

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO,  
INOVAÇÃO E EXTENSÃO – PROPIEX  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS – PPGCEM**

**DOUGLAS LUIZ GIORDANI**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FORMULAÇÃO DE  
ARGAMASSA REFROTÁRIA COM UTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA APLICAÇÃO NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Michael Peterson

**CRICIÚMA  
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

G497d Giordani, Douglas Luiz.

Desenvolvimento de uma formulação de argamassa refratária com utilização de resíduos industriais para aplicação na construção civil / Douglas Luiz Giordani - 2018.

57 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2018.

Orientação: Michael Peterson.

1. Cimento. 2. Materiais refratários. 3. Valorização do resíduo. 4. Dilatometria. 5. Pozolanas. - I. Título.

CDD 23. ed. 620.135


**DOUGLAS LUIZ GIORDANI**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FORMULAÇÃO DE  
ARGAMASSA REFRAATÁRIA  
COM UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA  
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**


Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais no Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma, 30 de Julho de 2018


**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **ADRIANO MICHAEL BERNARDIN**  
Data: 08/12/2025 09:06:28-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin  
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC

Documento assinado digitalmente  
 **ALEXANDRE GONCALVES DAL BÓ**  
Data: 08/12/2025 10:07:16-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Gonçalves Dal-Bó  
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Documento assinado digitalmente  
 **JEANE DE ALMEIDA DO ROSÁRIO**  
Data: 08/12/2025 09:43:40-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof<sup>ta</sup> Dr<sup>a</sup> Jeane de Almeida do Rosário  
Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por guiar, orientar e abençoar minha caminhada.

A minha família, por todo amor, carinho e incentivo incondicional durante a minha trajetória de vida e na busca desta conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Michael Peterson pela confiança, oportunidade, apoio e dedicação durante o decorrer de todo o trabalho.

Aos professores e colaboradores do PPGCEM pelo conhecimento e experiência repassada durante as disciplinas.

Aos colegas de mestrado pelo convívio e parceria durante esta etapa enriquecedora.



## RESUMO

A construção civil vem se destacando no Brasil nos últimos anos e as construtoras tiveram que se adequar às necessidades de seus clientes. No sul do Brasil, devido ao tipo de colonização e também devido à cultura das pessoas, há a necessidade das construtoras projetarem prédios residenciais com churrasqueiras, que podem ser a gás ou a carvão. Estas unidades possuem um sistema construtivo adequado para resistir a altas temperaturas e tanto os tijolos quanto a argamassa necessitam ter este tipo de resistência. O trabalho em questão teve como objetivo testar a substituição do cimento por materiais com características pozolânicas, como a cinza de termoeletrica e a cinza de indústria cerâmica na fabricação de argamassa refratária, visando assim a valorização destes resíduos. Os resíduos foram caracterizados através de ensaios de pozolanicidade conforme a NBR 12653 (ABNT, 2014). As novas argamassas foram formuladas com a substituição de 5 e 10 % do cimento por cada cinza e avaliadas através de dilatométrica óptica e ensaio resistência ao arrancamento. Estes ensaios indicaram que, apesar de não poderem ser classificadas como pozolanas, as cinzas podem ser utilizadas nas argamassas refratárias pois em todas as formulações atingiram temperatura de amolecimento próximas a 800 °C, superiores à temperatura de queima do carvão em churrasqueiras, e resistência ao arrancamento apropriadas ao uso, apesar de menores que os valores de referência.

**Palavras-chave:** Argamassa Refratária. Cimento. Valorização de Resíduos. Dilatometria.



## ABSTRACT

The construction industry has been highlighting in Brazil in recent years and the construction companies had to adapt to the needs of their clients. In southern Brazil, because of the type of settlement and also because of the culture of the people, there is a need for the construction companies to design residential buildings with grills, which may be gas or coal. These units have a constructive system suitable to withstand high temperatures and both bricks and mortar need to have this type of resistance. The purpose of this study was to test the replacement of cement by materials with pozzolanic characteristics, such as thermoelectric ash and ceramics industry ash in the manufacture of refractory mortar, aiming the valorization of these residues. The residues were characterized by pozzolanicity assays according to NBR 12653 (ABNT, 2014). The new mortars were formulated with the substitution of 5 and 10% of the cement for each gray and evaluated by optical dilatometry and tear resistance test. These tests indicated that, although they can not be classified as pozzolans, the ashes can be used in refractory mortars because in all formulations they reached a softening temperature close to 800 °C, higher than the temperature of charcoal burning in grills, and good resistance to pulling even though smaller than the reference values.

**Keywords:** Refractory Mortar. Cement. Waste Valorization. Dilatometry.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de produção de energia em usina termoeletrica.....	25
Figura 2 - Fluxograma genérico do processo de fabricação de revestimentos.....	27
Figura 3 - Dilatômetro NETZSCH Modelo DIL 402 .....	34
Figura 4 - Paredes refratárias para ensaios .....	35
Figura 5 - Parede refratária durante ensaio de arrancamento .....	36
Figura 6 - Corpos de prova após ensaio de arrancamento.....	36
Figura 7 - Difratoograma de raios X da Cinza P. ....	38
Figura 8 - Difratoograma de raios X da Cinza T .....	38
Figura 9 - Análise térmica da Cinza P.....	39
Figura 10 - Análise térmica da Cinza T .....	40
Figura 11 - Granulometria da Cinza P.....	41
Figura 12 - Granulometria da Cinza T .....	42
Figura 13 - Dilatometria das formulações a verde .....	45
Figura 14 - Dilatometria das formulações sinterizadas .....	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos químicos de materiais pozolânicos. ....	24
Tabela 2 - Requisitos físicos de materiais pozolânicos. ....	24
Tabela 3 - Tabela de formulações para a argamassa refratária (percentuais em massa).....	34
Tabela 4 - Composição química da argila refratária e dos resíduos estudados.....	37
Tabela 5 - Granulometria das Cinzas e do cimento CP-IV .....	43
Tabela 6 - Resistência à compressão da análise de atividade pozolânica .....	43
Tabela 7 - Área superficial específica das cinzas .....	44
Tabela 8 - Coeficiente de dilatação térmica e temperatura de amolecimento das formulações .....	46
Tabela 9 - Resistência ao arrancamento das formulações .....	49



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>21</b>
3.1 CIMENTO.....	21
3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS .....	21
<b>3.2.1 Classificação das Pozolanas</b> .....	<b>23</b>
3.4 CINZAS DE INDÚSTRIA CERÂMICA.....	26
3.4 MATERIAIS REFRAATÁRIOS.....	28
<b>3.4.1 Classificação dos refratários</b> .....	<b>29</b>
<b>3.4.2 Argamassa Refratária</b> .....	<b>30</b>
<b>4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>31</b>
4.1 MATERIAIS .....	31
4.2 MÉTODOS .....	31
<b>4.2.1 Caracterização das matérias-primas</b> .....	<b>31</b>
4.2.1.1 Análise Química (FRX).....	31
4.2.1.2 Análise mineralógica (DRX).....	32
4.2.1.3 Análise térmica (ATD/TG) .....	32
4.2.1.4 Análise granulométrica .....	33
4.2.1.5 Atividade pozolânica à cal aos 7 dias.....	33
4.2.1.6 Análise superficial específica (BET).....	33
<b>4.2.2 Formulações</b> .....	<b>33</b>
4.2.2.1 Fórmula Padrão .....	33
4.2.2.2 Formulações com as cinzas .....	34
<b>4.2.3 Caracterização das Formulações</b> .....	<b>34</b>
4.2.3.1 Análise dilatométrica.....	34
4.2.3.2 Ensaio de Resistência ao Arrancamento ou Ensaio de aderência à tração.....	35
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS .....	37
<b>5.1.1 Análise química (FRX)</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1.2 Análise mineralógica (DRX)</b> .....	<b>38</b>
<b>5.1.3 Análise térmica (ATD/TG)</b> .....	<b>39</b>
<b>5.1.4 Análise granulométrica</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1.5 Atividade pozolânica à cal aos 7 dias</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1.6 Análise de superfície específica (BET)</b> .....	<b>44</b>
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES .....	44
<b>5.2.1 Análise dilatométrica</b> .....	<b>44</b>

<b>5.2.2 Ensaio de arrancamento .....</b>	<b>49</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O cimento é a principal matéria-prima utilizada na construção civil. De acordo com o SNIC (2020), no ano de 2019 foram produzidas mais de 56 milhões de toneladas de cimento liberando aproximadamente 33,6 milhões de toneladas de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na atmosfera.

Devido a este agravante e em vista da necessidade da valorização dos variados tipos de resíduos gerados pelas indústrias, é necessário que se busquem alternativas para a substituição do cimento por estes resíduos para que se minimizem os impactos ao meio ambiente.

Segundo Margon (2012) a construção civil e principalmente os materiais por ela empregados, como por exemplo as argamassas, abrem um grande espaço para a reciclagem de resíduos industriais. O estudo do emprego de materiais alternativos em produtos da construção civil pode colaborar com novos conceitos de qualidade, propriedades e características dos materiais, gerar novas fontes de matéria-prima e principalmente solucionar problemas ambientais como a destinação final destes resíduos industriais.

Usinas termoelétricas produzem, anualmente, cerca de 3 milhões de toneladas de cinzas por ano no Brasil no processo de geração de energia. O principal resíduo deste setor são as cinzas provenientes da queima do carvão mineral. 80 % destas cinzas são conhecidas como cinzas mosca (ou cinzas volantes) e possuem diâmetro médio de partícula em torno de 50 µm. Os outros 20 % são de cinza pesada. A deposição destes resíduos em bacias de sedimentação causa grandes problemas ambientais e precisa ser discutida e avaliada. Destacam-se nesse sentido, principalmente a utilização de cinzas na construção civil através dos processos de fabricação de cimento, produção de clínquer, utilizado para a fabricação do cimento Portland, e de pavimentação (Kerstner *et al.*, 2011).

Já a indústria cerâmica gera aproximadamente 1.132 toneladas de resíduos por ano. Deste total, 85% dos resíduos gerados retornam ao processo de beneficiamento da argila, 1% é destinado à reciclagem e 14% são encaminhados para unidades receptoras de resíduos para que possam ser coprocessados (Dalfré, 2012). Dentro os resíduos gerados pela indústria cerâmica estão as cinzas de atomizador que totalizam cerca de 11.000 toneladas por ano (Pureza, 2004).

De volta ao âmbito da construção civil constata-se que com a escassez de mão-de-obra especializada (qualificada) no mercado da construção civil, cada vez mais ocorre a baixa qualidade dos resultados. Tal fato onera a produtividade no canteiro de obra (Picchi, 1993).

Devido a este fator, necessita-se cada vez mais introduzir produtos que aprimorem a produtividade e, tendo em vista a grande quantidade de cinzas de termoelétricas e cinzas de atomizador da indústria cerâmica geradas no sul do Estado de Santa Catarina, busca-se nesta pesquisa uma alternativa de aproveitamento desses resíduos na construção civil, com a incorporação das cinzas pesadas em argamassas refratárias, criando-se assim um material que esteja pronto para o uso, otimizando o tempo em relação a massas que precisem de preparo através da mistura de vários produtos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver uma argamassa refratária utilizando diferentes resíduos industriais em substituição ao cimento Portland.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar a pozolanicidade dos resíduos utilizados;
- Avaliar diferentes formulações entre resíduos e cimento na pasta de argamassa;
- Comparar as propriedades mecânicas e dilatométricas das formulações desenvolvidas com a argamassa padrão.



## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 CIMENTO

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o cimento é um material seco e finamente pulverizado que não possui isoladamente propriedades aglomerantes. No entanto, o cimento pode tornar-se um aglomerante ao entrar em contato com a água. Em sua composição o cimento Portland possui principalmente o clínquer Portland, material esférico resultante da queima de argila e calcária a 1450 °C (Battagin, 2011).

Para Neville (2016), quatro compostos são considerados como os principais constituintes do cimento: aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ), silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e silicato dicálcico ( $C_2S$ ).

O Brasil possui atualmente 8 tipos diferentes de cimento Portland sendo comercializados. Cada tipo de cimento possui propriedades particulares para os mais diversos tipos de aplicações (Battagin, 2011).

O cimento utilizado para a produção de argamassa refratária é o cimento Portland do tipo pozolânico (CP IV). Segundo Gomes, Santos e Nogueira (2017), este tipo de cimento é indicado para argamassas de assentamento e revestimento, em concreto magro, concreto armado, concreto para pavimentos e solo-cimento. Possui alto teor de pozolana (entre 15 e 50 %), o que faz com que a microestrutura seja modificada, diminuindo a permeabilidade e a difusibilidade iônica e aumentando a estabilidade e durabilidade da argamassa.

### 3.2 MATERIAIS POZOLÂNICOS

As pozolanas são materiais siliciosos ou silicoaluminosos, naturais ou artificiais, que contêm um elevado teor de sílica em forma reativa, isto é, numa forma não-cristalina (vítrea) e finamente pulverizada capaz de reagir, na presença de água e à temperatura normal, com hidróxido de cálcio (Coimbra *et al.*, 2002).

Farias Filho *et al.* (2000) afirmam que a reação cal-pozolana pode ocorrer na mistura cimento Portland e a pozolana, pois a cal é produzida como consequência da hidratação do silicato tri-cálcico ( $C_3S$ ) e bi-cálcico ( $C_2S$ ). A cinética da reação dependerá, além das características mineralógicas da pozolana, de sua finura e da temperatura e concentração dos reagentes. Os materiais pozolânicos possuem aptidão de reagirem com a cal em condições normais de temperatura e pressão (formando assim compostos de propriedades aglomerantes), devido ao fato de o

silício e o alumínio presentes na sua composição se encontrarem em estruturas amorfas ou desordenadas atômicamente.

O grau de pozolanicidade do material, também conhecido como a reatividade da sílica, depende da proporção dos silicatos que se encontram em forma vítrea, visto que a sílica cristalina é bastante estável à temperatura ambiente. De forma primária, quanto maiores forem o desarranjo estrutural do material e a sua instabilidade em meio básico, a reação pozolânica irá se manifestar de forma mais intensa. No caso de aditivos de pozolanas altamente ativas, as mesmas irão consumir rapidamente o hidróxido de cálcio do sistema e irão acelerar a hidratação do cimento Portland (Farias Filho *et al.*, 2000).

Estes mesmos autores (Farias Filho *et al.*, 2000) afirmam que:

Além da ação química, as pozolanas finamente pulverizadas possuem ação física, uma vez que atuam nos concretos e argamassas como material de preenchimento. Este fato é particularmente importante na zona de transição, pois elas produzem um arranjo mais eficiente na interface agregado-pasta de cimento, densificando essa zona e consequentemente aumentando a resistência do concreto.

As pozolanas são materiais com pouca qualidade cimentante intrínseca, uma vez que por si são ligantes pobres, mas quando finamente pulverizadas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura normal, formando então silicatos de cálcio estáveis com apreciável capacidade cimentante (Guilhermino, 2008).

As principais vantagens que resultam da adição de pozolanas ao cimento comum são o aumento da resistência mecânica, a redução da permeabilidade à água e consequentemente aos reagentes agressivos (íons cloretos e sulfatos), a redução da reação álcali-agregado e a diminuição do calor de hidratação (Angélica *et al.*, 2014).

A baixa libertação de calor durante a fase de hidratação torna os cimentos pozolânicos particularmente adequados para utilização em situações em que seja necessário betonar grandes volumes em simultâneo, evitando o sobreaquecimento das massas betonadas e a consequente fissuração (Massazza, 1993).

### 3.2.1 Classificação das Pozolanas

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos são classificados em função da sua origem e requisitos químicos, divididos em três classes:

- **Pozolânicos classe N** - Pozolanas naturais e artificiais como materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas;
- **Pozolânicos classe C** - São as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas;
- **Pozolânicos classe E** - Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Em função de sua origem a NBR 12653 (ABNT, 2014), classifica as pozolanas em:

- **Pozolanas Naturais** - são aquelas cuja origem é vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de  $\text{SiO}_2$ ) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica natural;
- **Pozolanas Artificiais** - são materiais resultantes de processos industriais ou provenientes de tratamento térmico com atividade pozolânica e podem ser divididas em argilas calcinadas, cinzas volantes e outros materiais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de materiais vegetais e rejeito de carvão mineral.

Ainda, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas, conforme Tabela 1 e Tabela 2.

A norma europeia EM 197-1 (IPQ, 2011) define como pozolanas naturais calcinadas, o material vulcânico termicamente ativado, argila, xisto ou materiais sedimentares e que consistem essencialmente em dióxido de silício reativo ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e secundariamente de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e outros óxidos. O dióxido de silício reativo deve representar, pelo menos, 25% do total (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013).

Tabela 1 – Requisitos químicos de materiais pozolânicos.

Propriedades	Classe de material pozolânico (%)		
	N	C	E
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 70	≥ 70	≥ 50
SO <sub>3</sub>	≤ 4	≤ 5	≤ 5
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6
Álcalis disponíveis em Na <sub>2</sub> O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5

Fonte: ABNT, 2014.

Tabela 2 - Requisitos físicos de materiais pozolânicos.

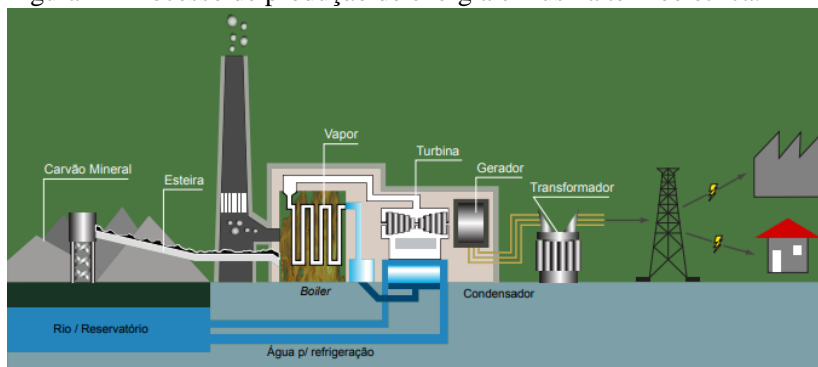
Propriedades	Classe de material pozolânico		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 µm	< 20 %	< 20 %	< 20 %
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa	≥ 6 MPa

Fonte: ABNT, 2014.

### 3.3 CINZAS DE USINAS TERMOELÉTRICAS

Nos dias atuais, a principal aplicação do carvão mineral em escala mundial é a geração de energia elétrica por meio de usinas termoelétricas. Para chegar na etapa final de geração de energia, o carvão é primeiramente extraído do solo, fragmentado e armazenado em silos. Em seguida é transportado à usina onde é cominuído e transformado em pó para que haja um melhor aproveitamento térmico nas fornalhas de caldeiras. O calor liberado pela queima do carvão aquece a água que escoa pelos tubos que envolvem a fornalha, transformando-a em vapor. A energia térmica contida no vapor é transformada em energia cinética, que movimentará a turbina do gerador de energia elétrica. O processo como um todo é representado pela Figura 1 (ANEEL, 2008).

Figura 1 - Processo de produção de energia em usina termoeletrica.



Fonte: ANEEL, 2008.

A combustão do carvão mineral, apesar de ser uma importante fonte de energia, é uma das formas de produção mais agressivas ao meio ambiente e gera uma grande quantidade de cinzas. Estas cinzas podem ser classificadas em dois tipos de resíduos sólidos: cinzas mosca (também chamadas de volantes) e pesadas (Sabedota *et al.*, 2011).

Devido às suas características físico-químicas, estes resíduos são comumente utilizados em associação com produtos que contenham hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  em sua composição, como por exemplo a cal hidratada e o cimento Portland (Margon, 2002).

Nesta pesquisa foram utilizadas cinzas volantes para a substituição parcial do cimento Portland nas argamassas refratárias.

### 3.4 CINZAS DE INDÚSTRIA CERÂMICA

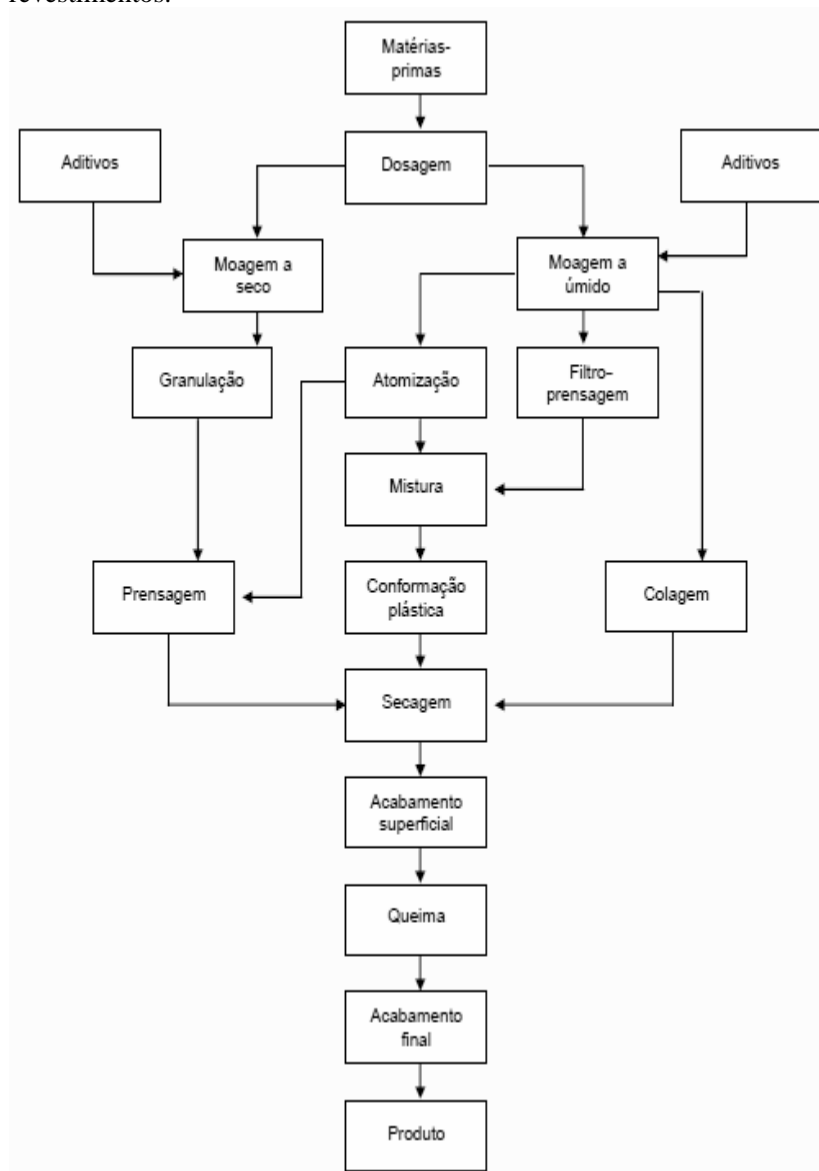
De acordo com Pedrassani (2002) a indústria cerâmica de revestimentos utiliza uma vasta gama de matérias-primas encontradas na natureza, ou seja, materiais argilosos e não argilosos, servindo de fundentes na massa ou para estruturar a forma da cerâmica. O processo está entre os mais modernos para produção de cerâmica e é bastante automatizado, limitando a mão-de-obra humana ao controle dos processos, inspeção da qualidade, armazenagem e expedição. De modo geral, o processo de produção de revestimentos cerâmicos pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2.

Segundo Ciacco, Rocha e Courinho (2017), na moagem por via seca o material é cominuído até o tamanho desejado sem o auxílio da água e, posteriormente, é encaminhado para prensagem. Já na moagem por via úmida, é feita a utilização de água para a cominuição das matérias-primas. Esta água adicionada ao processo é retirada da mistura através do processo de atomização e então podem ser prensadas. De modo geral, o processo de produção de revestimentos cerâmicos pode ser representado pelo fluxograma da Figura 2.

A atomização consiste na pulverização da barbotina para dentro de uma câmara cilíndrica onde, à uma temperatura média de 700 °C (gerada por um aquecedor à gás) a água é evaporada do sistema e o pó cerâmico é retirado do atomizador para prosseguir para as etapas seguintes de produção (Oliveira; Hotza, 2015).

As cinzas armazenadas no filtro de ar deste sistema são as chamadas cinzas de atomizador e são o objeto deste estudo.

Figura 2 - Fluxograma genérico do processo de fabricação de revestimentos.



Fonte: Oliveira e Hotza, 2015.

### 3.4 MATERIAIS REFRACTÁRIOS

O surgimento do refratário na História é obscuro, mas há indícios de que tenha iniciado com a extração de pedras de rochas silicosas e colocadas em fornos rudimentares para conservação do calor. Somente em meados do século XVII surgiram, nos Estados Unidos, relatos de produção em nível industrial (Pereira, 1985).

Pandolfelli e Sako (2014, p. 127) adicionam que “A indústria de refratários tem se desenvolvido principalmente em resposta aos avanços das indústrias de produtos primários, sendo a siderurgia a principal consumidora, utilizando mais de 70% da produção mundial de refratários.”

Os materiais refratários são cerâmicas técnicas, policristalinas, normalmente inorgânicas e polifásicas. Possuem volume estável e são capazes de manter as suas propriedades funcionais em altas temperaturas (acima de 1450 °C). Estes materiais devem apresentar, durante a sua aplicação, diferentes funções, tais como: manter e armazenar calor, resistir a solicitações mecânicas, térmicas e químicas e suportar cargas estáticas ou dinâmicas (Pandolfelli; Sako, 2014).

Segundo Dal Bó, Barbeta e Hotza (2007), os produtos cerâmicos são geralmente formados por fases cristalinas, vítreas e poros. A formação da microestrutura destas fases depende de fatores como o tipo de matéria-prima, o processo de fabricação, as condições de queima e resfriamento e onde o material será utilizado. As propriedades e o comportamento de um refratário (principalmente a sua temperatura de uso) depende diretamente da sua microestrutura.

Devido às várias combinações de condições onde se necessita usar refratários existem inúmeras fórmulas e maneiras de produzi-los. Isto envolve uma seleção rigorosa de material, por meio de uma especificação das características, processos e finalmente sua fabricação, conseguindo assim a combinação das propriedades desejadas (Pereira, 1985).

Os materiais refratários usados nos fornos, caldeiras, dutos, chaminés, entre outros, são, em geral, do tipo silicoaluminoso ou aluminoso, dada a excelente compatibilidade das características mecânicas, químicas e térmicas destes materiais com as solicitações de serviço normalmente encontradas naqueles equipamentos (Menezes, 1989).

As necessidades dirigidas aos refratários não se referem às relacionadas com a resistência ao calor, pois há um certo número de outros fatores derivados de seus usos particulares. Tais fatores podem ser divididos em três tipos principais (Duarte, 2012):

- Solidez (resistência aos esforços mecânicos);
- Resistência à destruição (por forças físicas e químicas);
- Isolamento do calor.

### 3.4.1 Classificação dos refratários

Os refratários podem ser classificados das seguintes formas (Duarte, 2012):

- **Comportamento químico:**
  - Ácidos: produtos com predominância de  $\text{SiO}_2$ ;
  - Básicos: produtos constituídos essencialmente por óxidos como  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ ;
  - Neutros: fabricados com matérias-primas ricas em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{ZrO}_2$ .
- **Composição química:**
  - Produtos silicoaluminosos: possuem teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  compreendido entre 15 e 45 %;
  - Produtos aluminosos: possuem teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  superior a 50%;
  - Produtos de semi-sílica: possuem teor de  $\text{SiO}_2$  compreendido entre 70 e 90 %;
  - Produtos de sílica: são os que possuem teor de  $\text{SiO}_2$  superior a 93%;
  - Produtos de magnésia: possuem teor mínimo de  $\text{MgO}$  admissível é de 82%;
  - Produtos de cromita: são fabricados a partir de minério de cromita, com teor de óxido de cromo mínimo de 30%;
  - Produtos de cromita-magnésia e magnésia-cromita: são fabricados a partir de misturas de cromita com magnésia em diferentes proporções. Normalmente, a primeira palavra do nome indica o óxido predominante.
- **Forma física de apresentação:**
  - Formados: têm formas definidas, tendo sofrido um processo de conformação mecânica ou manual;
  - Não-formados: não apresentam forma física definida e são constituídos pelos concretos, massas de socar, plásticos e argamassas, que podem ser fornecidos em baldes, sacos, caixas, etc.

- **Transmissão de calor:**

- Densos;
- Isolantes.

### **3.4.2 Argamassa Refratária**

As argamassas de revestimento utilizadas pela construção civil, segundo Carvalho Júnior (2005) podem ser definidas como a mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

Segundo a NBR 8826 (ABNT, 2014) define-se argamassa refratária como produto refratário sem conformação formado de grãos finamente moídos, podendo ser misturado com água e/ou aditivos ligantes. Este tipo de material é indicado para o assentamento, união ou proteção de outros refratários. Pode ser encontrado tanto no estado seco como em estado úmido e podem ser de pega a quente (que adquire resistência após aquecimento) de pega ao ar (que adquire resistência após secagem sem aquecimento) ou ainda de pega cerâmica (que torna-se resistente após aquecimento com aparecimento de novas fases) (Fernandes, 2012).

Também conhecidos como terra refratária, são materiais utilizados como agentes ligantes no assentamento dos materiais refratários formados na construção de alvenarias refratárias. A aplicação pode ser feita por colher ou por imersão, sempre obedecendo ao critério de uma camada fina (1 a 2 mm). As argamassas consistem geralmente em argila e chamota, obtendo a pega definitiva após a queima. Devido a essa característica de não possuir pega à temperatura ambiente, geralmente precisa da adição de ligantes ou, no caso da construção civil, a adição de cimento Portland (Fernandes, 2012).

## **4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

São apresentados nos tópicos subsequentes os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

### **4.1 MATERIAIS**

Foram utilizados neste estudo argila refratária e cimento Portland CP-IV (disponíveis no laboratório Valora da UNESCO), cinza proveniente de termoeletrica (Cinza T) e cinza proveniente de indústria cerâmica (Cinza P), ambas disponibilizadas pelas empresas.

### **4.2 MÉTODOS**

Para poder ter mais segurança e controle das formulações, fez-se necessário utilizar alguns ensaios e caracterização das matérias primas a serem utilizadas.

#### **4.2.1 Caracterização das matérias-primas**

Entre a imensa gama de ensaios existentes foram escolhidos, para a caracterização das matérias-primas os ensaios de: análise química (FRX), análise granulométrica, análise térmica (ATD/TG), análise mineralógica (DRX), estudo da atividade pozzolânica à cal aos 7 dias e análise superficial específica (BET).

##### **4.2.1.1 Análise Química (FRX)**

A fluorescência de raios X, consiste no processo de excitação da amostra através da irradiação de um feixe primário de raios X, que resulta na produção de uma radiação secundária devido às emissões características dos elementos químicos presentes. Conhecendo-se os ângulos de reflexão e a intensidade da radiação, é possível além de identificar os elementos presentes na amostra, quantificá-los (Brandão, 2007).

Os ensaios foram realizados em Espectrômetro de Fluorescência de Raios X da marca Panalytical, modelo AXIOS MAX no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais – LDCM/SENAI. As amostras foram moídas em gral com pistilo previamente.

#### 4.2.1.2 Análise mineralógica (DRX)

Este ensaio fez-se necessário devido à importância de se conhecer as fases cristalinas presentes nos resíduos, para a partir disso, poder elaborar melhor as formulações.

O método de análise baseia-se na comparação dos valores das distâncias interplanares e das intensidades dos picos nos difratogramas das amostras analisadas e uma amostra de referência.

O equipamento utilizado foi um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD 6000, com radiação incidente  $\text{CuK}\alpha$  (1,5406 Å), em um intervalo de leitura de 3 a 80° (2 $\theta$ ) e velocidade de 2°/min.

Para a realização deste ensaio as amostras também foram cominuídas em gral com pistilo.

#### 4.2.1.3 Análise térmica (ATD/TG)

A análise termogravimétrica (TG) e a análise termodiferencial (ATD) dão informações importantes na identificação de fases, tanto para materiais inorgânicos como para os orgânicos.

A TG é realizada em um instrumento chamado de termobalança, no qual alterações em massa da amostra são plotadas em função da temperatura. É um método quantitativo importante para o estudo de fases que sofrem decomposição térmica, como muitos minerais e fases inorgânicas, assim como de polímeros orgânicos. Normalmente usa-se atmosfera inerte, mas pode ser usada ainda em interação de fases com atmosferas reativas, como na combustão (Brandão, 2007).

A ATD é um ensaio qualitativo que mede simultaneamente as temperaturas em dois pontos: na amostra em estudo e em um padrão, que é inerte termicamente na faixa de temperatura em que se realiza o ensaio (Duarte, 2005). A ATD mostra os picos onde há absorção ou fornecimento de energia térmica, em relação ao padrão inerte. Desta forma, têm-se picos exotérmicos e endotérmicos.

As amostras foram ensaiadas em equipamento da marca NETZSCH, modelo STA 449F3A no Laboratório de Valorização de Resíduos (LabValora/UNESC). As condições de ensaio se deram em atmosfera ao ar, com incremento de 10 °C/min até uma temperatura de 1300 °C.

#### 4.2.1.4 Análise granulométrica

Foi feita através de equipamento modelo Cilas 1064 da marca Acil Weber, através de medidor de partículas a *laser* em via úmida, com faixa analítica de 0,04 a 500µm. Para este ensaio não foi necessária a utilização de ultrassom e defloculante.

#### 4.2.1.5 Atividade pozolânica à cal aos 7 dias

Regulamentado pela NBR 5751 (ABNT, 2015), neste ensaio foram confeccionados 4 corpos de prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para cada resíduo com uma mistura de hidróxido de cálcio, areia, água e a cinza. Após 7 dias os corpos de prova foram ensaiados para a sua resistência à compressão em máquina EMIC de ensaios mecânicos segundo NBR 5739 (ABNT, 2007) com um aumento de tensão de 0,55 MPa/s.

#### 4.2.1.6 Análise superficial específica (BET)

Foi utilizado o método BET (Brunauer-Emmet-Teller) para análise da superfície específica dos resíduos. Este ensaio foi realizado no LabValora Valora da UNESC em equipamento de marca Quantachrome Instruments, modelo NOVA 1200e.

### 4.2.2 Formulações

#### 4.2.2.1 Fórmula Padrão

Utilizou-se como fórmula padrão a mistura comumente utilizada na indústria da construção civil. Utilizou-se de argila refratária da Industria Maref (composta basicamente por 20% de argila fundente, 70% argila barro-branco e 10% chamote Maref) e do cimento Portland CP-IV.

Segundo o fabricante, a proporção recomendada é de:

- 80% Argila Refratária Maref;
- 20% Cimento Portland CP-IV;
- Água até atingir consistência de argamassa (podendo variar de acordo com a umidade em que se encontra a argila refratária).

#### 4.2.2.2 Formulações com as cinzas

Conforme mostra a Tabela 4, foram desenvolvidas quatro formulações diferentes com os índices de substituição do cimento Portland pelas cinzas variando entre 5 e 10 % em massa.

Tabela 3 - Tabela de formulações para a argamassa refratária (percentuais em massa).

Formulações	Argila refratária	Cimento CP-IV	Cinza P	Cinza T
<b>P5</b>	80	15	5	-
<b>P10</b>	80	10	10	-
<b>T5</b>	80	15	-	5
<b>T10</b>	80	10	-	10
<b>C</b>	80	20	-	-

Fonte: O autor, 2019.

#### 4.2.3 Caracterização das Formulações

Posteriormente à análise dos resultados de caracterização das matérias-primas e escolha das melhores composições, as argamassas desenvolvidas foram ensaiadas quanto à sua retração linear (análise dilatométrica) e resistência ao arrancamento.

##### 4.2.3.1 Análise dilatométrica

Realizada em dilatômetro NETZSCH modelo DIL 402C (Figura 3) disponível no SENAI de Criciúma/SC, esta teve como objetivo determinar a retração linear das argamassas conforme o aumento de temperatura.

Figura 3 - Dilatômetro NETZSCH Modelo DIL 402.



Fonte: UNIFESP, 2018.

#### 4.2.3.2 Ensaio de Resistência ao Arrancamento ou Ensaio de aderência à tração

Também conhecido como Ensaio de aderência à tração, este ensaio é regido pela NBR 13528 (ABNT, 2010) e foi realizado com aparelho emprestado pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC. Para a sua realização, o equipamento é fixado à superfície da parede refratária e determina a tensão de tração necessária para romper o substrato de argamassa.

A aderência da argamassa à base (uma propriedade das mais importantes considerando-se as ligações entre estes materiais) foi definida por Sabbatini (1998) como a capacidade que a interface componente-argamassa possui de absorver tensões tangenciais (cisalhamento) e normais (tração) a ela, sem romper-se.

Na Figura 4 estão apresentadas as paredes confeccionadas com as formulações de argamassa refratária e tijolos refratários e nas Figura 5 e Figura 6 os corpos de prova durante e após o ensaio de arrancamento.

Figura 4 - Paredes refratárias para ensaios.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 5 - Parede refratária durante ensaio de arrancamento.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 6 - Corpos de prova após ensaio de arrancamento.



Fonte: O autor, 2019.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

#### 5.1.1 Análise química (FRX)

Os resultados da análise química da cinza de indústria cerâmica (Cinza P), da cinza de termoeétrica (Cinza T) e da argila refratária são apresentados da Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química da argila refratária e dos resíduos estudados.

Elementos	Composição química (% em massa)		
	Argila refratária	Cinza P	Cinza T
<b>SiO<sub>2</sub></b>	60,81	59,75	61,60
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	22,11	23,39	23,10
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,72	3,18	5,51
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,42	1,58	3,05
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,38	0,28	0,66
<b>CaO</b>	0,34	3,93	1,50
<b>MgO</b>	0,47	0,54	1,25
<b>MnO</b>	< 0,05	< 0,05	0,24
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	< 0,05	< 0,05	0,08
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,88	1,06	1,17
<b>ZnO</b>	< 0,1	0,44	< 0,1
<b>Perda ao fogo</b>	9,27	3,31	1,05

Fonte: O autor, 2019.

Conforme NBR 12653 (2014), a Cinza P é classificada na classe E e a Cinza T na classe C. Desta forma, conforme Tabela 1, devem apresentar somatório de óxidos SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> maior que 50 e 70%. Em ambos os casos este requisito é atendido.

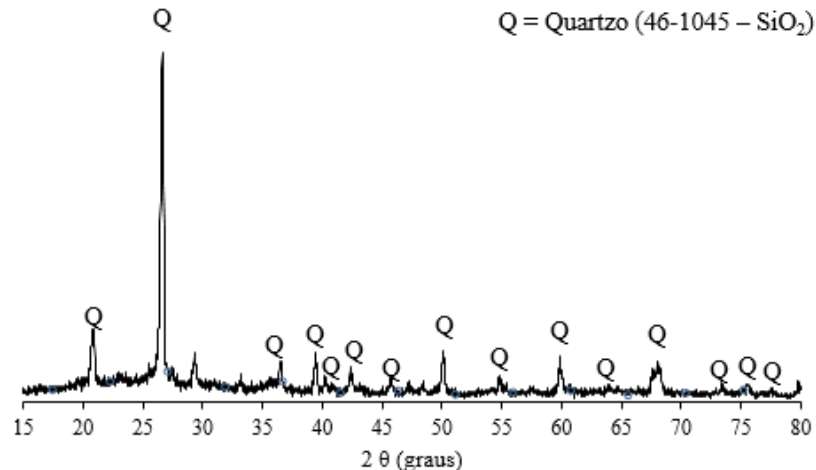
Em relação à perda ao fogo, a porcentagem em massa deveria ser menor que 6 % para ambas as cinzas, requisito que também foi alcançado.

Nota-se que o somatório dos óxidos da argila refratária não atinge 100 %. Este fator ocorre devido à presença de enxofre na amostra.

### 5.1.2 Análise mineralógica (DRX)

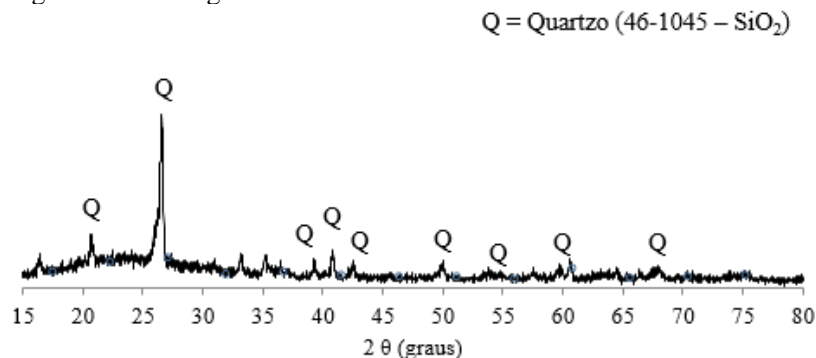
Conforme mostram a Figura 7 e a Figura 8, ambas as cinzas (Cinza P e Cinza T) possuem como principal fase cristalina o quartzo.

Figura 7 - Difratoograma de raios X da Cinza P.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 8 - Difratoograma de raios X da Cinza T.

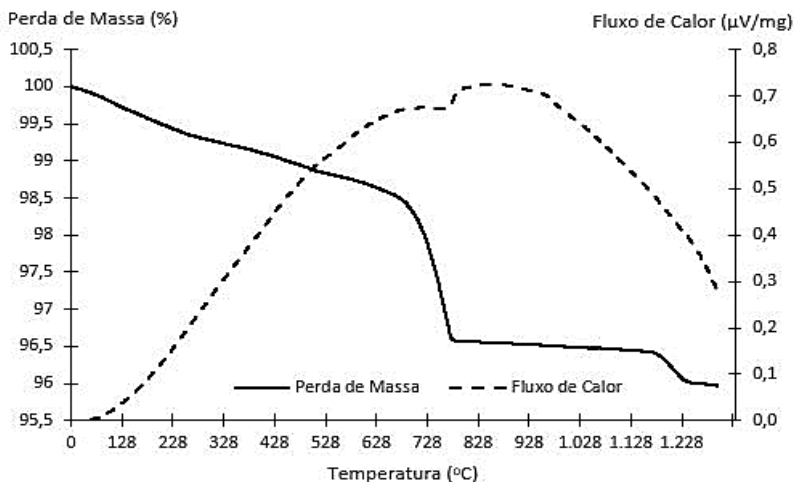


Fonte: O autor, 2019.

### 5.1.3 Análise térmica (ATD/TG)

Na Figura 9 são apresentados os resultados da análise térmica para a Cinza P.

Figura 9 - Análise térmica da Cinza P.

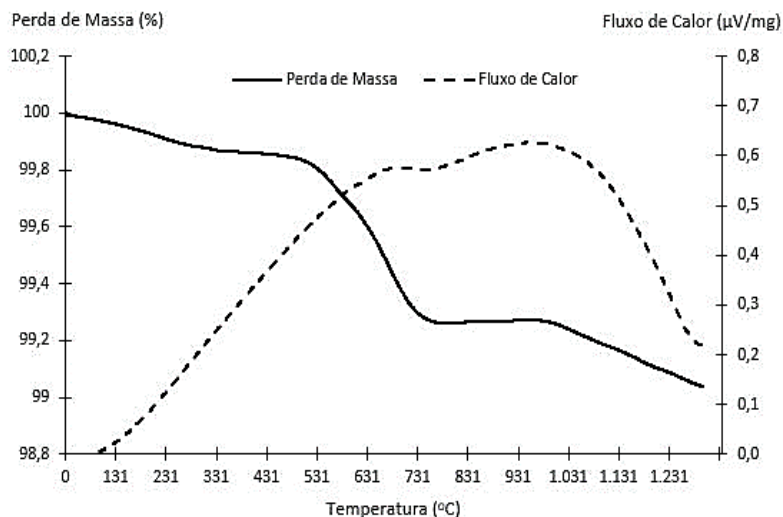


Fonte: O autor, 2019.

A análise térmica diferencial e termogravimétrica apresentou um resultado compatível com a composição química realizada por FRX. O gráfico de ATD mostra um evento endotérmico em torno de 780 °C relativo a reação de decomposição do carbonato de cálcio em gás carbônico que é possivelmente adicionado à mistura para minimizar a emissão de SO<sub>x</sub>. Nesta mesma região a termogravimetria apresentou uma perda de massa de 2% correspondendo a um teor de 4,5% de carbonato de cálcio na amostra original. Na temperatura de 1200 °C ocorre outra perda de massa de 0,5% que pode ser explicada pela redução dos óxidos de ferro presentes na amostra. Da temperatura ambiente até em torno de 600 °C houve uma perda de massa contínua ligada possivelmente a oxidação de matéria orgânica e decomposição de hidróxidos e saída de água adsorvida na amostra.

Para a Cinza T, os resultados da análise térmica são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Análise térmica da Cinza T.



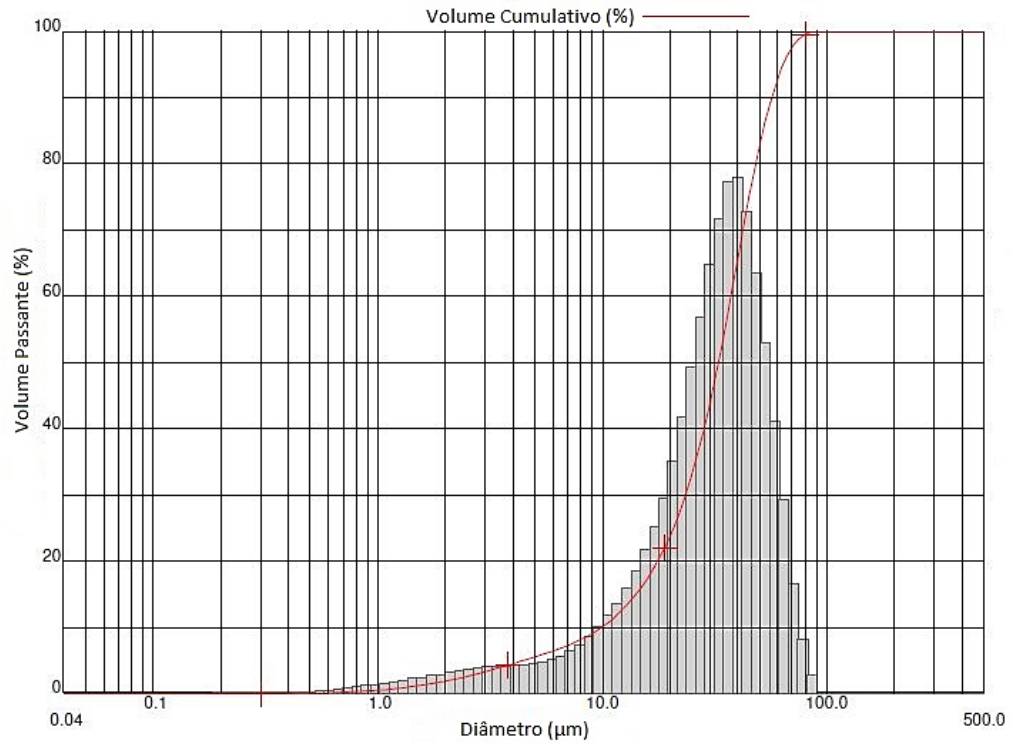
Fonte: O autor, 2019.

O resultado de ATD/TG apresentou ser típico de uma amostra que passou por processo de queima, houve uma pequena perda de massa da amostra, indicando a oxidação de carbono remanescente da queima incompleta ocorrida.

#### 5.1.4 Análise granulométrica

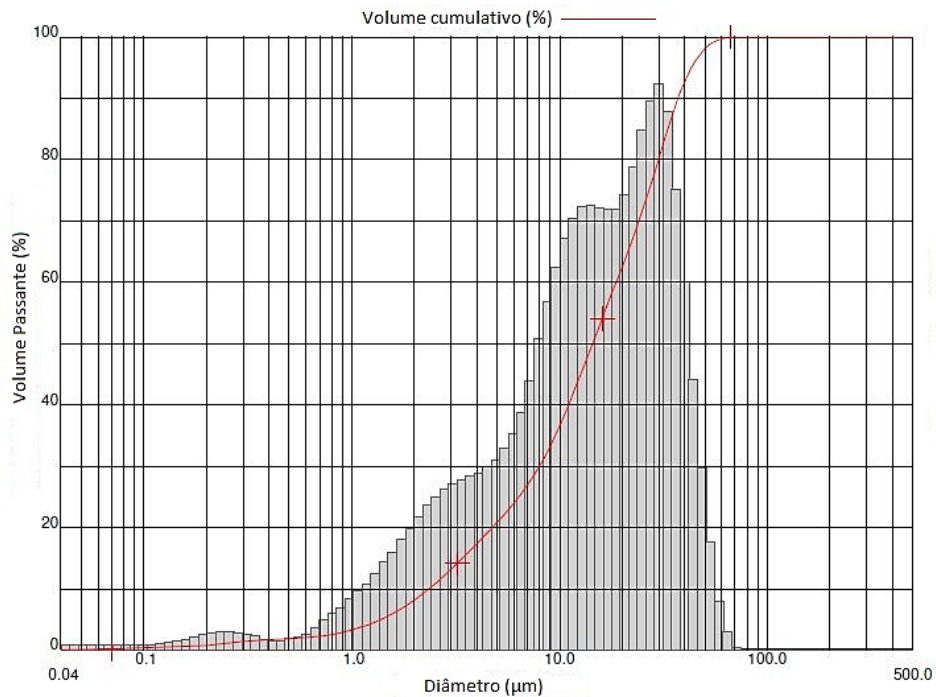
A Figura 11 e a Figura 12 apresentam a granulometria da Cinza P e da Cinza T, respectivamente.

Figura 11 - Granulometria da Cinza P.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 12 - Granulometria da Cinza T.



Fonte: O autor, 2019.

Conforme mostra a Figura 11, a Cinza P apresenta partículas com diâmetro entre 0,5 e 90  $\mu\text{m}$ , e sua curva granulométrica apresenta um comportamento monomodal. Já a Cinza T, possui partículas com diâmetro entre 0,1 e 70  $\mu\text{m}$ , mostrando-se mais fina (Figura 12) e sua curva se comporta de forma trimodal. A Tabela 5 apresenta os resultados de diâmetros médios de partículas em comparação com a granulometria do cimento Portland CP-IV (Oliveira; Oliveira, 2015).

Tabela 5 - Granulometria das Cinzas e do cimento CP-IV.

	<b>CP-IV</b>	<b>Cinza P</b>	<b>Cinza T</b>
<b>Diâmetro a 10 % (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	5,31	9,92	2,35
<b>Diâmetro a 50 % (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	17,05	32,95	14,42
<b>Diâmetro a 90 % (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	39,58	56,83	37,25
<b>Diâmetro médio (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	20,18	33,44	17,66

Fonte: Oliveira e Oliveira, 2015 e O autor, 2019.

A partir da Tabela 5 pode-se afirmar que, em comparação ao cimento, a Cinza T é mais fina, enquanto a Cinza P possui partículas maiores.

### 5.1.5 Atividade pozolânica à cal aos 7 dias

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova confeccionados para o estudo da atividade pozolânica à cal.

Tabela 6 - Resistência à compressão da análise de atividade pozolânica.

<b>Corpos de Prova</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	
	<b>Cinza P</b>	<b>Cinza T</b>
<b>CP 1</b>	5,06	4,35
<b>CP 2</b>	4,74	5,71
<b>CP 3</b>	4,42	6,60
<b>CP 4</b>	4,99	4,96
<b>Média</b>	<b>4,81</b>	<b>5,41</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,29</b>	<b>0,97</b>

Fonte: O autor, 2019.

Apesar de apresentarem valores próximos de 6 MPa, como exige a NBR 12653 (ABNT, 2014), ambas as cinzas não apresentaram resistência mínima à compressão necessária (conforme Tabela 2).

Desta forma estes resíduos não podem ser considerados como pozolânicos, apesar de apresentarem algumas características deste tipo de material.

### 5.1.6 Análise de superfície específica (BET)

Na Tabela 7 são indicados os valores de área superficial específica para cada uma das cinzas estudadas.

Tabela 7 - Área superficial específica das cinzas.

	<b>Cinza P</b>	<b>Cinza T</b>
<b>Área superficial específica</b>	6,313 m <sup>2</sup> /g	0,558m <sup>2</sup> /g

Fonte: O autor, 2019.

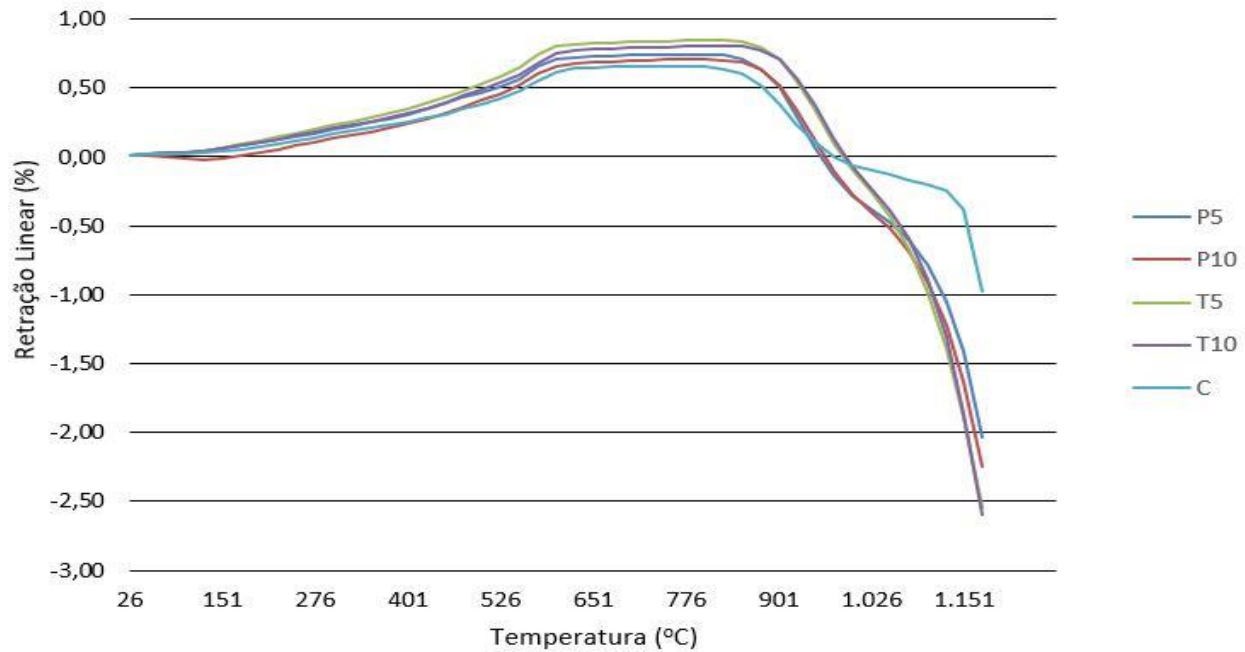
As cinzas apresentaram grande diferença em sua área superficial. Segundo Azevedo *et al.* (2015), valores maiores de área superficial tornam a sinterização do material mais rápida. Desta forma, a Cinza P tende a queimar com mais facilidade que a Cinza T.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

### 5.2.1 Análise dilatométrica

A Figura 13 ilustra as curvas dilatométricas a verde das formulações com a argila refratária, cinzas e cimento.

Figura 13 - Dilatometria das formulações a verde.



Fonte: O autor, 2019.

Os ensaios comparativos mostram que a adição de cinzas, não importando o tipo, aumenta significativamente a fundência. Este fato pode ser visualizado pela maior retração em altas temperaturas, acima de 1050 °C. A adição de 10% de cinza de termoelétrica a carvão apresentou a maior fundência. Para as aplicações usuais de uma churrasqueira a carvão usada comumente na construção civil em prédios residenciais, a temperatura atinge patamares menores, de no máximo 800 °C. Na Figura 13 percebe-se que em nenhuma formulação atinge-se a fundência abaixo de 800 °C, indicando que todas as formulações estão aptas para serem usadas nesta temperatura.

Para todas as formulações pode ser visualizada expansão característica do quartzo alfa para quartzo beta na temperatura em torno de 573 °C, compatível com os resultados de DRX destas amostras. Para a faixa de temperaturas entre a ambiente e 500 °C acontecem as reações de desidroxilação e oxidação de matéria orgânica, por isso acontece um nível pequeno de variação das dimensões destes corpos de prova para estas temperaturas. A maior retração das formulações em temperaturas elevadas pode ser explicada pela presença de óxidos fundentes como o óxido de potássio, sódio e ferro nas cinzas o que contribui para o aumento desta característica.

O objetivo de serem realizadas as dilatométricas das formulações já queimadas foi a determinação dos coeficientes de dilatação térmica médios ( $\alpha$ ), entre a temperatura ambiente de 25°C e 325°C que podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficiente de dilatação térmica e temperatura de amolecimento das formulações.

<b>Formulação</b>	<b><math>\alpha</math> (°C<sup>-1</sup>)</b>	<b>Amolecimento</b>
<b>P5</b>	7,18 x 10 <sup>-6</sup>	819,2 °C
<b>P10</b>	6,83 x 10 <sup>-6</sup>	818,5 °C
<b>T5</b>	7,32 x 10 <sup>-6</sup>	817,5 °C
<b>T10</b>	7,50 x 10 <sup>-6</sup>	791,0 °C
<b>C</b>	7,28 x 10 <sup>-6</sup>	799,0 °C

Fonte: O autor, 2019.

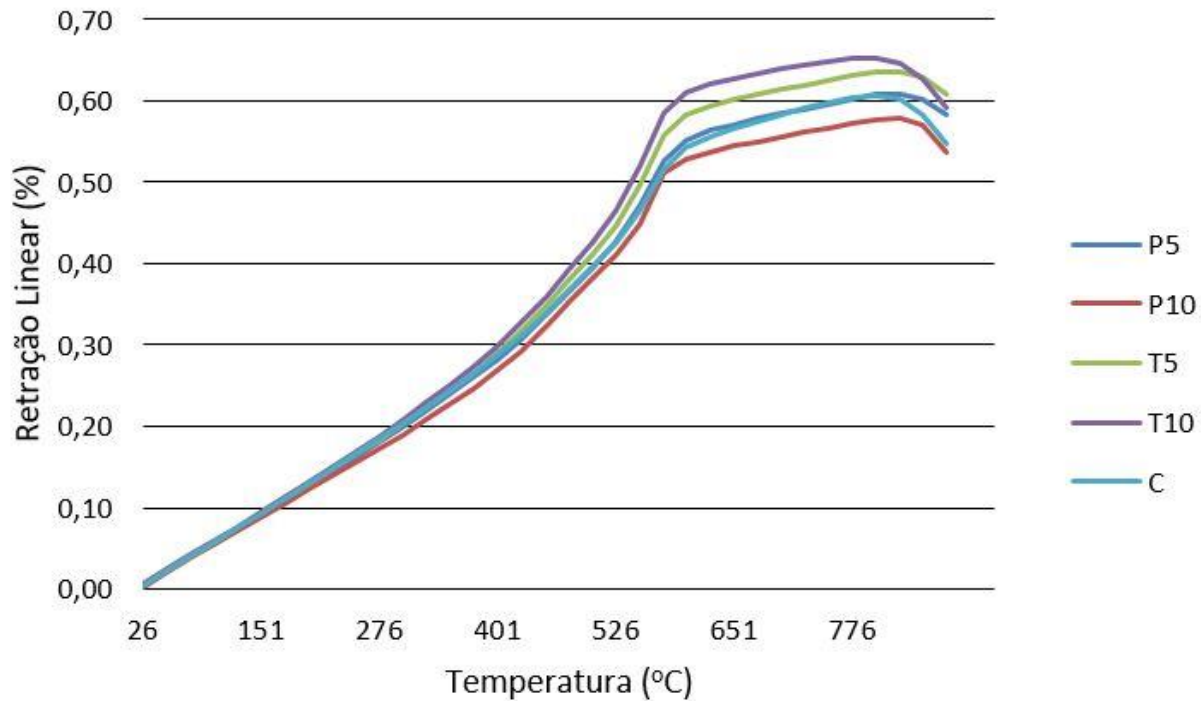
Os resultados indicam que houve alterações nos valores de coeficiente de dilatação térmica de acordo com adição dos resíduos em relação a dilatação do cimento puro. Com a substituição do cimento pela Cinza P, notou-se que os valores de  $\alpha$  diminuíram conforme a quantidade adicionada foi aumentando. Já com a substituição do cimento pela Cinza

T, os valores de  $\alpha$  aumentaram. Isto indica que, com o aumento da temperatura, a argamassa das formulações P5 e P10 dilata mais que a argamassa padrão (C), enquanto as argamassas das formulações T5 e T10 dilatam menos que a argamassa padrão, mostrando-se mais indicadas pois geram menos trincas no produto final.

A Figura 14 apresenta as curvas dilatométricas das amostras submetidas à queima. Através dela nota-se que houve diferença significativa no padrão de dilatação entre as formulações estudadas. A cinza da indústria cerâmica diminui a dilatação enquanto que a cinza da termoelétrica a carvão aumenta a dilatação. O cimento apresenta dilatação intermediária. A presença de quartzo pode ser visualizada em todas as formulações na expansão em torno de 573 °C, sendo que a adição de Cinza P incrementou este evento, nesta temperatura. Com relação à temperatura máxima, até se atingir o amolecimento, as temperaturas mantiveram-se semelhantes ao padrão das amostras a verde.

Segundo estudo de Vicente *et al.* (2018), a temperatura máxima dentro da churrasqueira durante a combustão do carbono gira em torno de  $414 \pm 93,8$  °C. Desta forma, por possuírem temperatura de amolecimento maiores que a máxima da churrasqueira, todas as formulações são aprovadas neste critério.

Figura 14 - Dilatometria das formulações sinterizadas.



Fonte: O autor, 2019.

### 5.2.2 Ensaio de arrancamento

A Tabela 9 apresenta os resultados de resistência de aderência à tração (arrancamento) para as formulações.

Tabela 9 - Resistência ao arrancamento das formulações.

CP	Resistência ao arrancamento (MPa)				
	P5	P10	T5	T10	C
1	0,064	0,083	0,121	0,069	0,144
2	0,049	0,112	0,067	0,043	0,110
3	0,087	0,063	0,114	0,083	0,110
4	0,135	0,050	0,075	0,060	0,161
5	0,168	0,094	0,071	0,057	0,169
6	0,077	0,057	0,075	0,101	0,087
7	0,084	0,096	0,101	0,081	0,168
8	0,057	0,081	0,109	0,114	0,073
9	0,080	0,072	0,100	0,062	0,171
10	0,101	0,076	0,116	0,098	0,137
11	0,112	0,073	0,096	0,062	0,026
12	0,093	0,061	0,091	0,093	0,145
<b>Média</b>	<b>0,092</b>	<b>0,077</b>	<b>0,095</b>	<b>0,077</b>	<b>0,125</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,034</b>	<b>0,018</b>	<b>0,019</b>	<b>0,022</b>	<b>0,045</b>

Fonte: O autor, 2019.

A partir da Tabela 9 notou-se que, em comparação com a argamassa padrão, todas as formulações apresentaram diminuição na sua resistência ao arrancamento. A redução da resistência mostrou-se gradativa conforme a quantidade de cimento substituída pelas cinzas foi aumentando.

No caso da Cinza P, a resistência diminuiu em 26,4 % com a substituição de 5 % do cimento e em 38,4 % com a substituição de 10 %. Já para a Cinza T, as substituições de 5 e 10 % do cimento resultaram em uma diminuição de 24 % e 38,4 % respectivamente.

Apesar destas reduções, todas as formulações apresentaram resistência suficiente e podem ser utilizadas pois se enquadram na classe A1 da NBR 13281, com resistência menor que 0,2 MPa (ABNT, 2005).

## 6. CONCLUSÃO

Após o estudo da substituição do cimento em argamassas refratárias por cinzas de indústria cerâmica e cinzas de termoeletrica de carvão, puderam ser feitas algumas afirmações sobre as suas propriedades.

As análises químicas e físicas dos resíduos confirmaram que, apesar de possuírem algumas características de materiais pozolânicos, como a presença em grandes quantidades dos óxidos de silício, alumínio e ferro e uma baixa perda ao fogo, em termos de resistência à compressão, estes resíduos não podem ser denominados como pozolânicos por não alcançarem a resistência mínima de 6 MPa.

Conforme esperava-se as análises térmicas feitas nas cinzas apresentaram resultados compatíveis com as análises químicas feitas por FRX. Para a análise granulométrica, em comparação ao cimento, a Cinza P apresentou partículas maiores enquanto a Cinza T apresentou partículas mais finas. Já em relação à área superficial, a Cinza P apresentou maiores valores que a Cinza T, indicando que a sua queima ocorre de forma mais rápida.

Com estes resultados, e após definidas as formulações, pode-se concluir, através da análise dilatométrica que todas as formulações podem ser aplicadas na construção civil pois possuem temperatura fundente próximas a 800 °C, quase o dobro da temperatura máxima a que uma churrasqueira comercial pode chegar. Na Cinza T mostrou-se mais vantajosa, pois apresentou menor coeficiente de dilatação linear em relação à argamassa padrão sem adição de resíduos, indicando a ocorrência de menos trincas conforme o aumento da quantidade adicionada.

Quanto à resistência de aderência à tração, todas as formulações apresentaram diminuição nos valores em comparação com a argamassa C. Este fator porém, não influencia na aplicabilidade das argamassas pois todas as formulações apresentam resistências apropriadas.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência à tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8826**: Materiais refratários — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- AZEVEDO, A. G. *et al.* Efeito da temperatura em processos de sinterização de pós de hidroxiapatita. **Cerâmica**, v. 61, p. 52-59, 2015.
- BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 931.
- CARVALHO JÚNIOR, A. N. **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2005. 222p.

CIACCO, E. F. S.; ROCHA, J. R.; COUTINHO, A. R. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. **Engineering**, v. 113, p. 1283–1289, 2017.

CINCOTTO, M. A. **Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações**. 2. ed. São Paulo: IPT, 1989.

COIMBRA, M. A., DOS SANTOS, W. M., MORELLI, M. R. Recuperação de resíduos inorgânicos para a construção civil. **Cerâmica**, v. 48, n. 206, p. 44-48, abr./jun. 2002.

DAL BÓ, M., BARBETTA, P. A., HOTZA, D. Utilização de Resíduos da Indústria de Revestimentos Cerâmicos na Fabricação de Refratários Triaxiais. **Cerâmica Industrial**, v. 12, jan./abr. 2007.

DALFRÉ, R. R. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Indústria de Cerâmica - Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2012.

DUARTE, A. **Definição de refratários**. In: CURSO FUNDAMENTOS DE REFRAATÁRIOS. Belo Horizonte, 2012.

FARIAS FILHO, J., ROLIM, J. S., TOLEDO FILHO, R. D. Potencialidades da metacaolinita e do tijolo queimado moído como substitutos parciais do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, set./dez. 2000.

FERNANDES, M. R. F. Estudo das propriedades das argamassas refratárias úmidas com o tempo de estocagem. Belo Horizonte, 2012, 231p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2012.

GOMES, M. M., SANTOS, M. L. Q. DOS, NOGUEIRA, J. A. Análise da Produção de Cimento Portland. **Revista Pensar**, v. 5, n. 1, jan. 2017.

GUILHERMINO, R. L. **Estudo de laboratório de um resíduo catalisador de equilíbrio para utilização em alvenaria na construção civil**. Rio de Janeiro, 2008, 152p. Dissertação de Mestrado - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE – IPQ. **NP EM 197-1: Cimento – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.** Caparica: IPQ, 2011. 35p.

KERSTNER, E. K. *et al.* Estudo da utilização de cinzas da combustão de carvão no processo de fabricação de componentes por metalurgia do pó convencional. **Anais do 66º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalúrgica – ABM.** São Paulo: 2010.

MARGON, P. V. Influência do uso das cinzas de carvão mineral de termelétricas em argamassas de revestimento: dosagem por curvas granulométricas. Florianópolis, 2002, 149p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement & Concrete Composites**, v. 15, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MENEZES, I. **Refratários: propriedades mecânicas, fratura e efeitos termomecânicos.** Belo Horizonte: 1989.

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

OLIVEIRA, A. P. N., HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos.** Editora UFSC, 2011.

OLIVERIA, W., OLIVEIRA, H. **Laboratório de Aplicações: Análise de Cimento Portland CP-IV.** Disponível em: <<http://laboratoriodeaplicacoes.blogspot.com/2015/05/analise-de-cimento-portland-cp-iv.html>>. Publicado em: 19 mai. 2015. Acesso em: 14 mar. 2018.

PACHECO-TORGAL, F. *et al.* **Eco-efficient concrete.** Cambridge: WoodheadPublishing, 2013.

PANDOLFELLI, V. C., SAKO, E. Y. Artigo revisão – A relação entre a corrosão e a microestrutura: a chave para o desenvolvimento de concretos

refratários espinelizados de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 127-142, jan./fev./mar. 2014.

PEDRASSANI, J. **O grês porcelanato: manual de fabricação e técnicas de emprego**. São Paulo: Faenza Editrice do Brasil, 2002. 262p.

PEREIRA, C. G. **Tecnologia de produtos refratários**. São Paulo: Tecnica Piping, 1985.

PICCHI, F. A. **Sistemas de qualidade: Uso em empresas de Construção de edifícios**. São Paulo, 1993. 462p. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

PUREZA, J. C. C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

SABBATINI, F. H. **Argamassas de Assentamento para Paredes de Alvenaria Resistente**. São Paulo, ABCP, 2. ed. 1998. 44p.

SABEDOTA, S. *et al.* Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas. **Anais do III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. Porto Alegre: 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Números do Setor**. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO – UNIFESP. **Dilatômetro**. Disponível em: <[https://www.unifesp.br/campus/sjc/images/SJC/DCT/NAPCEM/Dilometro\\_NETZSCH\\_DIL402C.pdf](https://www.unifesp.br/campus/sjc/images/SJC/DCT/NAPCEM/Dilometro_NETZSCH_DIL402C.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2018.

VICENTE, E. D. *et al.* Particulate and gaseous emissions from charcoal combustion in barbecue grills. **Fuel Processing Technology**, v. 176, p. 296-306, mar. 2018.