

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Rolando Ruben Chávez Zegarra**

**COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE  
ASSENTAMENTO SUBMETIDAS A ALTAS  
TEMPERATURAS**

**Santa Maria, RS  
2018**

**Rolando Ruben Chávez Zegarra**

**COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE  
ASSENTAMENTO SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS**

**Dissertação apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, da  
Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos  
Co-orientador: Prof. Dr. José Mário Doleys Soares**

**Santa Maria, RS  
2018**

ZEGARRA, ROLANDO RUBEN CHAVEZ  
COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE  
ASSENTAMENTO SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS / ROLANDO  
RUBEN CHAVEZ ZEGARRA.- 2018.  
92 p.; 30 cm

Orientador: JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS  
Coorientador: JOSÉ MARIO DOLEYS SOARES  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2018

1. ARGAMASSAS ALTAS TEMPERATURAS 2. RESISTÊNCIA  
MECÂNICA 3. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X  
4. DIFRAÇÃO DE RAIOS X I. PIZZUTTI DOS SANTOS, JOAQUIM  
CESAR II. DOLEYS SOARES, JOSÉ MARIO III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

**E-mail: rolchavez2020@gmail.com**

**Rolando Ruben Chávez Zegarra**

**COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE  
ASSENTAMENTO SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS**

**Dissertação apresentada ao Curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, da  
Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil**

**Aprovado em 19 de abril de 2018:**

---

**Joaquim Cesar Pizzutti dos Santos, Dr. (UFSM)  
(Presidente Orientador)**

---

**Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Dr. (UFSM)**

---

**Monica Regina Garces, Dra. (UFRGS)**

**Santa Maria, RS  
2018**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às pessoas que de maneira direta ou indiretamente deram sua contribuição para a conclusão da presente dissertação de Mestrado, principalmente ao apoio de minha família.

Foi o Arcanjo Miguel que no momento mais escuro, na hora mais terrível, na qual as multidões começaram a duvidar, no meio do inicial silêncio geral ele gritou: Quem como Deus? Foi assim que ficou o seu nome, o lutador infatigável e invencível. Não se tratava de um anjo superior, mas o seu amor era superior. Foi ele quem manteve mais viva a chama da fidelidade nos piores momentos da batalha “Por essa razão, aqueles que foram ao seu encontro tiveram que recuar”

(Pe. José Antônio Fortea, “História do Mundo dos Anjos”).

## RESUMO

### COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE ASSENTAMENTO SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

**AUTOR: ROLANDO RUBEN CHAVEZ ZEGARRA**  
**ORIENTADOR: JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS**

Neste estudo é pesquisado o comportamento de argamassas industrializadas de assentamento quando submetidas a altas temperaturas, analisando a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão axial. Para realizar esta pesquisa foram estudados três grupos de argamassas industrializadas, com resistências nominais de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa, da marca FIDA, submetidas a temperaturas, de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C dentro de um forno elétrico por um período de 4 horas. As argamassas foram moldadas em corpos de prova seguindo a Norma Brasileira NBR 13276. Para cada temperatura de exposição foram moldados 18 corpos-de-prova, para serem expostos as temperaturas mencionadas, com idades de ensaio de 28 e 91 dias. Os 18 corpos de prova foram distribuídos desta forma: 6 corpos de prova de 6 MPa, 6 corpos de prova de 8 MPa e 6 corpos de prova de 12 MPa, resultando em 198 corpos de prova para as diversas temperaturas de exposição. As amostras com idades de ensaio de 28 dias e de 91 dias foram colocadas a uma temperatura constante de 25 °C, no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Maria, antes de serem colocadas no forno elétrico. Cumpridas as idades de ensaio os corpos de prova foram submetidos às diversas temperaturas de exposição mencionadas, dentro de um forno elétrico, por um período de 4 horas. As amostras foram esfriadas à temperatura ambiente e submetidas aos ensaios de ruptura à tração na flexão e à compressão axial, seguindo a Norma Brasileira NBR 13279. Os resultados mostraram uma diminuição da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão axial. As amostras que foram submetidas às temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, diminuíram sua resistência, porém mantiveram sua integridade estrutural. Os corpos de prova submetidos às temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, após serem esfriadas à temperatura ambiente durante um período superior às 24 horas esfarelaram virando pó. Estas amostras foram submetidas a ensaios de espectrometria de fluorescência de raios X determinando-se em que proporção em termos de óxidos se encontram dentro das argamassas. Para a difração de raios X, foram usadas amostras submetidas a temperatura ambiente, 200 °C, 600 °C e 900 °C, observando-se que houve mudanças de fase na estrutura cristalográfica dos óxidos, devido ao stress nas argamassas quando submetidas a altas temperaturas, porém mantendo sua composição química até 900 °C.

**Palavras-Chaves:** Argamassa; Altas Temperaturas, Resistência Mecânica, fluorescência, difração.

## ABSTRACT

### BEHAVIOR OF INDUSTRIALIZED SEALING MORTARS SUBMITTED TO HIGH TEMPERATURES

**AUTHOR: ROLANDO RUBEN CHAVEZ ZEGARRA**  
**ADVISOR: JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS**

This study investigates the behavior of industrialized mortar under high temperature conditions, analyzing the flexural tensile strength and axial compression strength. In order to carry out this research, three groups of industrialized mortars with nominal strengths of 6 MPa, 8 MPa and 12 MPa of the FIDA brand were subjected to temperatures of 100 ° C, 200 ° C, 300 ° C, 400 ° C, 500 ° C, 600 ° C, 700 ° C, 800 ° C and 900 ° C inside an electric oven for a period of 4 hours. The mortars were molded in test specimens following Brazilian Standard NBR 13276. For each exposure temperature, 18 specimens were molded to expose the temperatures mentioned, with test ages of 28 and 91 days. The 18 specimens were distributed as follows: 6 6 MPa specimens, 6 8 MPa specimens and 6 specimens of 12 Mpa, resulting in 198 specimens at various exposure temperatures. Samples with a 28-day and 91-day assay were placed at a constant temperature of 25 ° C in the Civil Construction Materials Laboratory of the Federal University of Santa Maria before being placed in the electric oven. After the test ages, the test specimens were subjected to the mentioned exposure temperatures, within an electric oven, for a period of 4 hours. The samples were cooled to room temperature and subjected to tensile fracture and axial compression tests, following Brazilian Standard NBR 13279. The results showed a decrease in tensile strength in flexion and axial compressive strength. Samples that were submitted to temperatures of 100 ° C, 200 ° C, 300 ° C, 400 ° C, 500 ° C and 600 ° C, decreased their resistance but maintained their structural integrity. The specimens subjected to temperatures of 700 ° C, 800 ° C and 900 ° C, after being cooled to room temperature for more than 24 hours, crumbled into powder. These samples were subjected to X-ray fluorescence spectrometry tests determining to what proportion in terms of oxides are within the mortars. For the X-ray diffraction, samples were submitted to ambient temperature, 200 ° C, 600 ° C and 900 ° C, observing that there were phase changes in the crystal structure of the oxides, due to the stress in the mortars when subjected to high temperatures, maintaining its chemical composition up to 900 °C.

**Keywords:** Mortar; High Temperatures, Mechanical Resistance, Fluorescence, Diffraction.

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2. Objetivos Específicos.....	16
1.3 Estrutura do Trabalho.....	17
<b>2 ARGAMASSAS PARA ASSENTAMENTO.....</b>	<b>18</b>
2.1 Definição de argamassa.....	18
2.2 Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos.....	18
2.3 O uso do cimento nas argamassas.....	19
2.4 Formas de produção das argamassas.....	20
2.4.1 Argamassa dosada em central.....	20
2.4.2 Argamassa preparada em obra.....	20
2.4.3 Argamassa industrializada.....	20
2.4.4 Mistura semipronta para argamassa.....	22
2.5 Argamassa de assentamento.....	22
2.5.1 Argamassa de assentamento para alvenaria estrutural.....	22
2.5.2 Argamassa de assentamento para alvenaria de vedação.....	24
2.5.3 Argamassa de fixação ou encunhamento.....	25
<b>3. ESTUDO DAS ARGAMASSAS SUBMETIDAS A ALTAS</b>	
<b>TEMPERATURAS.....</b>	<b>26</b>
3.1 O fogo.....	26
3.2 O incêndio.....	27
3.3 Causas mais comuns dos incêndios em edificações.....	27
3.4 Evolução do incêndio em uma edificação.....	28
3.5 Resistência ao fogo de elementos construtivos em uma edificação.....	31
3.6 Importância em conhecer o comportamento das argamassas submetidas a altas temperaturas.....	32
3.7 Argamassas submetidas a altas temperaturas.....	32
3.7.1 Argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase.....	32
3.7.2 Argamassas com incorporação de fibra.....	37
3.7.3 Argamassas com adição vegetal.....	40

3.7.4 Argamassas com adição mineral.....	41
3.7.5 Argamassas como componente do concreto.....	43
3.8 Difração de raios X.....	44
3.8.1 Lei de Bragg.....	45
3.8.2 Redes de Bravais.....	46
3.8.3 Espectros gerados pelo difratômetro de raios X.....	47
3.8.4 Identificação de fases.....	48
3.9 Espectrometria de fluorescência de raios X.....	49
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
4.1 Especificações técnicas do fabricante da argamassa industrializada.....	50
4.2 Proporção da quantidade de água na argamassa industrializada.....	51
4.3. Determinação do índice de consistência.....	52
4.4. Moldagem dos corpos de prova.....	53
4.5 Amostras submetidas a Altas Temperaturas.....	55
4.6 Ensaio de Resistência à tração na flexão.....	55
4.7 Ensaio de Resistência à compressão axial.....	56
4.8 Ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X.....	58
4.8.1 Preparação das amostras.....	58
4.8.2 Equipamento utilizado.....	58
4.9 Análise da composição estrutural.....	59
4.9.1 Preparação das amostras.....	59
4.9.2 Descrição do equipamento utilizado.....	60
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>61</b>
5.1 Índice de consistência da argamassa.....	61
5.2 Análises das amostras após submetidas a altas temperaturas.....	62
5.3 Resistência à tração na flexão.....	63
5.4. Resistência à compressão axial.....	66
5.5 Análise de espectrometria de fluorescência de Raios X.....	68
5.6 Análise da difração de raios X.....	70
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição dos Cimentos Portland Comuns e Compostos.....	19
Quadro 2 – Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos.....	19
Quadro 3 - Composição das Argamassas ( $\text{kg/m}^3$ ) .....	34
Quadro 4 - Variação da Resistência à Flexão a 200 °C e 600 °C.....	35
Quadro 5 - Carga Máxima de perfuração para amostras expostas à Chama..	39
Quadro 6 - Propriedades mecânicas residuais das argamassas aquecidas....	43
Quadro 7 - Valores de Resistência Média à Compressão dos Corpos de Prova submetidos a 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C.....	44
Quadro 8 - Planejamento dos Ensaios.....	54
Quadro 9 – Medição do espalhamento com paquímetro.....	61
Quadro 10 – Perda de resistência à tração na flexão.....	65
Quadro 11 – Perda de resistência à compressão axial.....	68
Quadro 12 - Resultados das análises de espectrometria de fluorescência de raios X.....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1–Triângulo e Quadrado (Tetraedro) do fogo.....	27
Figura 2–Propagação do Calor por Condução.....	29
Figura 3 – Propagação do Calor por Convecção.....	30
Figura 4– Propagação do calor por Radiação Térmica.....	30
Figura 5 – Relação entre o ângulo de Bragg ( $\theta$ ) e o ângulo de difração medido experimentalmente ( $2\theta$ ).....	46
Figura 6– Redes de Bravais.....	46
Figura 7– Difratoograma de uma amostra de alumínio em pó.....	47
Figura 8– Esquema de fluorescência de raios X.....	49
Figura 9 - Saco de Argamassa Industrializada.....	51
Figura 10 - Molde Tronco-Cônico.....	52
Figura 11 – Mesa para leitura do índice de consistência da argamassa.....	52
Figura 12 – Paquímetro para medir o espalhamento do molde.....	53
Figura 13 - Molde Prismático de 40 mm x 40 mm x 160 mm.....	53
Figura 14 – Forno Elétrico.....	55
Figura 15 - Equipamento utilizado para o Teste de Resistência à Tração na Flexão.....	56
Figura 16 – Equipamento utilizado para o Teste de Resistência à Compressão Axial.....	57
Figura 17 -Amostra submetida ao teste de Resistência à Compressão axial.....	57
Figura 18 – Equipamento Bruker AXS S8 Tiger A15X10-A3E1A1-C2A1.....	59
Figura 19 – Equipamento de difração de raios X.....	60
Figura 20 – Amostras prismáticas esfareladas virando pó.....	62
Figura 21 - Resistência à Tração na Flexão para Argamassa de 6 Mpa.....	63
Figura 22 - Resistência à Tração na Flexão para Argamassa de 8 Mpa.....	64
Figura 23 - Resistência à Tração na Flexão para Argamassa de 12 Mpa....	64
Figura 24 - Resistência à Compressão Axial para Argamassa de 6 Mpa.....	64
Figura 25 - Resistência à Compressão Axial para Argamassa de 8 MPa.....	66
Figura 26 - Resistência à Compressão Axial para Argamassa de 12 Mpa...	67

Figura 27 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 28 dias submetida a Temperatura Ambiente.....	71
Figura 28 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 28 dias submetida a 200 °C.....	71
Figura 29 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 28 dias submetida a 600 °C.....	71
Figura 30 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 28 dias submetida a 900°C.....	71
Figura 31 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 28 dias submetida a Temperatura Ambiente .....	73
Figura 32 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 28 dias submetida a 200 °C .....	73
Figura 33 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 28 dias submetida a 600 °C.....	73
Figura 34 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 28 dias submetida a 900°C.....	73
Figura 35 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 28 dias submetida a Temperatura Ambiente .....	75
Figura 36 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 28 dias submetida a 200 °C .....	75
Figura 37 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 28 dias submetida a 600 °C.....	75
Figura 38 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 28 dias submetida a 900°C.....	75
Figura 39 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 91 dias submetida a Temperatura Ambiente.....	77
Figura 40 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 91 dias submetida a 200 °C.....	77
Figura 41 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 91 dias submetida a 600 °C.....	77
Figura 42 – Difratoograma da argamassa de 6 Mpa de 91 dias submetida a 900°C.....	77

Figura 43 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 91 dias submetida a Temperatura Ambiente.....	79
Figura 44 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 91 dias submetida a 200 °C.....	79
Figura 45 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 91 dias submetida a 600 °C.....	79
Figura 46 – Difratoograma da argamassa de 8 Mpa de 91 dias submetida a 900 °C.....	79
Figura 47 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 91 dias submetida a Temperatura Ambiente.....	81
Figura 48 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 91 dias submetida a 200 °C.....	81
Figura 49 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 91 dias submetida a 600 °C.....	81
Figura 50 – Difratoograma da argamassa de 12 Mpa de 91 dias submetida a 900 °C.....	81

## 1. INTRODUÇÃO

Instalações existentes podem tornar-se deficientes devido a várias razões como: projetos inadequados, erros de construção ou de uso e exposição a riscos naturais como terremotos ou fogo, etc.

Costa, Figueiredo e Silva (2002) mencionam que em situação de incêndio, as estruturas devem atender a um tempo mínimo (padrão) de resistência requerido por normas ou legislação, a fim de garantir a segurança na fuga dos ocupantes da edificação e, quando necessário, as operações de combate.

Ono (2004) refere que em uma situação de incêndio nos atemos principalmente em ações que protejam a vida humana devendo ser levado em consideração as condições do patrimônio em si

Quando a estrutura de uma edificação sofre um incêndio e não se consegue rapidamente conter o fogo, a resistência ao fogo dos elementos construtivos e a integridade estrutural são fundamentais para a proteção, principalmente de pessoas. Desta forma, é de vital importância que todo o material projetado para ser usado em construções e instalações precise passar por uma avaliação do seu comportamento à altas temperaturas.

Vários elementos da edificação são comprometidos em um incêndio, como as argamassas, que ao serem submetidas a altas temperaturas, sofrem principalmente diminuição da sua resistência à tração e à compressão axial. Esta diminuição na sua resistência pode provocar, por exemplo, o colapso de uma estrutura de alvenaria assentada e revestida com argamassa convencional. Existem alguns estudos que tratam da incorporação de diversos materiais dentro das argamassas para fortalecê-las contra incêndios, de tal forma que aumente sua resistência ao fogo. Desta maneira, os ocupantes da edificação terão um tempo maior para poder escapar com segurança. Esta possibilidade poderia ser bem aceita em todas as obras de construção civil, se o custo para este tipo de argamassas especiais não onerasse demais o custo final da obra, quando comparado com os custos da argamassa convencional.

Desta forma, o estudo do comportamento de argamassas convencionais de diversas resistências, existentes atualmente no mercado, quando submetidas ao fogo, é de grande importância para observar seu comportamento quando se encontram submetidas a altas temperaturas.

## 1.1. Justificativa

Quando acontece um incêndio em uma edificação, vários elementos estruturais são afetados, um deles são as argamassas de assentamento, as quais são utilizadas para juntar blocos e tijolos. Para realizar esta pesquisa foram usadas argamassas industrializadas de assentamento para alvenaria estrutural. Quando este tipo de argamassa é submetido a altas temperaturas, acontece uma diminuição na sua resistência à tração na flexão e na compressão axial, durante o incêndio ou após, provocando em diversas ocasiões o colapso da alvenaria que este material sustenta. Na alvenaria estrutural, uma falha nas paredes de alvenaria devido a um incêndio, em decorrência do uso deste tipo de argamassa, geraria danos estruturais maiores em comparação com as argamassas de assentamento utilizadas para alvenarias de vedação. Atualmente, existem, poucas pesquisas sobre o comportamento das argamassas de assentamento utilizadas na alvenaria estrutural, sem o incremento de nenhum aditivo, quando submetidas a altas temperaturas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar as alterações nas propriedades físicas, químicas e mecânicas das argamassas industrializadas de assentamento de 6 Mpa, 8Mpa e 12 Mpa, quando submetidas a altas temperaturas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar a perda de resistência à tração na flexão das argamassas.

Avaliar a perda da resistência à compressão axial das argamassas.

Analisar as possíveis alterações físico/químicas devido às diferentes temperaturas de exposição.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Com a finalidade de melhor organizar e contextualizar os elementos a serem pesquisados e discutidos, o trabalho foi dividido em seis capítulos, além das Referências Bibliográficas.

O primeiro capítulo faz uma breve introdução e contextualização do problema, apresentando a relevância do tema, além de apresentar os objetivos e justificativa desta pesquisa.

O segundo capítulo relaciona os estudos do comportamento das argamassas na temperatura ambiente, descrevendo a noção sobre argamassas, seus componentes e tipos.

O terceiro capítulo apresenta uma revisão sobre argamassas submetidas a altas temperaturas, tratando sobre o incêndio em uma edificação, a resistência ao fogo dos principais elementos estruturais de uma edificação, a importância em conhecer o comportamento das argamassas submetidas a altas temperaturas.

O quarto capítulo menciona os Materiais e Métodos utilizados para realizar este trabalho.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios de laboratório e da análise destas informações.

O sexto capítulo mostra as conclusões do trabalho.

Ao final são apresentadas as Referências Bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento da presente pesquisa.

## 2 ARGAMASSAS PARA ASSENTAMENTO

### 2.1 Definição de argamassa

A NBR 13281 (2001, p. 2) define argamassa da seguinte forma “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, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria [...]”.

Segundo a NBR 7200 (1998, p. 2) define argamassa inorgânica ou argamassa para revestimento nestes termos “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”.

### 2.2 Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

O Boletim Técnico 106 da ABCP (2002, p. 21) mostra de forma simplificada no Quadro 2 como os diversos tipos de cimentos agem sobre as argamassas e concretos de função estrutural.

O Quadro 1 mostra como é necessário ter uma dosagem ideal dos componentes das argamassas e concretos a partir do cimento escolhido e do traço definido no projeto. As causas principais de problemas nas argamassas e concretos são devidas ao adensamento e curas realizadas incorretamente. Alguns destes problemas são: a baixa resistência, aparecimento de trincas e fissuras, corrosão da armadura no interior do concreto, descolamento da argamassa, etc. Um bom adensamento se obtém através de uma vibração adequada e uma cura correta mantendo as argamassas e os concretos úmidos após a pega, molhando-os com uma mangueira ou com um regador, ou então cobrindo-os com sacos molhados, de tal forma que se impeça a evaporação da água pelo vento ou pelo calor do sol, durante um período mínimo de sete dias.

Quadro 1 – Influência dos tipos de cimento nas argamassas e concretos

Propriedade	Tipo de Cimento Portland						
	Comuns e Compostos	Alto-Forno	Pozolânico	Alta Resistência Inicial	Resistente aos Sulfatos	Branco Estrutural	Baixo Calor de Hidratação
Resistência a Compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Menor nos primeiros dias e maior no final da cura	Muito maior nos primeiros dias	Padrão	Padrão	Menor nos primeiros dias e padrão no final da cura
Calor gerado na reação do cimento com água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
Resistências aos agentes agressivos (água de mar e de esgotos)	Padrão	Maior	Maior	Menor	Maior	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior	Padrão	Maior

Fonte: (Boletim Técnico 106, ABCP, 2002, p. 21)

### 2.3. O uso do cimento nas argamassas

O Boletim Técnico 106 da ABCP (2002, p.23 e 24) aponta quais tipos de cimento disponíveis no mercado podem ser usados nas mais diferentes aplicações (Quadro 2).

Quadro 2 – Aplicações dos diversos tipos de cimentos portland em argamassas

Aplicação	Tipos de Cimento Portland
Argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e blocos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto Forno (CP III) e Pozolânico (CP IV).
Argamassa de assentamento de azulejos e ladrilhos	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) e Pozolânico (CP-IV)
Argamassa de rejuntamento de azulejos e ladrilhos	Branco (CPB)
Argamassa Armada (*)	Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F) de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) e Branco Estrutural (CPB Estrutural)
Argamassas e concretos para meios agressivos (água de mar e esgotos)	de Alta Forno (CP III) Pozolânico (CP IV) e Resistente a Sulfatos

Fonte: (Boletim Técnico 106, ABCP, 2002, p. 23 e 24)

(\*) dada a pouca experiência que se tem no Brasil sobre o uso do CP III e do CP IV na argamassa armada deve-se consultar um especialista antes de especificá-los para esse uso.

## 2.4. Formas de Produção das argamassas

Podem ser argamassas dosadas em central de preparo, preparada em obra, industrializada ou de mistura semipronta.

### 2.4.1 Argamassa dosada em Central

Definida pela NBR 13529 (1995, p.4) como: “Argamassa simples ou mista, cujos materiais constituintes são medidos em massa”.

É aquele tipo de argamassa dosada em centrais de preparo e transportada até o canteiro de obras em caminhões-betoneira.

### 2.4.2 Argamassa preparada em Obra

A NBR 13529 (1995, p. 4) a define desta forma: “Argamassa simples ou mista cujos materiais constituintes são medidos em volume ou massa e misturados na própria obra”.

É aquela argamassa preparada na obra, que tem um menor custo que as argamassas prontas industrializadas, porém, na maioria das vezes, resulta ser de qualidade inferior ao especificado no projeto.

### 2.4.3 Argamassa industrializada

A NBR 13529 (1995, p.4) define a argamassa industrializada desta forma:

Produto proveniente da dosagem controlada, em instalação própria, de aglomerante(s) de origem mineral, agregado(s) miúdos e eventualmente aditivo(s) e adição(ões) em estado seco e homogêneo, ao qual o usuário somente necessita adicionar a quantidade de água requerida.

Como a norma indica, este tipo de argamassas é fabricado em complexos industriais, onde os agregados miúdos, os aglomerantes e os aditivos, são selecionados e misturados a seco, por processos industriais mecanizados e controles rígidos.

Coutinho, et. al. (2013) descreve a incidência da argamassa preparada em obra e da argamassa industrializada para assentamentos de blocos de vedação. As análises de laboratório, mostraram que as duas argamassas estudadas apresentam características parecidas no estado fresco, entretanto no estado endurecido essas características diferem. Os resultados mostraram altos índices de resistência a tração na flexão e a compressão apresentadas pela argamassa feita em obra, o que sugere o uso excessivo de cimento em sua formulação. Este fato mostra que a empresa contratante pode estar gerando um gasto desnecessário com cimento. Esta pesquisa conclui que o uso de argamassas preparadas em obra através dos resultados obtidos nos ensaios realizados a ineficiência da Norma Brasileira para a classificação das argamassas quanto ao seu uso.

Cascudo, et al. (2007) apresenta o método de ensaio de avaliação de consistência de argamassa industrializada pela penetração do Cone, conforme a Norma ASTM C780, como proposta de seu emprego para a realização do controle de produção, em obra de argamassas industrializadas destinadas ao revestimento de paredes e tetos. Os pesquisadores propõem que cada fabricante devesse estudar e fornecer o índice de consistência adequado para sua argamassa. Tal índice deverá ser fixado com base nas características intrínsecas do material, além das condições de obra onde a argamassa será empregada. As condições climáticas, o tipo de misturador e o tempo de mistura podem influenciar os resultados. Os resultados obtidos desta pesquisa mostram a potencialidade do método de penetração do cone com vistas ao controle de argamassas industrializadas em obra, em especial por sua boa sensibilidade em detectar alterações da consistência da mistura fresca, alterações decorrentes principalmente das variações no teor de água da argamassa.

Romano, et al. (2010) menciona que as formulações de argamassas industrializadas, afetam significativamente as variações do teor de ar no revestimento, nas condições de preparo em obra. Os pesquisadores finalizam o estudo com a necessidade de adequação entre o equipamento de mistura e a formulação da argamassa, para obter argamassas de revestimento menos sensíveis ao processo de mistura.

Argamassas industrializadas apresentam uma grande uniformidade na dosagem o que permite a repetição de um determinado traço com um alto grau de confiança. Podendo ser vendido de duas formas:

#### a) Argamassa industrializada em sacos

São ensacadas para venda ao público. Pode ser preparada na obra adicionando água conforme o traço. Se os sacos são alocados com antecedência, o preparo pode ser feito no momento da aplicação com auxílio de misturadores, geralmente de eixo horizontal.

#### b) Argamassas industrializadas em silos

As argamassas são armazenadas em silos metálicos que são levados por caminhões até as obras. Para utilização na obra, a argamassa é bombeada a seco até o pavimento. Depois é adicionada água próximo ao local de uso. Outra forma de hidratar esta argamassa é adicionar água na boca do silo e entregá-la pronta no local de aplicação.

### 2.4.4 Mistura semipronta para argamassa

Geralmente é um aglomerante hidráulico aditivado, misturado com outras matérias primas selecionadas. Esta mistura semipronta é combinada com água e areia em obra, até virar uma argamassa homogênea, conforme o traço sugerido em função da sua utilização.

## 2.5 Argamassa de Assentamento

A argamassa de assentamento para alvenaria é utilizada para a união dos tijolos ou blocos na elevação das paredes e muros.

### 2.5.1 Argamassa de assentamento para alvenaria estrutural

Ramalho e Corrêa (2003, p. 7 e p. 8) definem a argamassa de assentamento para alvenaria estrutural desta maneira:

A argamassa de assentamento possui as funções básicas de solidarizar as unidades, transmitir e uniformizar as tensões entre as unidades de alvenaria,

absorver pequenas deformações e prevenir a entrada de água e de vento nas edificações. Usualmente composta de areia, cimento, cal e água, a argamassa deve reunir boas características de trabalhabilidade, resistência, plasticidade e durabilidade para o desempenho de suas funções.

Pela definição, a característica principal da argamassa de assentamento da alvenaria estrutural é a mesma que a alvenaria de vedação. Apenas o traço deve ser mudado. Sua finalidade também é ligar os blocos, transmitir e uniformizar as tensões entre as unidades de alvenaria.

Ishikawa (2003) pesquisou as propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. O tipo de areia artificial utilizado foi um material de rejeito encontrado nas pedreiras oriundas da britagem de rocha para a produção de agregado graúdo para concreto. Foram utilizados 11 tipos de argamassas onde foram avaliadas suas propriedades físicas, no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados obtidos com argamassas em cuja composição tem-se areia artificial de granito apresentaram quase o mesmo desempenho que as argamassas com areia de rio

Casali (2008) estudou a interação entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto. Para realizar esta experiência foram utilizados quatro tipos de argamassas diferentes (argamassa mista – cimento e cal – com e sem aditivo e argamassa de cimento com e sem aditivos) e dois blocos de concreto de fabricantes distintos. Foi avaliada a interação entre os diferentes tipos de argamassa no estado fresco em conjunto com os dois tipos de blocos, medindo a quantidade de transferência de água proveniente de cada tipo de argamassa e a sucção de cada bloco de concreto. No estado endurecido foi avaliada a resistência da aderência na flexão em cada face do bloco de concreto. Com estas análises observou-se que existe uma maior resistência de aderência entre a argamassa de assentamento e o bloco de concreto quando existe uma combinação ideal entre os dois elementos.

Soto (2011) estudou a alteração de compressão em paredes de alvenaria estrutural devida ao lançamento da argamassa de assentamento apenas nas laterais dos blocos em comparação com o lançamento total e a inserção de peças de ajuste dimensional para o acerto de modulações de paredes de alvenaria. Os resultados dos ensaios à compressão dos elementos demonstraram que o efeito do tipo de

argamassamento influenciou notavelmente na resistência à compressão da alvenaria, apresentando melhor desempenho o argamassamento total.

Nascimento (2015) investigou o comportamento estrutural à compressão da alvenaria de blocos estruturais cerâmicos considerando o preenchimento dos furos com argamassa de assentamento. Para atingir o objetivo do trabalho, relacionou-se a caracterização dos blocos, argamassas e grautes com as propriedades mecânicas dos prismas. A análise foi dividida em três Etapas: referência, argamassa Mista e argamassa Industrializada. Para a moldagem dos prismas, utilizaram-se três blocos de geometrias distintas; três traços de argamassas mistas; três traços de argamassas industrializadas e três traços de grautes, com resistências distintas. As desta pesquisa mostraram o aumento na resistência à compressão dos prismas usando argamassa como preenchimento estrutural, mas tomando em consideração que a escolha entre os componentes dos prismas seja a mais adequada.

#### 2.5.2 Argamassa de assentamento para alvenaria de vedação

A argamassa de assentamento em uma parede vertical não tem função estrutural e só cumpre um papel de ligação entre os blocos.

A NBR 8545 (1984, p.10) apresenta as características da argamassa de assentamento para alvenaria de vedação. Esta norma fixa as condições exigíveis para execução e fiscalização de alvenaria sem função estrutural de componentes cerâmicos.

Silva (2004) especifica que a argamassa de assentamento para alvenaria de vedação no estado fresco deve possuir estas características fundamentais: trabalhabilidade, capacidade de retenção de água, aderência, resistência mecânica, resiliência, retração na secagem e durabilidade.

Trabalhabilidade refere-se à plasticidade ou maleabilidade do material no estado fresco. A relação água/cimento, a relação aglomerante / areia e a granulometria do agregado miúdo (areia) são determinantes na plasticidade da argamassa de assentamento.

Capacidade de Retenção da água é importante para melhorar a plasticidade, mas também para prolongar a vida útil e garantir que os componentes cimentícios da argamassa estejam hidratados.

Aderência entre o bloco e a argamassa é fundamental, já que a argamassa penetra nos poros do bloco mantendo a união entre as unidades de alvenaria.

Resiliência refere-se à elasticidade ou a capacidade do material em se deformar retornando às dimensões originais. É importante para manter a estanqueidade na parede e evitar fissuras.

Retração na secagem influencia na deformação da alvenaria pela evaporação da água quando se hidrata o cimento.

Durabilidade é a manutenção de sua integridade quando se encontra exposta a chuvas, calor, etc.

A argamassa de assentamento pode ser preparada em obra ou de forma industrializada com seu traço especificado no projeto. Deve-se ter em consideração que as argamassas industrializadas têm como característica principal o módulo de elasticidade maior que a argamassa preparada em obra. Isto acontece devido a incorporação de aditivos, na argamassa industrializada, durante seu processo de fabricação. Também é preparada de forma diferente da argamassa preparada no canteiro de obras. Sua mistura é feita em uma argamassadeira de eixo horizontal, para assegurar a incorporação de ar dentro de suas características.

### 2.5.3 Argamassa de fixação ou encunhamento

É a ligação direta da alvenaria com a estrutura de concreto. Neste local podem acontecer fissuras devido a dois motivos: quando a estrutura transmite os esforços a qual está submetida para alvenaria e pela retração da argamassa quando esta seca.

Silva (2007) comenta que, para evitar as fissuras nesta parte da construção, a argamassa utilizada deverá possuir grande plasticidade, baixo módulo de elasticidade para absorver cargas provenientes da movimentação estrutural e maximizar a aderência.

### 3. ESTUDO DAS ARGAMASSAS SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

Neste capítulo serão mostradas as diferenças entre fogo e incêndio, as causas mais comuns dos incêndios em edificações, a evolução de um incêndio em uma edificação, a importância em conhecer o comportamento das argamassas quando submetidas a altas temperaturas e uma revisão bibliográfica sobre este capítulo.

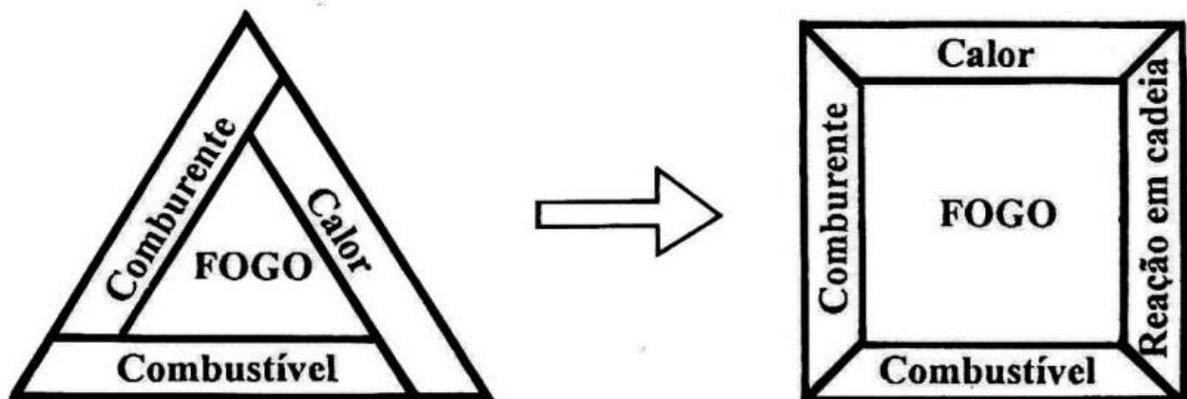
#### 3.1 O fogo

A NBR 13860 (1997, p. 6) define o fogo como “O processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”. Nos Estados Unidos a norma da NFPA (apud Azevedo, 2013, p. 2) diz o seguinte “É a oxidação rápida autossustentada acompanhada de evolução variada da intensidade de calor e de luz”. Na Inglaterra a norma BS 4422: Part. 1 (apud Azevedo, 2013, p.2) revela que: “É o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado por fumaça, chama ou ambos”.

Souza (2014) explica que o fogo é uma reação exotérmica de um combustível com o oxigênio resultando em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e água mais energia em forma de calor e de luz. Para que aconteça uma combustão são necessários apenas 3 elementos: combustível, comburente (oxigênio) e calor. (Observar a Figura 1)

- Combustível: Refere-se a todo material que queima. Podendo estar nos estados sólido, líquido ou gasoso
- Comburente (Oxigênio): Elemento ativador do fogo. O oxigênio reage com o combustível produzindo o fogo
- Calor: É o elemento que inicia e mantém o fogo
- Reação em cadeia: Os combustíveis geram calor, despreendendo gases ou vapores combustíveis até que a reação seja extinta por ação externa. Portanto seria uma transformação gerando outra transformação. A figura 1 mostra o triângulo do fogo e o tetraedro do fogo com os elementos necessários para iniciar e manter uma reação de combustão.

Figura 1 – Triângulo e Quadrado (Tetraedro) do fogo



Fonte: (Souza, 2014, p. 18)

### 3.2 O incêndio

O incêndio, definido pela NBR 13860 (1997, p. 7), “É o fogo fora de controle” a norma ISO 8421-1 (apud Azevedo, 2013, p.6) o descreve assim: “É a combustão rápida disseminando-se de forma descontrolada no tempo e no espaço”. Estas definições mostram que o fogo descontrolado, no caso de uma edificação, seria bastante prejudicial para as estruturas expostas e para os seres vivos.

### 3.3 Causas mais comuns dos incêndios em edificações

Gomes (2014) classificou as causas dos incêndios em edificações de duas formas:

- Por causas naturais: Quando é originado por fenômenos da natureza, sem a intervenção humana. Por exemplo: descargas elétricas naturais (raios), calor gerado pelo sol (raios solares), combustão espontânea (fibras de juta, resíduos de algodão, feno, carvão, panos ou estopas impregnados de óleo vegetal, pólvora, etc.), terremotos, vulcões, meteoros, etc.
- Por causas artificiais: Originado pela ação do homem. Isto pode acontecer de forma acidental ou de forma intencional.

#### a) De forma acidental

São aqueles fatores que fogem ao nosso controle e acontecem por uma fatalidade. Por exemplo:

- Riscos elétricos: Curto circuito, excesso de carga, mau contato, superaquecimento.
- Riscos mecânicos: atrito entre superfícies, centelha ou faísca (fenômeno luminoso que acompanha uma descarga elétrica), chama exposta (cigarros, velas, balões, fogos de artifício, palitos de fósforos acesos, etc.).
- Riscos químicos: É uma combinação de substâncias em que ocorre uma combustão, independentemente de uma fonte externa de calor. Podem liberar calor excessivo. Por exemplo: sódio mais água, ácido mais água, cal viva mais água, etc.

#### b) De forma intencional

Os incêndios que acontecem de forma intencional são provocados por ações criminosas de indivíduos sem escrúpulos. Por exemplo: atentados terroristas, vingança, alguns donos de imóveis que provocam incêndios de propósito na sua propriedade para obter os lucros do seguro contra incêndios, etc.

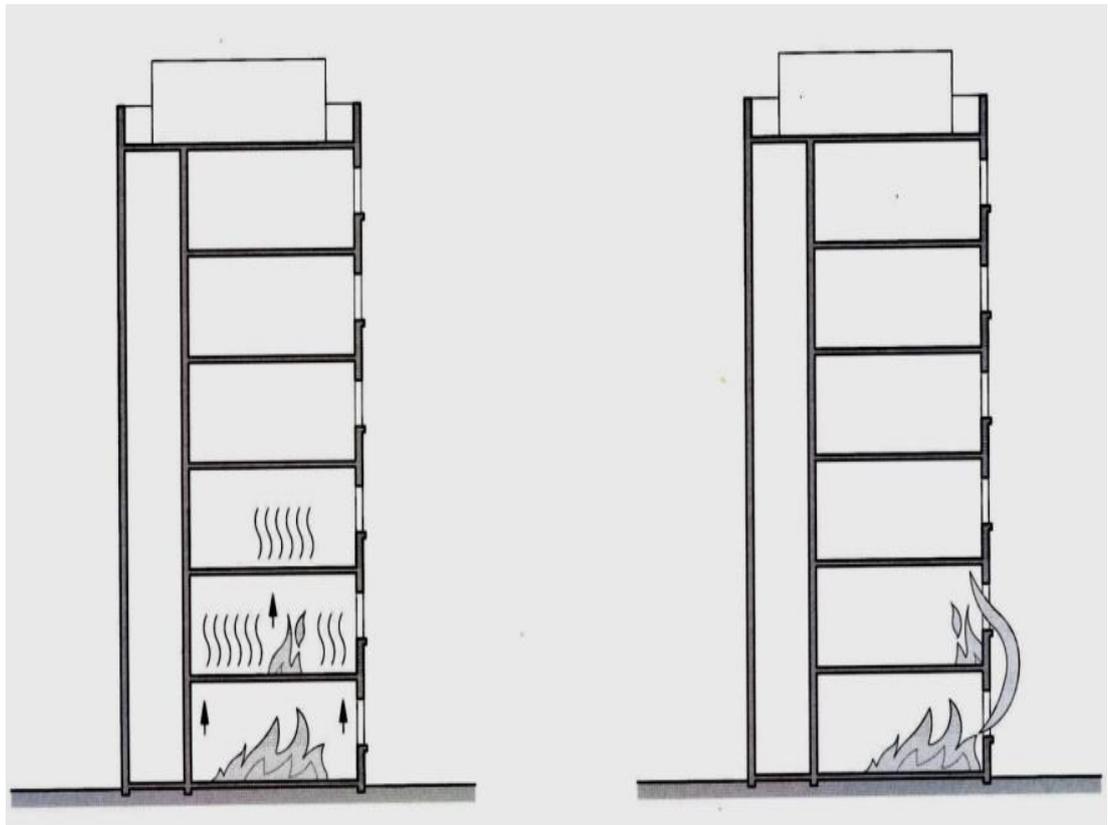
### 3.4 Evolução do Incêndio em uma edificação

Ono (2007) menciona que um incêndio pode provocar colapso da edificação, mais o pior fenômeno que pode acontecer é espalhar o incêndio para edifícios vizinhos.

Brentano (2007) especifica que a propagação do calor em uma edificação envolvida em um incêndio se dá pelos seguintes mecanismos:

(a) Por condução: quando os materiais submetidos ao calor durante o incêndio vão aquecendo outros materiais por contato direto ou por contato indireto da chama em um incêndio (Figura 2).

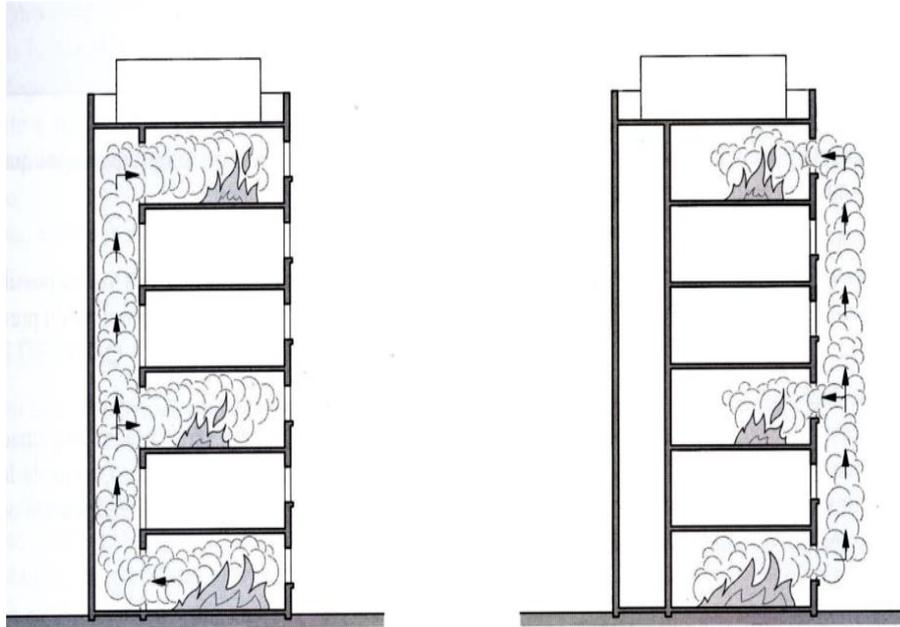
Figura 2 – Propagação do calor por condução



Fonte: (BRENTANO, 2007, p.98)

(b) Por convecção: quando os gases quentes do edifício vão circulando dentro da edificação incendiada, aquecendo os materiais até seus pontos de combustão. A transferência do calor de uma região para outra, através do transporte de matéria (ar ou fumaça) se processa em decorrência da diferença de densidade do ar, que ocorre com a absorção ou perda de calor. O ar quente sempre subirá. É o processo pelo qual o calor se propaga nas galerias ou janelas dos edifícios em chamas. O vento externo oxigena o fogo, acelerando ainda mais a propagação do incêndio (Figura 3).

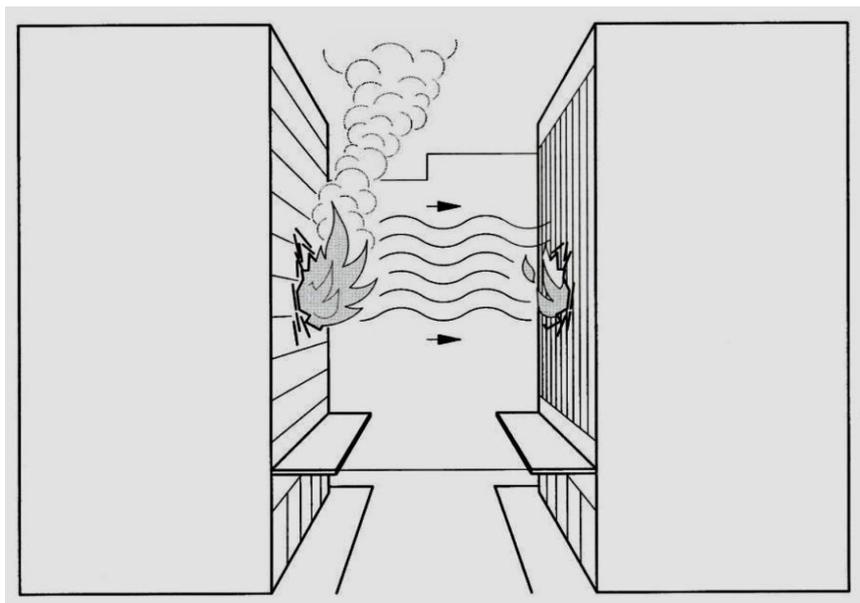
Figura 3 – Propagação do calor por convecção



Fonte: (BRENTANO, 2007, p.99)

(c) Por radiação térmica: emitida pelo edifício incendiado, através de aberturas existentes na própria edificação ou abertas pelas chamas para as edificações vizinhas (Figura 4).

Figura 4 – Propagação do calor por radiação térmica



Fonte: (BRENTANO, 2007, p.98)

### 3.5 Resistência ao fogo de elementos construtivos em uma Edificação

A NBR 15575-1 (2010, p. 15), que trata de desempenho de edifícios habitacionais, fixa as exigências quanto à segurança contra incêndio e menciona que estas exigências são pautadas pela NBR 14432 (2001).

A NBR 14432 (2000, p. 3) define desta forma a resistência ao fogo de elementos construtivos: “propriedade de um elemento de construção de resistir à ação do fogo por determinado período, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável”.

Para avaliar e classificar a resistência ao fogo em um incêndio dos elementos construtivos de uma edificação, tipo portas, janelas, paredes, pisos, etc., se devem cumprir certos requisitos fundamentais que são descritos a seguir (ONO, 2007, p.104):

- (a) estanqueidade: permite avaliar se as chamas e os gases quentes desenvolvidos no interior do ambiente em combustão são liberados por fissuras ou aberturas no elemento construtivo, podendo expor as pessoas e os objetos que se encontram na face não exposta ao fogo aos efeitos do incêndio;
- (b) isolamento térmico: permite avaliar se o calor transmitido por radiação e condução através da superfície do elemento construtivo pode ameaçar a segurança das pessoas e dos objetos que se encontram na face não exposta ao fogo aos efeitos do incêndio; e
- (c) estabilidade: permite avaliar se o elemento ou sistema construtivo não perde seu caráter funcional (seja este portante ou simplesmente de vedação), ou seja, não apresenta ruína durante o tempo de ensaio.

A carga de incêndio é definida desta forma pela NBR 14432 (2000, p.2): “Soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos”. É um fator importante porque mede o risco de incêndio num ambiente, pela quantidade de materiais combustíveis existentes no local.

Existe uma relação direta entre a intensidade que um incêndio pode alcançar com a quantidade de materiais combustíveis existentes num compartimento. Desta maneira, a carga de incêndio permite definir no projeto os elementos construtivos que

serão empregados na construção da edificação e os sistemas de proteção contra incêndios compatíveis com aquele risco.

‘ Este problema resulta da resistência em vários países do mundo em adotar os ensaios de laboratório padronizados. Sendo realizados em sua grande maioria de forma regional.

### 3.6 Importância em conhecer o comportamento das argamassas submetidas a altas temperaturas

Sendo a argamassa um elemento estrutural que é usado principalmente para assentamentos e revestimentos, possui uma grande importância quando a edificação é submetida a uma situação de incêndio.

Leite (2018) menciona que a argamassa usada para assentamento de alvenaria, em uma situação de incêndio, precisa ser determinada sua resistência ao fogo para diversas temperaturas de exposição, para poder avaliar se as juntas que unem os tijolos ou blocos das paredes de alvenaria terão a capacidade de manter a integridade estrutural durante e após o incêndio.

Rossemann (2011) especifica que quando a argamassa é usada como revestimento, sendo exposta a uma situação de incêndio, é necessário estudar a contribuição que possa vir a trazer para evitar a propagação das chamas ou sustentar a combustão. Este fato permite ganhar mais alguns minutos, dando mais tempo para as pessoas poderem fugir.

Estas duas aplicações das argamassas submetidas a altas temperaturas podem ser avaliadas em laboratórios, obtendo-se assim subsídios para a seleção de materiais na fase de projeto da edificação.

### 3.7 Argamassas submetidas a altas temperaturas

Existem muitas pesquisas sobre argamassas submetidas a altas temperaturas, que serão mencionadas na sequência.

### 3.7.1 Argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase

Cunha, et al. (2014) estudaram as argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase, cujas siglas em inglês são PCM (Phase Change Materials). Os materiais de mudança de fase têm a função de regular as flutuações de temperatura.

A argamassa com incorporação de PCM tem a capacidade de regular a temperatura no interior de edifícios, contribuindo para o conforto térmico e redução do uso de equipamento de aquecimento e de arrefecimento, utilizando apenas a energia fornecida pelo sol. Materiais de mudança de fase possuem a capacidade de alterar o seu próprio estado em função da temperatura ambiente. Esta aplicação pode ser feita em argamassas de revestimento de edifícios, com a vantagem da regulação passiva da temperatura interna com o aumento da inércia térmica.

Para este estudo foram desenvolvidas diferentes argamassas com diversos conteúdos de PCM. Os ligantes utilizados para esta experiência foram cal aérea, cal hidráulica, gesso e cimento. A proporção de PCM estudada foi de 0% e 40% da massa de areia. Foi possível observar que a exposição a altas temperaturas em geral leva a uma diminuição das propriedades mecânicas das argamassas estudadas. As composições utilizadas têm diferentes conteúdos de PCM e diferentes ligantes. A fim de ultrapassar alguns dos problemas relacionados com a baixa resistência a flexão e compressão verificadas nas argamassas de cal aérea com incorporação de microcápsulas de PCM, optaram-se por incorporar um maior teor de aglutinante. As composições estudadas são apresentadas na Quadro 05

Os testes foram realizados em moldes submetidos a elevadas temperaturas dentro de um forno durante um período de 4 horas. Cada composição foi testada em três faixas de diferentes temperaturas. As temperaturas utilizadas foram 20 °C (temperatura de referência), 200 °C e 600 °C.

Em relação às argamassas de referência (0% de PCM), foi possível verificar uma diminuição na resistência à flexão causada pela exposição a altas temperaturas. Verificou-se também que para uma temperatura de 200 °C estas não exibem uma diminuição considerável na resistência à flexão, com exceção da argamassa a base de gesso. No entanto, na análise da temperatura a 600 °C foi possível observar que a perda sofrida na resistência a flexão é mais significativa, em alguns casos foi verificada a destruição total das amostras, devido a sua resistência nula (Quadro 3).

Para as argamassas com a incorporação de 40% de PCM a 20 °C, foi possível observar uma resistência a flexão mais baixa do que nas argamassas de referência (0% PCM). Esta diminuição pode ser explicada pelo aumento da quantidade de água nas composições com incorporação de PCM. Foi notado que o aumento de teor de água nas argamassas com a adição de PCM provocou um aumento na porosidade o que levou a uma diminuição da sua resistência (Quadro 3).

Quadro 3 - Composição das argamassas (kg/m<sup>3</sup>)

Composição	Ligante		Areia	PCM	SP	Fibras	Água/ Ligante
CA500-0PCM	Cal aérea	500	1447,2	0	15	0	0,45
CA800-40PCM	Cal aérea	800	451,2	180,5	24	0	0,34
CA800-40PCM-F	Cal aérea	800	425,2	170,1	24	8	0,36
CH500-0PCM	Cal hidráulica	500	1351,1	0	15	0	0,54
CH500-40PCM	Cal hidráulica	500	571,6	228,6	15	0	0,62
CH500-40PCM-F	Cal hidráulica	500	567,2	226,9	15	5	0,62
C32.5N500-0PCM	Cimento II B-L 32.5N	500	1418,8	0	15	0	0,55
C32.5N500-40PCM	Cimento II B-L 32.5N	500	644,3	257,7	15	0	0,56
C32.5N500-40PCM-F	Cimento II B-L 32.5N	500	622,2	248,8	15	5	0,59
G5000-PCM	Gesso	500	1360,4	0	15	0	0,56
G500-40PCM	Gesso	500	540,1	216,0	15	0	0,70
G500-40PCM-F	Gesso	500	535,8	214,3	15	5	0,70

Fonte: (CUNHA, et al., 2011, p. 3)

A adição de fibras em argamassas com PCM forneceu efeitos diferentes na resistência à flexão tomando em conta o ligante utilizado. Desta forma foi possível verificar que o ligante mais sensível das argamassas submetidas a 200 °C e 600 °C por comparação com os valores das argamassas expostas a uma temperatura de 20 °C foi a cal aérea, porque houve uma destruição total das amostras. O ligante com

melhor comportamento e conseqüentemente com menores perdas de resistência foi o cimento (Observar Quadro 4).

Os testes de resistência à compressão foram realizados colocando uma carga sobre a amostra utilizando uma peça metálica e rígida de modo a fazer uniforme a carga vertical. As amostras utilizadas para o teste foram as partes resultantes do ensaio de flexão. Os testes de compressão foram realizados com um controle de carga, a uma velocidade de 150 N/s. Foi possível verificar uma diminuição na resistência à compressão provocada pela exposição às altas temperaturas.

As argamassas com ligantes a base da cal aérea e de cal hidráulica, quando expostos a uma temperatura de 200 °C mostraram uma melhoria na sua resistência à compressão, no entanto para uma temperatura de 600 °C a resistência a compressão diminui (Quadro 4).

As argamassas com ligantes a base de gesso e cimento apresentam uma diminuição na resistência à compressão para uma temperatura de 200 °C. Para uma temperatura de 600 °C é possível que ocorra o processo de desidratação dos ligantes, aumentando ainda mais a perda de resistência (Quadro 4).

Quadro 4 – Variação da Resistência a Flexão a 200 °C e 600 °C

Composição	Ligante	Variação da Resistência a Flexão a 200 °C (%)	Variação da Resistência a Flexão a 600 °C (%)
CA500-0PCM	Cal aérea	4	-75
CA800-40PCM	Cal aérea	-100	-100
CA800-40PCM-F	Cal aérea	-25	-100
CH500-0PCM	Cal hidráulica	8	-87
CH500-40PCM	Cal hidráulica	-24	-100
CH500-40PCM-F	Cal hidráulica	-26	-100
C32.5N500-0PCM	Cimento II B-L 32.5N	-3	-75
C32.5N500-40PCM	Cimento II B-L 32.5N	-56	-96
C32.5N500-40PCM-F	Cimento II B-L 32.5N	-47	-94
G5000-PCM	Gesso	-31	-80
G500-40PCM	Gesso	-51	-90
G500-40PCM-F	Gesso	-60	-94

O PCM deve ser encapsulado, para sua correta utilização, em caso contrário, durante a fase líquida há uma possibilidade que ele se mova para a área original de aplicação. Existem duas formas de encapsulação, microencapsulação e macroencapsulação. A macroencapsulação é baseada na introdução de PCM em tubos, painéis ou outros grandes recipientes. Geralmente é feito em recipientes com mais de 1 cm de diâmetro apresentando uma melhor compatibilidade com o material, melhorando o manuseio na construção. A microencapsulação do material de mudança de fase consiste em cobrir as partículas de material, geralmente um polímero. É uma cápsula comumente conhecida, com dimensões entre 1  $\mu\text{m}$  e 60  $\mu\text{m}$ . A vantagem deste processo de encapsulamento é a melhoria da transferência de calor através de sua grande área de superfície.

Uma das conclusões deste estudo estabelece que a adição de microcápsulas de PCM em argamassas diminui a resistência mecânica para todas as faixas de temperatura estudadas. Por outro lado, adição de fibras, na maioria dos casos, melhora o desempenho das argamassas, com exceção das argamassas à base de gesso. As argamassas à base de cimento são as que têm uma menor sensibilidade à exposição a altas temperaturas, apresentando conseqüentemente um melhor desempenho. Além disso, as argamassas a base de cal aérea mostraram maior deterioração, apresentando um comportamento sensível a temperaturas elevadas.

Uma outra conclusão afirma que a incorporação de microcápsulas de PCM em argamassas traz um benefício social, econômico e ambiental, já que demonstra uma contribuição significativa para a construção com um valor mais elevado de sustentabilidade. Os benefícios sociais derivam do conforto térmico que aumenta no interior dos edifícios. Hoje em dia, este é um requisito importante e frequentemente exigido por compradores e vendedores potenciais como um parâmetro essencial de decisão. Aumenta-se o conforto térmico pela capacidade térmica do PCM, permitindo armazenamento e liberação de energia, mantendo o interior a temperaturas constantes, ou pelo menos com uma menor variação. No aspecto ambiental se diminui o uso de combustíveis fósseis, dado que esta tecnologia tem por objetivo manter temperaturas constantes dentro do edifício, levando conseqüentemente a utilizar menos o equipamento de ar condicionado. O benefício econômico está relacionado com os custos de adequação para implementar esta tecnologia. Estes devem ser facilmente amortizados pelo usuário. Também se pode observar os benefícios econômicos na redução de energia de consumo com o uso de PCM.

A argamassa com incorporação de PCM tem a capacidade de regular a temperatura no interior de edifícios, contribuindo para o conforto térmico e redução do uso de equipamento de aquecimento e de arrefecimento, utilizando apenas a energia fornecida pelo sol. Materiais de mudança de fase possuem a capacidade de alterar o seu próprio estado em função da temperatura ambiente. Em outras palavras, quando a temperatura do ambiente circundante de PCM aumenta até o ponto de fusão do material, sofre uma alteração do estado sólido para o estado líquido, absorvendo e armazenando a energia calorífica do ambiente. Por outro lado, quando a temperatura diminui até o ponto de solidificação do PCM, o material passa do estado líquido para o estado sólido, libertando para o ambiente a energia anteriormente armazenada. Esta aplicação pode ser feita em argamassas de revestimento de edifícios, com a vantagem da regulação passiva da temperatura interna com o aumento da inércia térmica.

### 3.7.2 Argamassas com incorporação de fibra

Ezziane, et al. (2011) fizeram um trabalho sobre testes de exposição a temperaturas extremas em vários tipos de argamassas com fibra. Para este fim foi feita uma comparação do comportamento mecânico de argamassas reforçadas com fibras de aço, fibra de polipropileno e de uma combinação de fibra híbrida. Estas argamassas foram submetidas a várias exposições de calor para em seguida serem testadas mecanicamente.

Foram preparados quatro tipos de argamassas: argamassa padrão normalizada, argamassa com fibra de aço, argamassa com fibra de polipropileno e finalmente uma argamassa híbrida (proporções iguais de fibras metálicas e fibras de polipropileno). Para isto foram usadas amostras prismáticas de 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>. Dois tipos de exposição ao calor foram usados no estudo: a exposição ao calor no forno e o rápido aquecimento com exposição a uma chama.

O primeiro grupo de amostras foi exposta ao calor sendo submetidas a temperaturas de 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 1000 °C. O tempo de exposição mantido a uma temperatura constante foi de 1 hora. A taxa de aumento de temperatura foi de 2°C/min e o esfriamento até à temperatura ambiente teve lugar no forno fechado e desligado (cerca de -0,3°C / min). Foram realizados em amostras de

controle testes mecânicos imediatamente após o esfriamento. Estes testes permitiram a determinação da resistência à compressão e à flexão.

O segundo grupo de amostras foi colocado no forno e expostos a uma chama até uma temperatura de 1000 °C na face exposta, esta temperatura foi mantida durante 1 hora. A superfície exterior da amostra manteve-se em contato com o ar em condição ambiente. Várias das amostras foram equipadas com termopares para medir as mudanças de temperatura no interior da amostra a diferentes profundidades.

A resistência à compressão das amostras de argamassa submetidas a altas temperaturas num forno mostrou que as argamassas com fibras de aço após a exposição ao calor a 400 °C diminuiu para 78% comparado com sua resistência original a 20 °C. Com exposição a 600 °C, a perda de resistência à compressão da argamassa com fibras de aço é maior do que a argamassa padrão. As amostras com adição de fibras de polipropileno mostraram que com temperaturas de 400 °C se degrada mais lentamente do que a argamassa padrão. A 170 °C as fibras de polipropileno derretem e criam uma ligação de porosidade que contribui para reduzir a pressão de vapor, e portanto, reduz as fissurações. No entanto, para além de 400 °C, quando as fibras de polipropileno já derretem, o dano térmico torna-se mais acentuado. A 400 °C a argamassa híbrida deteriora mais do que a argamassa padrão. Mas com 600 °C a argamassa híbrida deteriora tão rapidamente quanto a argamassa padrão. É notado que, no que diz respeito à resistência a compressão, não há nenhum efeito positivo ou negativo na adição de fibras de aço e polipropileno. Se a argamassa híbrida é comparada com a argamassa de polipropileno, observa-se que a adição de fibras de aço pode dar uma melhor resistência ao fogo que as argamassas de polipropileno.

A resistência à flexão das amostras de argamassas submetidas num forno a altas temperaturas indicou que em toda gama de temperatura, a força da argamassa com fibras de aço é significativamente maior do que a argamassa padrão, argamassa com fibra de polipropileno ou fibra híbrida. O dano térmico da argamassa com fibras de aço é menor do que a argamassa padrão. Conforme observado anteriormente, a 400 °C, a argamassa de fibra de polipropileno degrada menos que a argamassa normal, mas para 600 °C, este efeito positivo desaparece. As fibras de polipropileno podem reduzir a fissuração por controlar o vapor de pressões, mas não influenciam as alterações físico-químicas. Isto sugere que a resistência à tração é mais sensível a fissuração que a alterações físico-químicas enquanto a resistência à compressão é

sensível a estes dois fenômenos. O efeito positivo das fibras de polipropileno também ocorre na argamassa híbrida. A 400 °C, a resistência da argamassa híbrida é superior a 90 % da resistência inicial de 20 °C. O dano térmico a 400 °C é muito semelhante para a argamassa híbrida e para a argamassa de fibra de aço. Para além de 600 °C, a deterioração da argamassa híbrida torna-se mais marcante.

As argamassas submetidas à exposição de chama mostraram mudanças de temperatura durante este ensaio, em relação ao tempo de exposição e à profundidade, mantendo a face interna da amostra com uma chama a 1000 °C. As temperaturas no interior da argamassa são muito baixas. A uma profundidade de 1 cm da face da chama exposta, a temperatura não excede de 500 °C. A face “fria”, ou seja, a 5 cm da chama exposta, a temperatura atingiu os 100 °C, após 1 hora de aquecimento. O Quadro 5 coloca em ordem os resultados de amostras aquecidas e não aquecidas. Argamassas de fibra exibem maior resistência ao cisalhamento de perfuração do que a argamassa normal, como esperado. Depois da exposição a chama, todas as argamassas mostraram uma perda de resistência ao cisalhamento por perfuração. O dano térmico de argamassa com fibras de aço é menor do que a argamassa normal. A resistência da argamassa ao cisalhamento de perfuração, reforçada com fibras de aço é de 72% de sua resistência original a 20 °C.

Quadro 5 – Carga Máxima de perfuração para amostras expostas a chama

F <sub>máx</sub> (kN)	Normal	Aço	Polipropileno	Híbrido
Não aquecida	27,5	40	33	37
Aquecido	5	28,7	10,3	14,4

Fonte: (EZZIANE et al., 2011, p. 723)

Os resultados deste estudo mostram que as fibras de aço podem limitar os danos das argamassas durante a exposição ao calor, mesmo se as fibras de aço não alteram a deterioração físico-química. Elas limitam as fissurações durante a exposição ao calor e controlam a propagação destas trincas durante o carregamento mecânico. O uso de fibras de aço em uma argamassa padrão proporciona maior resistência e ductilidade à temperatura ambiente. Durante a exposição a temperaturas elevadas de argamassas reforçadas com fibras de aço acontece deterioração em um maior ou menor grau de extensão dependendo da temperatura de exposição. As fibras de

polipropileno se fundem a 170 °C, criando assim uma porosidade que limita a pressão de poros devido à evaporação da água intersticial, que ocorre durante a exposição ao calor, conseqüentemente a fissuração é reduzida durante a exposição ao calor.

### 3.7.3 Argamassas com adição vegetal

Keles (2011) realizou uma investigação da resistência ao fogo de uma argamassa aditivada com fibras vegetais. Para o uso das fibras vegetais foram identificados três tipos de resíduos originados da matéria prima utilizada, o pó de serra, o cavaco e a maravalha.

O pó de serra é o resíduo gerado pelas serras circulares e planas nas indústrias de transformação de madeira, a maravalha é o resíduo gerado pelas fresas, desgrossadeiras e plainas também nas indústrias de transformação da madeira e os resíduos gerados nas serrarias na transformação de madeira roliça em madeira serrada, juntamente com as cascas e pequenos galhos são levados para os picadores e transformados em cavacos.

Após analisar os três resíduos de madeira gerados pela indústria madeireira observou-se que o cavaco e a maravalha apresentam granulometria grosseira, e o pó de serra apresentou uma granulometria mais refinada. Com o objetivo de aproveitar os resíduos de madeira, este trabalho estudou a utilização do pó de serra.

Logo foi realizado um tratamento do pó de serra fino “in natura” com solução de cal e solução de soda cáustica com cal. A primeira solução não influenciou significativamente na massa unitária nos estados solto e compactado, sendo que a segunda solução influenciou um pouco mais na massa unitária no estado compactado, aumento de 6,7%, mas não considerado significativo. A massa específica foi influenciada modestamente pelos tratamentos, 3,2% para o tratamento com solução de cal e 7,8% para o tratamento com soda e cal. A perda ao fogo foi reduzida com os tratamentos, principalmente para o tratamento com solução de cal.

As moldagens dos corpos de prova foram feitas de acordo com a NBR 7215 (1996, p. 2). Foram moldados corpos de prova cilíndricos cujas dimensões são de 5 x 10 cm, corpos de prova prismáticas cujas dimensões são 4 x 4 x 20 cm e placas cujas dimensões são 2,2 x 30 x 30 cm para compósitos com substituição de 0, 15, 30 e 45% de agregado miúdo por pó de serra tratada.

A perda ao fogo dos compósitos cimentícios aumentou com o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelos pós de serra tratados. A massa específica dos compósitos cimentícios foi reduzida significativamente com a adição do pó de serra tratado, o que contribui para sua utilização como material de revestimento, principalmente no que diz respeito a material de proteção de estruturas metálicas, uma vez que a superfície dos perfis metálicos apresenta poucas condições de aderência. A absorção de água por imersão foi aumentada pela adição de pó de serra.

Para a substituição de 15% de agregado miúdo natural por pó de serra tratado, principalmente aquele tratado com solução de soda cáustica e cal, as propriedades mecânicas não obtiveram perdas tão significativas quanto as substituições de 30 e 45%.

#### 3.7.4 Argamassas com adição mineral

Kockal (2013) investigou os efeitos nas argamassas submetidas às condições de pré - fogo e pós – fogo. Na composição destas argamassas se considerou a adição ou não adição de sílica ativa contendo cerâmica verde em pó e pó de mármore.

Observou-se que argamassas com sílica ativa tiveram uma melhor resistência a elevadas temperaturas do que aquelas sem sílica ativa. Além disso, os melhores desempenhos foram obtidos para argamassas contendo pó de mármore, no caso de tratamentos de pré-aquecimento e de pós-aquecimento. Com elevada temperatura as argamassas contendo cerâmica verde em pó exibiram baixa resistência em comparação com as argamassas contendo pó de mármore.

Além disso, foi observada a explosão de 100 mm<sup>3</sup> de amostras a temperaturas entre 600 e 700 °C durante o aquecimento. Este fato sugeriu que a utilização destes materiais residuais na argamassa ou nos elementos de concreto pode ser prejudicial, quando o aumento de temperatura for muito elevado. Esta explosão pode ser atribuída à ausência de porosidade em argamassas de alta resistência liberando o gás aprisionado a partir das variações de fase da cerâmica verde em pó e da alta perda de ignição do pó de mármore. O gás aprisionado não conseguiu encontrar espaço suficiente para diminuir o acúmulo de tensão nesta gama de temperaturas.

Türker (2001, apud Alessandro Onofre Rigão, 2012) relatam dados de ensaios de resistência residual de argamassas com calcário ou quartzito. Nesses dados, a

diminuição de resistência foi próxima de 20% a 500°C, 65% a 700°C e 80% a 850°C, para agregados leves (pedra-pome), a redução de resistência foi menor.

Cülfik e Özturan (2002, apud Rigão, 2012) em seus estudos realizaram a comparação da alteração das propriedades mecânicas de argamassas (traço 1:3) com adição de 5% de grafite em pó em substituição ao cimento. O nível de aquecimento das amostras foi de 300, 600 e 900°C. Os ensaios foram realizados a uma taxa de aquecimento de 2 °C/min. e 8°C/min, além disso, o tempo de exposição a temperaturas elevadas foi de 1 hora e 10 horas. Observaram que a temperatura de 600°C foi suficiente para causar grande perda nas propriedades mecânicas das argamassas, e que a 900°C o material praticamente não possuía mais resistência. No Quadro 08 apresenta-se o resumo dos resultados desses ensaios.

A 300°C a perda de resistência à compressão variou de 12 a 29% para as argamassas sem adição de grafite, já as com adição de grafite, esse valor variou de 0 a 15%. A 600°C, a resistência das argamassas sem adição de grafite reduziu de 51 a 65%, já as com adição de grafite, de 55% a 62%. Na temperatura de 900°C, a resistência residual das amostras era em torno de 10% e foi observado alteração da coloração para rósea.

A perda de resistência à flexão foi mais acentuada devido à micro fraturas do material causadas pelo aquecimento, com redução de 36% a 300°C e obtendo valores de até 87% a 600°C e 90% a 900°C. Para os dois tipos de argamassas os valores ficaram próximos. Conforme os autores, os resultados seguiram a tendência de trabalhos semelhantes usando argamassas com adição mineral de escória granulada de alto forno em substituição ao cimento (variando de 0% a 80%) e utilizando pedra-pome como agregado miúdo.

Aydin (2008, apud Rigão, 2012) observou que o aumento percentual de adição mineral na pasta reduziu a resistência das argamassas na temperatura ambiente, porém, quando aquecidas, a perda de resistência era menor. A temperatura de aquecimento foi de 300, 600 e 900°C. Assim como outros trabalhos, o resfriamento foi ao ar livre e com choque em água fria.

Houve ganho de resistência à compressão nas amostras aquecidas a 300°C e resfriadas lentamente, em relação às argamassas de controle, com máximo ganho para argamassa com adição mineral de 40%. A incorporação de adição mineral a 600°C não causou praticamente nenhuma perda de resistência na compressão nas amostras resfriadas lentamente. O maior benefício observado foi a 900°C, pois a

perda percentual de resistência das argamassas com adição mineral foi bastante baixa em relação àquelas moldadas somente com cimento (Quadro 6).

Quadro 6 - Propriedades mecânicas residuais das argamassas aquecidas

T (° C) Taxa	Aquecim. (° C/min) Tempo	Exposição (h)	Resist. Média à compressão (Mpa)		Resist. Média à flexão (Mpa)		Módulo Elasticidade (GPa)	
			Sem grafite	Com grafite	Sem grafite	Com grafite	Sem grafite	Com grafite
20	0	0	62,9	44,3	11,46	8,45	33,73	17,89
300	2	1	48,8	37,7	7,26	6,45	19,18	13,05
300	2	10	44,7	39,3	7,29	5,45	19,10	10,12
300	8	1	55,3	44,3	9,73	6,95	22,54	17,36
300	8	10	50,7	40,4	7,76	5,55	21,67	14,40
600	2	1	23,8	20,0	1,85	1,78	3,54	3,53
600	2	10	21,7	17,8	1,62	1,49	3,42	3,20
600	8	1	30,8	19,6	2,55	2,20	6,03	3,41
600	8	10	24,4	16,9	1,51	1,51	4,24	3,39
900	2	1	8,0	7,9	0,81	0,93	-	-
900	2	10	6,5	7,1	0,69	0,76	-	-
900	8	1	9,0	8,1	0,81	1,18	-	-
900	8	10	7,0	8,0	0,69	0,69	-	-

Fonte: (Cülfik e Özturan 2002, apud Rigão, 2012, p. 84)

### 3.7.5 Argamassas como componente do concreto

Morales, Campo e Faganello (2011) estudaram a ação do fogo sobre os componentes do concreto. Trabalharam com corpos de cilíndricos de argamassa, com dimensões de 5 x 10 cm. Moldaram 06 corpos de prova por lote, utilizando a mesma composição de argamassa de um traço de concreto. O traço em massa utilizado foi 1:3 e a relação água/cimento 0,44. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, ao ar, durante 7 dias. Os materiais utilizados foram: areia media siliciosa de rio e cimento Portland CP-V. Os corpos de prova foram submetidos aos patamares de 300 °C, 350 °C, 400°C, 450 °C e 750°C com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min até os patamares especificados. Depois de aquecidos os corpos de prova foram

submetidos a resfriamento rápido e lento. Nos corpos de prova aquecidos até 300 °C a resistência a compressão teve uma redução em torno de 5%, entanto os corpos de prova que tiveram um resfriamento brusco, apresentaram uma perda de 30,5% na resistência à compressão.

Os corpos de prova aquecidos a 300 °C, 350 °C, 400°C, 450 °C e 750°C apresentaram esfarelamento e desagregação, seguido da ruptura à compressão. Os corpos de prova aquecidos a 750°C apresentaram esfarelamento e desagregação, não sendo possível realizar sua ruptura à compressão, sendo que os mesmos apresentaram tonalidade rosácea. Na Quadro 7 se apresentam os valores da resistência média à compressão dos corpos de prova submetidos a 300 °C, 350 °C, 400°C e 450 °C.

Quadro 7 – Valores de Resistência Média à Compressão dos corpos de prova submetidos a 300 °C, 350 °C, 400°C e 450 °C

Temperatura °C	F <sub>cj7</sub> (Mpa)	Perda (%)	E (GPa)	Perda (%)
REF	18,7	0	34,40	0
300	13,5	28	18,60	46
350	13,00	30	17,10	50
400	9,5	49	14,50	58
450	6,8	64	9,40	73

Fonte: (Morales, et. al, 2011, p. 54)

Nos resultados desta pesquisa observou-se que os concretos submetidos a temperaturas superiores a 300 °C perderam consideravelmente sua resistência mecânica à compressão, mas até 300 °C a perda de resistência é mínima e gira em torno e 5%. Os corpos de prova de argamassas de cimento e areia submetidos a 300 °C com resfriamento lento perderam em torno de 5% de sua resistência enquanto que, com o resfriamento rápido perderam entre 28 e 30% de sua resistência. As amostras submetidas a 750 °C perderam totalmente a resistência mecânica.

### 3.8 Difração de raios X

Callister e Rethwisch (2015) definem os raios X como uma forma de radiação eletromagnética. Quando um feixe de raios X incide sobre um material sólido, uma

fração desse feixe é dispersada em todas as direções e os elétrons associados a cada átomo ou íon que se encontra na trajetória do feixe. Nestas condições poderá haver interferências construtivas ou destrutivas entre ondas eletromagnéticas se estiverem em fase entre si ou defasadas, respectivamente

A técnica de análise estrutural e micro estrutural por raios X se baseia na presença de uma rede cristalina ou na periodicidade do arranjo atômico. Esta é a principal limitação da técnica, ou seja, a técnica de análise de estrutura ou microestrutura de difração de raios-X não se aplica a materiais sólidos totalmente amorfos como os vidros ou polímeros e nem a líquidos.

A difração de raios X é uma das técnicas mais empregadas para o análise estrutural e micro estrutural para identificar os diferentes materiais.

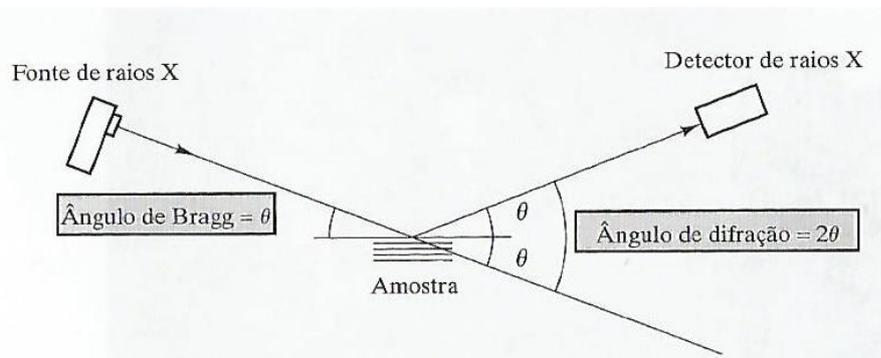
### 3.8.1 Lei de Bragg

Shackelford (2008) menciona que para existir difração os feixes de raios X espalhados por planos cristalinos adjacentes precisam estar em fase. Caso contrário, ocorre interferência destrutiva de ondas e basicamente nenhuma intensidade espalhada é observada. Na geometria (Figura 5) precisa para interferência construtiva (ondas espalhadas em fase), a diferença de caminho entre os feixes de raios X, adjacentes é algum número inteiro ( $n$ ) de comprimentos de onda da radiação ( $\lambda$ ). A relação que demonstra essa condição é a equação de Bragg.

$$n \cdot \lambda = 2d \sin \theta$$

Onde  $d$  é o espaçamento entre planos cristalinos adjacentes e  $\theta$  é o ângulo conhecido como ângulo de Bragg, e o  $2\theta$  é conhecido como ângulo de difração, pois é o ângulo medido experimentalmente.

Figura 5 – Relação entre o ângulo de Bragg ( $\theta$ ) e o ângulo de difração medido experimentalmente ( $2\theta$ )

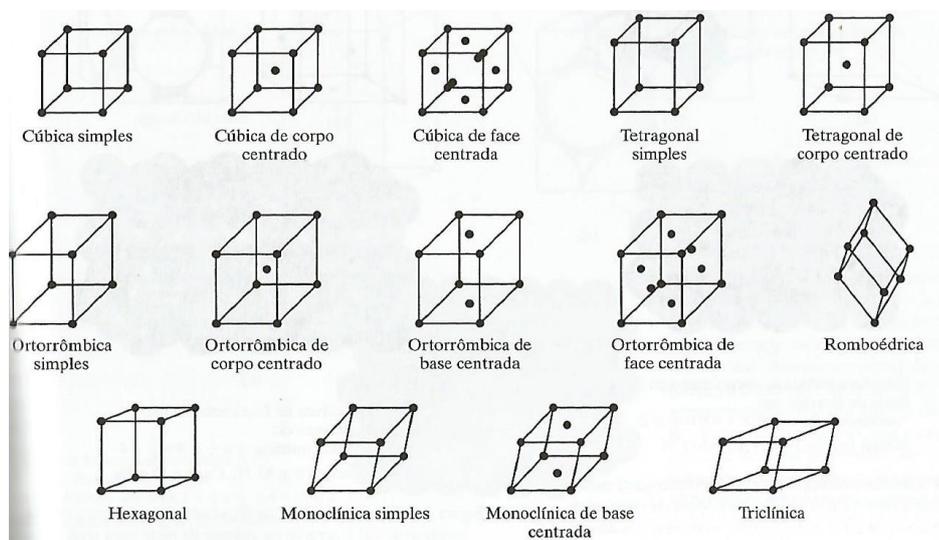


Fonte: Shackelford (2008)

### 3.8.2 Redes de Bravais

É a denominação dada às configurações básicas que resultam da combinação dos sistemas de cristalização com a disposição das partículas em cada uma das células unitárias de uma estrutura cristalina, sendo estas células entendidas como os paralelepípedos que constituem a menor subdivisão de uma rede cristalina que conserva as características gerais de todo o retículo, permitindo que por simples replicação da mesma se possa reconstruir o sólido cristalino completo. Para além da sua utilização em cristalografia, as redes de Bravais constituem uma importante ferramenta de análise tridimensional em geometria euclidiana. (Figura 6)

Figura 6 – Redes de Bravais



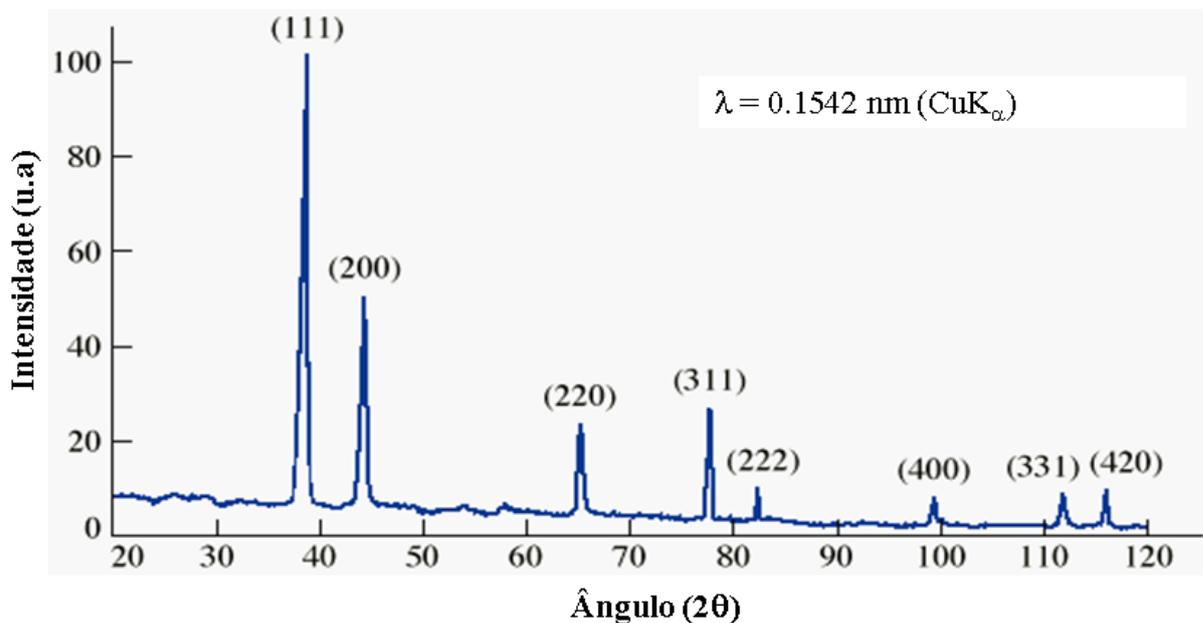
Fonte: Shackelford (2008)

### 3.8.3 Espectros gerados pelo difratômetro de raios X

Callister e Rethwisch (2015) explicam que a intensidade do feixe difratado é monitorada eletronicamente por um detector de radiação com varredura mecânica controlada. Padrões de pó, são usados para comparação contra uma grande coleção de padrões conhecidos.

A Figura 7 mostra um padrão de difração para uma amostra de alumínio em pó. Os picos de alta intensidade resultam quando a condição de difração de Bragg é satisfeita por algum conjunto de planos cristalográficos. Na figura, cada pico (no gráfico da intensidade dos raios X em função do ângulo de difração,  $2\theta$ ) representa a difração do feixe de raios X por um conjunto de planos cristalinos paralelos em várias partículas de pó.

Figura 7– Difratoograma de uma amostra de alumínio em pó



Fonte: Shackelford (2008)

Um dos principais empregos para a difratometria de raios X é na determinação da estrutura cristalina. O tamanho e a geometria da célula unitária podem ser obtidos a partir das posições angulares dos picos de difração, enquanto o arranjo dos átomos no interior da célula unitária está associado às intensidades relativas desses picos.

### 3.8.4 Identificação de fases

Quando um material já teve sua estrutura cristalina caracterizada, consta em um catálogo de difratogramas. A partir deste difratograma, é possível identificá-lo usando este catálogo.

Callister e Rethwisch (2015) explicam que se duas fases distintas possuem a mesma estrutura cristalina, as linhas de difração aparecem em posições  $2\theta$  diferentes, porque cada fase terá seus parâmetros de rede específicos. Além disso, as intensidades de linhas de difração, também serão diferentes entre os dois difratogramas, principalmente se elas forem formadas por elementos químicos diferentes

O conjunto de linhas de difração, compreendendo as posições  $2\theta$  e as intensidades relativas, tem uma relação biunívoca com a correspondente fase. Desta forma pode-se construir um arquivo de fichas de difração conhecidas, que, organizadas de modo apropriado, permitiria identificar as fases de um material desconhecido.

Hanawalt e Rinn (1936) criaram um sistema de fichas de busca que permite encontrar, a ficha de fase desconhecida. O comitê internacional, chamado de Joint Committee for Powder Diffraction Standard (JCPDS), coleciona difratogramas ao redor do mundo, dentro de um critério de qualidade e confiabilidade.

As fichas de difração contêm os valores das distâncias interplanares,  $d$ , dos cristais, e não as posições  $2\theta$ , porque as últimas dependem do comprimento de onda utilizado no difratômetro no momento da análise. As distâncias interplanares não dependem disso, pois são características do cristal. Por meio da Lei de Bragg, podemos converter  $\theta$  em  $d$ .

Outro aspecto a ser levado em consideração refere-se as intensidades das linhas de difração. O que são características de um cristal são as intensidades relativas das linhas, e não as intensidades absolutas. Estas últimas dependem dos parâmetros operacionais do difratômetro no momento da análise. Por outro lado, as intensidades relativas são determinadas pela estrutura cristalina e pelos elementos químicos presentes no cristal.

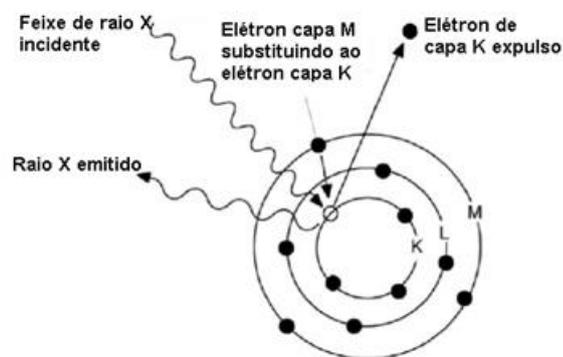
Portanto para analisar uma amostra desconhecida, seus picos deverão ser comparados com os materiais conhecidos e tabelados, permitindo assim a identificação do material e suas mudanças de fase.

### 3.9 Espectrometria de fluorescência de raios X

A espectrometria de fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos presentes em uma amostra estabelecendo a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra.

A espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) expõe sólidos pulverizados à radiação X de comprimento de onda curta que causa a ionização dos átomos na amostra. Quando a ionização ocorre, um ou mais elétrons são expulsos desde o átomo, frequentemente desde orbitais internos. Quando isto ocorre a configuração do elétron do átomo é instável e os elétrons em orbitais altos se movimentam até os orbitais baixos para estabilizar o átomo como se pode apreciar na Figura 8 na qual se faz uma representação esquemática da expulsão de um elétron da capa K por um feixe incidente dos raios X.

Figura 8 – Esquema de fluorescência dos raios X



Fonte: Ryan (2014)

A energia liberada aparece na forma de um fóton que possui uma energia igual a diferença de energia dos orbitais envolvidos. Desta forma átomos individuais na amostra emitem radiação característica dos átomos presentes. A intensidade de radiação num nível de energia dado é proporcional com a abundância desse elemento em particular. A fluorescência descreve o processo de dois passos na qual o átomo absorve energia (neste caso, desde raios X), depois reemite radiação de uma energia diferente que é tipicamente de um nível mais baixo que a energia inicialmente absorvida (Ryan, 2014). Neste contexto é possível realizar a determinação de elementos majoritários e minoritários.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida para a avaliação do comportamento de três tipos de argamassas industrializadas, com capacidades nominais de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa que foram submetidas a temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C, dentro de um forno elétrico por um período de 4 horas. Formaram-se dois grupos de corpos de prova de argamassas com capacidades nominais de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa. O primeiro grupo foi curado por 28 dias e o segundo grupo foi curado por 91 dias. Depois de transcorrido esse tempo de cura, cada grupo de corpos de prova foi submetido às temperaturas acima mencionadas. Para esfriar as amostras elas foram deixadas por um período de 24 horas expostas a temperatura ambiente. Uma vez que as amostras das argamassas esfriaram, foi testada sua resistência à tração na flexão e sua resistência à compressão axial.

### 4.1 Especificações Técnicas do Fabricante da Argamassa Industrializada

Foi utilizada argamassa industrializada com as seguintes especificações técnicas do fabricante:

#### a) Composição

As Argamassas para Assentamento Estrutural 6 MPa, 8MPa e 12 MPa são feitas de uma mistura seca à base de cimento Portland, Cal hidratada, areia industrial seca e classificada, fíler mineral, que asseguram ao produto uma melhor trabalhabilidade e aderência (Figura 9).

#### b) Aplicação

Como argamassa de assentamento de blocos em alvenaria.

#### c) Classificação

Para as argamassas de resistência nominal de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa a classificação está de acordo com a norma NBR 13281 (2005)

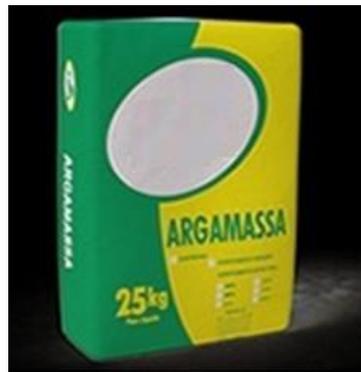
d) Rendimento

As argamassas de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa são vendidas em sacos de 25 kg. Um saco rende  $13,4 \pm 0,4$  litros de argamassa úmida.

e) Validade

A validade de cada tipo de argamassa é de 06 meses após sua fabricação.

Figura 9 – Saco de argamassa industrializada



Fonte: Autor

#### 4.2 Proporção da quantidade de água na argamassa industrializada

A quantidade de água necessária para cada tipo de argamassa industrializada, foi determinada conforme o estabelecido na pela norma NBR 13276 (2005).

#### 4.3. Determinação do índice de consistência

Para determinar o índice de consistência foi seguida a norma NBR 13276 (2005), utilizando o molde tronco-cônico (Figura 10), a mesa para leitura de índice de consistência com queda manual (Figura 11) e o paquímetro para medir o espalhamento do molde tronco-cônico (Figura 12).

O procedimento que será descrito a continuação foi realizado para montar as amostras de cada grupo de argamassas:

- a) Se pesou 2,5 kg de argamassa industrializada, numa balança de precisão;

b) Depois se pesou a massa de água, na mesma balança de precisão. Este volume de água foi colocado num recipiente misturador. Foi considerado que 1 grama de água equivale a 1 mililitro de água;

c) Com o volume de água contida no recipiente misturador, se juntou com a argamassa industrializada de um modo contínuo. por um período de 30 s;

d) Se acionou o recipiente misturador na velocidade baixa e se realizou a mistura por 30s. Logo se desligou o equipamento

e) Se retirou a pá do recipiente misturador e se raspou toda a superfície interna do recipiente e da pá. Após efetuar esta tarefa recolocou-se a pá. Toda esta tarefa deveu ser realizada em um intervalo de 60s;

f) Se ligou novamente o equipamento do recipiente misturador, por mais 30 s.

g) Realizada a mistura da água com argamassa industrializa, se teve o maior cuidado para que a medida do espalhamento no Molde Tronco Cônico fique na faixa de  $(260 \pm 5)$  mm. Este valor é de vital importância, para o cálculo do índice de consistência.

Figura 10 – Molde Tronco-cônico



Fonte: Autor

Figura 11 – Mesa para leitura do índice de consistência da argamassa



Fonte: Autor

Figura 12 – Paquímetro para medir o espalhamento do molde



Fonte: Autor

#### 4.4 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi executada seguindo a NBR 13279 (2005), em moldes prismáticos de dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm (Figura 13) que possuem armações abertas com paredes removíveis, formando três compartimentos quando montados, capaz de servirem de molde para três corpos-de-prova.

Figura 13 – Molde Prismático de 40 mm x 40 mm x 160 mm



Fonte: Autor

Colocou-se a argamassa pronta, no molde prismático, fixo à mesa de adensamento, na parte central. Foi introduzida, diretamente em cada compartimento do molde, uma porção de argamassa. Com o auxílio de um nivelador de argamassas,

procedeu-se ao espalhamento da argamassa em cada compartimento, formando uma camada uniforme. Em seguida, aplicou-se 30 golpes através da mesa de adensamento.

Seguidamente foi introduzida uma segunda camada de argamassa em cada compartimento do molde e com o auxílio do nivelador de camadas, se procedeu ao espalhamento uniforme de argamassa aplicando-se novamente 30 quedas na mesa de adensamento. Rasaram-se os corpos-de-prova com uma régua metálica.

Os corpos-de-prova permaneceram 24 horas nos moldes nas condições ambientais do laboratório a uma temperatura média de 25 °C.

Passado esse intervalo de tempo as argamassas foram desmoldadas e mantidas na temperatura ambiente do laboratório até serem submetidas a tempos de cura de 28 e 91 dias, às temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C.

No quadro 8 pode-se observar o planejamento dos ensaios

Desta forma, ficou mais fácil expor os três grupos de argamassas de diferentes resistências nominais às diversas temperaturas de exposição um dia após o outro. Para o esfriamento das amostras foi considerado um período de 24 horas em cada caso.

Quadro 8 – Planejamento dos Ensaio

Temperatura (°C)	Número de amostras Para cada Resistência			Total/ 28 dias	Total/ 91 dias	Total/ Moldagem
	6 MPa	8 MPa	12 MPa			
AMBIENTE	12	12	12	18	18	54
100	6	6	6	9	9	
200	6	6	6	9	9	18
300	6	6	6	9	9	18
400	6	6	6	9	9	18
500	6	6	6	9	9	18
600	6	6	6	9	9	18
700	6	6	6	9	9	18
800	6	6	6	9	9	18
900	6	6	6	9	9	18
<b>Total de Amostras</b>	<b>66</b>	<b>66</b>	<b>66</b>	<b>99</b>	<b>99</b>	<b>198</b>

Fonte: Autor

#### 4.5 Amostras submetidas a Altas Temperaturas

O equipamento utilizado para submeter as amostras a altas temperaturas foi um forno elétrico marca SANCHIS (Figura 14), cujas principais características técnicas são: funciona a 220 V, possui uma frequência de 60 Hz e potência de 18 KW. O forno possui programação para a taxa de aquecimento, além de termostato para controle de temperatura.

Figura 14 – Forno Elétrico



Fonte: Autor

#### 4.6 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

As fases para realizar este ensaio, conforme a NBR 13279 (2005), foram as seguintes:

- a) Posicionamento o corpo-de-prova nos dispositivos de apoio do equipamento, conforme mostra a Figura 15, de modo que a face rasada não fique em contato com os dispositivos de apoio nem com o dispositivo de carga.
- b) Aplicação da carga de  $(50 \pm 10)$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova (Figura 13).
- c) Cálculo da resistência à tração na flexão usando a equação:

$$Rf = \frac{1,5 \cdot Ft \cdot L}{H^3}$$

Onde:

Rf é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

Ft é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L é a distância entre os suportes, em milímetros (L= 100 mm);

H é a altura do molde em milímetros (H = 40 mm).

Figura 15 – Equipamento utilizado para o teste de Resistência à tração na flexão



Fonte: Autor

#### 4.7 Ensaio de Resistência à compressão axial

As fases para realizar este teste conforme a NBR 13279 (2005), e o equipamento utilizado (Figura 16), foram os seguintes:

- a) Posicionamento das metades dos corpos-de-prova do ensaio de flexão no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga (Figura 17);
- b) Aplicação da carga de  $(500 \pm 50)$  N/s até a ruptura do corpo-de-prova.
- c) Determinação da resistência à compressão, pela equação:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Onde:

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F_c$  é a carga máxima aplicada, em N;

$A$  é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga

( $A = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} = 1.600 \text{ mm}^2$ ).

Figura 16 - Equipamento utilizado para o teste de resistência à compressão axial



Fonte: Autor

Figura 17 – Amostra submetida ao teste de Resistência à Compressão axial



Fonte: Autor

#### 4.8 Ensaios espectrometria de fluorescência de raios X

Para analisar o efeito de temperatura na composição química das argamassas foram realizados ensaios de espectrometria de fluorescência de raios X em 3 corpos de prova de 6 Mpa, 8 Mpa e 12 Mpa, com tempos de cura de 28 e 91 dias. Cada um deles submetidos às seguintes temperaturas: ambiente, 200 °C, 600 °C e 900 °C. Estas temperaturas de exposição são as mais representativas para o estudo da composição das argamassas industrializadas.

##### 4.8.1 Preparação das amostras

Cada amostra de argamassa foi moída, transformada em pó e em seguida passada pela peneira número 325 a qual tem uma abertura de 0,044 mm. Utilizando uma balança de precisão pesou-se 9,00 gramas para cada amostra. Depois foram pesadas 3,00 gramas de celulose. Ambas amostras foram transferidas a um vaso de moagem e misturadas entre si com ajuda de um pilão.

Dessa mistura foram utilizadas 10,00 gramas de pó moído para fazer uma pastilha. Essa pastilha foi transferida ao equipamento da Bruker AXS S8 Tiger A15X10-A3E1A1-C2A1, sendo analisada no pacote do equipamento.

##### 4.8.2 Equipamento utilizado

Foi usado o equipamento da Bruker AXS S8 Tiger A15X10-A3E1A1-C2A1 (Figura 18). As amostras foram medidas usando um espectrômetro de fluorescência de raios X dispersivo de comprimento de onda, equipado com um tubo de raios-X de Rh de 4 kW, contador de cintilação, contador proporcional de fluxo com fluxo de gás P10, máscara automática, colimador, filtros e trocadores de cristal, e carregador de amostras robótico.

Figura 18 - Equipamento Bruker AXS S8 Tiger A15X10-A3E1A1-C2A1



Fonte: Autor

#### 4.9 Análise da composição estrutural

Para analisar o efeito de temperatura na composição estrutural das argamassas foram realizados ensaios de difração de raios X em amostras retiradas de 3 corpos de prova de 6 Mpa, 8 Mpa e 12 Mpa, com tempos de cura de 28 e 91 dias. Estes corpos de prova foram submetidos às seguintes temperaturas: ambiente, 200 °C, 600 °C e 900 °C. Estas temperaturas de exposição são as mais representativas nas mudanças de fase.

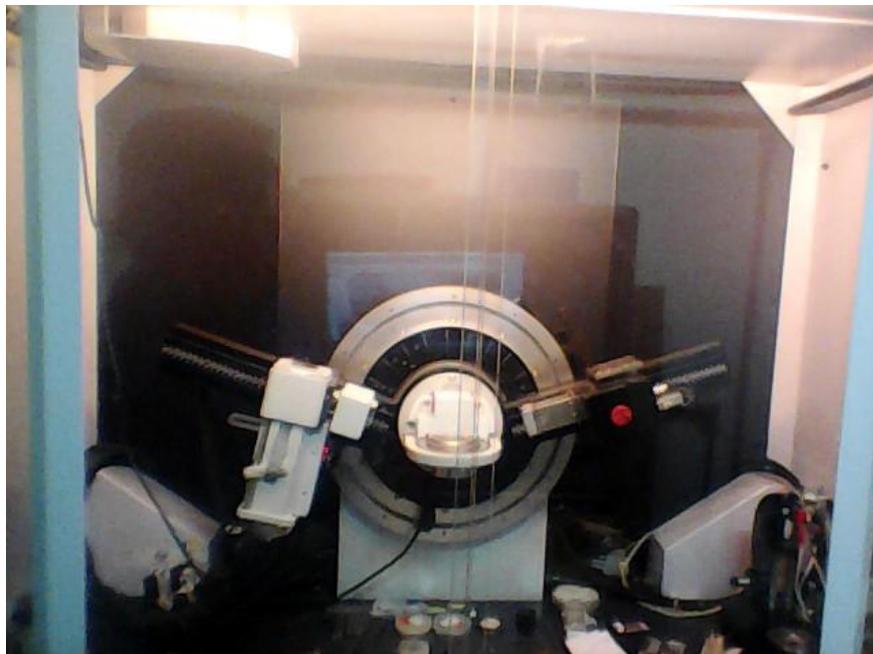
##### 4.9.1 Preparação das amostras

Cada amostra de argamassa foi moída, transformada em pó e seguidamente passada pela peneira número 10 a qual tem uma abertura de 2,00 mm. Utilizando uma balança de precisão pesou-se 10,00 gramas por cada amostra. Para a análise da amostra no equipamento de difração de raios X foi usado apenas uma pequena proporção desta massa. Esta amostra em pó foi submetida ao Análise de difração de raios X.

#### 4.9.2 Descrição do equipamento utilizado

O equipamento utilizado foi um difratômetro Bruker D8 Advance que possui goniômetro na geometria de Bragg-Brentano (ou  $\Theta - 2\Theta$ ), tubo de raios X com alvo de cobre e detector LinsxEye de tiras de silício. Usando apenas o comprimento de onda característico de uma transição eletrônica da camada L para a camada K de um átomo do alvo (emissão  $K\alpha$  de cobre,  $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ), são utilizados filtros que absorvem o espectro contínuo e outras emissões menos intensas características do cobre. O porta amostras é mantido fixo, o tubo e o detector são movidos por motores de passo de modo que o ângulo entre eles é sempre  $2\Theta$ . Cada vez que o ângulo medido é tal que satisfaz a condição de interferência construtiva para raios refletidos por uma determinada família de planos (hkl) do cristal, para um determinado d e para o  $\lambda$  utilizado, a intensidade de radiação detectada aumenta e surge um pico de Bragg no difratograma (Figura 19).

Figura 19 - Equipamento de Difração de Raios X



Fonte: Autor

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados e analisados de forma visual, tátil e gráfica o comportamento das amostras prismáticas após serem submetidas às temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C e esfriadas por um período de 24 horas na temperatura ambiente. São analisados, também, os resultados das resistências à tração na flexão e das resistências à compressão axial das argamassas submetidas às temperaturas da fluorescência de raios X e de difração de raios X.

### 5.1 Índice de consistência da argamassa

Segundo a norma NBR 13276 (2005) o índice de consistência das argamassas foi determinado pela média de três medições do espalhamento da argamassa, como mostra o Quadro 9.

Quadro 9 – Medição do espalhamento com paquímetro

Argamassa (MPa)	Volume de Água (ml)	Medida do espalhamento			
		1° Medição (mm)	2° Medição (mm)	3° Medição (mm)	Média das três medidas (mm)
6	505	260	267	262	263
8	455	261	261	260	261
12	525	255	256	258	256

Fonte: Autor

Os resultados dos volumes de água das amostras de 6 Mpa, 8 Mpa e 12 Mpa mostrados no quadro 9, mostra que está dentro dos padrões especificados pela norma NBR 13276 (2005).

## 5.2 Análises das amostras após submetidas a altas temperaturas

As amostras prismáticas de argamassa que foram submetidas a temperaturas de 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, após serem esfriadas para testar sua resistência à flexão na tração e compressão axial, mantiveram sua forma sólida após transcorridos vários meses, mas evidentemente com uma resistência menor da que inicialmente apresentavam, antes de serem submetidas as temperaturas mencionadas.

As outras amostras prismáticas de argamassa que foram submetidas às temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C após passarem pelo processo de esfriamento de 24 horas a temperatura ambiente, mantiveram alguma resistência para os testes de resistência à tração na flexão e na compressão axial. Porém depois de transcorridos um período de três dias esfarelaram virando pó. (Figura 20).

Figura 20 – Amostras prismáticas esfareladas virando pó

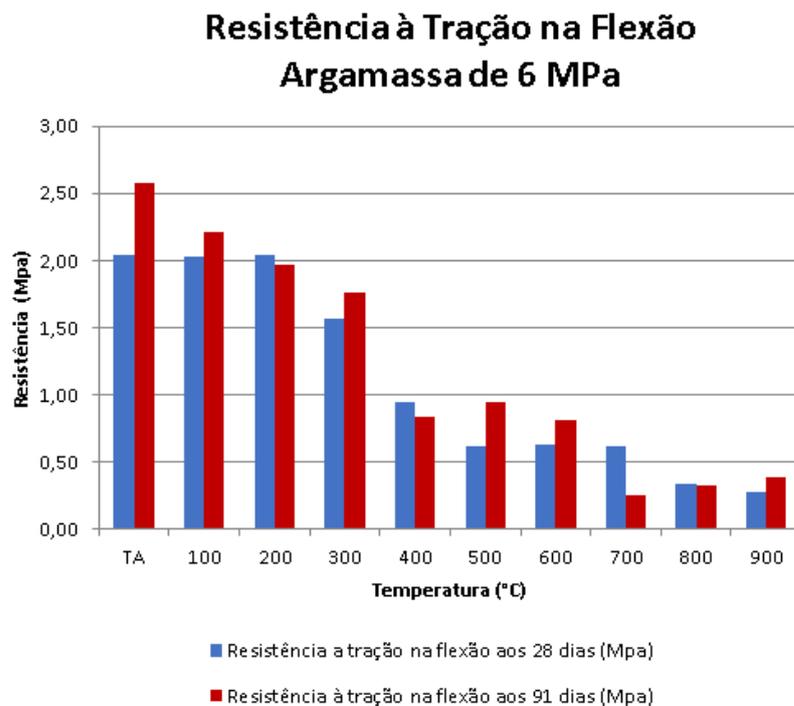


Fonte: Autor

### 5.3. Resistência à tração na flexão

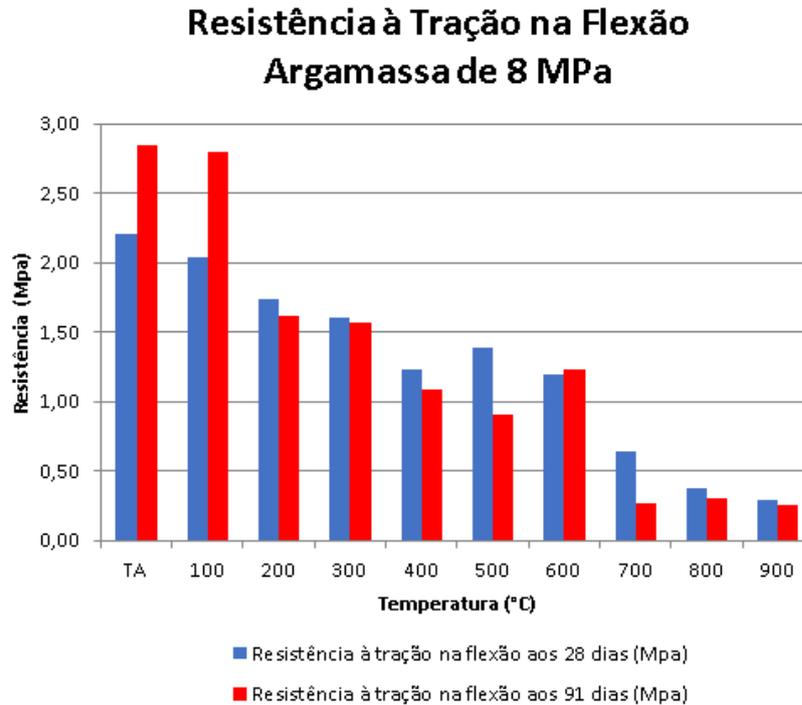
Tomaram-se como base de comparação as argamassas industrializadas a condições ambientais não submetidas a aquecimento. Para outras argamassas com idades de cura de 28 e 91 dias submetidas ao aquecimento observou-se nos ensaios de resistências à tração e flexão, uma diminuição na sua resistência, conforme aumentava a temperatura de aquecimento. Observa-se estas variações nas figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 - Resistência à Tração na Flexão para argamassas de 6 Mpa



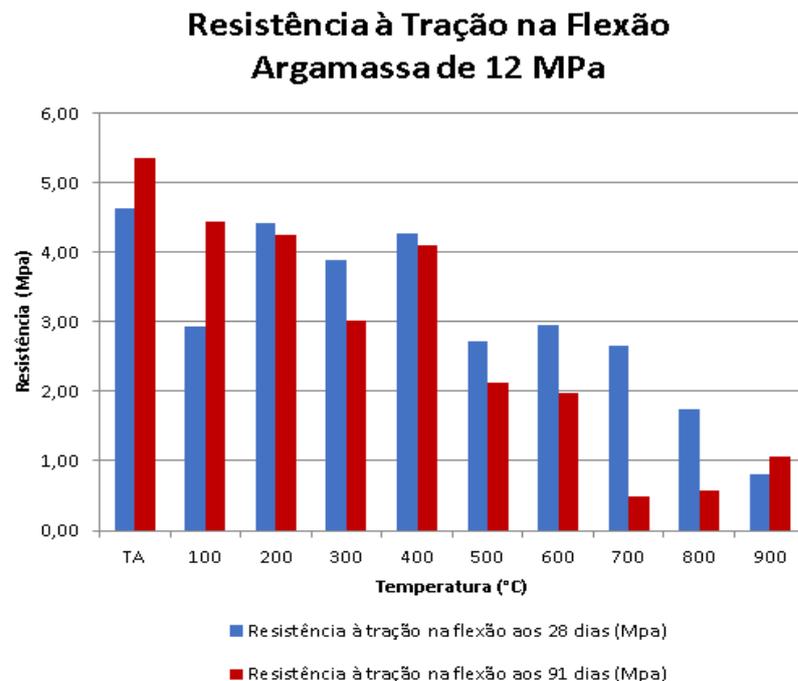
Fonte: Autor

Figura 22 - Resistência à Tração na Flexão para argamassas de 8 Mpa



Fonte: Autor

Figura 23 - Resistência à Tração na Flexão para argamassas de 12 MPa



Fonte: Autor

Os diagramas de barras das Figuras 21 a 23 mostram estas quedas na resistência à tração na flexão das amostras prismáticas de argamassas, com resistências nominais de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa.

As argamassas de 8 MPa e 12 MPa são as duas argamassas de maior resistência ensaiada neste estudo. Sabe-se que para obter argamassas de maior resistência é necessário um menor fator água: cimento e maior consumo de cimento (traço mais rico). Observa-se nas Figuras 21 a 23 que até uma temperatura de 100 °C a resistência à tração na flexão aos 91 dias é maior que a de 28 dias, indicando ser mais importante a idade de cura em relação à temperatura de aquecimento. Porém, a partir de 200 °C ocorrem algumas inversões de resistências entre 28 e 91 dias de cura, certamente devido a variações nos corpos de prova.

No quadro 10 tomando como referência a resistência tração na flexão na temperatura ambiente observou-se uma nítida tendência de perda de resistência com o aumento da temperatura de tratamento das amostras, chegando-se a resultados da ordem de 87,02% a 91,08% de perda de resistência comparado com as resistências iniciais, para as temperaturas mais altas.

Quadro 10 – Perda de resistência à tração na flexão (%)

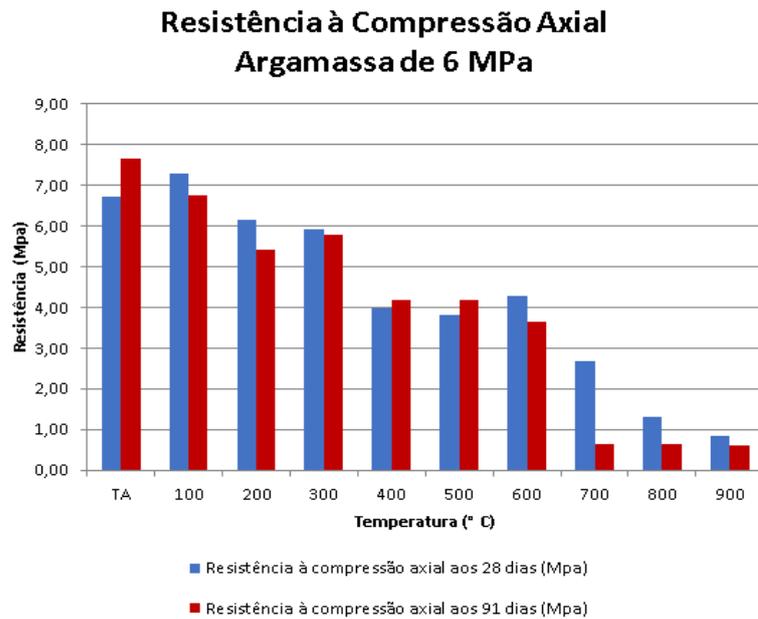
Temperatura	6 MPa		8 MPa		12 MPa	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
100 °C	1,05	14,54	7,78	1,88	36,83	17,21
200 °C	0,00	23,68	21,39	43,28	4,40	20,81
300 °C	23,60	31,99	27,22	45,16	16,22	43,63
400 °C	53,49	67,72	44,24	62,10	7,88	23,41
500 °C	69,85	63,15	36,86	68,12	41,43	60,34
600 °C	69,14	68,34	46	56,83	36,05	63,24
700 °C	69,74	90,16	70,98	90,71	42,85	90,66
800 °C	83,38	87,66	83,13	89,20	62,54	89,25
900 °C	86,53	85,17	87,02	91,08	82,47	80,25

Fonte: Autor

#### 5.4 Resistência à compressão axial

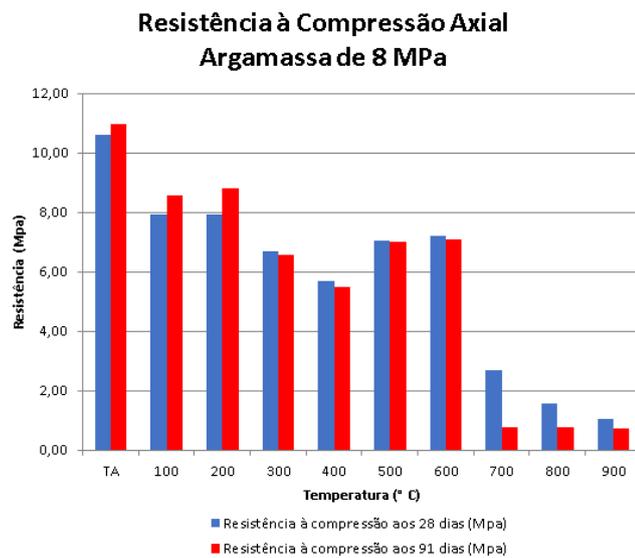
As Figuras 24 a 26 também mostram uma queda na resistência à compressão axial nas amostras prismáticas com capacidade nominal de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa, com o aumento da temperatura em que as amostras são submetidas.

Figura 24 - Resistência à compressão axial para argamassa de 6 MPa



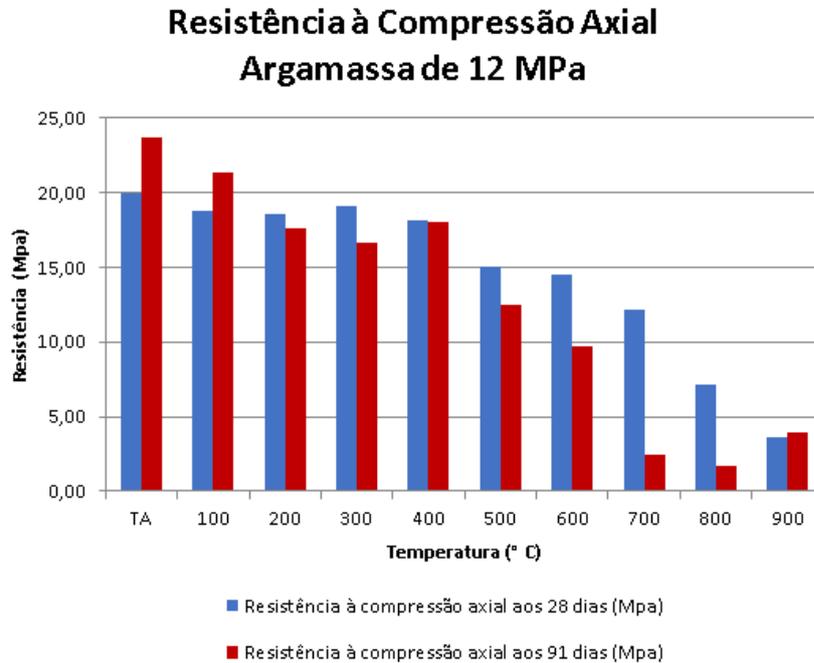
Fonte: Autor

Figura 25 - Resistência à compressão axial para argamassa de 8 MPa



Fonte: Autor

Figura 26 - Resistência à compressão axial para argamassa de 12 MPa



Fonte: Autor

As maiores reduções das resistências à tração e à compressão estão associadas a temperaturas de aquecimento acima de 600 °C. Para temperaturas próximas a 650 °C ocorre uma transformação da estrutura da sílica (presente nos agregados miúdos), com aumento de volume e posterior redução (resfriamento) que certamente levam a redução da integridade dos corpos de prova e conseqüente redução de resistência, podendo levar até a total desintegração, após transcorridos mais de 24 horas do seu esfriamento natural no médio ambiente.

No quadro 11 tomando como referência a resistência à compressão axial na temperatura ambiente também se observou uma perda de resistência com o aumento da temperatura no tratamento das amostras. As maiores perdas de resistência estão na ordem de 92,12% a 93,47% comparado com as resistências iniciais, para as temperaturas mais altas.

Neste quadro também se observa que a argamassa de 6 Mpa com tempo de cura aos 28 dias submetida a uma temperatura de 100 °C, mostra um sinal negativo de -8,69% quando comparada com resistência a compressão axial na temperatura ambiente. Este sinal negativo significa que houve um incremento da resistência à compressão nessa temperatura.

Quadro 11 – Perda de resistência à compressão axial (%)

Temperatura	6 MPa		8 MPa		12 MPa	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
100 °C	-8,69	11,62	25,14	21,92	5,78	9,58
200 °C	8,23	29,24	25,41	19,50	6,96	25,51
300 °C	11,74	24,43	37,09	39,93	4,30	29,43
400 °C	40,70	45,53	46,53	49,72	8,96	23,69
500 °C	43,16	45,26	33,50	35,82	24,79	47,22
600 °C	35,90	52,47	32,18	35,26	27,24	58,89
700 °C	60,21	91,59	74,76	92,82	39,10	89,73
800 °C	80,34	91,59	85,16	93,00	64,07	92,97
900 °C	87,65	92,12	90,27	93,47	81,65	83,38

Fonte: Autor

### 5.5 Análise de espectrometria de fluorescência de Raios X

Esta análise permitirá conhecer a composição química das argamassas industrializadas neste estudo, permitindo estabelecer a proporção que cada uma delas se encontra presente em cada amostra.

Conforme observado no Quadro 12 os resultados das análises de espectrometria de fluorescência de raios X, nos 12 corpos de prova das argamassas ensaiados, mostram que os óxidos que se encontram em maior proporção são: óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), dióxido de silício ou sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e tri óxido de enxofre (SO<sub>3</sub>).

Analisando estes resultados na composição das argamassas pode-se observar que óxido de cálcio (CaO) existente em todas as amostras está em uma proporção de 44,96% a 51,35%, em torno da metade em cada uma delas. O óxido de magnésio (MgO) encontra-se na proporção de 12,1% a 19,56%. O óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) na proporção de 8,56% a 13,41%. O óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) está na proporção de 1,61% a 1,89%, o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) está na proporção de 1,63% a 2,46% e o tri óxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) está na proporção de 1,07% a 1,52%. A presença destes três últimos óxidos indica que fazem parte da composição do cimento na mistura das argamassas.

O restante dos óxidos na composição das argamassas não tem grande representatividade comparado com os óxidos de CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SO<sub>3</sub> existentes nestes ensaios. Estes outros óxidos representam individualmente menos de 1% na constituição das argamassas. Deve-se tomar em consideração a perda de massa na composição das argamassas ao serem submetidas a altas temperaturas. Pode ser considerada uma perda de massa entre 3% a 5%, tomando como base as pesquisas de Rigão (2012).

O CaO faz parte da composição da cal e do cimento na argamassa industrializada. O MgO indica a presença de cal área do tipo dolomítica. O SiO<sub>2</sub> a presença de areia. Os outros óxidos em menor proporção são parte da composição química do cimento, aditivos ou outros compostos químicos.

Somando todas as massas dos óxidos existentes no Quadro 12 estas não chegam ao 100%. Isto pode ter acontecido devido à existência de elementos leves, causados pela heterogeneidade das amostras ou pela rugosidade da superfície.

Quadro 12 – Resultados das análises de espectrometria de fluorescência de raios X

ÓXIDOS	6 Mpa				8 Mpa				12 Mpa			
	TA	200 °C	600 °C	900 °C	TA	200 °C	600 °C	900 °C	TA	200 °C	600 °C	900 °C
CaO(%)	44,96	46,64	47,37	49,24	47,34	46,82	49,45	50,01	50,95	49,41	51,35	50,32
MgO(%)	15,80	16,93	18,20	20,81	16,01	16,44	17,99	19,27	16,46	12,10	17,20	19,56
SiO <sub>2</sub> (%)	10,69	11,76	11,89	12,70	12,05	12,27	13,07	13,41	10,36	8,56	10,58	12,76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,61	1,64	1,64	1,68	1,73	1,68	1,78	1,89	1,64	1,71	1,68	1,81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1,79	2,14	2,11	2,27	1,97	2,19	2,32	2,46	1,97	1,63	2,13	2,30
SO <sub>3</sub> (%)	1,07	1,22	1,20	1,44	1,28	1,37	1,43	1,52	1,48	1,32	1,56	1,59
K <sub>2</sub> O(%)	0,26	0,25	0,23	0,18	0,28	0,24	0,23	0,18	0,28	0,30	0,22	0,17
TiO <sub>2</sub> (%)	0,13	0,13	0,13	0,14	0,12	0,14	0,14	0,16	0,13	0,14	0,14	0,14
SrO(%)	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,07	0,09	0,08
Na <sub>2</sub> O(%)	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06	0,04
MnO(%)	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
CeO <sub>2</sub> (%)										0,03		
Cl(%)	0,03	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05
ZrO <sub>2</sub> (%)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)									0,01	0,01		
ZnO(PPM)	81	81	75	75	87	87	82	89	90	84	97	85
CuO(PPM)	62	48	55	50	58	60	66	49	62	64	49	46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (PPM)		62	74			66	69		56	62	70	71
NiO(PPM)		41	49	57	54	48	54	55	55	57	50	49
Pd(PPM)									66			50
CaO(PPM)												5
TOTAL(%):	76,6	81,0	83,1	88,8	81,1	81,5	86,8	89,3	83,6	75,6	85,2	89,0

Fonte: Autor

## 5.6 Análises da difração de raios X

As análises dos espectros gerados pela difração de raios X, permitirão conhecer as mudanças na estrutura cristalina dos óxidos componentes nas argamassas de 6 Mpa, 8 Mpa e 12 Mpa submetidas as temperaturas de 200 °C, 600 °C e 900 °C.

Nos gráficos de difração de raios X, alguns picos que aparecem nas diversas temperaturas, desaparecem e reaparecem novamente, o qual mostra que as estruturas cristalinas de alguns óxidos componentes das argamassas industrializadas sofrem mudanças de fase, quando submetidos a altas temperaturas, porém mantendo sua porcentagem nestas argamassas, com leves mudanças, quando comparadas com a temperatura ambiente, como pode ser observado nos resultados das análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no Quadro 12.

Conforme o tipo de amostra e a temperatura a que foi submetida há várias fases nas estruturas da célula unitária em diferentes planos, que serão analisadas nas próximas figuras geradas no difratômetro de raios X.

Da figura 27 à figura 30 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 6 MPa com tempo de cura de 28 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. O resultado da análise destas figuras mostra que há uma predominância de mudança de fase do SiO<sub>2</sub>. Na temperatura de 200 °C aparece na forma monoclinica com  $2\theta = 50,63^\circ$ , na forma tetragonal com  $2\theta = 68,79^\circ$  e  $74,73^\circ$ , na forma ortorrômbica com  $2\theta = 73,16^\circ$  e  $77,32^\circ$ . Na temperatura de 600 °C aparece na forma ortorrômbica com  $2\theta = 39,31^\circ$ , na forma cubica com  $2\theta = 47,31^\circ$  e na forma monoclinica com  $2\theta = 48,50^\circ$ . Na temperatura de 900 °C aparece na forma ortorrômbica com  $2\theta = 37,08^\circ$  e  $54,24^\circ$ .

Estas mudanças de fase do SiO<sub>2</sub> são provenientes da presença de areia na mistura da argamassa. Observa-se o aparecimento de MgO, SO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO que são óxidos provenientes da presença de cimento e cal na mistura, mas não sofrem mudanças de fase.

FIGURA 27 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 6 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A TEMP. AMB.

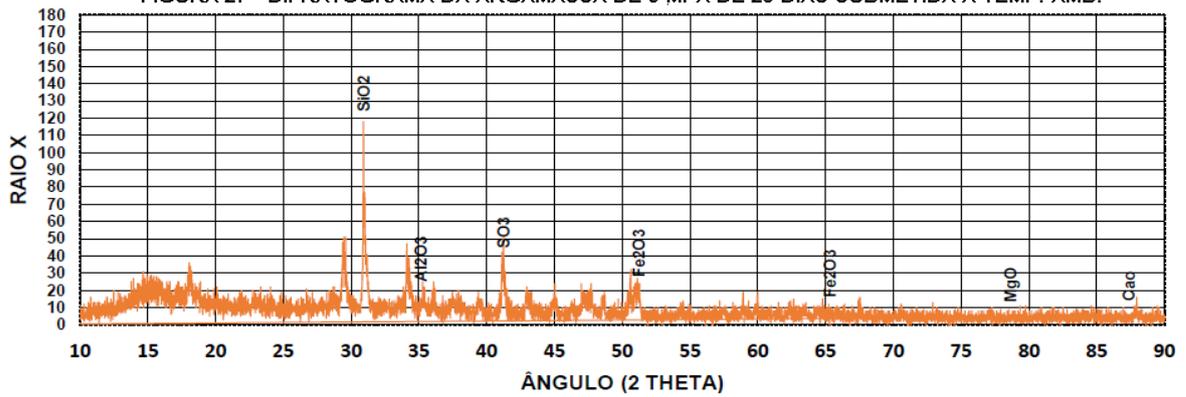


FIGURA 28 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 6 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 200 °C

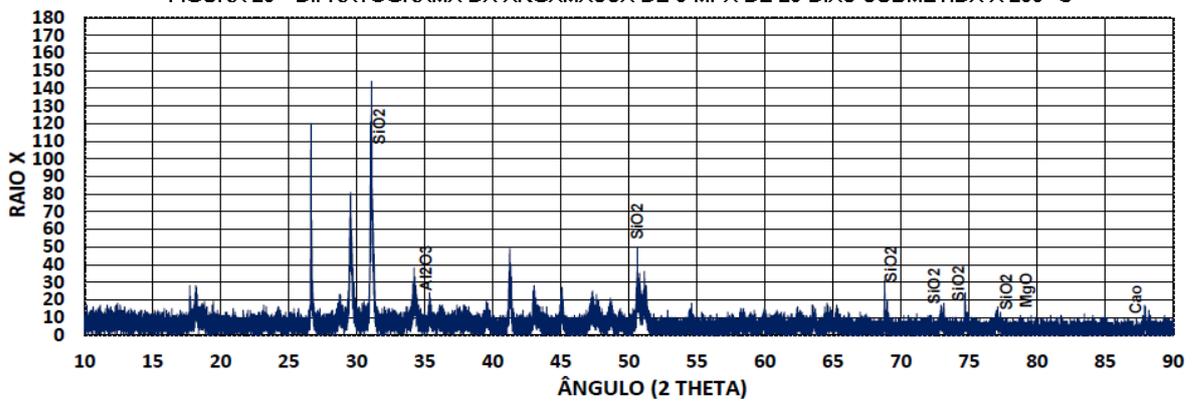


FIGURA 29 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 6 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 600 °C

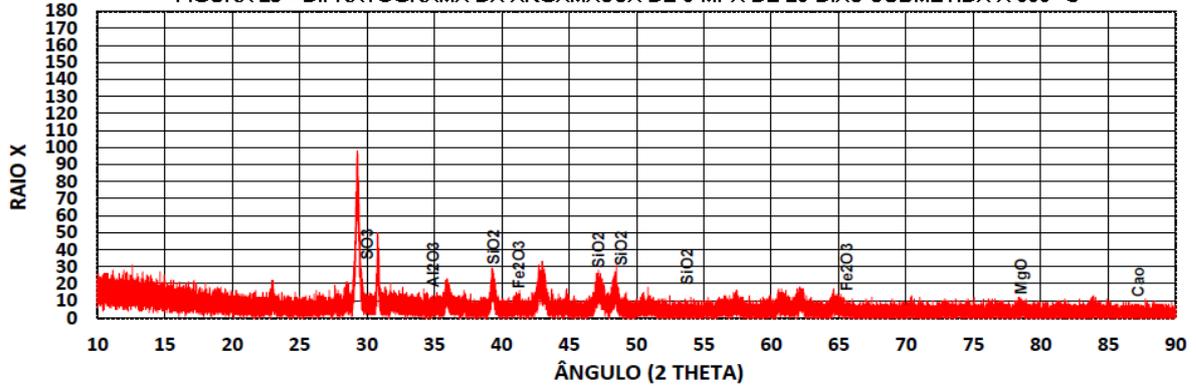
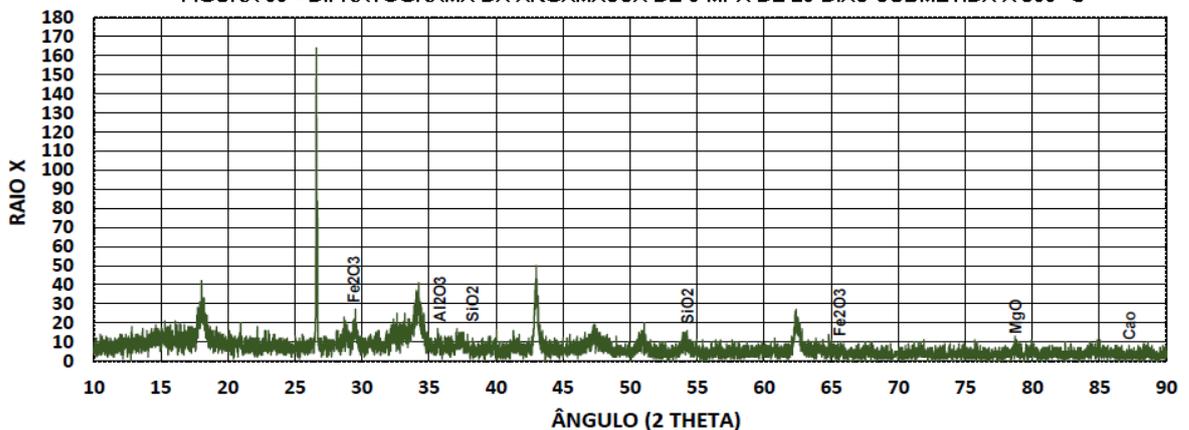


FIGURA 30 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 6 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 900 °C

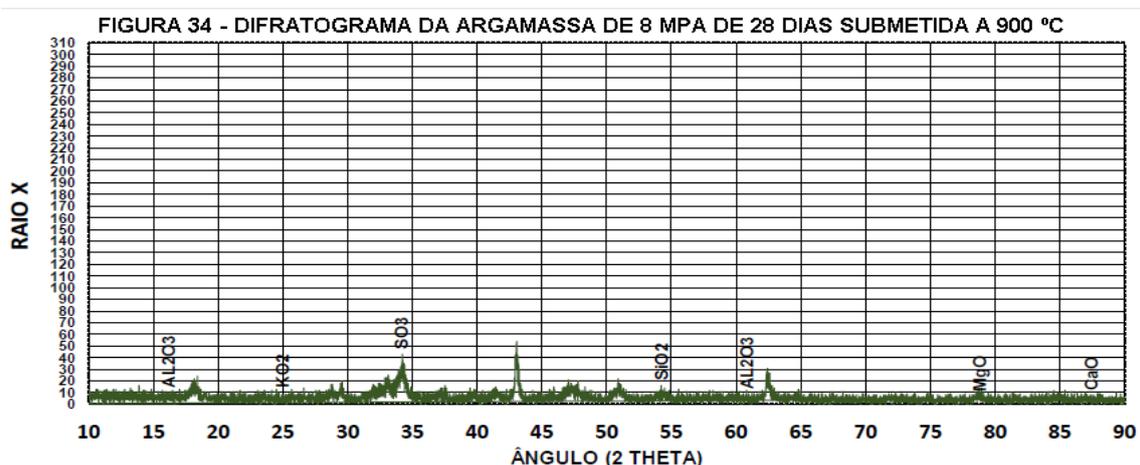
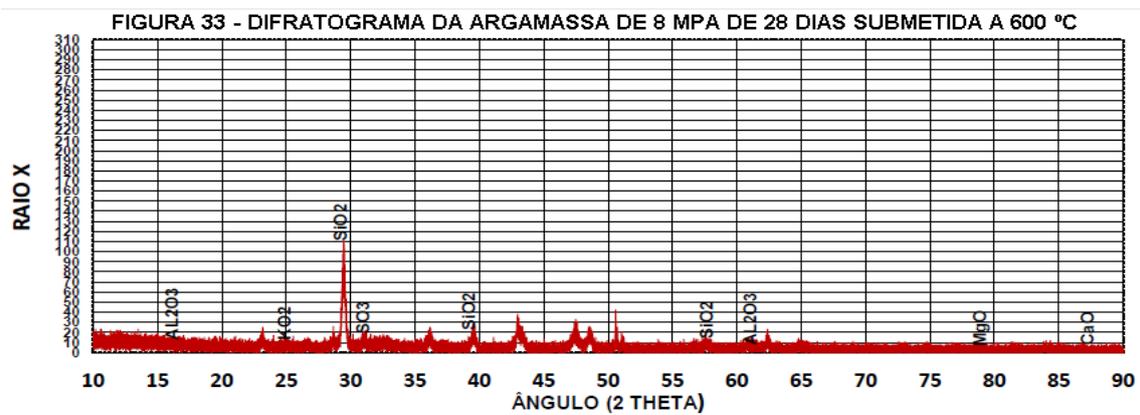
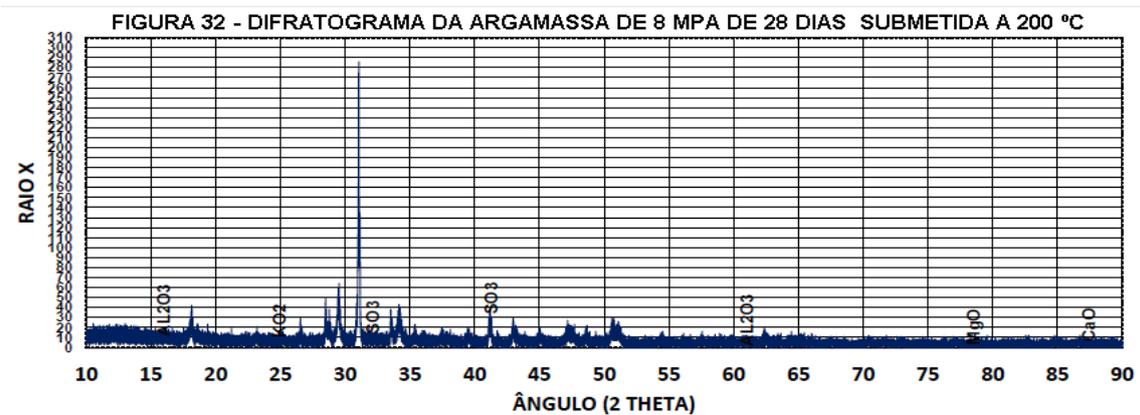
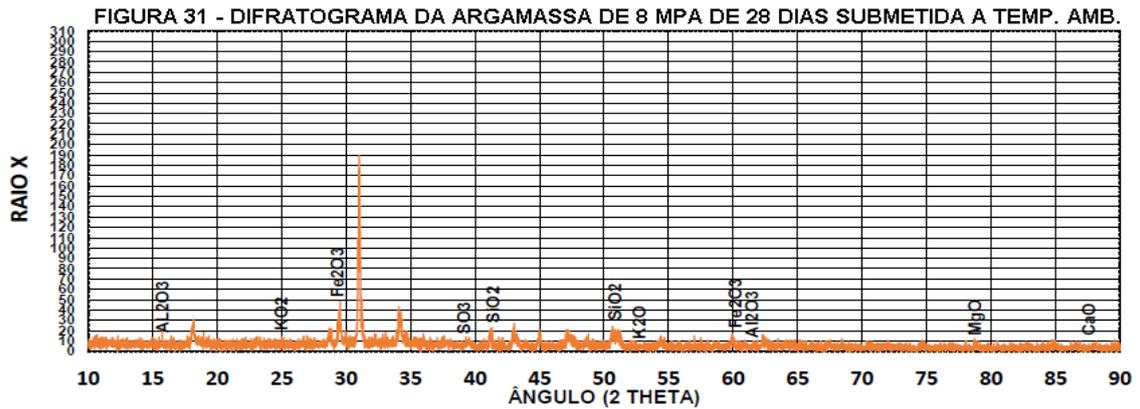


Da figura 31 à figura 34 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 8 MPa com tempo de cura de 28 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. Observa-se que estas argamassas de resistência maior à de 6 Mpa apresentam os óxidos CaO, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que fazem parte da composição do cimento e cal na mistura da argamassa industrializada, não tem mudanças de fase na sua estrutura cristalográfica.

Isto mostra que o CaO e MgO que estão em maior proporção na argamassa, quando submetidos a estas temperaturas de exposição não sofrem mudanças significativas, mantendo sua porcentagem na mistura desta argamassa com leves mudanças, quando comparadas com a temperatura ambiente, como pode ser observado nos resultados das análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no quadro 12.

O SiO<sub>2</sub> apresenta novamente várias mudanças de fase. Quando submetido a 600 °C com  $2\theta = 29,44^\circ$  aparece na forma monoclinica, com  $2\theta = 39,60^\circ$  da forma ortorrômbica e com  $2\theta = 57,97^\circ$  na forma cúbica. Na temperatura de 900 °C com  $2\theta = 54,84^\circ$  aparece da forma tetragonal, nos diversos difratogramas de raios X.

As mudanças de fase do SiO<sub>2</sub> representam a presença de areia na mistura da argamassa industrializada. Observando as análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no quadro 12, este óxido não sofre variações significativas em sua composição original, quando comparado com a temperatura ambiente. Este óxido sofre mudanças de fase nessas temperaturas de exposição, mas mantém sua proporção dentro da mistura de argamassa com poucas variações percentuais de diferença.



Da figura 35 à figura 38 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 12 MPa com tempo de cura de 28 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. A resistência desta argamassa é maior que as anteriores de 6 Mpa e 8 Mpa.

Os óxidos que fazem parte da composição do cimento e da cal, dentro da mistura das argamassas industrializadas, do tipo CaO, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não apresentam mudanças de fase, mantendo sua composição base.

O SiO<sub>2</sub> que faz parte da composição da areia dentro da mistura da argamassa industrializada, apresenta diversas mudanças de fase. Quando submetido a temperatura de 200 °C se encontra no estado monoclinico com  $2\theta = 51^\circ$  e  $67,63^\circ$ . Na temperatura de 600 °C com  $2\theta = 29,47^\circ$  também no estado monoclinico. Na temperatura de 900 °C com  $2\theta = 71,35^\circ$  no estado ortorrômbico. Apesar destas mudanças de fase, é observado nas análises de espectrometria de raios X, no quadro 12, que sua proporção nas amostras de argamassa, não tem variações significativas quando comparado com as argamassas a temperatura ambiente.

FIGURA 35 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 12 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A TEMP. AMB.

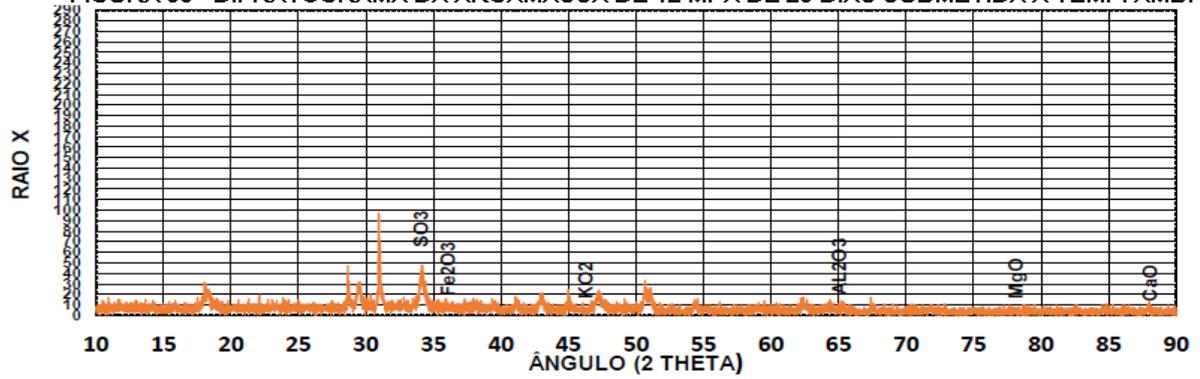


FIGURA 36 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 12 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 200 °C

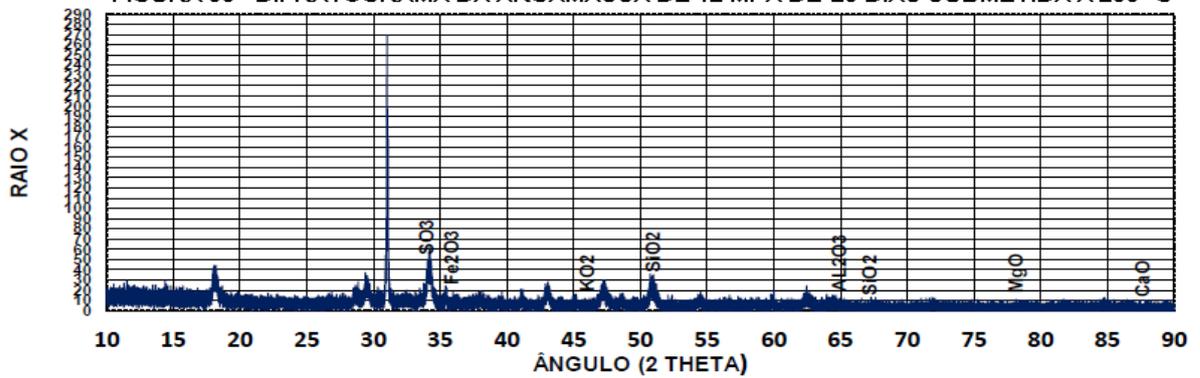


FIGURA 37 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 12 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 600 °C

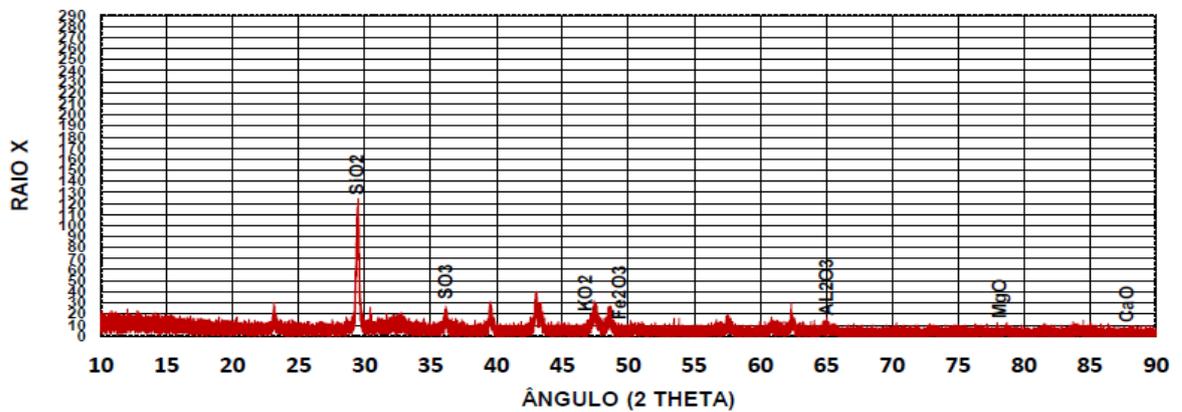
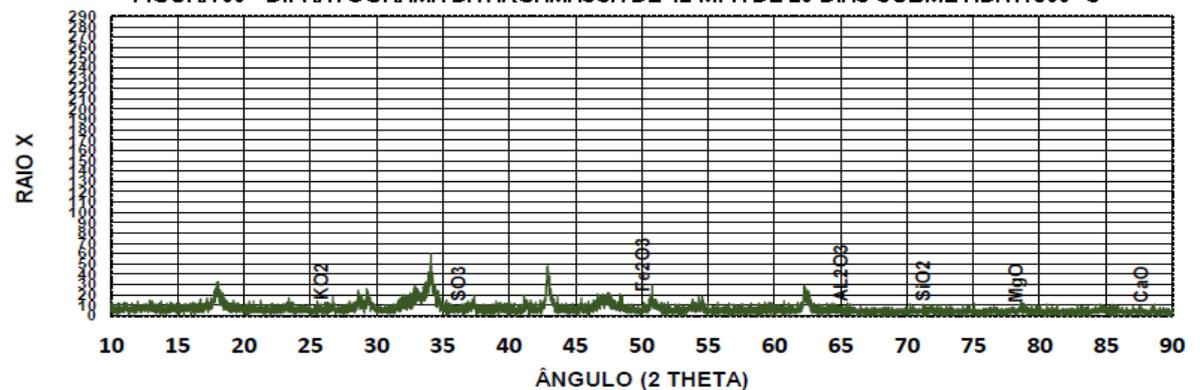


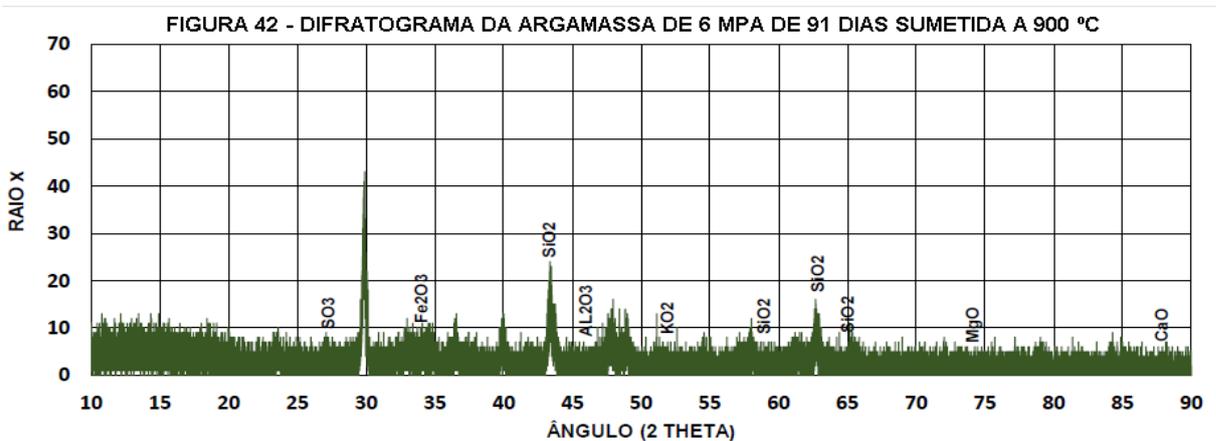
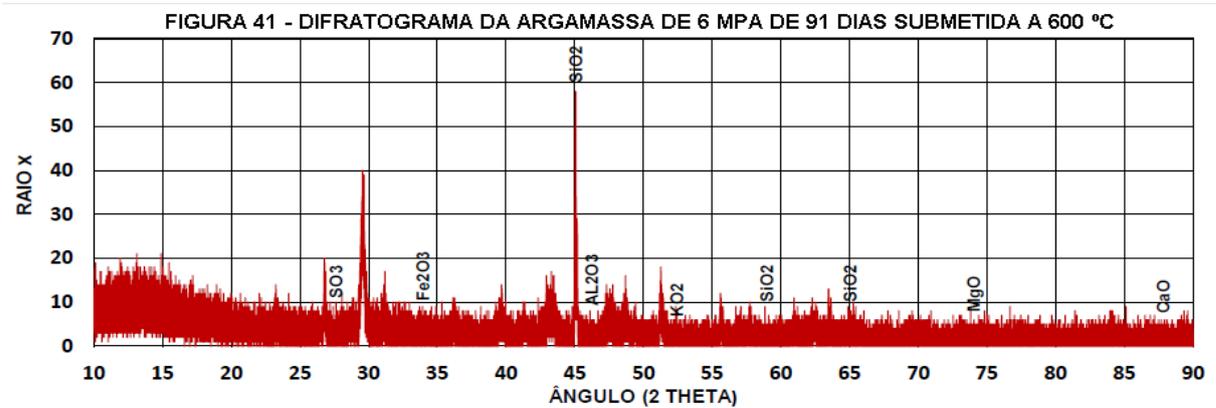
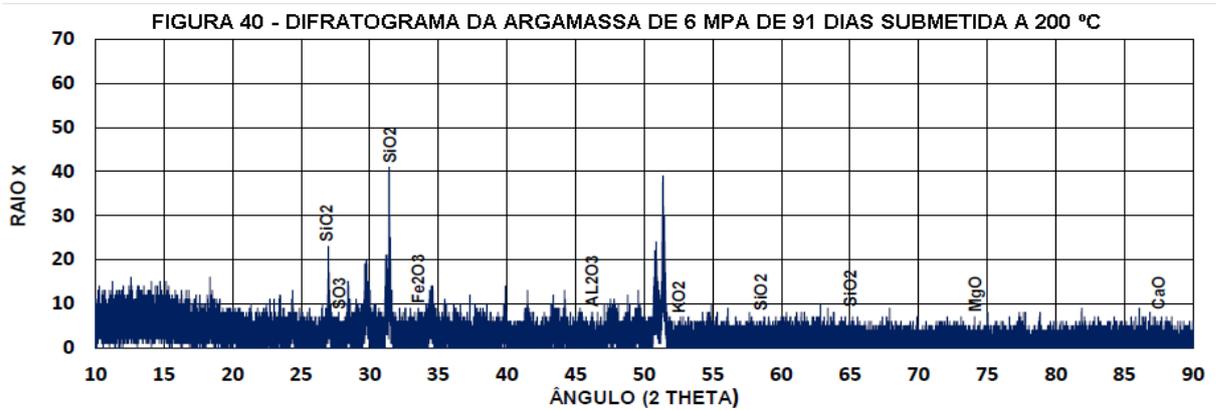
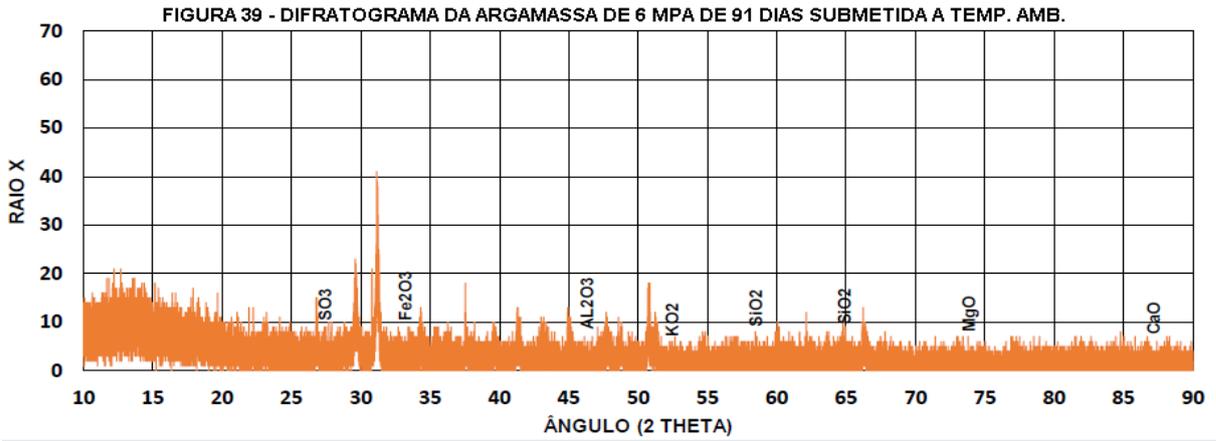
FIGURA 38 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 12 MPA DE 28 DIAS SUBMETIDA A 900 °C



Da figura 39 à figura 42 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 6 MPa com tempo de cura de 91 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. Comparado com as figuras das argamassas de mesma resistência mais com tempo de cura de 28 dias apresentam alguns picos diferentes, porém de menor intensidade e desfasados. Analisando as fichas de difração para estes óxidos em questão, observa-se que eles sofrem mudança de fase na estrutura cristalográfica, mas mantendo a composição química original.

Os óxidos MgO, KO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que fazem parte da composição do cimento e o CaO que faz parte da composição da cal dentro da mistura das argamassas, não tem mudança de fase. Na temperatura de 200 °C, 600 °C e 900 °C o SiO<sub>2</sub> apresenta diversas mudanças de fase.

O SiO<sub>2</sub> aparece na forma monoclinica com  $2\theta = 26,97^\circ$  da forma tetragonal e com  $2\theta = 32,41^\circ$  da forma monoclinica, com  $2\theta = 51,36^\circ$  da forma ortorrômbica. A 600 °C com  $2\theta = 45,05^\circ$  da forma ortorrômbica. A 900 °C com  $2\theta = 43,45^\circ$  e  $58,05^\circ$  da forma monoclinica, com  $2\theta = 62,70^\circ$  da forma ortorrômbica. Este óxido que faz parte da areia, na composição da argamassa industrializada, sofre diversas mudanças de fase na sua estrutura cristalográfica, porém como observado nas análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no quadro 12, não tem variações significativas quando comparado com as argamassas à temperatura ambiente.



Da figura 43 à figura 46 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 8 MPa com tempo de cura de 91 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. Fazendo uma comparação com alguns dos picos dos gráficos dos difratogramas de mesma resistência, mas com tempo de cura de 28 dias, apresentam alguns picos diferentes, porém de menor intensidade e desfasados.

Não existe mudança de fase para os óxidos do tipo CaO, MgO, KO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, que são parte da composição do cimento e da cal dolomítica, dentro da mistura da argamassa industrializada.

O SiO<sub>2</sub> que faz parte da areia na composição da argamassa industrializada tem mudanças de fase. Na temperatura ambiente com  $2\theta = 28,16^\circ$  no estado monoclinico e com  $2\theta = 41,53^\circ$  no estado ortorrômbico. Também se encontra no estado ortorrômbico na temperatura de 600 °C com  $2\theta = 55,24^\circ$  e na temperatura de 900 °C com  $2\theta = 47,71^\circ$ . Comparando as análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no quadro 12, em conjunto com as fichas de difração para este óxido em questão, observa-se que eles sofrem mudança de fase na estrutura cristalográfica, mas mantendo a proporção na composição química original, com poucas variações significativas quando comparado com as argamassas à temperatura ambiente.

FIGURA 43 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 8 MPA DE 91 DIAS SUBMETIDA A TEMP. AMB.

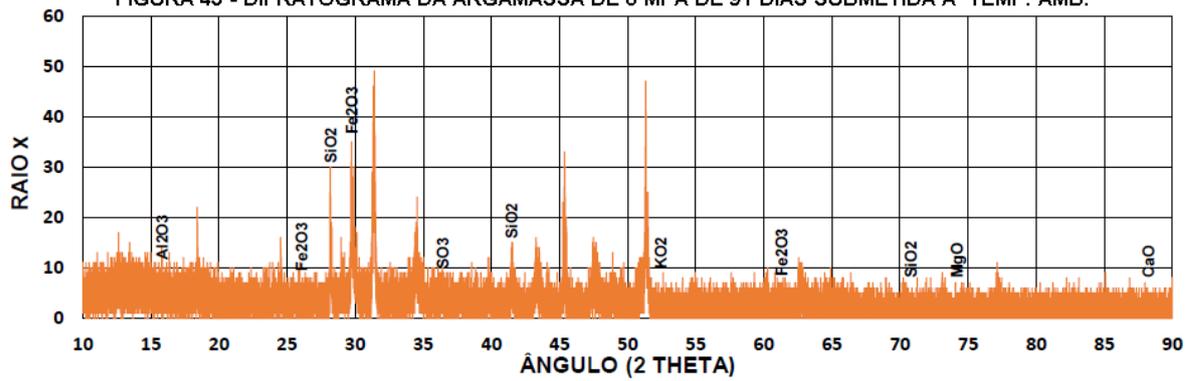


FIGURA 44 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 8 MPA DE 91 DIAS SUBMETIDA A 200 °C

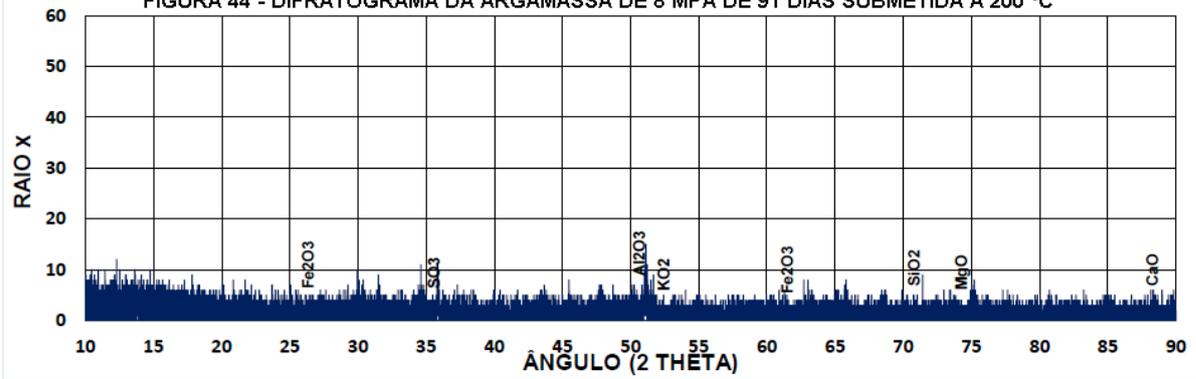


FIGURA 45 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 8 MPA DE 91 DIAS SUBMETIDA A 600 °C

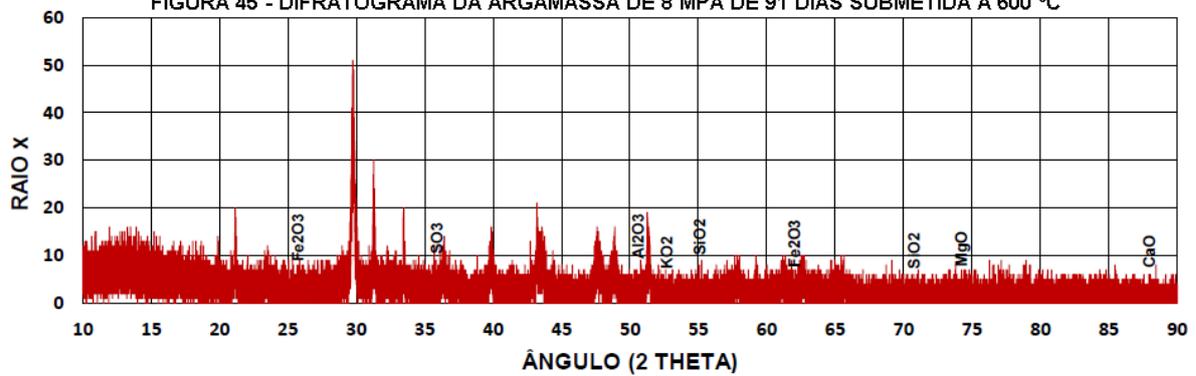
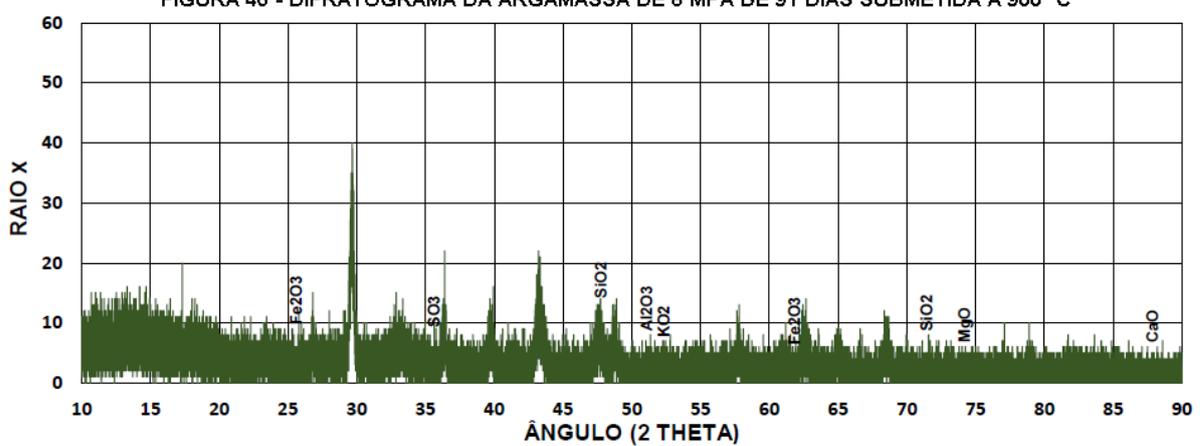


FIGURA 46 - DIFRATOGRAMA DA ARGAMASSA DE 8 MPA DE 91 DIAS SUBMETIDA A 900 °C

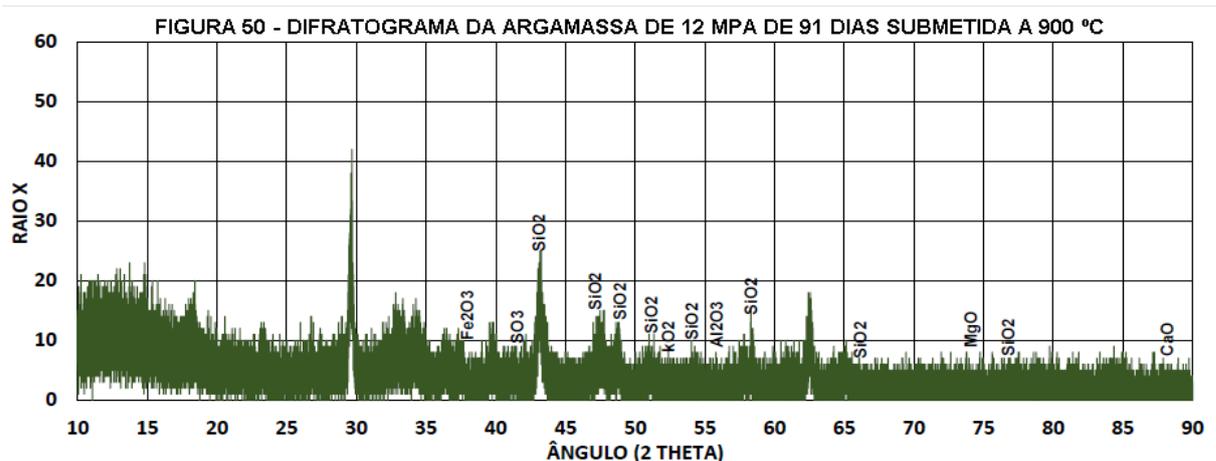
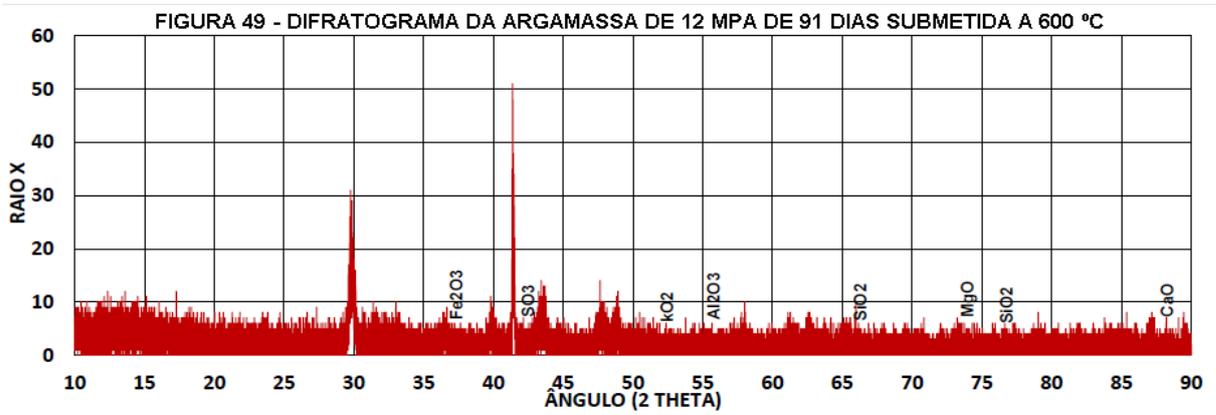
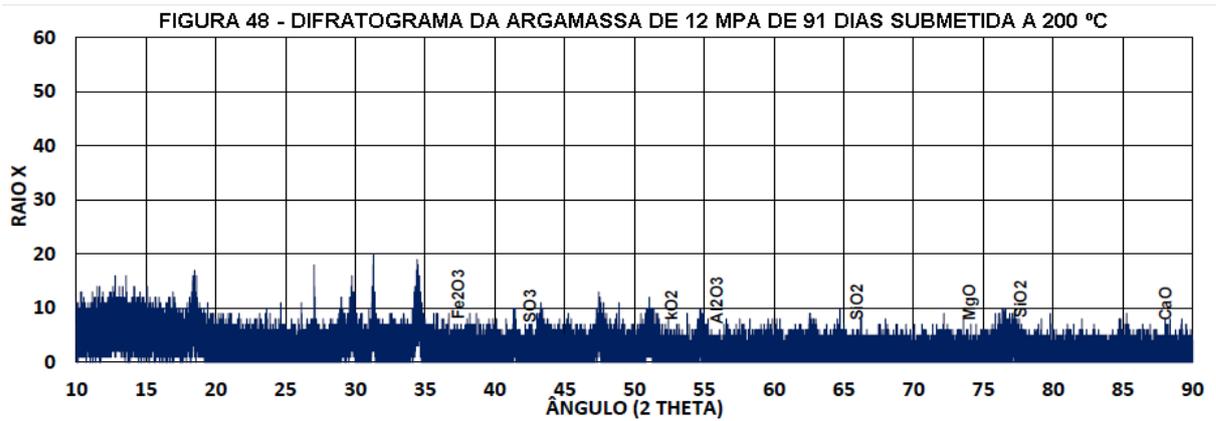
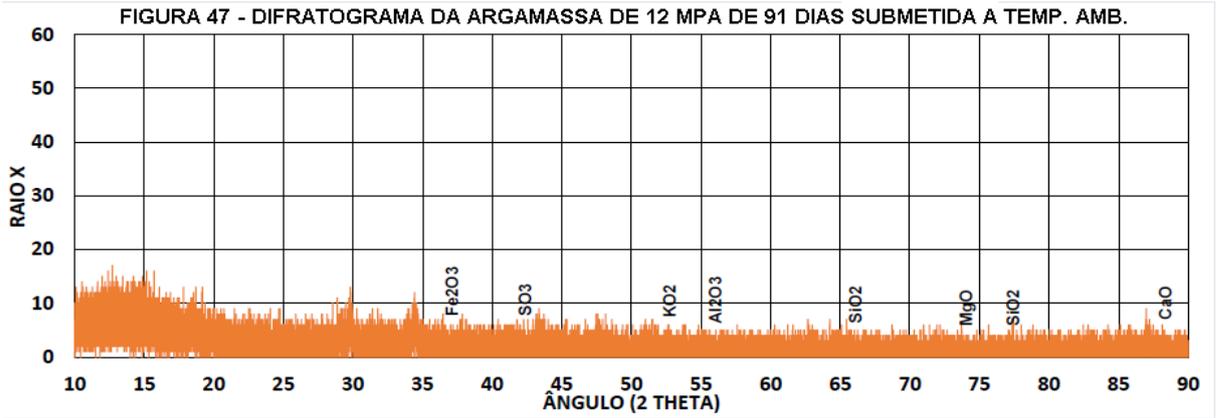


Fonte: Autor

Da figura 47 à figura 50 mostram-se os difratogramas de raios X das argamassas de 12 MPa com tempo de cura de 91 dias submetidas à temperatura ambiente, à temperatura de 200°C, à temperatura de 600 °C e à temperatura de 900 °C respectivamente. Comparando alguns dos maiores picos dos difratogramas das argamassas de mesma resistência submetidas as mesmas temperaturas porem com tempo de cura de 28 dias, também são de menor intensidade e desfasados. Analisando as fichas de difração destes óxidos, se observa mudança de fase na sua estrutura cristalográfica, mais mantendo a composição química original.

Os óxidos CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, KO<sub>2</sub>, e SO<sub>3</sub>, que fazem parte da composição do cimento e cal, na mistura da argamassa industrializada, não é observada mudança de fase.

A sílica SiO<sub>2</sub> que faz parte da areia na composição da argamassa industrializada tem mudanças de fase. Na temperatura de 900 °C no estado monoclinico com  $2\theta = 43,22^\circ$ , no estado ortorrômbico com  $2\theta = 36,68^\circ$ ,  $47,21^\circ$  e  $58,28^\circ$ . Nesta mesma temperatura aparece na forma tetragonal quando  $2\theta = 48,87^\circ$ ,  $50,99^\circ$  e  $54,27^\circ$ . Observando as análises de espectrometria de fluorescência de raios X, no quadro 12, este óxido não sofre maiores mudanças, mantém a proporção na composição química original, com poucas variações significativas quando comparado com as argamassas à temperatura ambiente.



Apesar de existir maior proporção em massa de CaO e MgO conforme mostrado na composição química das argamassas, estes óxidos não têm mudanças de fase em todos os difratogramas de raios X, devido a que suas composições estruturais se mantêm ao serem submetidas a altas temperaturas.

Nos diversos difratogramas de raios X quem aparece mais é a sílica SiO<sub>2</sub>, pois é o que mais se formou nas superfícies dos grãos. Este fato significa que a sílica sofre maiores mudanças em sua composição estrutural que os outros óxidos existentes, compatível com as alterações de integridade e redução da resistência dos corpos de prova nas temperaturas mais altas.

Os outros óxidos que aparecem em menor proporção na composição química das argamassas industrializadas como o caso do óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), não sofrem grandes mudanças em sua composição estrutural. Estes últimos 4 elementos químicos fazem parte da composição do cimento, que se encontra presente na mistura das argamassas, indicando que não existe mudanças de fase quando submetidas as temperaturas mencionadas nos difratogramas de raios X.

Como pode ser observado nas análises de espectrometria de raios X, no quadro 12, existem outros óxidos dentro da composição das argamassas industrializadas, porém em proporções menores de 1%, que estão presentes nas análises de difração de raios X, desenvolvendo mudanças de fase, mais encontram-se em proporções bastante pequenas, possivelmente em etapa de transição tratando de formar outros compostos químicos.

## 6. CONCLUSÕES

As amostras utilizadas foram argamassas industrializadas (resistências de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa) das quais não foi possível obter, do fabricante, informações sobre os traços e composição.

Das análises das propriedades mecânicas das amostras pode-se observar:

- Nas argamassas estudadas, submetidas a altas temperaturas, verificou-se a redução da resistência com o aumento da temperatura.

- As argamassas submetidas à tração na flexão, tomando-se como referência a resistência à temperatura ambiente, apresentaram expressivas perdas de resistência da ordem de 37% a 91%, quando aquecidas em temperaturas mais altas (500 °C, 600 °C e 900 °C).

- As argamassas submetidas à compressão axial, apresentaram perdas de resistência que variaram da ordem de 25% a 93%, para as temperaturas mais altas (500° C, 600 °C e 900 °C). Na temperatura de 900 °C, as argamassas ficaram quase sem nenhuma resistência.

- Nos gráficos, tanto na resistência à tração na flexão como para a resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, não foi possível encontrar equações de regressão não linear que permitam a simulação das resistências das argamassas analisadas quando submetidas a temperaturas superiores a 900 °C.

Das análises de fluorescência de raios X ou análises químicas observou-se:

- Nas análises químicas de todas as argamassas submetidas a altas temperaturas encontrou-se uma maior proporção de óxido de cal (CaO), que faz parte da composição do cimento e do cal. O segundo componente em maior proporção foi o óxido de magnésio (MgO) indicando a presença de cal aérea do tipo dolomítica. O terceiro componente em maior proporção foi o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) - sílica, indicando a presença de areia. Os outros óxidos que estão em menor proporção são componentes do cimento, parte de aditivos ou o começo da formação de outras composições químicas em função da elevação da temperatura.

- Os resultados das análises químicas confirmaram que para obter argamassas de maior resistência é necessário um maior consumo de cimento (expresso pelas maiores percentagens na composição) e um menor fator água: cimento. Este componente da argamassa ao ser hidratado passa por uma série de reações químicas até endurecer à temperatura ambiente. As argamassas submetidas a altas temperaturas, perderam moléculas de água com conseqüente perda de massa, diminuição de volume e alteração da composição.

- As argamassas de 6 MPa, 8 MPa e 12 MPa ao serem submetidas a altas temperaturas tiveram grande fissuração após 24 horas de resfriamento na temperatura ambiente.

- Amostras de mesmas argamassas, submetidas às temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900 °C, após um tempo superior a 24 horas de resfriamento à temperatura ambiente, começaram a esfarelar virando pó. Este fato está associado à baixíssima resistência mecânica residual e à reidratação com perda de estrutura e de coesão aparente.

Das análises de difração de raios X conclui-se:

- Nas análises de difração de raios X observou-se o deslocamento dos picos assim como também o alargamento ou estreitamento deles. O aquecimento das argamassas gerou uma mudança de estrutura e de composição resultando na quase total perda de resistência e, em alguns casos, no esfrelamento das amostras submetidas a temperaturas de 700 °C, 800 °C e 900°C;

- Os óxidos que fazem parte da composição das argamassas a temperatura ambiente mantiveram-se com o aumento de temperatura porém em proporções diferentes. A mudança de fase dos mesmos na superfície dos grãos ocasionou uma perda de aderência e de coesão. Isso é justificado pelo aparecimento e desaparecimento dos picos nas análises de difração de raios X;

- As argamassas submetidas à altas temperaturas mostram as mudanças na estrutura cristalográfica dos óxidos, porém mantendo a composição química até uma temperatura de 900 °C.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NORMA BRASILEIRA.

\_\_\_\_\_. **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001, 13p.

\_\_\_\_\_. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995, 18 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6453**: Cal virgem para construção civil. Rio de Janeiro, 2003, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2005, 4 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998, 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 1983, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996, 08 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8042**: Bloco cerâmico para alvenaria – Formas e dimensões. Rio de Janeiro, 1992, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 8545**. Execução de alvenaria sem função estrutural de tijolos e blocos cerâmicos. Rio de Janeiro, 1984, 13 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10636**. Paredes e divisórias sem função estrutural – Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1989, 7 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11172.** Aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro, 1990, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578.** Cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1991, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 11560.** Água destinada ao amassamento do concreto para estruturas classes I, em centrais núcleo elétricas – Qualidade e controle. Rio de Janeiro, 1990, 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12989.** Cimento portland branco. Rio de Janeiro, 1993, 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13207.** Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994, 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, 2002, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão axial. Rio de Janeiro, 2005, 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005, 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13529:** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995, 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13530.** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Classificação. Rio de Janeiro, 1995, 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13749.** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 1996, 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13860.** Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997, 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro, 1999, 46 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-1**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2010, 60 p.

ARAUJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. G. A. **Materiais de Construção**. Capítulo 3: Aglomerantes, [s. n.], 2011, p. 18 – 37.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), Boletim Técnico 106 (BT-106), Guia básico de Utilização do cimento portland, São Paulo, 2002, 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP), Manual de revestimentos de argamassa, São Paulo, 2012, 104 p.

AZEVEDO, M. S. de. **Estruturas em Situação de Incêndio**. Capítulo 2: Fundamentos de Fogo e Incêndio. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. n.], São Paulo, 2013, 11 p.

BRENTANO, T. **A proteção contra Incêndios no Projeto de Edificações**, Porto Alegre, [s. n.], 2007, 616 p.

BRITES, C. A. **Avaliação de Pilares de Concreto Armado Colorido de Alta Resistência, Submetidos a Elevadas Temperaturas**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2011, 252 p.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G.; **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**. 4. Ed. Rio de Janeiro, 2015, 805 p.

CARNEIRO, L. F. C. (2014). **Resistência a Altas Temperaturas de Argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM)**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Escola de Engenharia, Portugal, 2014, 98 p.

CASALI, M. J. **Estudo da Interação entre a Argamassa de Assentamento e o Bloco de Concreto para Alvenaria Estrutural: Transporte de água e Aderência.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008, 348 p.

CASCUDO, O. CARASEK, H. **Controle de Produção de argamassas Industrializadas em obra empregando o método de penetração do cone,** 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, [ s. n.], Lisboa, Portugal, 2007, 12 p.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). DTU 25 .1: Du2019Enduits Intérieurs em Plâtre. Paris, 1975.

COSTA, L. F. **Resistência a altas temperaturas de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM).** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2014, 98 p.

COSTA, S. C. **Avaliação da resistência ao fogo de produtos de construção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro. Departamento de Engenharia Civil, Portugal, 2010, 133 p.

COUTINHO, S.M.; SORAYA, M. P.; TRISTÃO, F. A. Argamassa preparada em Obra x argamassa industrializada para assentamentos de blocos de vedação: Análise do uso em Vitória – ES. Teoria e Prática em Engenharia Civil, nº 21, [s. n.], 2013, 7 p.

CUNHA, et al. **High temperatures behaviour of mortars with incorporation of phase change materials,** 1º Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, [s. n.], Portugal, 2014, 12p.

EZZIANE, et al. **Properties of fibre mortars exposure to high temperatures.** European Journal of Environmental and Civil Engineering, volume 15, 2011, p. 425 - 431.

GOMES, T. **Projeto de Prevenção e Combate à Incêndio**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Tecnológico. Curso de Engenharia Civi. Universidade Federal de Santa Maria, 2014, 94 p.

GRULLON, M. R. **Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo de estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. Departamento de Engenharia e Construção Civil, 2004, 107 p

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de Argamassas de Assentamento Produzidas com Areia Artificial para Alvenaria Estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003, 180 p.

HANAWALT, J. D.; RINN, H. W. **Industrial and Engineering Chemistry**, Anal Ed. 8, 1936, 244 p.

JOCHEM, L. F. **Estudo das argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD: Características físicas e propriedades da microestrutura**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2012, 221 p.

KELES, G. J. **Investigação da resistência ao fogo de uma argamassa aditivada com fibras vegetais**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas Gerais. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2011, 125 p.

KOCKAL, N. U. **Effects of elevated temperature and re-curing on the properties of mortars containing industrial waste materials.**, Transactions of Civil Engineering, Republic of Iran, Vol. 37, No.C1, p. 67-76

LEITE, H. A. L. **Alvenaria estrutural em situação de incêndio – proposta de avaliação com vistas à normatização**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas, São Paulo, 2018, 152 p.

MARQUES, M. L.; CAMPOS, K. (2012). **Estudo da adição do pó de pedra em argamassas de revestimento e assentamento**. Pindorama-Revista Eletrônica Científica do IFBA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia) v, 3, 150-164.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. M. P. **A ação do fogo sobre os componentes do concreto**. Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v.32, n. 1, p. 47-55, jan. /mar. 2011.

NASCIMENTO, M. R. de. **O uso da Argamassa de Assentamento como preenchimento de Alvenaria Estrutural Cerâmica**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015, 265 p.

ONO, R. **Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, volume 7, nº 1, Porto Alegre, 2007, 16 p.

RAMALHO, M. A., CORRÊA, M. R. **Projeto de Edifícios de Alvenaria Estrutural**. Editora PINI, São Paulo, 2003, 188 p.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**, 2012, 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, 2012.

ROMANO et al. Efeito do procedimento de mistura nas características de argamassas de revestimento industrializadas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. n.], 2010, 6 p.

ROSEMANN, F. Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 2011, 160 p.

RYAN, P. "**Environmental Low Temperature Geochemistry Ed.**", Ltd. John Wiley & Sons. Wiley Blackwell, 2014.

SANTIAGO, C.C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p.

SHACKELFORD, J. F., **Ciência dos Materiais**. 6º ed. São Paulo, 2008, 556 p,

SILVA, A. J. **Alvenaria**, Departamento de Engenharia Civil, Recife, Universidade Católica de Pernambuco, [s. n.], 2004, 13p.

SILVA, L. D. **Técnica e Procedimentos para assentamento de alvenaria de vedação estrutural**. Trabalho de Conclusão, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, SP, 2007, 61 p.

SILVA, N. G. da; CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 8, n.4, out/dez 2008, p. 21-35.

SOTO, I. O. **Influência do tipo de argamassamento e da utilização de peças de ajuste dimensional na resistência à compressão na alvenaria de blocos de concreto**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011, 179 p.

SOUZA, D. T. **A nova legislação de prevenção e combate a incêndio em Porto Alegre: Uma análise crítica**. Monografia (para obtenção do grau de especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho). Faculdade de Engenharia. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), Porto Alegre, 2014, 85 p.

SOUZA, R. P. de. **Avaliação da Influência da Espessura do Revestimento Argamassado e do Carregamento no Comportamento da Alvenaria frente a Altas Temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, 2017, 137 p.

VANDERLEI, M.J.; RUBIANE, P.N.A. **Argamassas de gesso**. Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, [s. n.], São Paulo, 2012, 10 p.