência disso, o estudo da adição do resíduo de ardósia está avançando e sendo empregado em vários materiais na construção civil. No Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia, no estado de Minas Gerais, foram realizados estudos para o uso de resíduo de ardósia em tijolos e segundo MANSUR et al. (2006 apud CUNHA, 2007) o resíduo pode substituir a cerâmica vermelha na fabricação de tijolos e tubos cerâmicos. Além de reutilizar o rejeito da ardósia, não gera custo e é abundante na região de Minas Gerais, outra vantagem apresentada é o fato de substituir a cerâmica, material oriundo da extração da argila, que é altamente poluente.

As proporções de adição do resíduo de ardósia em matrizes cerâmicas podem variar de 10% à 60% e são obtidas por processos de combinações, moldagem e queima a 1000°C por 4 horas. Assim, o resíduo de ardósia tem sido recuperado

como matéria-prima por várias empresas do setor cerâmico (CUNHA, 2007), sobretudo na fabricação de telhas, atendendo a exigência mínima de 27MPa para uso e comercialização do material.

O uso de material residual para a construção civil vem sendo estudado desde meados da década de 70 e segundo BUTLER et al (2000) o resíduo de ardósia é utilizado em matrizes de concreto de baixo custo, além de ser empregado como matéria prima no setor cerâmico.

O estudo, análise e caracterização dos diferentes tipos de resíduos, bem como sua caracterização mineralógica e análise térmica tornam-se imprescindíveis para definição de uma estratégia para emprego no setor industrial, possibilitando o uso dos resíduos em vários segmentos industriais, diminuindo o volume de resíduo depositado e, conseqüentemente, melhorando as condições ambientais

3.4 Caracterização do resíduo de ardósia

3.4.1 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de raios-X representa o fenômeno de interação entre um feixe de raios-x incidente e os elétrons dos átomos do material (GOBBO, 2003). Os raios X ao atingirem o material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (espalhamento coerente). O fóton de raios X após a incidência muda sua trajetória, mas mantém a mesma fase e energia do fóton incidente, assim, a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida.

Partindo da existência de dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, a difração de raios X ocorrerá a partir da diferença da trajetória percorrida pelos raios X e o comprimento de onda da radiação incidente. Esse fenômeno satisfaz a Lei de Bragg (Equação 1), onde um feixe monocromático de determinado comprimento de onda incide sobre um cristal a um determinado ângulo, denominado ângulo de Bragg, de onde tem-se:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (1)$$

Onde: n = ordem de difração;

λ = comprimento de onda;

d = distância entre os planos de átomos;

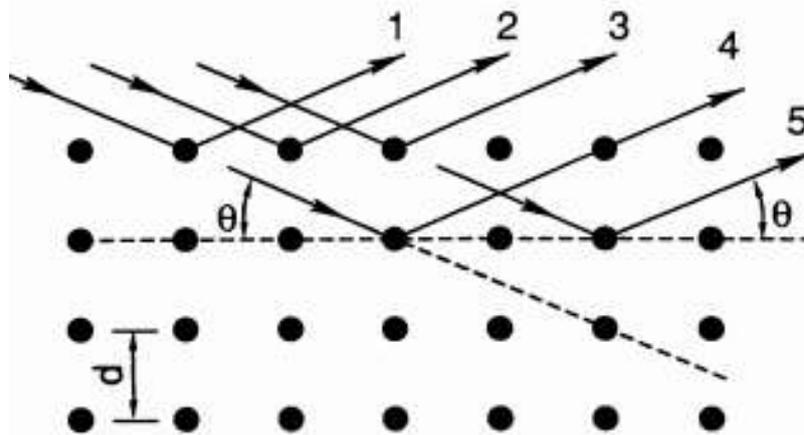
θ = ângulo de Bragg.

Equação 1- Lei de Bragg

O feixe difratado é expresso por picos que se destacam da linha de base, constituindo o padrão difratométrico ou difratograma.

A intensidade difratada (representada pelos picos do difratograma) é dependente do número de elétrons no átomo, esses por sua vez são distribuídos no espaço de tal forma que os vários planos de uma estrutura cristalina possuem diferentes densidades de átomos ou elétrons, fazendo com que as intensidades difratadas sejam distintas. Os dados obtidos de cada pico são a intensidade, a posição angular (2θ) ou distância interplanar (d) e o perfil (Figura 3).

Figura 3- Fenômeno de difração de raios-X (Lei de Bragg).



Fonte: KAHN, 2009, p. 2.

Através do método do pó em agregados policristalinos a amostra é pulverizada, fixada a um porta-amostra por prensagem e/ou colagem e submetida a um feixe de raios-X monocromático. Cada partícula deste pó vai se comportar como um pequeno cristal, com orientação aleatória em relação ao feixe de raios-X incidente. A sobreposição de reflexões dos componentes é o inconveniente da técnica, que acaba resultando na mistura de informações contidas na intensidade e dificulta a análise de um material com número excessivo de compostos cristalinos.

As substâncias são identificadas através da comparação do espectros observados com padrões dos difratogramas de fases individuais disponibilizados pelo ICDD (Internacional Center for Diffraction Data), permitindo calcular os parâmetros de cada unitária, avaliar o grau de cristalinidade e quantificar as fases presentes (baseada nas intensidades dos picos do difratograma, que contém a

característica da estrutura cristalina de cada fase e refletem a proporção das fases na amostra)(GOBBO,2003).

Com a análise correta, experiência na leitura, um bom operador e equipamentos computacionais adequados o difratograma de raios-X pode oferecer resultados inteiramente satisfatórios sobre a constituição de fases da amostra.

3.4.2 Análise Térmica

Análise térmica é um grupo de métodos pelos quais as propriedades físicas ou químicas de uma substância, mistura ou reativo são medidos como funções de temperatura ou tempo, enquanto a amostra, sob uma atmosfera específica está sujeita a um programa de temperatura controlada. O programa pode consistir em aquecer, resfriar, manter a temperatura constante ou uma sequencia destes.

Essa definição comumente aceita para análise térmica foi proposta pelo Comitê de Nomenclatura da Confederação Internacional de Análises Térmicas (ICTA) e adotada pela IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada) e pela ASTM (Sociedade Americana de Testes de Materiais)(MACHADO, 2008).

Dentre os métodos mais utilizados de análise térmica encontra-se a análise termogravimétrica (TGA), onde ocorrem mudanças de massa devido à interação com a atmosfera, vaporização e decomposição e a análise térmica diferencial (DTA), na qual processos físicos e químicos envolvem a variação de energia.

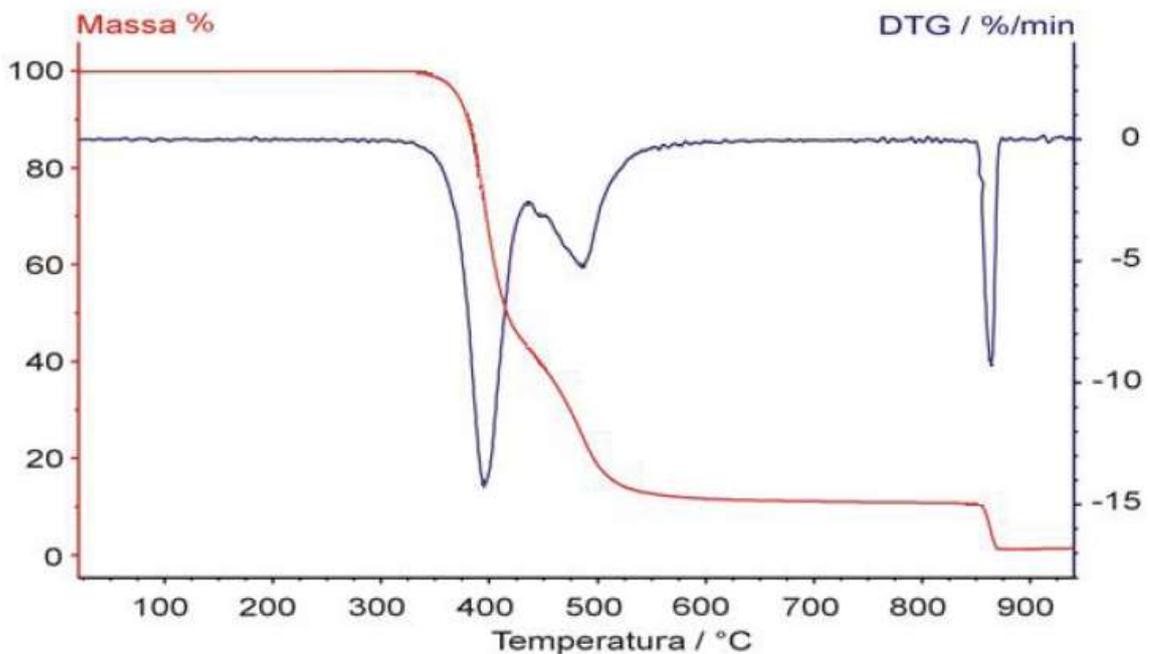
3.4.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica acompanha a variação da massa da amostra em função da temperatura quando esta é submetida a uma programação controlada. Ou seja, é a técnica que acompanha a perda ou ganho de massa da amostra em função da temperatura.

Através da termogravimetria é possível quantificar a presença de fases pela perda de massa a dada temperatura, pois cada composto químico sofre alteração e transformação sob determinada temperatura. A TG é utilizada para caracterizar a decomposição e a estabilidade térmica de materiais e examinar a cinética de processos físico-químicos que ocorrem em uma amostra (HATAKEYAMA; QUINN, 1999).

Para análise da curva termogravimétrica faz-se o traçado dos dados da perda de massa da amostra no eixo das ordenadas pelo aumento da temperatura. Para auxiliar no reconhecimento de um composto a partir de determinado trecho obtêm-se a curva derivada a primeira em relação à curva de perda de massa. Para os trechos da curva de perda de massa em que houver uma mudança na inclinação, resultará na curva derivada a primeira, picos que representam uma decomposição (ou reação) de um determinado composto químico (NITA; JOHN, 2007). As curvas TGA (termogravimétrica) e DTG (termogravimétrica derivada) estão representadas a seguir (Figura 4).

Figura 4-Curva TGA em vermelho e DTG em azul.



Fonte: MACHADO, 2008, p. 4.

Observa-se que no eixo das ordenadas a massa é representada em percentual de massa wt%, ao invés da massa total, proporcionando uma fácil comparação entre várias curvas em uma base normalizada.

Pela técnica da termogravimetria (curvas TGA e DTG) observa-se que os produtos hidratados na matriz perdem a água quimicamente combinada em picos característicos. O processo de perda de água do hidróxido de cálcio situa-se em 370°C, sendo praticamente decomposto na temperatura de 580°C com total desidratação. Assim, a verificação da atividade pozolânica se dá com a diminuição

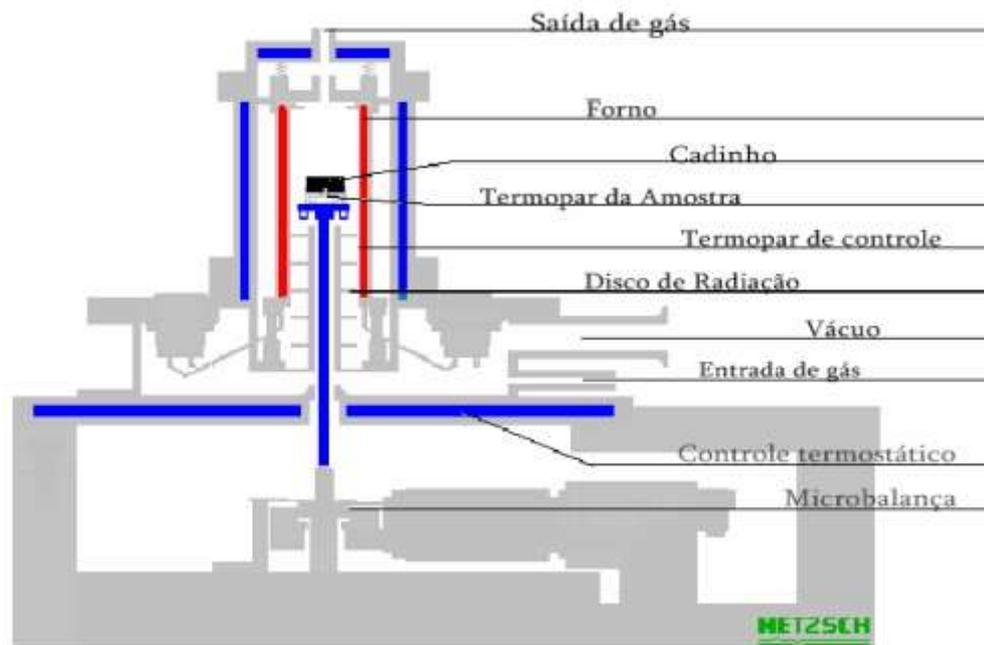
desse pico ao longo do envelhecimento, indicando, portanto, o consumo de hidróxido de cálcio.

O equipamento utilizado na termogravimetria (Figura 5) é basicamente composto pela termobalança, que é um instrumento que permite a pesagem contínua de uma amostra em função da temperatura à medida que ela é aquecida ou resfriada.

O equipamento é constituído pelos seguintes equipamentos:

- Forno: apresenta ampla diversidade conforme o fabricante e cada forno compreende um faixa de temperatura específica, podendo variar de -170°C à 2800°C , dependendo dos materiais constituintes e dos demais componentes;
- Programador de temperatura: tem como função controlar a taxa de aquecimento do forno que, em geral, está na faixa de 1 a $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e deve ser capaz de uma programação diretamente proporcional ao tempo para várias faixas de temperaturas diferentes;
- Termopar: constituído de dois condutores elétricos tendo duas junções, uma onde a temperatura é medida, e outra onde a temperatura é conhecida. A temperatura entre as duas junções é determinada pelas características do material e o potencial elétrico estabelecido.
- Balança: instrumento que permite medidas contínuas da massa da amostra enquanto ocorre a mudança de tempo e temperatura. A expressão “termobalança” é utilizada para designar o sistema que mede a massa de amostra em um determinada faixa de temperatura.
- Cadinhos: De acordo com o tipo de amostra a ser utilizada o cadinho pode ser dos mais diversos materiais. Para amostras em pó, os cadinhos são achatados, mas para evitar inchamentos é indicado o uso de cadinhos com paredes mais altas.

Figura 5-Desenho detalhado de um aparelho de termogravimetria.



Fonte: MACHADO, 2008, p. 6.

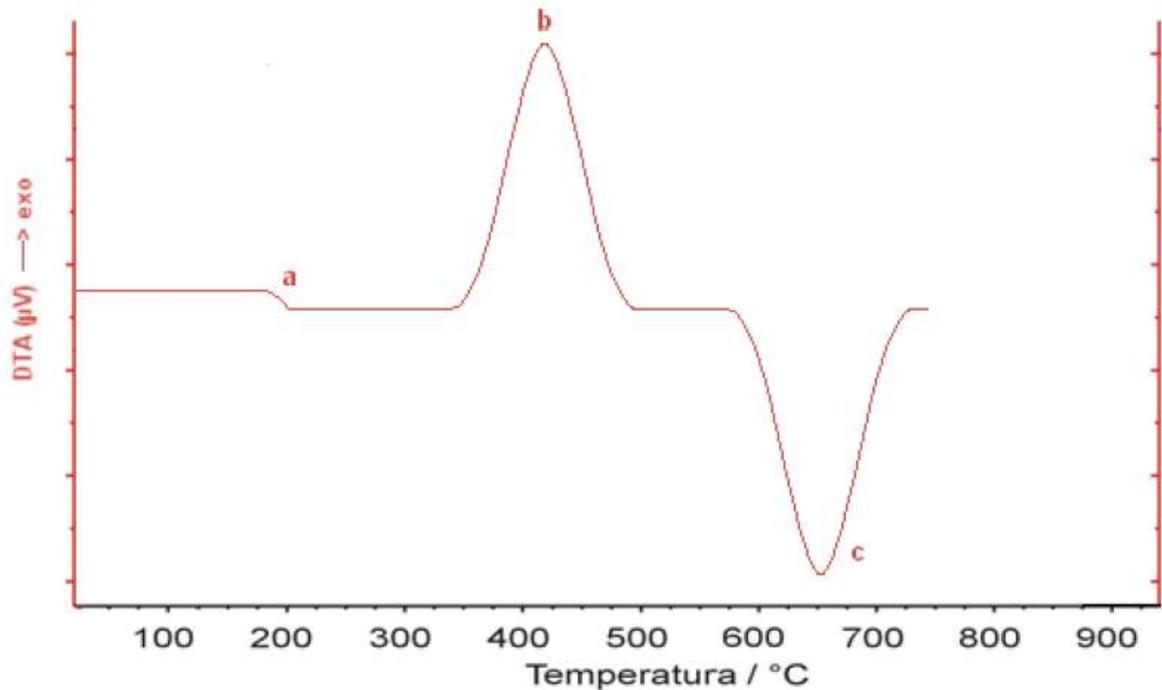
3.4.2.2 Análise Térmica Diferencial (DTA)

A análise térmica diferencial derivada (DTA) é uma técnica em que a diferença de temperatura entre uma substância e um material de referência é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

É importante ressaltar que a substância e o material de referência são submetidos à mesma programação de aquecimento, monitorada pelos sensores de temperatura. O material de referência pode ser a alumina em pó e até mesmo a cápsula vazia.

A amostra e o material de referência são mantidos à mesma programação de temperatura até a ocorrência de alguma alteração física ou química da amostra. Se a amostra apresentar por um curto período de tempo temperatura superior à temperatura do material referência, a amostra liberou calor, ocorrendo uma reação exotérmica. Se ocorrer uma reação endotérmica a temperatura da amostra apresentará, por um curto período de tempo, temperatura inferior que a temperatura de referência (MACHADO, 2008). Na Figura 6 tem-se uma curva típica de análise térmica diferencial.

Figura 6-Curva típica de uma análise térmica diferencial.



Fonte: MACHADO, 2008, p. 10.

- a) Variação da capacidade calorífica;
- b) Reação exotérmica;
- c) Reação endotérmica;

Dessa forma, observa-se que as mudanças como fusão, solidificação e cristalização da amostra são registradas sob a forma de picos (b e c) e a capacidade calorífica registrada como um deslocamento da linha de base (a). Além disso, tem-se na curva DTA a temperatura ou tempo na abscissa, e a diferença de temperatura nas ordenadas (μV).

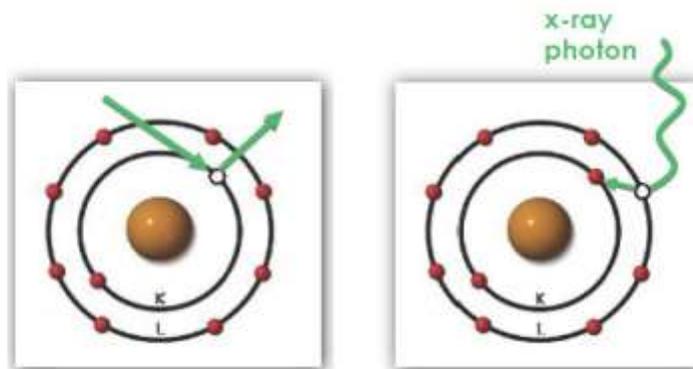
A análise térmica diferencial é usada principalmente para determinar a temperatura inicial dos processos térmicos e caracterizá-los como exotérmicos ou endotérmicos. Essa informação auxilia na determinação do consumo de hidróxido de cálcio, uma vez que os picos endotérmicos entre 500°C e 600°C estão associados à portlandita residual. Assim, quanto menor a área do pico do hidróxido de cálcio, maior o consumo de hidróxido de cálcio e maior o potencial pozolânico (LANA, 2014 *apud* MANFROI et al., 2010).

3.4.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A fluorescência de raios-X é um método semi-quantitativo baseado na medida das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos constituintes da amostra. Esse procedimento é uma técnica não destrutiva permitindo identificar os elementos presentes em uma amostra (análise qualitativa) assim como estabelecer a concentração em que cada elemento presente na amostra se encontra. Isso ocorre a partir do momento em que átomos da substância analisada absorvem energia de uma fonte de radiação de energia elevada (raio-X) provocando, assim, a excitação dos átomos e deixando-os em uma situação instável. O átomo excitado tende a voltar ao seu estado inicial, ocorrendo uma emissão de energia que é característica específica de cada elemento químico, permitindo sua identificação e quantificação (OLIVEIRA, 2011).

Abaixo a Figura 7 ilustra o princípio da fluorescência de raios-X quando um átomo recebe uma descarga de raios-X, possibilitando a entrada de fótons que atingem o elétron da amostra, elevando sua energia e sendo retirado da camada atômica que ocupava, deixando um vazio. Este vazio é preenchido por um elétron de maior energia e nesse processo há liberação de energia na forma de um fóton de raios-X, que demonstra as características iguais ao comprimento de onda dos elementos constituintes da amostra.

Figura 7- Representação do princípio da fluorescência de raios-X.



Fonte: Manual ARL 9900 Intellipower Series, Nº AA83654-02, Thermo Fisher Scientific, 2007 apud OLIVEIRA, 2011, p. 44.

De modo sucinto, a fluorescência de raios-X consiste em três fases: excitação dos elementos constituintes da amostra, dispersão dos raios-X emitidos pela amostra e detecção dos raios-X emitidos pela mesma.

Dessa forma, a partir da sua capacidade em determinar elementos químicos de forma rápida, sem destruir a matriz e com custos de operação baixos e mínimo preparo das amostras a FRX vem ocupando um lugar de destaque na comunidade científica e acadêmica, propondo a solução a certos problemas químicos e aplicações em diversas áreas.

O fenômeno da fluorescência de raios-X se fundamenta na produção e detecção de raios-X por radiações eletromagnéticas de alta frequência com comprimento de onda na faixa de 0,003 a 3nm.

3.5 Índice de Atividade Pozolânica

3.5.1 Método de Luxan

Segundo Luxan et al (1989) a atividade pozolânica pode ser medida pela condutividade elétrica. O método consiste em avaliar a variação da condutividade elétrica de 200mL de solução saturada de hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 40°C e sob agitação constante devido à adição de 5,0 g de pozolana. Após a adição da pozolana, no caso o resíduo de ardósia, a condutividade decresce em decorrência da menor quantidade de íons Ca^{2+} e $(\text{OH})^-$, sendo o Índice de Atividade Pozolânica (IAP) definido como a relação entre a condutividade elétrica antes da adição da pozolana e a condutividade elétrica após passados 120s da adição da pozolana.

Luxan et. al (1989) propõe ainda que os materiais sejam classificados em grupos conforme o índice de atividade pozolânica a saber:

- Materiais sem atividade pozolânica: $\Delta\text{mS}/\text{cm} < 0,4$;
- Materiais de atividade pozolânica moderada: $0,4 < \Delta\text{mS}/\text{cm} < 1,2$;
- Materiais com alta atividade pozolânica: $\Delta\text{mS}/\text{cm} > 1,2$.

É um método de fácil aplicação, porém o decréscimo da condutividade elétrica pode não representar de forma realista o grau de atividade pozolânica. Isto ocorre porque pode haver nucleação com os íons Ca^{2+} sendo atraídos para a superfície das partículas, sem haver reação entre estes íons e a sílica amorfa. Nesse caso, a condutividade elétrica apresenta-se muito mais como função da área de superfície específica das partículas do que o teor e a qualidade de sua fase ativa.

3.5.2 Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal - NBR 5751 (ABNT, 2012)

A norma brasileira NBR 5751 (ABNT, 2012) prescreve todo o método de ensaio para determinação da atividade pozolânica com o cal. É um método físico de determinação da pozolanicidade a partir da medição da resistência mecânica de argamassas contendo pozolana, cal (hidróxido de cálcio hidratado), areia e água após o período de sete dias de cura.

Segundo CORDEIRO (2009) a opção pelas argamassas em detrimento do ensaio em pastas é devido ao fato de ser uma tentativa de ensaiar o material que mais se aproxima das condições utilizadas normalmente. No entanto, a interação entre as curvas granulométricas da areia e da pozolana podem encobrir medições e ocasionar resultados diferenciados.

Tem-se optado por realizar esse ensaio para eliminar as variações decorrentes dos desempenhos variados dos cimentos e para investigar a reatividade dos materiais pozolânicos com a cal hidratada, uma vez que cada pozolana fixa uma determinada quantidade de hidróxido de cálcio para atingir a máxima resistência à compressão.

É importante ressaltar que a NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece a condição de que os corpos de prova obtidos no ensaio prescrito pela norma NBR 5751 (ABNT, 2012) possuam resistência à compressão aos 7 dias de, no mínimo, 6,0 MPa, como ilustra a Tabela 1.

Tabela 1- Exigências físicas.

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

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

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Cimento Portland

O Cimento Portland é um material de construção que possui propriedades aglomerantes e aglutinantes, produzido a partir da moagem do clínquer, constituído por silicatos de cálcio hidráulicos, usualmente com adição de sulfato de cálcio e que endurecem sob a ação de água. A fusão de uma mistura dosada e homogeneizada de calcário e argila, de modo que toda cal se combine com os compostos argilosos, resulta nos clínqueres, que se apresentam em nódulos de 5 a 25mm de diâmetro de material sinterizado (DE CARVALHO, 2009).

A norma brasileira prevê adições que são oito tipos de Cimento Portland, conforme o teor e a composição adotada (Tabela 2).

Tabela 2-Tipos de cimento.

				Componentes [% em Massa]			
Título da Norma	Denominação	Sigla	Classe [MPa]	Clínquer +Sulfato de Cálcio	Escória Granul. A. F.	Material Pozolânico	Material Carbonático
CP comum	CP comum	CPI	25 32	100	-	-	-
	CP comum + adição	CPI-S	40	99-95	1-5		
CP composto	CP composto com escória	CPII-E	25	94-56	6-34	-	0-10
	CP composto com Pozolana	CPII-Z	32	94-76	-	6-14	0-10
	CP composto com Filer	CPII-F	40	94-90	-	-	6-10
CP de alto forno	CP de alto forno	CPIII	25/32/40	65-25	35-70	-	0-5
CP pozolânico	CP pozolânico	CPIV	25/32	85-45	-	15-50	0-5
CP de alta resistência inicial	CP de alta resistência inicial	CPV-ARI	Mín. de 34 MPa Aos 7 dias	100-95	-	-	0-5
Classe de Resistência [25,32,40] ; A medida da Resistência à compressão dos cimentos brasileiros é o MegaPascal [MPa] - 1 MPa =10,197 kgf / cm ² ou 1MPa = 10 kgf / cm ²							

Obs.: Existem ainda os seguintes tipos de cimento portland:

Resistente a Sulfatos (RS), Baixo Calor de Hidratação (BC), Branco Estrutural (CPB).

Fonte: CARVALHO, 2009, p. 57.

O cimento portland é uma das substâncias mais consumidas pelo homem e isso se deve às características que lhe são peculiares, como trabalhabilidade, moldabilidade (estado fresco), alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo (estado duro). Insubstituível em obras civis, o cimento pode ser empregado tanto em

peças de mobiliário urbano como em grandes barragens, em estradas ou edificações, em pontes, tubos de concreto ou telhados, podendo ser até matéria-prima para a arte (ABCP, 2009).

No presente trabalho utilizou-se o CP V ARI (Alta Resistência Inicial) que é um aglomerante hidráulico que atende às exigência de alta resistência inicial com valores mínimos de resistência à compressão exigidos pela norma de 26 MPa a um dia de idade e de 53 MPa aos 7 dias (ABCP). É o produto da moagem do clínquer Portland, constituído principalmente de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual é possível, se necessário, adicionar uma ou mais formas de sulfato de cálcio. O CP V ARI pode ter em sua composição até 5% de material carbonático em massa, sendo o restante dos componentes o clínquer e os sulfatos de cálcio.

O CP V ARI utilizado foi entregue em um saco contendo 50kg de cimento e foi verificado sua integridade na ocasião de sua inspeção e recebimento. Seu armazenamento se deu em local seco e protegido, colocado sobre um estrado seco e apenas uma saco foi empilhado acima deste.

O CP V ARI é recomendado no preparo de concreto e argamassa para produção de artefatos de cimento em indústrias de médio e pequeno porte, como fábricas de blocos de alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes, etc até edificações de maior porte que requeiram resistência inicial elevada e desforma rápida. A propriedade de alta resistência inicial nesse tipo de cimento é obtida a partir da dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, resultando em elevação dos conteúdos de alita e C_3A , e pela moagem mais fina do cimento, a partir disso ao reagir com a água o CP V ARI atinge elevada resistência com maior velocidade (DE CARVALHO, 2009).

4.2 Cal

Cal é um aglomerante resultante da calcinação de rochas calcárias em temperatura inferior ao ponto de fusão, em torno de 900°C, suficiente para a dissociação do calcário. Existem dois tipos de cales, a cal aérea (cal virgem e cal hidratada) e a cal hidráulica (Figura 8). Para realização do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica com cal fez-se uso da cal hidratada CH-II. A cal foi entregue em um saco contendo 15kg e foi verificado sua integridade na ocasião de sua inspeção e recebimento. Seu armazenamento se deu em um saco transparente seco, protegido e fechado.

Figura 8- Tipos de Cal

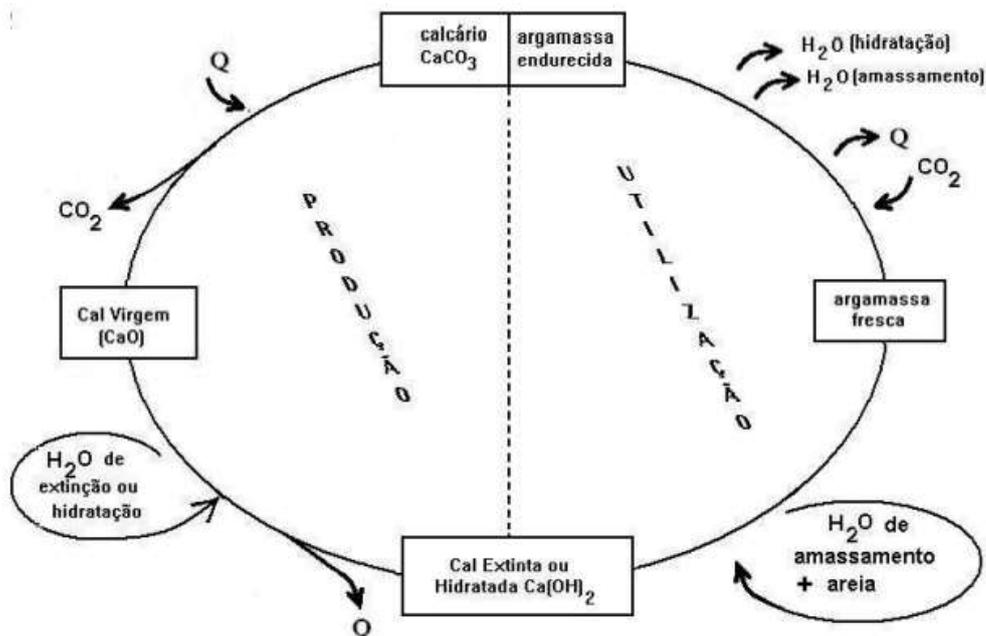


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Cal aérea

A cal aérea em contato com o gás carbônico presente no ar endurece, podendo tornar-se tão sólida quanto o calcário que a originou. De acordo com o teor de óxido de cálcio (CaO) a cal aérea pode ainda ser gorda ou magra. A cal gorda possui no mínimo 90% de óxido de cálcio, é branca e apresenta melhor qualidade e rendimento. A cal magra possui teor de magnésio variando entre 20% e 50% do volume da cal e apresenta como maior desvantagem a sua lenta extinção quando comparada ao CaO . A Figura 9 retrata o ciclo da cal aérea, desde a sua fabricação até sua aplicação, apresentando-se como argamassa endurecida.

Figura 9- Ciclo da cal aérea



Fonte: DE CARVALHO, 2009, p. 33.

4.2.1.1 Cal virgem

A cal virgem, também denominada cal extinta, é o produto inicial resultante da queima de rochas calcárias, composto essencialmente dos óxidos de cálcio e magnésio. A aquisição da cal virgem para extinção no canteiro está praticamente eliminada por vários fatores, inclusive segurança nas obras, isto apesar de oferecer maior plasticidade nas argamassas e maior rendimento econômico (DE CARVALHO, 2009).

A cal virgem pode ser classificada em função do tempo de extinção. Para isso colocam-se em um recipiente duas ou três medidas correspondentes a um punho fechado e adiciona-se água até cobrir a cal. Se a extinção da cal começar em menos de cinco minutos, tem-se a cal de extinção rápida. Entre cinco e trinta minutos, tem-se a cal de extinção média e se a extinção ocorrer após trinta minutos tem-se a cal de extinção lenta.

O tipo de extinção caracteriza o modo de ser adicionar e dosar a mistura (MARINHO, 2013):

- Cal de extinção rápida: adicionar sempre a cal à água, sendo a água suficiente para cobrir toda a cal. Se houver desprendimento de vapor durante o processo deve-se revolver inteiramente a massa e adicionar água até interromper o vapor.
- Cal de extinção rápida: adicionar água a cal, e garantir que a cal fique meio submersa. Caso haja desprendimento de vapor mexer e adicionar água.
- Cal de extinção lenta: adicionar quantidade suficiente de água para umedecer totalmente a cal, não mexendo no material até que a extinção esteja completa.

4.2.1.2 Cal hidratada

A NBR 7175 (ABNT, 2003) define como cal hidratada o pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

A denominação da cal hidratada é ainda determinada de acordo com a composição da cal:

- Cal hidratada CH-I: cal hidratada especial podendo ser de origem de calcário cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou calcário dolomítico ($\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$);
- Cal hidratada CH-II: cal hidratada comum composta de $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$;
- Cal hidratada CH-III: cal hidratada comum com carbonatos.

4.2.2 Cal hidráulica

A cal hidráulica é constituída por silicatos, aluminatos e óxidos de cálcio que hidratados endurecem na água ou ao ar. Por conter silicatos e minerais argilosos proporcionam alta na porcentagem de compostos com propriedades hidráulicas.

4.3 Resíduo de Ardósia

O resíduo de ardósia utilizado para esse trabalho é proveniente da Mineradora MPM SLATE, de Pará de Minas, Minas Gerais. O resíduo foi transportado e armazenado corretamente à temperatura, umidade e condições adequadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP. O processo de preparação da amostra envolve várias etapas, sendo a etapa inicial de grande importância a homogeneização do resíduo de ardósia, necessário para torná-lo adequado para a posterior caracterização do material e para os ensaios de atividade pozolânica. A figura 10 abaixo apresenta o esquema da preparação do resíduo de ardósia.

Figura 10- Fluxograma do preparo do resíduo de ardósia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a homogeneização o resíduo de ardósia passou pelo procedimento de secagem em estufa a uma temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 horas. O material já se apresentava bastante fino e em forma de pequenos torrões.

Após a secagem o resíduo foi moído em um moinho de bolas horizontal da marca Marconi (Figura 11), onde, através de movimentos circulares rápidos no sentido horizontal do jarro sobre os rolos motorizados, esferas em alumina sinterizada eram direcionadas em sentido contrário contra as paredes internas dos jarros pulverizando a amostra. A finalidade desse procedimento foi desaglomerar as partículas do material, ou seja, separar as partículas, tornando sua superfície específica maior e, conseqüentemente aumentando sua reatividade. É importante ressaltar que o resíduo de ardósia foi moído durante 2 minutos para destorroamento, separando-se amostra significativa da moagem. Após a moagem todo o material foi armazenado em saco transparente fechado e devidamente identificado.

Figura 11- Moinho de bolas horizontal da marca Marconi.



Fonte: Acervo pessoal.

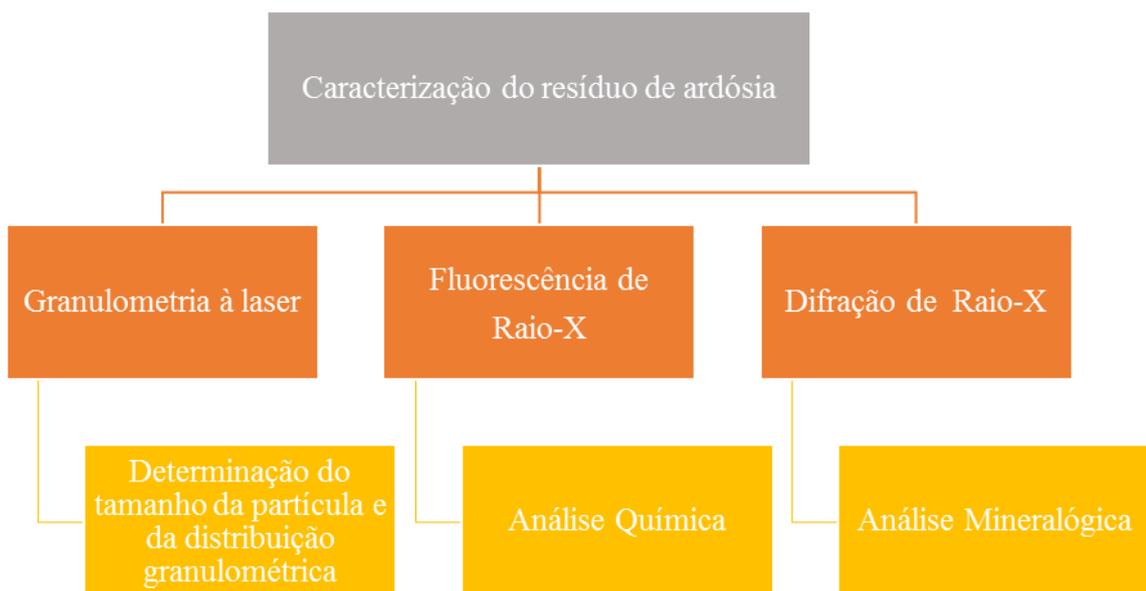
É importante lembrar que o processo de amostragem é o processo que limita a exatidão do procedimento e garante que esta represente a composição de todo lote. Qualquer irregularidade durante a etapa de amostragem pode resultar em erros de precisão e exatidão. Sendo assim, faz-se necessário a coleta e o processamento da amostra o mais rápido possível, no entanto quando não se torna possível é

indispensável que a mesma seja armazenada em recipiente impermeável e fechado, com o menor espaço de ar possível.

Após todo o correto preparo da amostra do resíduo de ardósia, anteriormente à caracterização do resíduo e da determinação do índice de atividade pozolânica mesmo, foi realizada a determinação da massa específica do resíduo de ardósia por meio da técnica de picnometria a hélio no laboratório de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto. Essa técnica permite a determinação da massa específica do material através da comparação da variação da pressão de hélio na câmara da amostra e a de uma câmara de volume calibrado. Usa-se o hélio em virtude da sua facilidade de penetrar nos poros das amostras, permitindo assim a definição de modo preciso do volume do sólido. Assim, a picnometria a hélio determina a densidade e o volume real da amostra, através da relação existente entre a massa do material e o volume real, excetuando todos os espaços vazios. Por meio desse método, a massa específica do resíduo de ardósia destorroado no moinho horizontal de bolas por dois minutos foi de 2,634 g/cm³.

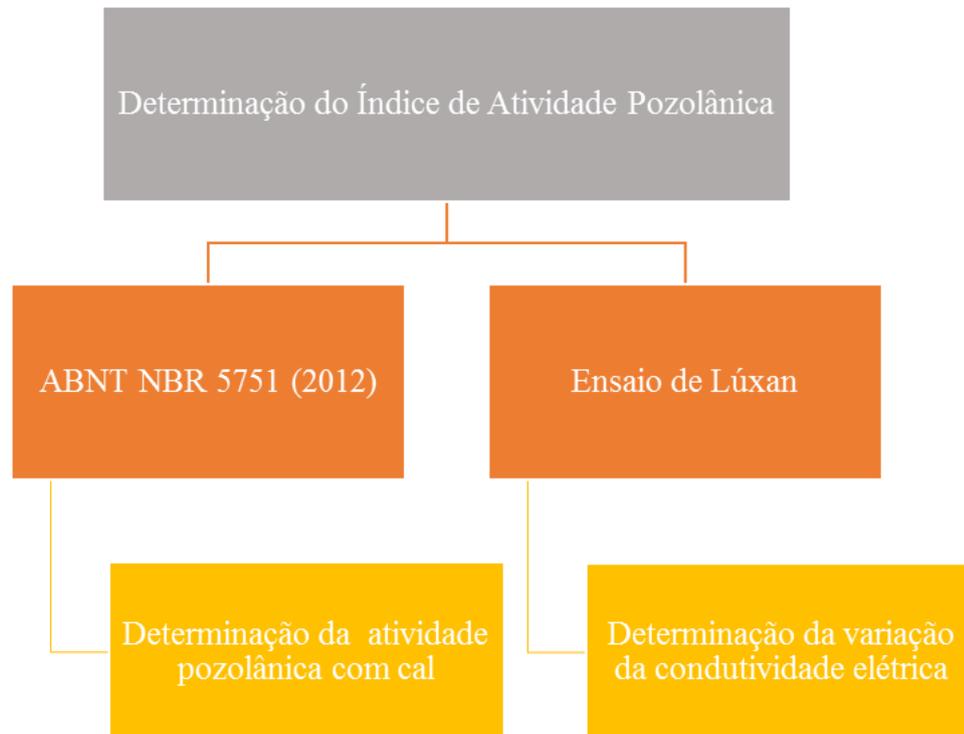
Posteriormente à determinação da massa específica do resíduo de ardósia foi feita a caracterização do resíduo e foram definidos e executados os métodos de determinação do Índice de Atividade Pozolânica como ilustram as figuras 12 e 13.

Figura 12- Fluxograma da caracterização do resíduo de ardósia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13- Fluxograma da determinação do Índice de Atividade Pozolânica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.1 Caracterização do resíduo de ardósia

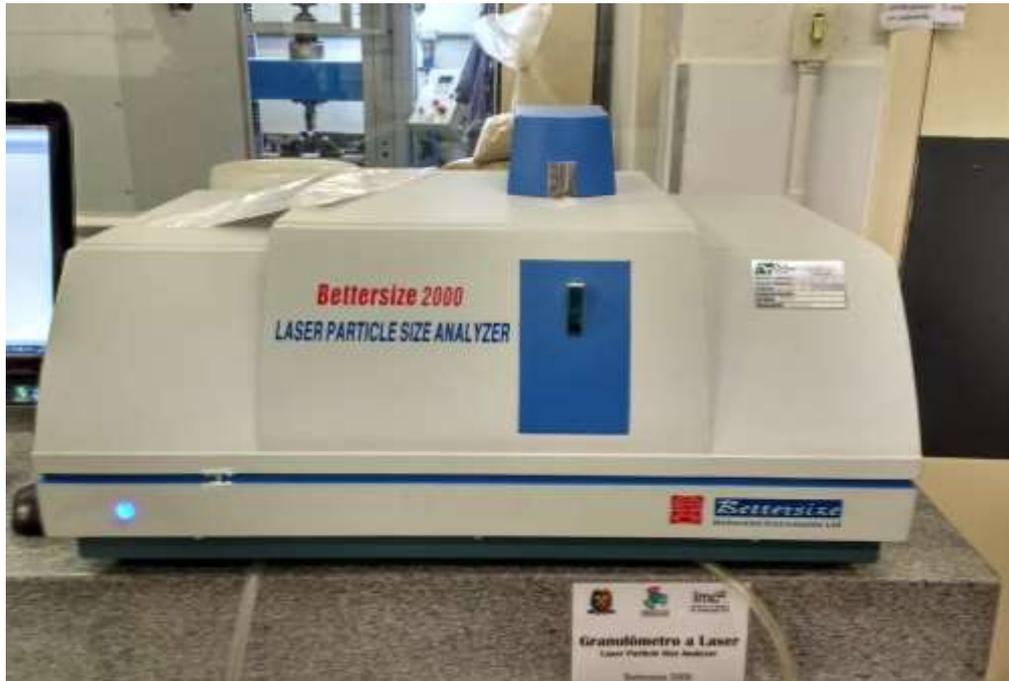
4.3.1.1 Granulometria a laser

A granulometria é o processo que tem como objetivo definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a porcentagem em peso que cada fração possui em relação a massa total da amostra em análise.

O tamanho ou granulometria dos grãos está diretamente ligada à reatividade do material, pois quanto menor o grão, maior superfície específica e maior reatividade com a água e outros materiais. Dessa forma, a finura influi diretamente na reatividade do material, além disso, a ardósia sendo um material fino, preenche os vazios e pode apresentar efeito secundário de fíler.

Para realização da granulometria à laser, após a passagem da amostra pela peneira de malha 1,20 mm (16 mesh), utilizou-se o granulômetro Bettersize 2000, indicado na Figura 14. A caracterização granulométrica foi feita para a amostra destorroada durante 2 minutos.

Figura 14- Granulômetro a Laser.



Fonte: Acervo pessoal.

4.3.1.2 Fluorescência de raios-X- Análise Química

A análise química por fluorescência de raios-X visou determinar os componentes químicos do resíduo de ardósia. Para se obter dados precisos foi necessário o preparo correto da amostra, com distribuição homogênea, em boas condições analíticas. Como a amostra já encontrava-se devidamente seca, moída e em recipiente fechado, apenas fez-se necessário a coleta de quantidade suficiente para a realização do ensaio.

Dessa forma, a espectrometria de raios-X foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (Imc²) da Universidade Federal de Ouro Preto, no equipamento PANalytical-Epsilon 3^x (Figura 15).

Figura 15- Espectrômetro de raios-X - PANalytical Epsilon 3^x



Fonte: Acervo pessoal.

4.3.1.3 Difração de raios-X – Análise Mineralógica

A determinação das fases minerais é parte crucial na caracterização de minérios, rejeitos e concentrados, por vários motivos e, dentre os mais importantes, destaca-se a avaliação da reatividade em amostras potencialmente poluidoras e no estabelecimento da viabilidade de aplicações de minerais. (DA COSTA, NEUMANN, 2007).

Dessa forma, a caracterização mineralógica do resíduo de ardósia foi feita por meio da difração de raios-X. Foram coletados 9 gramas do resíduo de ardósia destorroado por 2 minutos no moinho horizontal de bolas. À essa amostra foram adicionados constantes 1 grama de fluoreto de cálcio (CaF_2), correspondente a 1% do peso (total) em massa da amostra, como padrão interno. A fluorita foi escolhida como um padrão interno por ser um composto estável que apresenta uma estrutura simples, elevada simetria, pureza e cristalinidade e por apresentar poucos picos difratados e intensos.

O difratograma foi obtido a partir da utilização do feixe de radiação monocromática de $\text{CuK}\alpha$, enquanto θ era variado e a partir de outros parâmetros como definido na Figura 16. Para tanto, utilizou-se o equipamento EMPYREAN da Panalytical (com detector X'Celerator) no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto.

Figura 16- Parâmetros da difração de raios-X

Anchor Scan Parameters

Dataset Name:	Guilherme_box3_absolute_ARDÓSIA_2mim_2
File name:	C:\XRD_Data\Guilherme_box3_absolute_ARDÓSIA_2mim_2.xrdml
Sample Identification:	ARDÓSIA_2mim
Comment:	Configuration=Panalytical- 1, Owner=User-1, Creation date=19-Dec-13 2:28:08 PM Goniometer=Theta/Theta; Minimum step size 2Theta:0.0001; Minimum step size Omega:0.0001 Sample stage=Reflection-transmission spinner; Minimum step size Phi:0.1 Diffractometer system=EMPYREAN Measurement program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\Guilherme_box3_absolute.xrdmp, Identifier={D8DD4831-8489-4812-A87A-3F387C1D5F5D} Batch program=C:\PANalytical\Data Collector\Programs\Guilherme_box3_sample_changer.xrdmp, Identifier={EE918055-CCAD-4B39-A03D-C972EF289EF5} 16-Mar-16 9:28:22 AM
Measurement Date / Time:	
Operator:	Usuário
Raw Data Origin:	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis:	Gonio
Start Position [$^{\circ}2\theta$.]:	4.0084
End Position [$^{\circ}2\theta$.]:	69.9684
Step Size [$^{\circ}2\theta$.]:	0.0170
Scan Step Time [s]:	10.1600
Scan Type:	Continuous
PSD Mode:	Scanning
PSD Length [$^{\circ}2\theta$.]:	2.12
Offset [$^{\circ}2\theta$.]:	0.0000
Divergence Slit Type:	Fixed
Divergence Slit Size [$^{\circ}$.]:	1.0000
Specimen Length [mm]:	10.00
Measurement Temperature [$^{\circ}\text{C}$.]:	25.00
Anode Material:	Cu
K-Alpha1 [Å]:	1.54060
K-Alpha2 [Å]:	1.54443
K-Beta [Å]:	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio:	0.50000
Generator Settings:	40 mA, 45 kV
Diffractometer Type:	0000000011076186
Diffractometer Number:	0
Goniometer Radius [mm]:	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]:	91.00
Incident Beam Monochromator:	No
Spinning:	No

Fonte: Acervo pessoal.

4.3.2 Determinação do Índice de Atividade Pozolânica do resíduo de ardósia

4.3.2.1 NBR 5751 (ABNT, 2012) Materiais Pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com a cal

Na determinação da atividade pozolânica com cal seguiu-se o método preconizado na norma brasileira NBR 5751 (ABNT, 2012), preparando-se uma argamassa de cal no traço 1:9 (hidróxido de cálcio : areia normal) em massa. A norma brasileira NBR 7214 (ABNT, 2012) - Areia normal para ensaio de cimento-

exige ainda que a areia deve ser ainda dividida em quatro frações de partes iguais em peso das frações 16, 30, 50 e 100 como indicado na Tabela 3:

Tabela 3- Frações granulométricas de areia

Denominação da fração de areia	Material retido entre as peneiras de abertura nominal de:
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3 mm e 0,15 mm

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7214, 2012, p. 2.

É importante lembrar que a NBR 5751 (ABNT, 2012) propõe as quantidades, em massa, de hidróxido de cálcio, areia normal e material pozolânico para a moldagem de três corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.

Adicionou-se, uma quantidade de material pozolânico igual ao dobro do volume absoluto de hidróxido de cálcio, ou seja, a quantidade de material pozolânico utilizado para a moldagem de três corpos de prova era calculado pela relação expressa a seguir, na Equação 2:

$$m_{poz} = 2 \cdot \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \cdot 104, \text{ em gramas (g);} \quad (2)$$

Onde: m_{poz} = massa (em gramas) de material pozolânico;

δ_{poz} = massa específica do material pozolânico;

δ_{cal} = massa específica da cal hidratada;

Equação 2- Determinação da massa de material pozolânico

Desta maneira, possuindo a massa específica do resíduo de ardósia de 2,634 g/cm³ e a massa específica da cal coletada na literatura de 2,215 g/cm³, tem-se:

$$m_{poz} = 2 \cdot \frac{2,634}{2,215} \cdot 104 = 247,35 \text{ (g);}$$

De areia normal foram adicionados e homogeneizados manualmente 234g de cada uma das quatro frações para cada três corpos de prova, resultando em 936 g de areia. A dosagem dos materiais e a relação água/aglomerante para realização do ensaio encontram-se na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4- Dosagem dos materiais – Ensaio NBR 5751 (ABNT, 2012).

Materiais Ensaio NBR 5751 (2012)			
Areia (g)	Cal (g)	Mat. Poz. (resíduo de ardósia) (g)	Relação Água/Aglomerante
234 de cada fração	104	247,35	0,78

Fonte: Elaborado pelo autor.

O material pozolânico, no caso o resíduo de ardósia, e o hidróxido de cálcio foram misturados e homogeneizados por 2 minutos em recipiente fechado como ilustrado na figura 17.

Figura 17- Mistura homogênea de cal e resíduo de ardósia em recipiente fechado.



Fonte: Acervo pessoal.

Esta mistura foi adicionada à água de amassamento que já estava no misturador mecânico, com posterior adição de areia e tempo de amassamento seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215 (ABNT, 1996). A quantidade de água adicionada foi a quantidade necessária para atingir o índice de consistência de (225 ± 5) mm (Figura 18).

Figura 18- Índice de consistência



Fonte: Acervo pessoal.

Após o amassamento foram moldados os corpos de prova de 100 mm de altura por 50 mm de diâmetro e os mesmos mantidos vedados para garantir a umidade durante os sete dias de cura (figura 19). Durante as primeiras (24 ± 2) h os corpos de prova foram mantidos a temperatura ambiente de (23 ± 2) °C e durante as outras (144 ± 2) h foram mantidos à temperatura de (55 ± 2) °C até $(4 \pm 0,5)$ h antes do ensaio de ruptura à compressão, quando os corpos de prova atingiram a temperatura de (23 ± 2) °C (ABNT NBR 5751, 2012).

Figura 19- Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal.

Cerca de 4h antes do ensaio de ruptura à compressão os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e em torno de 1 hora antes do ensaio foram desmoldados e capeados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2012).

4.3.2.1 Ensaio de Luxan

O ensaio de Luxan avalia o Índice de Atividade Pozolânica através da variação da condutividade elétrica de uma solução saturada de hidróxido de cálcio, de 200ml a 40°C, antes e após 120s da adição de 5g de pozolana. Nesse ensaio foram necessários os seguintes equipamentos e materiais:

- Balança;
- 5g de resíduo de ardósia seco e destoroadado por 2 minutos no moinho horizontal de bolas;
- 200ml de água destilada;
- 0,3g de hidróxido de cálcio;
- Condutímetro de bancada multi-parâmetro da marca HANNA- Modelo HI 2315;
- Becker de 200ml;
- Agitador magnético com controle de temperatura;

Primeiramente, aqueceu-se até a temperatura de 40°C os 200ml de água destilada em um Becker, sob agitação constante. Com a estabilização da temperatura adicionou-se 0,3g de hidróxido de cálcio, mantendo a solução sob agitação e garantindo toda a dissolução do Ca(OH)_2 . Em seguida introduziu-se na solução o condutímetro e mediu-se a condutividade elétrica inicial em mS/cm (Figura 20).

Figura 20-Medida inicial da condutividade elétrica



Fonte:Acervo pessoal.

Após esse procedimento, foi adicionada à solução 5g do resíduo de ardósia, mantida em constante mistura durante o tempo de 120s, quando por fim foi medida a condutividade final da solução (Figura 21).

Figura 21- Medida final da condutividade elétrica



Fonte: Acervo pessoal.

O Índice de Atividade Pozolânica é determinado pela relação entre a condutividade elétrica da solução antes da adição do resíduo de ardósia e a condutividade elétrica medida após 120s da adição da pozolana (Equação 3).

$$CE = \frac{CE \text{ antes da adição do resíduo de ardósia}}{CE \text{ transcorridos 120s da adição do resíduo de ardósia}} \text{ (mS/cm);} \quad (3)$$

Onde: CE = Condutividade elétrica em mS/cm.

Equação 3- Condutividade elétrica.

4.3.3 Análise Térmica da pasta de cimento referência e de substituição

Foram feitas as análises térmicas TGA (termogravimétrica) e DTA (análise térmica diferencial) em pastas de cimento com 100% de cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), como amostra de referência, e em pasta de cimento com substituição de 35% do aglomerante pelo resíduo de ardósia.

O procedimento consistiu em duas dosagens da pasta (Tabela 5), uma pasta de referência contendo 100% de cimento como aglomerante e uma pasta com substituição de 35% de cimento Portland por resíduo de ardósia.

Para a realização desse ensaio foi utilizado o cimento CP V ARI, água, uma balança, moldes de garrafa PET.

Tabela 5-Dosagem da pasta de cimento e da pasta com 35% de substituição.

Dosagem		
Relação água/cimento (a/c): 0,50		
Amostra	Cimento (g)	Ardósia (g)
Amostra de Referência	750	-
Amostra 1 (ardósia destorroada durante dois minutos)	487,5	262,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim, moldaram-se os corpos de prova em garrafas PET (Figura 22), visando sua homogeneidade através da mistura de seus constituintes, utilizando, em todos os corpos-de-prova a relação água/cimento igual a 0,5. A cura foi feita em uma câmara úmida por 28 dias, à temperatura de $31 \pm 2^\circ\text{C}$ tomando-se medidas de

precaução para evitar a evaporação da água utilizada na mistura que devia reagir com o cimento e a ardósia, hidratando-os.

Figura 22- Amostra de referência e amostras de substituição de 35% de cimento por resíduo de ardósia.



Fonte: Acervo pessoal.

Após o período de cura de 28 dias os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida da marca Equilam, desmoldados (Figura 23) e quebrados ao meio, sendo retirada quantidade suficiente para análise térmica. A análise foi realizada no equipamento Shimadzu (Figura 24), modelo DTG-60H no Laboratório de Materiais de Construção Civil (Imc²).

Figura 23- Corpos de prova devidamente desmoldados após 28 dias de cura.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 24- Equipamento de Análise Termogravimétrica



Fonte: Acervo pessoal.

Foram retirados da amostra da pasta de cimento de referência e da pasta com 35% de substituição e moídos 10 gramas de amostragem para a análise com auxílio de um almofariz e pistilo (Figura 25) para obter o tamanho desejado das partículas. A razão de aquecimento utilizada para a análise térmica foi de 10°C/min até a temperatura de 1000°C.

Figura 25-Almofariz e postilo para moer a pasta de cimento.



Fonte: Acervo pessoal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do resíduo de ardósia

5.1.1 Granulometria a laser

A granulometria a laser foi realizada no equipamento Bettersize 2000 e partir da análise dos resultados obtidos foram analisadas e comparadas as granulometrias das porcentagens acumuladas a 10%, 50% e 90%, possuindo assim os seguintes diâmetros: D10% (dez por cento das partículas apresentam tamanho inferior a este diâmetro), D50% (cinquenta por cento das partículas apresentam tamanho inferior a este diâmetro) e D90% (noventa por cento das partículas apresentam tamanho inferior a este diâmetro).

Os resultado da análise granulométrica são apresentados na Tabela 6 e no gráfico a seguir.

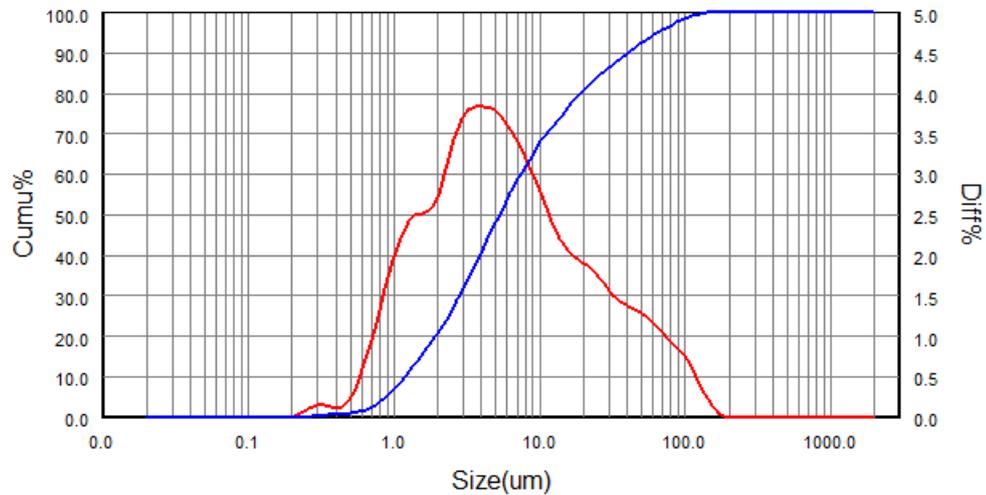
Tabela 6- Diâmetro das partículas (μm)

Diâmetro das partículas (μm)			
Amostra destorroada no moinho horizontal de bolas por 2 minutos			
Amostra: Resíduo de ardósia			
Diâmetro porcentagem acumulada	D10%	D50%	D90%
Diâmetro das partículas (μm)	1,198	5,331	40,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O conhecimento do tamanho dos grãos do resíduo de ardósia é de fundamental importância uma vez que influencia diretamente na rapidez de hidratação, reação, incremento de resistência com a idade, entre outras. Dessa forma, resíduos mais finos apresentam maior superfície específica, resultando em maior capacidade de reação.

Gráfico 1-Curva de distribuição granulométrica da amostra destorroada por 2 minutos

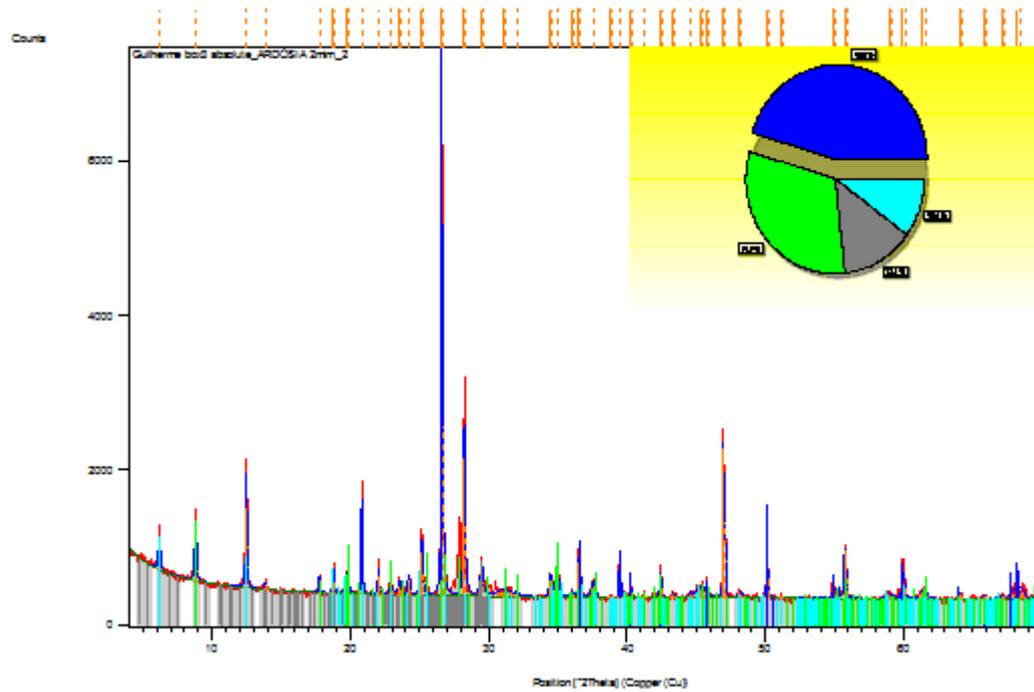


5.1.2 Difração de raio-X do resíduo de ardósia

De acordo com Albers et. al (2002) dentre as vantagens da técnica de difração de raios-X para a análise mineralógica, destacam-se a simplicidade e rapidez do método, a confiabilidade dos resultados, uma vez que o perfil da difração é característico para cada composto e a possibilidade de análise e quantificação das fases dos materiais componentes.

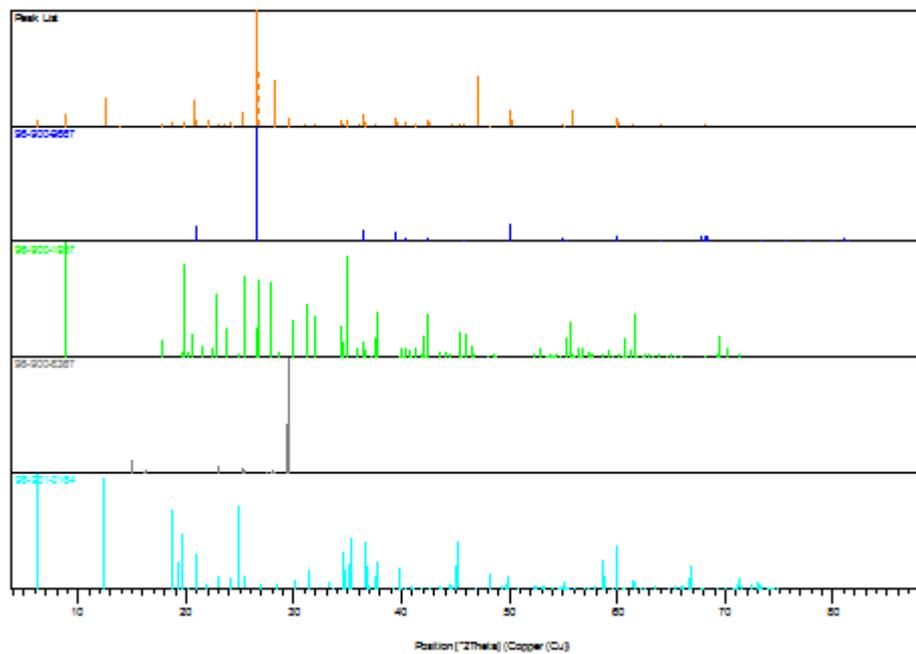
Os espectros de raios-X, por sua vez, detectaram na amostra de resíduo de ardósia a presença de quartzo, muscovita, alita e clorita (Figura 26 e 27). Em virtude da maior quantidade de quartzo (SiO_2) na amostra pode-se concluir que o resíduo pode apresentar atividade pozolânica quando moído e adicionado ao cimento Portland.

Figura 26- Difratoograma de raios-X



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 27- Padrão difratométrico de cada composto do resíduo de ardósia



Fonte: Acervo pessoal.

5.1.3 Fluorescência de raios-X

A fluorescência de raios-X sendo uma técnica analítica não destrutiva, rápida e de baixo custo se tornou um dos métodos mais disseminados para análise química de diversas amostras (SANTOS et. al, 2013). Os resultados da análise química do resíduo de ardósia encontram-se discriminados na Figura 28.

Segundo John et. al (2003) para que uma adição mineral apresente reatividade, o material deve apresentar silício como elemento predominante. Na amostra foi detectado 59,558% de SiO₂ (Sílica), reforçando o resultado obtido pela difração de raios-X, indicando que o resíduo pode apresentar atividade pozolânica.

Além disso, foram encontrados 16,98% de Al₂O₃, 8,494% de Fe₂O₃, baixa proporção de MgO, CaO, Na₂O e K₂O. No entanto, os álcalis presentes no resíduo que são elementos MgO, CaO, Na₂O e K₂O podem provocar decomposição do concreto, influenciando a velocidade da resistência do material, prejudicando portanto o desempenho dos produtos à base de cimento.

Figura 28- Resultado da espectrometria de raios-X

Compound	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO3	Cl	K2O	CaO	TiO2	V2O5	Cr2O3
Conc	2.045	3.300	16.980	59.558	0.508	0.366	827.9	3.898	3.548	0.862	263.0	170.7
Unit	%	%	%	%	%	%	ppm	%	%	%	ppm	ppm

Compound	MnO	Fe2O3	NiO	CuO	ZnO	Ga2O3	As2O3	Rb2O	SrO	Y2O3	ZrO2	Nb2O5
Conc	0.126	8.494	74.5	83.6	177.3	28.7	0.0	185.0	436.5	38.4	247.5	20.6
Unit	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

Compound	Eu2O3	Yb2O3	IrO2	PbO	CO2	Re
Conc	529.5	23.2	0.0	36.0	0.0	0.0
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

Fonte: Acervo pessoal.

Somando-se os percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ encontrados na amostra de resíduo de ardósia tem-se 85,032% desses componentes, atendendo aos quesitos mínimos que a norma NBR 12653 (ABNT, 1992) determina para que o material seja considerado pozolânico.

A norma exige ainda que a quantidade máxima de álcalis disponíveis em Na₂O seja de 1,5% no material pozolânico. O cálculo da equivalência de Na₂O leva em consideração o teor de potássio, por meio da equação Na₂O + 0,648K₂O (DE CARVALHO, 2009) e desse modo a quantidade de álcalis presentes no resíduo de ardósia resulta em 4,57%, ultrapassando o limite estabelecido pela norma.

5.2. Índice de Atividade Pozolânica do resíduo de ardósia

5.2.2 Índice de Atividade Pozolânica com cal NBR 5751 (ABNT,2012)

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) para que um material seja classificado como pozolânico ele deve apresentar resistência à compressão mínima com a cal de 6,0MPa, após 7 dias de cura. Os resultados da resistência à compressão da cal com adição do resíduo de ardósia encontram-se relacionados abaixo na Tabela 7. O ensaio foi realizado na prensa mecânica da marca Emic DL20000.

Tabela 7 – Índice de Atividade Pozolânica com cal do resíduo de ardósia

Ensaio de resistência à compressão		
CP	Força máxima (kN)	Resistência Compressão (MPa)
CP1	0,9	0,5
CP2	1	0,5
CP3	1,1	0,5
	Média	0,5035
	Mediana	0,5071
	Desv. Padrão	0,04831

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de resistência à compressão atingiram em média 0,5MPa, valores muito inferiores ao exigido pela norma NBR 12653 (ABNT, 1992) de 6,0MPa, concluindo portanto que não é possível considerar o resíduo de ardósia como um material pozolânico.

5.2.2 Ensaio de Luxan

Após todo o procedimento descrito no capítulo 4, calculou-se a variação da condutividade elétrica da solução e o resultado obtido encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8- Condutividade Elétrica

Condutividade Elétrica				
Amostra	Leitura Inicial (mS/cm)	Leitura Final (mS/cm)	Condutividade elétrica (mS/cm)	Classificação quanto a pozolanicidade
Resíduo de ardósia destorroado por 2 minutos	1,75	1,62	1,08	Moderada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo a classificação estabelecida por Luxan et al. (1989) tem-se, a partir dos resultados obtidos que o resíduo de ardósia apresenta atividade pozolânica moderada. A condutividade elétrica decresceu em virtude da reação da sílica amorfa presente no resíduo de ardósia com os íons Ca^{2+} formando silicato de cálcio hidratado (composto insolúvel). Assim, quanto maior a diferença de condutividade da solução antes da adição do resíduo de ardósia e transcorridos 120s da adição do material pozolânico, maior é a reatividade do material.

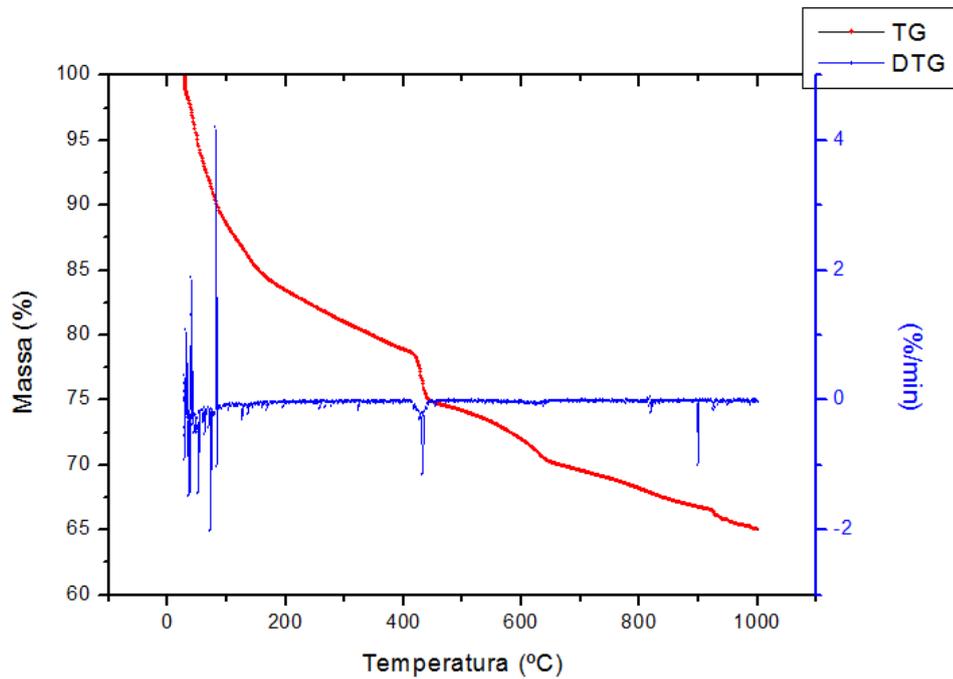
5.3 Análise Térmica da pasta de cimento referência e de substituição

A análise térmica foi realizada na pasta com 100% de cimento e na pasta com 35% de substituição por resíduo de ardósia com o objetivo de identificar picos característicos onde os produtos hidratados presentes na matriz perdem água quimicamente.

Por meio da análise térmica e da derivada termogravimétrica verifica-se a atividade pozolânica através da diminuição dos picos de hidróxido de cálcio ao longo do envelhecimento, representando seu consumo.

A decomposição de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) ocorre entre 425°C e 550°C, caracterizada por total perda de água em sua estrutura química, e, conseqüentemente, perda de massa, como podemos observar nas curvas TG/DTG da pasta de cimento e da pasta com substituição (Figura 29 e 30).

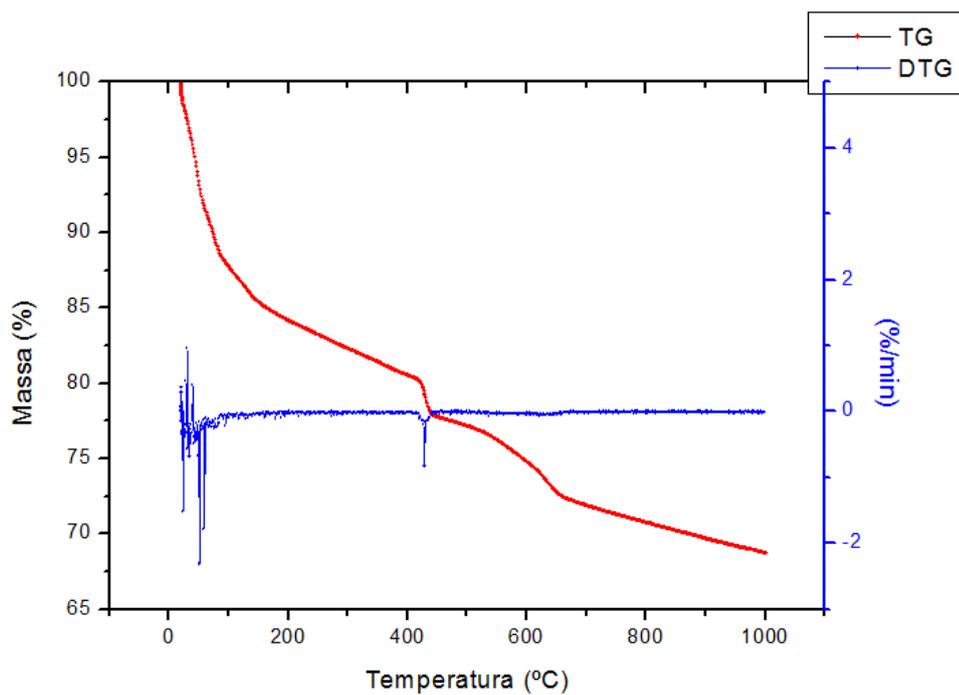
Figura 29- TG/DTG da pasta com 100% de cimento Portland



Fonte: Acervo pessoal

Em torno de 900°C observa-se um pico endotérmico na Figura 29, que representa a decomposição do carbonato de cálcio em óxido de cálcio (CaO) e dióxido carbônico (CO₂).

Figura 30- TG/DTG da pasta com 35% de substituição com resíduo de ardósia



Fonte: Acervo pessoal

6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal objetivo estudar a reatividade e a atividade pozolânica que o resíduo de ardósia pode proporcionar quando adicionado a matrizes cimentícias.

Apresentam-se aqui as conclusões acerca dos resultados obtidos e possíveis sugestões para futuras pesquisas e trabalhos.

Quanto à caracterização física o resíduo apresentou granulometria compatível, apresentando 90% do diâmetro abaixo de 40,5 μm . A análise mineralógica pela técnica de difração de raios-X indicou que o resíduo é composto em sua maioria de sílica (SiO_2) em forma de quartzo, com possível geração de atividade pozolânica.

A análise química apontou que somando-se os percentuais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 tem-se 85,032% desses componentes, atendendo aos quesitos mínimos que a norma NBR 12653 (ABNT, 1992) determina para que o material seja considerado pozolânico. Em controvérsia, pelo cálculo de equivalência de Na_2O , a quantidade de álcalis presentes no resíduo ultrapassa o limite estabelecido pela norma.

A determinação do Índice de Atividade Pozolânica apresentou divergência pelo método de Luxan e da NBR 5751 (ABNT, 2012). O primeiro indicou que o resíduo possui moderada pozolanicidade enquanto o segundo indicou que o resíduo apresenta nenhuma atividade pozolânica.

Embora o resultado não tenha sido satisfatório, sugere-se que sejam feitos estudos semelhantes aos realizados, baseando-se na resistência a compressão do concreto com adição de pozolana, como descrito na norma NBR 5752 (ABNT, 2012). Além disso, o estudo contribuiu na busca um método de reaproveitamento do resíduo de ardósia, como alternativa sustentável, visando a redução dos impactos ambientais que a mesma gera.

REFERÊNCIAS

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Estimativa da Serragem de Chapas de Rochas Ornamentais no Brasil**. Informe 05/2012.

ALMEIDA, J. **Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto**. 2008. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Aplicações do Cimento Portland. Disponível em < <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/aplicacoes>> . Acesso em 15 de fevereiro 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Disponível em:<<http://www.abcp.org.br/colaborativoportal/perguntasfrequentees.php?id=2>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos: determinação da atividade pozolânica: índice de atividade pozolânica com a cal: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas- Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento: especificação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

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

BLOG DO PET CIVIL. Disponível em:<<http://blogdopetcivil.com/tag/propriedades-pozolanicas/>>.Acesso em 18 de fevereiro de 2016.

BUTLER, A. M. **Concreto com agregados grãos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2003.

BUTLER, A.K.; LEEK, D.S.; JOHNSON, R.A. **Potential for using some alternative aggregates in structural concrete**. Structural Engineer, v. 78, n. 22, p. 22-25, Nov 21 2000.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação de amorfisto da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica.** 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2009.

COUTINHO, J. S. **Materiais de construção 2.** Universidade do Porto, 2008.

CUNHA, P. J. **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal.** 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2007.

DE CARVALHO, E. F. T. **Apostila de Materiais de Construção 1.** Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

DA COSTA, L. B. F; NEUMANN, R. **Quantificação de fases minerais e de amorfos por difração de raios X, método de refinamento de espectro multifásico total (método de Rietveld).** XV Jornada de Iniciação Científica, CETEM, Rio de Janeiro- RJ, 2007.

DOS SANTOS, C. G. et al. **Adição de rejeitos de extração de ardósia em concreto.** Pós em revista do Centro Universitário Newton Paiva 2013/2, Belo Horizonte- MG , n 8, p. 100-103, 2013.

FEINAR – Feira Nacional de Ardósia. 2006. Disponível em: <<http://www.jcnoticias.com.br/index.php?Conteudo=noticias&subMod=dodia&Codigo=2929>>. Acessado em 17/02/2016.

FURQUIM, V. R. P. **Estudo estatístico de produção de concretos com adições minerais.** 2006. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2006.

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

GOBBO, A. L. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-x e qualificação por refinamento de Rietveld.** 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Geociências, USP, São Paulo-SP, 2003.

HATAKEYAMA, T.; QUINN, F. X. **Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science.** 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1999.

JOHN, V. M. et al. Cinzas e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. (Coords.) **Tecnologias e materiais alternativos de construção.** 2003. p. 145-190 Campinas: Editora da UNICAMP, 2003.

KAHN, H. **Difração de raios-X.** 2009.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: origem, características e qualidade.** 1983. 249 f. Tese (Doutorado)- Universidade de São Paulo, São Paulo- SP, 1983.

LANA, S. C. **Avaliação pozolânica do resíduo do corte de ardósia.** 2014. 45 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil)- UFOP, Ouro Preto-MG, 2014.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e de demolição.** 2001. 290 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2001.

LUXAN, M.P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement.** Cement na Concrete research. Vol. 19, 1989.

MACHADO, M. E. S. **Análise térmica diferencial e termogravimétrica.** 2008. 21p. Disponível em:<<http://docslide.com.br/documents/analises-termicas-concluido.html>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2016.

MARINHO, A. L. B. **Produção de ligantes para argamassa obtida a partir da reciclagem de resíduo sólido de siderurgia- Escória de Forno Panela.** 2013. 74 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil)- UFOP, Ouro Preto - MG, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** IBRACON, 674 f. São Paulo, 2008.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A; FERREIRA, H.S.; HEBER C. FERREIRA, H. C. **Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, n.6, p.795–801. Campina Grande, 2009.

MPMSLATE. Disponível em: <<http://www.mpmslate.com/site/ardosia/ardosia-no-brasil-mg/>>. Acesso em 18 de fevereiro de 2016.

MÜLLER, A.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R. **Propriedades físicas e mecânicas de argamassas de assentamento com adições minerais e orgânicas.**In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. UEFES/PPGEC, 1999.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento.** Boletim técnico da Escola Politécnica da USP/DECC, São Paulo, 2004.

NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos.** 2006. 149 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte- MG, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Editora PINI. São Paulo, 1997.
NITA, C; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. 2007. 15 f. Boletim técnico – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2007.

OLIVEIRA, E. A.. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. 2011. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.

OLIVEIRA, M.P.; NÓBREGA, A.F.; CAMPO, M.S.; BARBOSA, N.P. **Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland**. Conferencia Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitação e Infra-estrutura de Interesse Social,. Pirassununga, SP, Anais..., Pirassununga: NOCMAT, 2004. p. 15 – 30,

SANTOS, M. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamasas para a construção civil**. 2008. 165 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2008.

SOUZA, L. P. de F. et.al. **Caracterização de pó de ardósia proveniente de rejeitos quanto a cristalinidade e comportamento térmico**. 2000.In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS,14., São Paulo-SP, 2000.

SOUZA, P. S. L.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudo da viabilidade do uso de argilas calcinadas, como metacaulim de alta reatividade (MCAR)**.Revista Engenharia Civil, n. 15, p. 45-54, 2002.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoeétrica como componente aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. 196f. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2007.

WEBER, S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. 116 f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis- SC, 2001.