



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ELEVADAS
TEMPERATURAS EM REVESTIMENTO DE
ARGAMASSA**

MAURICIO SCHAFFER

São Leopoldo, Outubro de 2015.

MAURICIO SCHAFFER

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ELEVADAS
TEMPERATURAS EM REVESTIMENTO DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Co-Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Banca examinadora: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva
Prof. Dr. Daniel Tregnago
Pagnussat

São Leopoldo, Outubro de 2015.

S296a

Schafer, Mauricio.

Análise da influência de elevadas temperaturas em revestimento de argamassa / Mauricio Schafer. – 2015.
131 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

“Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak ;
Co-Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian”.

1. Argamassa. 2. Concreto – Efeito da temperatura. I.
Título.

CDU 691.53

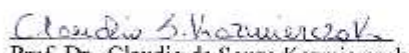
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252)

MAURÍCIO SCHÄFER

**"ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ELEVADAS
TEMPERATURAS EM REVESTIMENTO DE ARGAMASSA"**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 28 de outubro de 2015


Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Orientador - UNISINOS


Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC - UNISINOS


Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian
Coorientador - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat - UNISINOS/UCS


Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho - UFRGS

Dedico a todas as pessoas que me apoiaram e me incentivaram nesta caminhada, principalmente meus pais Arno José Schäfer e Lori Maria Schäfer, ao meu irmão Vinicius Schäfer e a minha namorada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conduzir tão bem por este caminho, e também por me dar calma, paciência e sabedoria para as tomadas de decisões.

Aos professores Dr. Claudio de Souza Kazmierczak e Dr. Bernardo Fonseca Tutikian, que acreditaram em minha capacidade para desenvolvimento do trabalho, por terem disponibilizado seu tempo, para me apontar a direção correta a seguir, e sabiamente passando seus conhecimentos de forma clara para facilitar o meu entendimento, professores o meu obrigado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação, pela seriedade com que constroem os alicerces da nossa experiência em pesquisa, e por se mostrarem sempre prestativos em darem idéias e auxiliarem em eventuais dúvidas na pesquisa.

Aos meus amigos e colegas Ingrid, Júlio Cesar, David, Rodrigo (Tchai), obrigado pela força e pela ajuda, devo muito deste trabalho a vocês, principalmente para o Tchai que sempre passa sua alegria para todos que estão em sua volta.

Aos amigos e funcionários do itt Performance, Emir, Gustavo, Augusto, Bruno, Lucas, Gabriela, Josiane, Jonas, Sérgio, Camila, Gisele, Jordan, Rafael, Fernanda (Nanda), Roberto (Beto), que sempre me auxiliaram quando precisei, obrigado pessoal.

Aos amigos que quando eu estava trabalhando em minha pesquisa foram sempre prestativos, o meu muito obrigado a Angélica, Barbara, Rodrigo E., Jeferson e Laércio, valeu pessoal.

Às empresas Bennter e Pauluzzi pela doação de materiais para a pesquisa.

Ao itt Performance e a Universidade do Vale do Rio dos Sinos, pela concessão da bolsa de estudos.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	25
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	25
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	25
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL FRENTE AO INCÊNDIO.....	27
2.2	COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA APLICADOS EM SUBSTRATO DE CERÂMICA VERMELHA EM ELEVADAS TEMPERATURAS	29
2.3	COMPORTAMENTO DE COMPONENTES A BASE DE CIMENTO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS.....	33
2.3.1	<i>Alterações Físicas</i>	33
2.3.2	<i>Alterações Químicas</i>	36
2.3.3	<i>Influência da Alta Temperatura nas Propriedades Mecânicas</i>	41
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	47
3.1.1	<i>Fatores e níveis de controle</i>	49
3.1.2	<i>Fatores Fixos</i>	49
3.1.3	<i>Fatores não controláveis</i>	49
3.1.4	<i>Variáveis de resposta</i>	50
3.1.5	<i>Projeto de experimentos</i>	50
3.1.6	<i>Tratamento dos dados</i>	51
3.2	MATERIAIS.....	52
3.2.1	<i>Cimento</i>	52
3.2.2	<i>Agregado miúdo</i>	53
3.2.3	<i>Argamassa Industrializada</i>	55
3.2.4	<i>Blocos cerâmicos</i>	56
3.2.5	<i>Água</i>	56
3.3	MÉTODOS	56
3.3.1	<i>Preparação do Substrato</i>	56
3.3.2	<i>Preparação da base para o revestimento</i>	58
3.3.3	<i>Produção do revestimento</i>	58
3.3.4	<i>Processo de elevação de temperatura</i>	58
3.3.5	<i>Caracterização da argamassa</i>	59
3.3.6	<i>Caracterização do revestimento</i>	61
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
4.1	ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA SUBMETIDOS A AQUECIMENTO EM MUFLA 67	
4.1.1	<i>Resistência à compressão</i>	67
4.1.2	<i>Resistência à tração na flexão</i>	70
4.1.3	<i>Densidade de massa</i>	73
4.1.4	<i>Índice de vazios e absorção de água total</i>	75
4.1.5	<i>Coeficiente de capilaridade</i>	78
4.1.6	<i>Módulo de elasticidade dinâmico</i>	81
4.1.7	<i>Difração de raios X</i>	83
4.1.8	<i>Análise conjunta dos resultados</i>	86
4.2	ENSAIOS EM REVESTIMENTOS SUBMETIDOS A AQUECIMENTO EM MUFLA	88
4.2.1	<i>Avaliação da Resistência de aderência à tração</i>	89
4.2.2	<i>Análise da velocidade da propagação da onda</i>	92

4.2.3	<i>Índice de vazios</i>	94
4.2.4	<i>Absorção capilar pelo método da Rilem TC 116 PCD (1999)</i>	95
4.2.5	<i>Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)</i>	97
4.2.6	<i>Análise conjunta dos resultados</i>	97
4.3	ENSAIOS EM REVESTIMENTO DE PAREDE EM ESCALA REAL SUBMETIDO À AÇÃO DE FOGO 99	
4.3.1	<i>Avaliação da Resistência de aderência à tração</i>	99
4.3.2	<i>Índice de vazios</i>	102
4.3.3	<i>Absorção capilar pelo método da Rilem TC 116 PCD (1999)</i>	103
4.3.4	<i>Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)</i>	104
4.3.5	<i>Análise conjunta dos resultados</i>	105
5	CONCLUSÃO	107
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	APÊNDICES	119
	APÊNDICE A - VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SUBMETIDOS À MUFLA	121
	APÊNDICE B - PERFIS DE ABSORÇÃO CAPILAR ATÉ 120 HORAS DOS REVESTIMENTOS SUBMETIDOS À MUFLA	125
	APÊNDICE C - VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS PAREDES SUBMETIDAS AO FOGO	127
	APÊNDICE D - PERFIS DE ABSORÇÃO CAPILAR DAS PAREDES SUBMETIDAS AO FOGO ATÉ 120 HORAS	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Elevação da temperatura.....	28
Tabela 2 - Lista de propriedades indicadas pelo Comitê 13-MR da Rilem, como requisitos de desempenho (Saretok 1977 apud Araújo 1995).	30
Tabela 3 – Temperatura versus efeito na argamassa.	35
Tabela 4 – Alterações químicas em função da temperatura.	40
Tabela 5 – Queda da resistência à compressão em função da temperatura.....	41
Tabela 6 – Queda do módulo de elasticidade em função da temperatura.	44
Tabela 7 – Quantidade de ensaios realizados.	51
Tabela 8 – Características químicas do cimento (Lote 03/2015).	52
Tabela 9 – Características físicas do cimento (Lote 03/2015).	53
Tabela 10 – Caracterização do agregado miúdo.....	53
Tabela 11 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no chapisco.....	54
Tabela 12 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no revestimento.....	54
Tabela 13 - Caracterização da argamassa no estado fresco.....	55
Tabela 14 - Caracterização da argamassa no estado endurecido.....	56
Tabela 15 – Caracterização dos blocos cerâmicos.	56
Tabela 16 – Caracterização da argamassa no estado endurecido.	59
Tabela 17 – Resultados dos ensaios realizados.	67
Tabela 18 – Resultados dos ensaios realizados.	68
Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) da resistência á compressão.	70
Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	70
Tabela 21 – Resultados dos ensaios realizados.	71
Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) da resistência á tração na flexão.....	72
Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	72
Tabela 24 – Resultados dos ensaios realizados.	73
Tabela 25 – Resultados dos ensaios realizados.	74
Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) da densidade de massa.	75
Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	75
Tabela 28 – Resultados dos ensaios realizados.	76
Tabela 29 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.....	77
Tabela 30 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	77
Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água total.	77
Tabela 32 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	78
Tabela 33 – Resultados dos ensaios realizados.	79
Tabela 34 – Análise de variância (ANOVA) do coeficiente de capilaridade.....	79
Tabela 35 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	80
Tabela 36 – Resultados dos ensaios realizados.	80
Tabela 37 – Resultados dos ensaios realizados.	81
Tabela 38 – Resultados dos ensaios realizados.	82
Tabela 39 – Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade dinâmico.....	83
Tabela 40 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	83
Tabela 41 – Resultados dos ensaios realizados.	89
Tabela 42 – Modelo binário entre as variáveis dependentes e independentes.	91
Tabela 43 – Análise de regressão da resistência de aderência.	92
Tabela 44 – Análise de regressão da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.	94
Tabela 45 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.....	95
Tabela 46 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.....	95

Tabela 47 – Resultados do ensaio da Rilem aos 3,5 minutos.	96
Tabela 48 – Resultados dos ensaios realizados.....	97
Tabela 49 – Resultados dos ensaios realizados.....	99
Tabela 50 – Análise de regressão da resistência de aderência.....	101
Tabela 51 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.	103
Tabela 52 – Resultados do ensaio da Rilem aos 5 minutos.	104
Tabela 53 – Resultados dos ensaios realizados.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores atuantes sobre o sistema de revestimento argamassado.....	32
Figura 2 – Porosidade através da saturação em álcool e resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio.	36
Figura 3 – Os retângulos denotam portlandita e os círculos indicam o gel C-S-H.	38
Figura 4 – Redução da resistência à compressão de concreto com diferentes agregados em função da temperatura.	43
Figura 5 – Etapa I do programa experimental.	47
Figura 6 – Argamassas e placas revestidas posicionadas na mufla.	48
Figura 7 – Esquema do forno e da parede de alvenaria.	49
Figura 8 – Esquema para o corte do bloco.	57
Figura 9 – Execução da parede de alvenaria.	57
Figura 10 – Diagrama de ensaio.	59
Figura 11 – Amostra da Difração de raios X.	60
Figura 12 – Amostras de absorção do revestimento.	62
Figura 13 – Disposição das amostras para o ensaio de aderência.	62
Figura 14 – Método de ensaio utilizado pela RILEM (1999).	63
Figura 15 – Amostra do índice de vazios.	64
Figura 16 – Área de obtenção da amostra para ensaios de microestrutura.	64
Figura 17 – Resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa	68
Figura 18 – Resistência à tração na flexão	71
Figura 19 – Densidade de massa	73
Figura 20 – Índice de vazios e absorção total de água	76
Figura 21 – Coeficiente de capilaridade	78
Figura 22 – Módulo de elasticidade dinâmico.	81
Figura 23 – Difração de raios X da argamassa de referência	84
Figura 24 – Difração de raios X da argamassa elevada a 100°C	84
Figura 25 – Difração de raios X da argamassa elevada a 300°C	84
Figura 26 – Difração de raios X da argamassa elevada a 500°C	85
Figura 27 – Difração de raios X da argamassa elevada a 700°C	85
Figura 28 – Difração de raios X da argamassa elevada a 900°C	85
Figura 29 – Relação linear: (a) resistência à compressão e resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão e densidade de massa; (c) resistência à compressão e coeficiente capilar; (d) resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico; (e) resistência à compressão e índice de vazios.	87
Figura 30 – Relação linear onde: (a) resistência à tração e coeficiente capilar; (b) resistência à tração e densidade de massa; (c) resistência à tração e absorção de água; (d) resistência à tração e módulo de elasticidade dinâmico.	88
Figura 31 – Amostra subtraída da placa.	90
Figura 32 – Resistência de Aderência à Tração	90
Figura 33 – Falta de aderência do revestimento em temperatura de 700°C; (a) vista de perfil; (b) vista das superfícies internas na região fraturada.	91
Figura 34 – Velocidade de propagação da onda ultrassônica.	93
Figura 35 – Índice de vazios.	94
Figura 36 – Absorção Capilar pela Rilem	96
Figura 37 – Relação linear onde: (a) resistência de aderência à tração e velocidade de propagação da onda; (b) resistência de aderência à tração e taxa de absorção.	98
Figura 38 – Relação linear onde: (a) volume total acumulado de mercúrio e índice de vazios; (b) volume total acumulado de mercúrio e taxa de absorção.	98

Figura 39 – Relação linear entre a velocidade de propagação da onda e a taxa de absorção de água.	99
Figura 40 – Amostra subtraída da parede.	100
Figura 41 – Resistência de Aderência à Tração	100
Figura 42 – Deslocamento do revestimento durante o ensaio da temperatura de 700°C	101
Figura 43 – Índice de vazios	102
Figura 44 – Absorção Capilar	103
Figura 45 – Relação linear entre a resistência de aderência à tração e a taxa de absorção de água.	105
Figura 46 – Relação linear onde: (a) volume total acumulado de mercúrio e resistência de aderência à tração; (b) volume total acumulado de mercúrio e taxa de absorção de água. ...	106

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
ANOVA	Análise de variância
GMAT	Grupo de Materiais
GSC	Gerenciamento e Sustentabilidades das Construções
itt Fossil	Instituto Tecnológico de Micropaleontologia
itt Performance	Instituto Tecnológico em Desempenho da Construção Civil
LMC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma MERCOSUL
PIM	Porosimetria por intrusão de mercúrio
PPGEC	Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systemes de Construction et Ouvrages
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

LISTA DE SÍMBOLOS

MPa	Mega Pascal
GPa	Giga Pascal
mm ²	Milímetro(s) quadrado(s)
g	Gramma
v	Velocidade de propagação da onda
ρ	Densidade de massa aparente
μ	Coefficiente de Poisson
cm	Centímetro
cm ²	Centímetros quadrados
cm ³	Centímetro cúbico
g	Gramas
°C	Grau Celsius
\geq	Maior igual
\pm	Mais ou menos
\leq	Menor igual
m ³	Metro Cúbico
m/s	Metro por segundo
μm	Micrometro
μs	Micro segundo
mm	Milímetro
min	Minuto
kg	Quilograma
kgf	Quilograma Força
s	Segundos

RESUMO

SCHAFER, M. **Análise da influência de elevadas temperaturas em revestimento de argamassa**. São Leopoldo, 2015. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

Uma solicitação extrema a que uma alvenaria pode ser submetida é a decorrente de incêndios, que se destacam pelo grande potencial de degradação. Os revestimentos de argamassa são normalmente aplicados sobre substratos e, por comporem a última camada da alvenaria, se tornam mais suscetíveis às elevadas temperaturas. O estudo das alterações macro e microestruturais das argamassas podem auxiliar na identificação dos níveis de temperatura a que a estrutura foi submetida ao longo de um incêndio, permitindo um melhor diagnóstico sobre o sinistro e uma melhor estimativa sobre o nível de danos da estrutura de concreto e demais componentes da edificação. Partindo deste contexto, esta pesquisa tem como objetivo a análise da influência de elevadas temperaturas em um revestimento de argamassa. O programa experimental desenvolvido possui duas etapas: a primeira utilizando-se argamassas de revestimento aplicadas sobre blocos cerâmicos submetidos, em uma mufla, a temperaturas de 100, 300, 500, 700, e 900°C, e caracterizados com relação a sua macroestrutura (resistência de aderência, absorção de água e velocidade de propagação da onda) e microestrutura (microscopia eletrônica de varredura e porosimetria por intrusão de mercúrio). A segunda etapa consiste no ensaio de paredes de alvenaria, construídas com o mesmo bloco cerâmico e a mesma argamassa da etapa anterior, em um forno que simula a ação de incêndio, especificado pela NBR 10636 (ABNT, 1989). Nas temperaturas até 300°C houve uma melhoria nas propriedades das argamassas, já a partir da temperatura de 500°C ocorreu uma degradação das argamassas e do revestimento, com queda de revestimento a partir da temperatura de 700°C. Embora os procedimentos utilizados para o aumento da temperatura em mufla e em forno tenham ciclos de aquecimento distintos, não foram constatadas diferenças expressivas entre os resultados de ensaios em revestimentos submetidos a aquecimento em mufla e os submetidos ao forno simulando o incêndio.

Palavras-chave: revestimento de argamassa; elevadas temperaturas; macroestrutura; microestrutura.

ABSTRACT

SCHAFER, M. **Analysis of the influence of high temperatures in mortar coating.** São Leopoldo, 2015. 137 p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

An extreme request that masonry can be submitted is the result of fires that stand out for great potential of degradation. The mortar coatings are typically applied to substrates, and compose the last layer of masonry, become more susceptible to elevated temperatures. The study of changes macro and microstructure of the mortars can help identify temperature levels to which the structure was subjected over a fire, enabling a better diagnosis of the accident and a better estimate of the level of damage of the concrete structure and other components of the building. From this context, this research aims to analyze the influence of high temperatures in a mortar coating. The experimental program has two steps: first using a mortar coating applied over subjected ceramic blocks in a muffle furnace at temperatures of 100, 300, 500, 700, and 900°C, and characterized with regard to its macrostructure (adhesion resistance, water absorption and speed wave propagation) and microstructure (scanning electron microscopy and mercury intrusion porosimetry). The second step consists in testing masonry walls built with the same ceramic block and the same mortar in an oven to simulate the action of fire, specified by NBR 10636 (ABNT, 1989). In temperatures to 300°C there was an improvement in the properties of mortars, already from 500°C temperature occurred the deterioration of the mortar and coating, coated drop from the temperature of 700°C. Although the procedures used for increasing the temperature in a muffle furnace and oven have separate heating cycles, no significant differences observed between the test results on coatings.

Key-words: mortar coating; elevated temperatures; macrostructure; microstructure.

1 INTRODUÇÃO

Diante dos fenômenos que causam danos nas estruturas, os incêndios se destacam com uma grande capacidade de destruição. A ocorrência de incêndios pode estar associada à falta de manutenção ou degradação de edifícios (PISSARRA, 2014).

A segurança contra incêndio em edifícios é uma área que apresenta características distintas que podem ser, desde a concepção dos espaços, da edificação ou usos, até à utilização em adequadas condições de segurança para cada momento, por exemplo, a resistência ao fogo dos elementos de construção, a reação ao fogo dos materiais de construção, a detecção, a extinção ou o comportamento das pessoas em caso de incêndio (PRIMO, COELHO, RODRIGUES, 2008).

Nos últimos anos, trabalhos têm sido desenvolvidos na área, mas por ser um tema relativamente recente, a maioria das pesquisas estão focadas na análise de estruturas de aço e de concreto armado. Estas pesquisas avaliaram as alterações ocorridas nas propriedades dos materiais estruturais quando os mesmos são submetidos a elevadas temperaturas, mas não abordando a questão do comportamento da estrutura como um todo (RUSCHEL, 2011).

No Brasil, existem normas técnicas específicas para determinar a resistência frente ao fogo de elementos de vedação, como a NBR 5628 (ABNT, 2001) e a NBR 10636 (ABNT, 1989). Estas normas possuem uma série de exigências de segurança contra o incêndio, especificando ensaios em escala real e sob a carga para alvenaria estrutural e sem carga para alvenaria de vedação.

Tendo em vista que a argamassa de revestimento não é um elemento estrutural poucas pesquisas são realizadas no material isolado. Yazici, Sezer e Sengul (2012) verificaram o efeito de altas temperaturas sobre a resistência à compressão, em que mesma apresentava uma resistência à compressão de 45,3 MPa. Já Morsy *et al.* (2012) verificam o comportamento da resistência à compressão e à flexão de argamassas com adição de nanometaculim frente a elevadas temperaturas para uma argamassa de 25 MPa de resistência à compressão.

Cülfik e Özturan (2002) analisaram o que ocorre com a argamassa quando é alterado o tempo de exposição a elevadas temperaturas e a velocidade do aumento da temperatura frente à resistência à compressão.

Neste contexto, esta pesquisa analisou o comportamento macro e microestrutural de revestimentos de argamassa aplicado em um substrato cerâmico submetido a altas temperaturas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Recentemente entrou em vigência no Brasil a Norma NBR 15575 (ABNT, 2013) – Norma de desempenho nas edificações, que preconiza a necessidade de avaliação do comportamento de sistemas de vedação verticais de edifícios habitacionais quando submetidos à situação de incêndio. O sistema de vedação vertical mais utilizado em nosso país são as alvenarias (ANICER, 2015), constituídas por elementos cerâmicos revestidos por argamassas.

Apesar de existirem diversas publicações sobre os efeitos de elevadas temperaturas em elementos estruturais de concreto armado (SOUZA, (2005), KIRCHHOF, (2010), CORREA, LIMA e BRITO, (2014)), a partir de revisão bibliográfica, não foi possível se identificar estudos nacionais sobre revestimentos de argamassa expostos a elevadas temperaturas, o que demonstra uma lacuna nesta área do conhecimento.

A falta de estudos sobre o comportamento do revestimento de argamassa, quando submetido a elevadas temperaturas, além de dificultar o atendimento à norma de desempenho, frequentemente leva à necessidade da remoção de grandes quantidades de revestimento em edificações submetidas a incêndios, sem uma devida justificativa para este procedimento.

A ausência de publicações sobre o tema se justifica em parte pela inexistência de equipamentos específicos para a simulação de incêndio. No instituto itt Performance – Unisinos, há um equipamento para a simulação de incêndio, que permitiu o início de pesquisas sobre o tema, a partir de 2014, pelos grupos de pesquisa GMat (Grupo de Materiais) e GSC (Gerenciamento e Sustentabilidades das Construções), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Unisinos, tanto em elementos estruturais de concreto armado quanto em alvenarias.

Com o intuito de identificar e entender as variações das propriedades dos revestimentos de argamassa (como a resistência de aderência, porosidade e absorção de água) quando submetidas a elevadas temperaturas, foi elaborado este estudo. O mesmo visa determinar alterações macro e microestruturais em revestimentos e auxiliar na identificação, em situações reais de incêndio, dos níveis de temperatura a que uma alvenaria foi submetida ao longo do incêndio e uma melhor estimativa sobre o nível de danos ocorridos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Como objetivo geral, esta pesquisa visa determinar a influência de elevadas temperaturas em argamassa e sistema de vedação (bloco cerâmico, chapisco e revestimento argamassado).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar a influência das elevadas temperaturas nas propriedades mecânicas da argamassa, como a resistência à compressão e tração na flexão;
- Analisar a influência das elevadas temperaturas nas propriedades físicas da argamassa, como a absorção de água capilar e total e o módulo de elasticidade dinâmico;
- Analisar a influência das elevadas temperaturas na composição química da argamassa na difração de raios x;
- Analisar a resistência de aderência à tração pela velocidade de propagação da onda e da absorção capilar das elevadas temperaturas no revestimento de argamassa;
- Avaliar a influência das elevadas temperaturas do revestimento de argamassa na microestrutura e da porosimetria por intrusão de mercúrio.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa foi dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo está a introdução, com justificativa, objetivos, estrutura e delimitações da pesquisa.

No segundo capítulo foi realizada a revisão bibliográfica sobre as propriedades de compósitos cimentícios quando submetidos a elevadas temperaturas e fatores químicos e físicos que ocorrem a partir do aumento da temperatura.

O terceiro capítulo apresenta a descrição do programa experimental, métodos e ensaios realizados.

No quarto capítulo encontram-se as análises de resultados obtidos através do programa experimental.

A função do quinto capítulo é expor as conclusões obtidas com esta pesquisa, sugerindo possibilidades de trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido com as delimitações que seguem:

- utilização de um tipo de substrato cerâmico, o que não permite a extrapolação direta para outro tipo de substrato;
- uso de um tipo de argamassa, essa por sua vez industrializada e estabilizada;
- duas condições de aquecimento para os sistemas de revestimento;
- dois sistemas de revestimento, em que um foi aplicado em uma placa cerâmica e o outro em uma parede em uma escala real.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é apresentada uma abordagem sobre o comportamento químico e físico de pastas, agregados, argamassas e concretos quando submetidos a elevadas temperaturas, com o intuito de compreender os efeitos causados pelo aumento da temperatura.

2.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL FRENTE AO INCÊNDIO

A avaliação de sistemas de vedação vertical frente à situação de incêndio deve ser realizada seguindo normas técnicas específicas. No Brasil, as normas utilizadas para esta avaliação especificam parâmetros de resistência ao fogo, estabilidade estrutural, estanqueidade e isolamento térmico que devem ser atendidos pelos sistemas de vedação.

No caso de paredes estruturais, lajes, pilares e vigas que são elementos construtivos estruturais, para os quais a NBR 5628 (ABNT, 2001) prescreve o método de determinação da resistência ao fogo, a amostra deve ser preparada de modo a reproduzir as condições de uso do sistema. Assim, antes do início do ciclo térmico a amostra deve ser submetida a um carregamento que será mantido constante por todo o ensaio. Durante o ensaio, deve ser registrado o deslocamento transversal, a ocorrência de ruína da amostra ou qualquer outro fator que possa afetar a resistência mecânica. Neste ensaio, determina-se a estanqueidade a gases e fumaça, verificando-se a presença de fissuras ou outras aberturas. O isolamento térmico do sistema, determinado pela medição da temperatura da face não exposta ao fogo, deve ser anotada a cada 5 minutos.

Pequenas variações de temperatura não costumam ocasionar o aparecimento de tensões internas no concreto. No entanto, quando as variações de temperatura são grandes, podem ocorrer expansões diferenciadas significativas, resultando no aparecimento de tensões e na fissuração do concreto (WENDT, 2006).

A NBR 14432 (ABNT, 2001) estabelece condições a serem atendidas pelos elementos estruturais em situação de incêndio para que seja evitado o colapso da estrutura, e sejam atendidos os requisitos de estanqueidade e isolamento para um tempo suficiente que permita de forma segura a fuga dos ocupantes da edificação e as operações de combate ao incêndio, minimizando os danos às edificações adjacentes. A cada elemento construtivo é requerida uma resistência mínima ao fogo, conhecida como tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), e determinado em função da ocupação e da altura da determinada edificação.

A NBR 15200 (ABNT, 2012) estabelece critérios de projeto para estruturas de concreto, elementos estruturais pré-moldados ou pré-fabricado visando o comportamento em situação de incêndio. A exposição ao fogo reduz a resistência dos mesmos, e propõe fórmulas e coeficientes para dimensionamento, estabelecendo critérios para realização de projeto das estruturas de concreto nesta situação específica.

Em paredes sem função estrutural, ou seja, paredes de vedação, a resistência ao fogo é determinada de acordo com a NBR 10636 (ABNT, 1989). Esta norma estabelece formas de avaliação e parâmetros de elevação de temperatura para tal determinação. Os critérios de avaliação são definidos através da capacidade do sistema manter a estabilidade estrutural se mantendo íntegra, a estanqueidade impedindo a passagem de chamas e gases, e o isolamento térmico, em que o sistema deve resistir à transmissão de calor para a face não exposta ao fogo. A Tabela 1 apresenta as taxas de elevação de temperatura conforme a norma.

Tabela 1 – Elevação da temperatura.

Tempo (min)	Elevação da temperatura (T-T₀)°C
5	556
10	659
15	718
30	821
60	925
90	986
120	1029
180	1090
240	1133
360	1193

Fonte: NBR 10636 (ABNT, 1989) adaptado pelo autor.

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) estabelece requisitos, critérios e métodos para a avaliação do desempenho de sistemas de vedação vertical de edificações habitacionais. Esta norma prevê a segurança contra incêndio estabelecendo requisitos visando dificultar a ocorrência da inflamação generalizada, a propagação do incêndio, e a preservação da estabilidade estrutural da edificação, se remetendo as normas citadas anteriormente.

Nos estudos de Rigão (2012), foi investigado o nível de degradação em pequenas paredes com carregamento e em prismas cerâmicos devido à elevação da temperatura. Foram avaliadas três temperaturas: ambiente, 400 e 900°C. Para realizar o aquecimento foi utilizada uma mufla e verificou-se a taxa de aquecimento encontrada difere da proposta pela NBR 5628 (ABNT, 2001). O autor ainda salienta que em fornos de resistência elétrica para o

aquecimento, os mesmos não são capazes prover a energia térmica necessária para atingir altas temperaturas iniciais, sendo necessário utilizar fornos com chamas para atingir essas temperaturas iniciais. As paredes ensaiadas demonstraram bom desempenho frente às altas temperaturas, apresentando baixo nível de fissuração e mantendo a estabilidade estrutural. A tensão de ruptura da parede exposta às altas temperaturas ficou bem próxima à média dos prismas cerâmicos submetidos à mesma taxa de aquecimento.

2.2 COMPORTAMENTO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA APLICADOS EM SUBSTRATO DE CERÂMICA VERMELHA EM ELEVADAS TEMPERATURAS

A aplicação de uma argamassa sobre um determinado substrato altera seu comportamento, especialmente sob a ação de elevadas temperaturas, tendo em vista que são geradas tensões diferenciais entre o revestimento e o substrato que possui um coeficiente de dilatação térmica inferior ao da argamassa. Portanto, é de fundamental importância conhecer as características da base e as características da argamassa de revestimento, a fim de se verificar suas principais características e identificar o comportamento do revestimento frente às elevadas temperaturas.

O substrato é de fundamental importância para o desempenho do revestimento de argamassa principalmente no que determina suas propriedades físico-mecânicas onde se pode citar a textura superficial, absorção capilar, porosidade, e movimentações higroscópicas irreversíveis. Essas propriedades se refletem diretamente no revestimento de argamassa e podem ser verificadas nos ensaios de resistência de aderência à tração, resistência ao cisalhamento e a fissuração (SILVA, 2006).

Na Tabela 2 estão listados os requisitos de desempenho de argamassas de revestimento elaborados pelo Comitê 13-MR da RILEM citada por Araújo (1995).

Tabela 2 - Lista de propriedades indicadas pelo Comitê 13-MR da Rilem, como requisitos de desempenho (Saretok 1977 apud Araújo 1995).

Propriedades no Estado Fresco	Propriedades no Estado Endurecido
Trabalhabilidade	Textura e cor
Consistência	Fissuração
Coesão	Aderência (tração e cisalhamento)
Tixotropia	Resistência superficial
Exsudação de água	Retração de secagem, movimentos térmicos e higroscópios
Retenção de água	Teor de umidade de equilíbrio e teor máximo de umidade
Endurecimento	Absorção de água
Retenção de consistência	Permeabilidade à umidade
Adesão inicial	Resistência ao congelamento
	Estabilidade
	Condutibilidade térmica
	Resistência ao fogo

Fonte: Araújo, (1995).

As características dos substratos influenciam na velocidade e quantidade da água transportada da argamassa fresca para o substrato. O ambiente também possui uma grande importância, devido à perda de água por evaporação. A migração de água da argamassa para o substrato cerâmico ou sua evaporação para o ambiente resulta numa alteração da microestrutura da argamassa e na região de interface argamassa e substrato, interferindo nas propriedades do revestimento (PAES, 2004).

Conforme Carasek (1996), a velocidade de absorção de água do substrato é variável com o tempo, sendo máxima no início quando entra em contato com a argamassa e decrescendo posteriormente. A sucção de água exercida pelo substrato depende diretamente da sua estrutura e de sua porosidade.

A retração da argamassa está relacionada com a perda de água da argamassa e essa perda ocasiona movimentação reversível ou irreversível, estando diretamente relacionada com capacidade de absorção de água do sistema base-revestimento. A movimentação irreversível se relaciona com processo de secagem (CINCOTTO *et al.*, 1995). Segundo Pereira (2007) a retração na secagem ocorre devido à evaporação e absorção pelo substrato da água de amassamento da argamassa e, também, pelas reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes.

Segundo Bauer (2005), a textura do substrato, ou rugosidade, é de fundamental importância para o desenvolvimento da aderência. As rugosidades são pontos de ancoragem da argamassa aplicada e desta forma auxiliam na aderência entre os materiais. Os substratos rugosos possuem uma maior área de contato com a argamassa aplicada, com isso melhoram

potencialmente as condições de aderência. Substratos lisos, geralmente possuem valores menores de aderência, por isso deve-se sempre preparar as superfícies com intuito de torná-las adequadamente rugosas.

Ainda tendo em vista o preparo da superfície, Bauer (2005) afirma que para melhorar e adaptar o substrato emprega-se rotineiramente o chapisco, que visa, em sua essência, fornecer ao substrato uma textura adequadamente rugosa e com porosidade adequada ao desenvolvimento da aderência. A textura rugosa atua também nos momentos iniciais pós-aplicação favorecendo a adesão inicial.

O grau da extensão de aderência é dependente do nível de rugosidade da superfície a ser aderida do substrato, e também da trabalhabilidade da argamassa. Uma boa extensão de aderência (maior área de contato) beneficia os mecanismos de aderência, caso a mesma seja contínua e prolongada ao longo de toda a interface argamassa-substrato. A trabalhabilidade da argamassa fresca também contribui com a extensão de aderência, visto que pode facilitar o trabalho de lançamento da argamassa com uma energia de aplicação mais adequada e melhorar o efeito do aperto, gerando uma maior extensão por força de um maior espalhamento da argamassa sobre o substrato (GOLÇALVES, 2004).

De acordo com Cincotto *et al.* (1995), o desempenho dos revestimentos de argamassa ao longo do tempo é afetado por alguns fatores associados às condições de exposição e também à ação dos usuários. Estes fatores podem ser divididos em: extrínsecos, que estão associados à solicitação externa sobre o sistema de revestimento (ações do meio ambiente, tais como temperatura, umidade, chuvas e ventos dentre outros); e intrínsecos, em que estes, por sua vez estão relacionados com as propriedades e as características dos materiais, componentes e sistemas, de acordo com as condições de superfícies externas.

A Figura 1 ilustra os fatores extrínsecos ao sistema de revestimento argamassado.

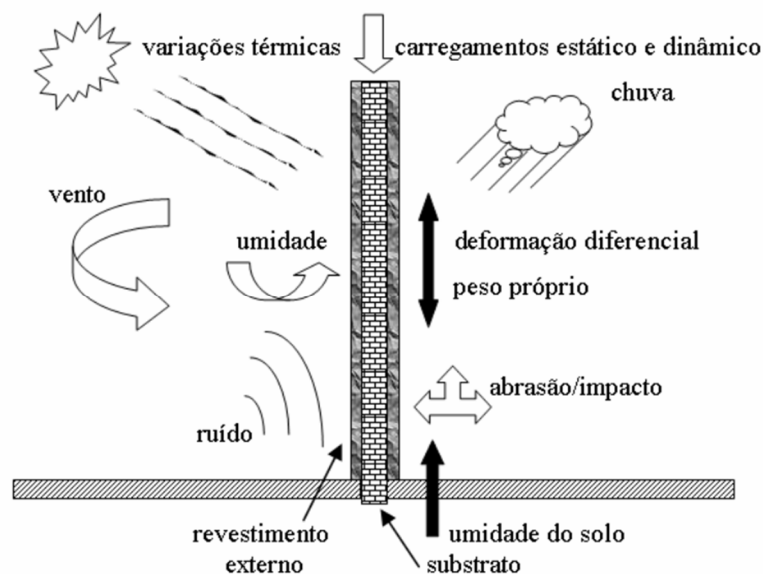


Figura 1 - Fatores atuantes sobre o sistema de revestimento argamassado
(Fonte: Leal, 2003)

O coeficiente de expansão térmica se refere à variação volumétrica ou linear do revestimento de argamassa para cada grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$) em que ocorre a modificação da temperatura. Quando se trata da variação do comprimento em materiais isotrópicos, normalmente é denominado de coeficiente de dilatação térmica linear ou coeficiente de expansão térmica (ESQUIVEL, 2009).

Quanto aos efeitos térmicos, Esquivel (2009) salienta que cada material apresenta uma variação dimensional quando ocorre uma variação da temperatura no meio em que estão dispostos. A variação pode produzir expansão à medida que a temperatura aumenta ou retração, conforme a temperatura diminui. O revestimento de argamassa é composto de pasta aglomerante e agregado miúdo e ambos possuem diferentes coeficientes de dilatação térmica.

A variação dimensional por dilatação ou contração é uma das principais alterações físicas provocadas pela temperatura, e a mesma é responsável por gerar tensões que causam deformações e o aparecimento de fissuras. Com isso cabe ressaltar a potencialidade de manifestações patológicas em grandes painéis de fachadas através de fissuras resultantes de movimentações térmicas. Isso pode ser minimizado conhecendo o comportamento dos materiais utilizados em argamassas e prevendo juntas de dilatação para reduzir o impacto da variação dimensional em relação à temperatura (ANTUNES, 2010).

Segundo Antunes (2010), conhecendo os coeficientes de dilatação dos materiais, é possível estabelecer dosagens de argamassas onde o coeficiente da mesma esteja o mais

compatível possível ao do substrato a ser revestido, a fim de evitar grandes diferenças de comportamento decorrentes da dilatação, contribuindo na prevenção de possíveis problemas.

Ao estudarem a condutividade térmica (habilidade dos materiais de conduzir energia térmica) em pasta de cimento, argamassa e concreto, Kim *et al.* (2003) observaram que a idade da amostra, o volume de agregado, a quantidade de cimento, os tipos de aditivos, a fração de finos dos agregados, a temperatura e a umidade da amostra impactam diretamente na condutividade térmica, e conseqüentemente no coeficiente de dilatação. Os autores verificaram que os principais fatores causadores das alterações da condutividade nas amostras cimentícias são as condições de umidade e o volume de agregado.

2.3 COMPORTAMENTO DE COMPONENTES A BASE DE CIMENTO SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Em condições normais de uso, argamassas e concretos estão expostos a temperaturas que oscilam de acordo com o ambiente, e nestas condições sofrem pequenas variações em suas propriedades, normalmente reversíveis. Os materiais a base de cimento, quando expostos a elevadas temperaturas, sofrem alterações físicas e químicas que, dependendo da temperatura, pode alterar substancialmente as suas propriedades.

O grau de hidratação e a umidade influenciam no comportamento de pastas e concretos mediante altas temperaturas, pois durante a vaporização da água livre e da água adsorvida, a temperatura do concreto não aumentará até que toda a água tenha evaporado (MEHTA e MONTEIRO, 2014), sendo o mesmo comportamento válido para argamassas.

Ao ser exposto a solicitações térmicas, o material cimentício sofre alterações acarretando em mudanças de sua microestrutura, contribuindo na transformação da porosidade, com isso origina-se uma nova distribuição do tamanho dos poros e microfissuração (KIRCHHOF, 2010).

A elevação temperatura também provoca alterações químicas no compósito, pois as reações químicas de degradação se aceleram devido a esta condição, contribuindo para uma diminuição na durabilidade do revestimento (ANTUNES, 2010).

2.3.1 Alterações Físicas

A perda de água através da elevação da temperatura leva o aumento da porosidade de uma pasta de cimento. As elevadas temperaturas aumentam em até 1 µm no tamanho do poro da pasta de cimento desidratada, podendo ser considerado como uma microfissura. O concreto, que possui estrutura compacta devido à reduzida porosidade capilar, acaba

dificultando a liberação de vapor e colaborando com a perda de massa procedente das fragmentações térmicas durante a elevação da temperatura (ANDRADE, ALONSO e KHOURY¹, 2003 apud KIRCHHOF 2010).

Mehta e Monteiro (2014) classifica a estrutura de poros, conforme suas dimensões da seguinte forma:

- a) Microporo – diâmetro inferior a 0,1 μm ;
- b) Poro capilar – diâmetro de 0,1 μm a 20 μm ;
- c) Macroporo – diâmetro superior a 20 μm ;
- d) Cavidades fechadas – poros não acessíveis;

Maciel (2015) observou que em concretos a grande parte de diâmetro de poros encontra-se entre 0,01 a 0,1 μm . Já Arnold (2011) obteve diâmetros de poros de 0,1 a 1 μm em argamassa. Assim, verifica-se, que em argamassas de revestimento os diâmetros são superiores aos do concreto.

Kim, Yun e Park (2013) afirmam que nas argamassas que utilizaram em sua pesquisa, o aumento da temperatura alterou a estrutura dos poros e até fraturas ocorreram quando a argamassa foi submetida a uma temperatura de 1000°C. Várias mudanças físicas e químicas ocorreram simultaneamente, podendo ser identificado por faixas de temperaturas conforme a Tabela 3 apresenta.

¹ ANDRADE, C.; ALONSO, C.; KHOURY, G.A. Porosity & Microcracking. In: Course on effect of heat on concrete. Undine, Itália: International Centre for Mechanical Sciences, Apostila, 2003.

Tabela 3 – Temperatura versus efeito na argamassa.

Faixa de Temperatura	Efeito na Argamassa Utilizada na pesquisa
25 – 100°C	Através da evaporação de água ocorre um aumento da porosidade, diminuindo a densidade.
100 – 400°C	Diminuição da porosidade apesar de diminuir a densidade, ocorre hidratação adicional de grãos de cimento não hidratados através do desenvolvimento de condições similares as encontradas em uma autoclave, com isso a diminuição da porosidade se justifica por novos produtos de hidratação nos poros existentes.
400 – 700°C	A desidratação causada pela decomposição de gel de C-S-H portlandita desempenha um papel preponderante na mudança física permanente. A maioria dos processos de desidratação ocorre principalmente nesta faixa, mudanças nas propriedades físicas da pasta de cimento incluem porosidade crescente acompanhada pela diminuição da densidade. Este aumento da porosidade pode indicar que os vazios se tornam maiores em tamanho e número, em consequência da desidratação, e, além disso, a fissura térmica é iniciada e se intensifica com o aumento da temperatura.
700 – 1000°C	A desidratação é praticamente completa e fendas de expansão térmicas se propagam facilmente, que passa através das zonas mais próximas de fraqueza tal como os vazios de ar, através de uma combinação das fissuras e poros existentes, pode ocorrer um lascamento da amostra.

Fonte: Kim, Yun e Park (2013) adaptado pelo autor.

Chen *et al.* (2010) apresentaram resultados de porosimetria obtidos através de uma argamassa constituída por cimento e agregado miúdo, submetida a cinco diferentes temperaturas: 60, 105, 200, 300 e 400°C, em que a temperatura de 60°C aplicada teve a finalidade de remover a água livre dos poros interligados. Os autores realizaram uma análise direta através de dois métodos, o de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) e por saturação do álcool, onde a amostra é imersa em álcool até constância de massa em uma câmara submetida a vácuo. Pela diferença de massa antes e depois da saturação, conhecendo o volume da amostra e a massa específica do álcool é possível calcular o volume de poros. Os autores verificaram que na porosimetria por intrusão de mercúrio a porosidade diminui em 1% entre 105 e 200°C; já nos resultados de saturação com álcool ocorreu um aumento na porosidade conforme houve o aumento da temperatura, e quando a argamassa é submetida a

uma temperatura de 400°C, sua porosidade aumenta em torno de 19,2% da inicial (60°C), para ambos os métodos considerando a média do método saturado em álcool de acordo com a Figura 2.

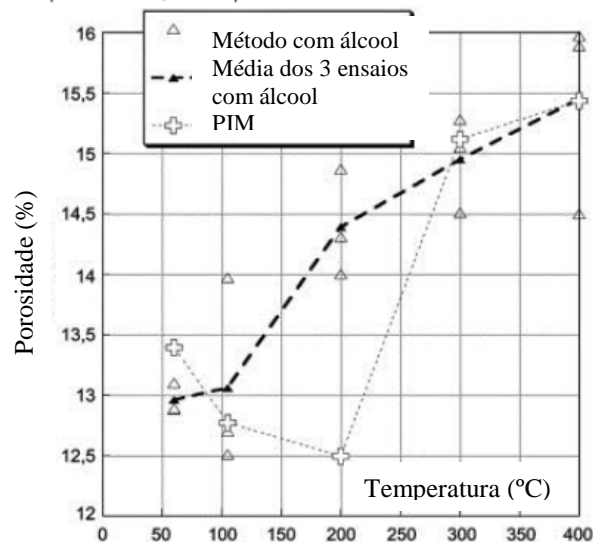


Figura 2 – Porosidade através da saturação em álcool e resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Fonte: Chen *et al.* (2010)

Embora não tenha sido encontrado um relato sobre argamassas, é possível se extrapolar parte de seu comportamento para argamassas de revestimento: no concreto endurecido a água absorvida pelo ambiente é evaporada entre 65 e 80°C, e de 80 a 100°C a água livre dos interstícios do concreto mantém suas propriedades mecânicas até 100°C. Contudo em temperaturas de 300 a 400°C há o surgimento de fissuras superficiais, e no interior do concreto em profundidade maior que 10 mm encontram-se íntegro. Nesta faixa de temperatura o concreto usual e o de alta-resistência apresentam uma queda em sua resistência à compressão. A perda total da resistência do concreto, prejudicando a função estrutural, se dá em temperaturas superiores a 600°C (COSTA, FIGUEIREDO e SILVA, 2002).

2.3.2 Alterações Químicas

Uma pasta de cimento Portland hidratada é composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio hidratados.

De acordo com Costa, Figueiredo e Silva (2002) entre 4 e 80 °C, os compostos hidratados do cimento Portland permanecem quimicamente estáveis, contudo, na pasta de cimento ocorrem alterações físicas como o aparecimento de fissuras e alteração na porosidade.

Em altas temperaturas existem fases de mudança da estrutura química dos compósitos. Ao atingir aproximadamente 300°C, a água interlamelar do C-S-H e parte da água quimicamente combinada do C-S-H e a dos sulfoaluminatos hidratados serão perdidas; por volta de 500°C ocorre uma desidratação da pasta de cimento devido à decomposição do hidróxido de cálcio; e em temperaturas da ordem de 900°C há uma decomposição completa do C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A decomposição do C-S-H se inicia na temperatura de 400 a 600°C, através da dessecação dos poros, originando a decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H. A reação endotérmica da desidratação do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libera o óxido de cálcio (CaO) e a água evapora. Estas reações químicas são acompanhadas pelo efeito físico de redução do volume, contribuindo para o aumento da fissuração (GRATTAN-BELLEW², 1996 apud COSTA, FIGUEIREDO e SILVA, 2002).

Alarcon-Ruiz *et al.* (2005) realizaram uma análise termogravimétrica de uma pasta de cimento com uma relação água/cimento de 0,33 e verificaram que a amostra apresentou três rápidas perdas de massa: a primeira ocorreu entre 100 e 200°C, resultado de reações de desidratação de vários hidratos (C-S-H, carboaluminatos, etringita), com a perda de água devida; a segunda perda de massa foi identificada entre 450 e 500°C, com a desidroxilação de portlandita, que é outro produto de hidratação do cimento; já na terceira perda de massa, que ocorre a 750°C, corresponde à possível descarbonatação de carbonato de cálcio proveniente do clínquer.

A decomposição química do agregado e sua mineralogia somados com as possíveis transformações de fase são fatores que determinam o comportamento do concreto quando submetido ao fogo. Por exemplo, as expansões térmicas diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento são determinadas pela mineralogia do agregado e isso também causa efeito na resistência última da zona de transição na interface (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), os agregados silicosos que possuem quartzo podem prejudicar o concreto, causando danos a uma temperatura de 573°C, pois ocorre a transformação do quartzo da forma α em β , que está relacionada à expansão súbita do material na ordem de 0,85%. Em rochas carbonáticas esse fenômeno pode ocorrer em temperaturas acima de 700°C, através da reação de descarbonatação.

² GRATTAN-BELLEW, P. E. Microstructural Investigation of Deteriorated Portland Cement Concretes. Construction and Building Materials. Vol. 10. Issue 1. Elsevier Science Ltd. Amsterdam, February, 1996.

Kim, Yun e Park (2013) verificaram que a argamassa na temperatura de 25 a 400°C, o hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se manteve constante e, conforme o aumento da temperatura houve uma redução gradativa da sua quantidade até os 700°C. A partir desta temperatura ocorre uma diminuição mais significativa do hidróxido de cálcio até seu desaparecimento a 1000°C. Já o óxido de cálcio (CaO) apresenta um aumento seguindo a decomposição do $\text{Ca}(\text{OH})_2$, através da hidrólise de umidade em hidratos de cimento em torno de 500°C e da decomposição parcial de carbono de cálcio acima de 900°C.

Ainda na pesquisa dos mesmos autores, através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em uma argamassa identificou-se que, entre 25 e 300°C, os produtos de hidratação do cimento como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o gel de C-S-H se encontram bem formados, e se assemelham a uma placa hexagonal e uma nuvem de algodão, respectivamente. Em 500°C o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sofre uma separação da estrutura da placa hexagonal, demonstrando que houve uma deformação da microestrutura, devido à decomposição do gel de C-S-H; nos 700°C a maior parte dos produtos de hidratação e o gel de C-S-H entraram em decomposição e surgiram fissuras no interior dos poros; já acima de 1000°C uma membrana é formada em função da fusão causada pela decomposição dos produtos de hidratação, e apenas uma parte muito pequena de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ permaneceu intacta. Cabe salientar que a amostra de argamassa permaneceu 15 minutos submetida à temperatura de análise.

A Figura 3 apresenta as mudanças da microestrutura em função do efeito das altas temperaturas.

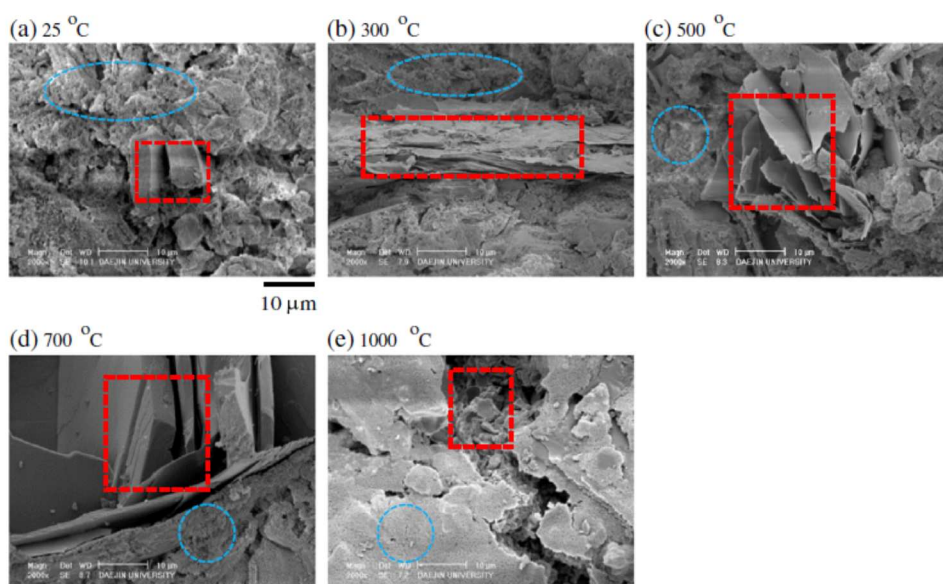


Figura 3 – Os retângulos denotam portlandita e os círculos indicam o gel C-S-H.

Fonte: Kim, Yun e Park (2013).

Segundo Neville (1997), o concreto em temperaturas superiores a 200 °C sofre uma pequena reação físico-química, quando a água evaporada passa a reduzir as forças de Van der Waals entre as camadas de C-S-H, e com isso há uma perda parcial da adesão química, ocorrendo o aparecimento de fissuras e uma queda considerável da resistência até a temperatura de 300 °C.

Assim, pode-se identificar pela bibliografia, que até a temperatura de 300°C ocorre apenas a perda de água. Entre a temperatura de 400 a 700°C inicia uma decomposição do hidróxido de cálcio e destruição do gel de C-S-H, mas por outro lado há um aumento gradativo do óxido de cálcio. Já nas temperaturas superiores à 900°C ocorre uma decomposição completa do C-S-H. A Tabela 4 apresenta um resumo das alterações químicas de acordo com o aumento da temperatura.

Tabela 4 – Alterações químicas em função da temperatura.

Autores	Material	Temperaturas (°C)													
		25	80	100	200	300	400	450	500	600	700	750	800	900	1000
Costa, Figueiredo e Silva (2002)	Pasta	Os compostos de cimento Portland permanecem estáveis.													
Metha e Monteiro (2014)	Pasta	É perdida a água interlamelar do C-S-H, a água quimicamente combinada do C-S-H e a água dos sulfoaluminatos hidratados				Ocorre a desidratação da pasta de cimento devido a decomposição do hidróxido de cálcio				Decomposição completa do C-S-H					
	Agregado					Expansão súbita do material				Expansão de rochas carbonáticas					
Grattan-Bellew (1996) apud Costa, Figueiredo e Silva (2002)	Pasta	Decomposição dos produtos de hidratação e destruição do gel de C-S-H													
Alarcon-Ruiz <i>et al.</i> (2005)	Pasta			Reações de desidratação de vários hidratos (C-S-H, carboaluminatos, etringita, entre outros).				Desidroxilação de portlandita				Descarbonatação de carbonato de cálcio			
Kim, Yun e Park (2013)	Argamassa	Hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se manteve constante, e os produtos de hidratação do cimento como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o gel de C-S-H se encontram bem formados								Redução gradativa do hidróxido de cálcio, decomposição do gel de C-S-H e dos produtos de hidratação, e aumento do óxido de cálcio				Desaparecimento do hidróxido de cálcio	
Neville (1997)	Concreto					Reação físico-química									

Fonte: adaptado pelo autor.

2.3.3 Influência da Alta Temperatura nas Propriedades Mecânicas

O comportamento das propriedades mecânicas em função de altas temperaturas é relatado por muitos autores, principalmente a resistência à compressão. Também são avaliados, em geral, propriedades como a resistência à flexão, absorção de água e módulo de elasticidade. Essas propriedades citadas serão abordadas a seguir.

2.3.3.1 Resistência à Compressão e à Tração na Flexão

Muitas pesquisas relacionadas resistência à compressão de concretos e argamassas submetidos a altas temperaturas identificam que essa propriedade sofre uma grande queda conforme o aumento da temperatura e isso se pode observar na Tabela 5 onde são apresentados os resultados dos traços de referência de algumas pesquisas.

Tabela 5 – Queda da resistência à compressão em função da temperatura.

Autores	Resistência Referência (MPa)	Concreto/ Argamassa	Percentual aproximado da diferença da resistência à compressão quando submetida a uma determinada temperatura comparada à resistência de referência (%)								
			200 (°C)	250 (°C)	300 (°C)	400 (°C)	450 (°C)	500 (°C)	600 (°C)	800 (°C)	900 (°C)
Morsy <i>et al.</i> (2012)	25,0	Argamassa		+44			+24		-16		-60
Yazici, Sezer e Sengul, (2012)	45,3	Argamassa			-21		-30		-53		
Cülfik e Özturan, (2002)	62,9	Argamassa			-12				-51		-86
Correa, Lima e Brito (2014)	48,7	Concreto							-25	-68	
Souza, (2005)	47,0	Concreto			-32				-50		
Wendt, (2006)	26,0	Concreto	-1,0			-5,0			-20		-83
Bezerra, (2012)	44,0	Concreto						-39			
Kirchhof, (2010)	42,0	Concreto	-7,1			-29			-50		

Fonte: adaptado pelo autor.

Pode-se identificar que apenas em um caso houve um ganho da resistência à compressão. A argamassa estudada por Morsy *et al.* (2012), apresentou um acréscimo em sua resistência à compressão de 44% na temperatura de 250°C e ainda 24% na temperatura de

450°C. Esses percentuais são em relação à argamassa de referência, na ordem de 25,0 MPa. Outra observação pertinente é que a queda da resistência à compressão de acordo com o aumento da temperatura é maior para argamassas ou concretos que possuem uma resistência inicial mais elevada, e isso se conecta com a porosidade do material, pois para uma maior resistência há uma menor porosidade.

Yazici, Sezer e Sengul (2012) verificaram que através do aumento da temperatura a resistência à compressão da argamassa diminuiu, e quando adicionado sílica ativa a argamassa apresenta resistência superior em algumas faixas de temperatura ao ser comparada com a argamassa sem nenhuma adição. Com isso, os autores afirmam que o melhor desempenho considerando as perdas de resistências de ambas as argamassas utilizadas na pesquisa foi da argamassa com sílica ativa quando exposta nas temperaturas entre 150 e 600°C. Em contrapartida a argamassa com cinza volante elevada à temperatura de 600°C possui uma menor perda de resistência à compressão comparando às demais.

Em argamassas de alto desempenho de resistência de aproximadamente 63 MPa, com 0 e 5% de grafite, verifica-se quedas acentuadas na resistência à compressão, e na resistência à flexão mais expressiva, conforme o aumento das temperaturas no intervalo de 300 a 900°C. As argamassas submetidas à temperatura de 300°C perderam em torno de 29% da resistência à compressão e na resistência à flexão foi de 36%; em 600°C a perda da resistência à compressão e a flexão foram respectivamente de 65 e 87%; na temperatura de 900°C as resistências apresentaram valores próximos de zero (CÜLFİK e ÖZTURAN, 2002).

Yüzer, Aköz e Öztürk (2004) utilizaram duas formas de resfriar as argamassas submetidas a altas temperaturas para avaliação da resistência à compressão. Uma foi através de imersão na água e outra, ao ar. Com isso verificaram que quando a amostra é submetida a uma temperatura de 600°C e resfriada pelas duas formas, pode-se verificar que a resistência à compressão das argamassas resfriadas de forma brusca, em água, foi de 70% inferior à argamassa de referência. Para a amostra de argamassa resfriada ao ar, a resistência à compressão é 40% inferior à argamassa de referência.

Souza (2005) também comprovou a influência do resfriamento brusco em sua pesquisa. Em seus ensaios, corpos de prova de misturas de concreto preparados com diferentes agregados foram aquecidos à temperatura máxima de 600°C. Estes espécimes foram resfriados rapidamente através de aspersão de água (simulando o combate ao incêndio) e por resfriamento lento de 1°C/minuto até a temperatura ambiente. A diferença para a resistência à compressão foi 25% superior para o resfriamento lento. Este dado corrobora com

a afirmação de Neville (1997) que um resfriamento brusco causa uma grande redução na resistência à compressão.

Em concretos com resistência inicial de 28 MPa utilizando diferentes tipos de agregados, foi verificado que, em temperaturas de aproximadamente 430°C, concretos com agregados silicosos perdem uma parte maior de resistência quando comparado com concretos produzidos com agregados de calcários ou com agregados leves, entretanto essa diferença desaparece quando a temperatura atinge cerca de 800°C (Figura 4). De maneira geral, a temperatura de 600°C pode ser considerada a limite para que se mantenha a integridade estrutural de concretos de cimento Portland (ABRAMS³, 1971 apud NEVILLE, 1997).

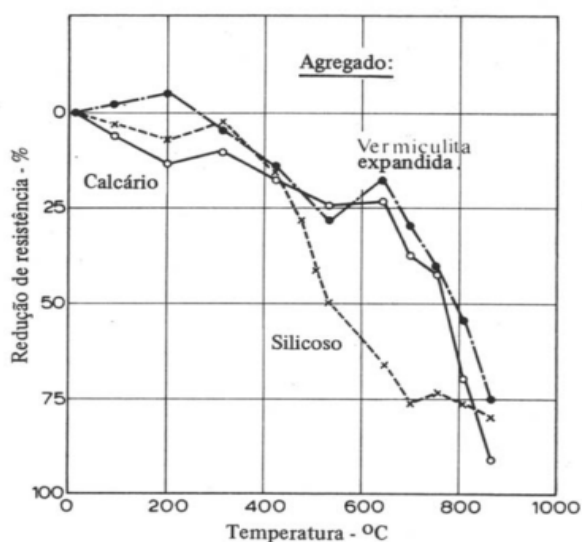


Figura 4 – Redução da resistência à compressão de concreto com diferentes agregados em função da temperatura.

Fonte: Abrams, (1971) apud Neville, (1997).

2.3.3.2 Absorção de Água

Na pesquisa de Chen *et al.* (2010), os autores verificaram que a porosidade da argamassa utilizada em sua pesquisa sofreu um aumento quando submetida nas temperaturas de 105, 200, 300 e 400°C, através de um aquecimento de 20°C/h e um resfriamento lento. Verificaram que a permeabilidade do material se alterou. Quanto maior a porosidade maior será a absorção do material.

Correa, Lima e Brito (2014), em pesquisa realizada em concretos para avaliar a absorção de água quando os mesmos são submetidos a três temperaturas de 20, 600 e 800°C, os autores identificaram que a absorção de água total aumenta de acordo com a temperatura.

³ ABRAMS, M. S., Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F, *Temperature and Concrete*, ACI SP-25, pp. 33–58 (Detroit, Michigan, 1971).

Esse comportamento ocorre uma vez que o concreto elevado a 600°C resulta em um valor médio de 15,5% de absorção. Quando em temperatura ambiente (20°C) a média de absorção é 13,9%, demonstrando uma diferença de aproximadamente 11%. Já o concreto submetido à 800°C, o aumento em relação ao concreto com temperatura ambiente foi de 39%. Esse aumento decorrente do acréscimo da temperatura indica valores bem expressivos de absorção de água.

2.3.3.3 Módulo de Elasticidade

Cülfik e Özturan (2002) em seus estudos verificaram que o aumento da temperatura diminuiu o módulo de elasticidade estático para as argamassas ensaiadas. Em 300°C a perda do módulo foi de 33%, já a 600°C as argamassas apresentaram 82% de queda no módulo de elasticidade. Na temperatura de 900°C o módulo registrado foi insignificante, ou seja, sem a possibilidade de registrá-lo. Cabe salientar que os autores realizaram os ensaios de módulo de elasticidade após as amostras resfriarem, em temperatura ambiente.

Segundo Neville (1997) e Wendt (2006), o módulo de elasticidade no concreto é fortemente influenciado pelas altas temperaturas. Na Tabela 6 são apresentados alguns resultados dos traços de referência comparativos de queda do módulo de elasticidade para concretos e argamassas em diferentes temperaturas.

Tabela 6 – Queda do módulo de elasticidade em função da temperatura.

Autores	Módulo de elasticidade (GPa)	Concreto/ Argamassa	Percentual da diferença do módulo de elasticidade quando submetido a uma determinada temperatura comparado o módulo de referência (%)					
			200°C	300°C	400°C	600°C	800°C	900°C
Cülfik e Özturan (2002)	33,7	Argamassa		-33		-82		-100
Wendt (2006)	26,5	Concreto	-6		-40	-75		-98
Lima (2005)	47,0	Concreto	-7		-23	-74		
Souza, (2005)	36,2	Concreto		-45		-80		
Correa, Lima e Brito (2014)	37,0	Concreto				-45	-83	

Fonte: adaptado pelo autor.

De fato, observa-se que a elevação da temperatura provoca uma queda constante no módulo de elasticidade, tanto para argamassa como para concretos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com base nos objetivos propostos e na revisão teórica realizada foi elaborado o programa experimental, o qual estabelece variáveis de análise, materiais e métodos de experimentos.

3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

O planejamento experimental será realizado em duas etapas, a Etapa I está apresentada na Figura 5, sendo que nesta etapa os revestimentos e as argamassas serão submetidos a diferentes temperaturas com o auxílio de uma mufla capaz de realizar uma programação de ciclo de aquecimento. As temperaturas utilizadas foram: temperatura ambiente (23°C), 100, 300, 500, 700, e 900°C.

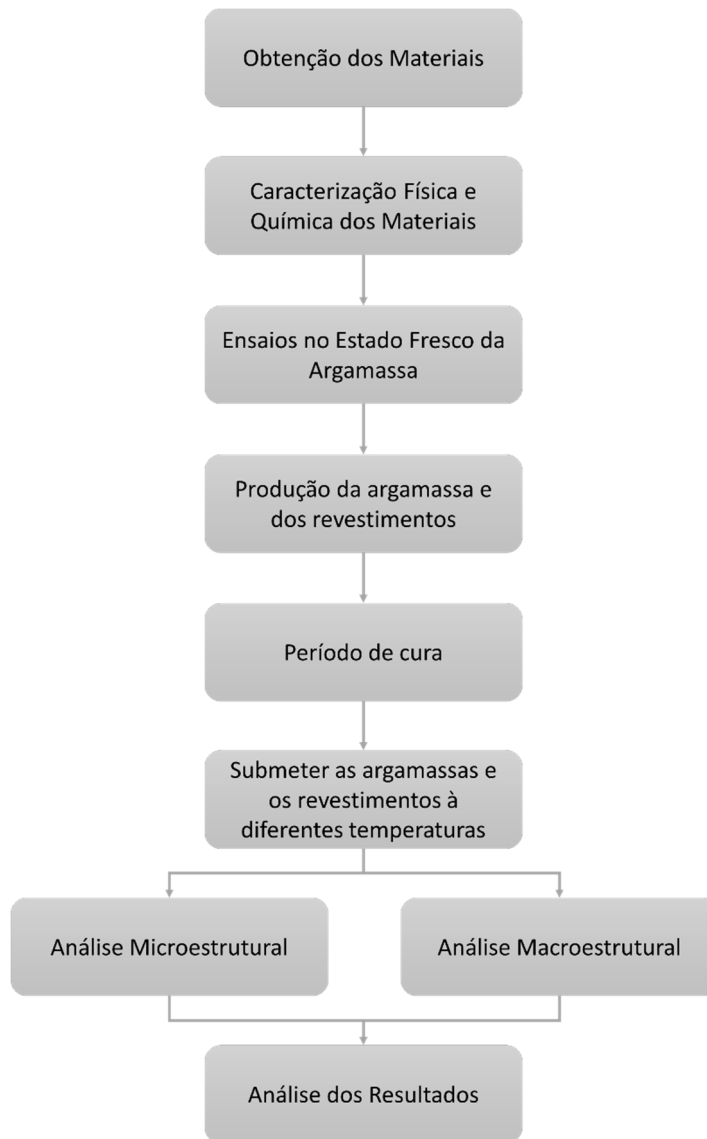


Figura 5 – Etapa I do programa experimental.

Cabe salientar que na Etapa I os blocos cerâmicos utilizados como substratos para a argamassa de revestimento foram cortados em placas a fim de facilitar o manuseio e a disposição dos conjuntos (substrato + argamassa) na mufla, podendo obter mais repetições por temperatura. A Figura 6 apresenta a posição utilizada dos revestimentos e dos prismas de argamassas na mufla de ensaio.



Figura 6 – Argamassas e placas revestidas posicionadas na mufla.

Após a Etapa I foi realizada a Etapa II, de acordo com os ensaios da macroestrutura foi verificado que até a temperatura de 500°C o revestimento ainda possui propriedades de resistência de aderência, com isso foi determinado utilizar um nível acima de temperatura, logo, até 700°C para a realização da Etapa II. Com isso para as temperaturas ambiente, 100, 300, 500 e 700°C foi realizado um ensaio em escala real, através da produção de uma parede de vedação nas dimensões de 3,15 x 3 m, para cada condição, após isso a mesma foi revestida e exposta ao fogo de acordo com a NBR 10636 (ABNT, 1989) até a temperatura desejada e mantida por 30 minutos. Na Figura 7 está apresentado um esquema da parede em conjunto com o forno utilizado.

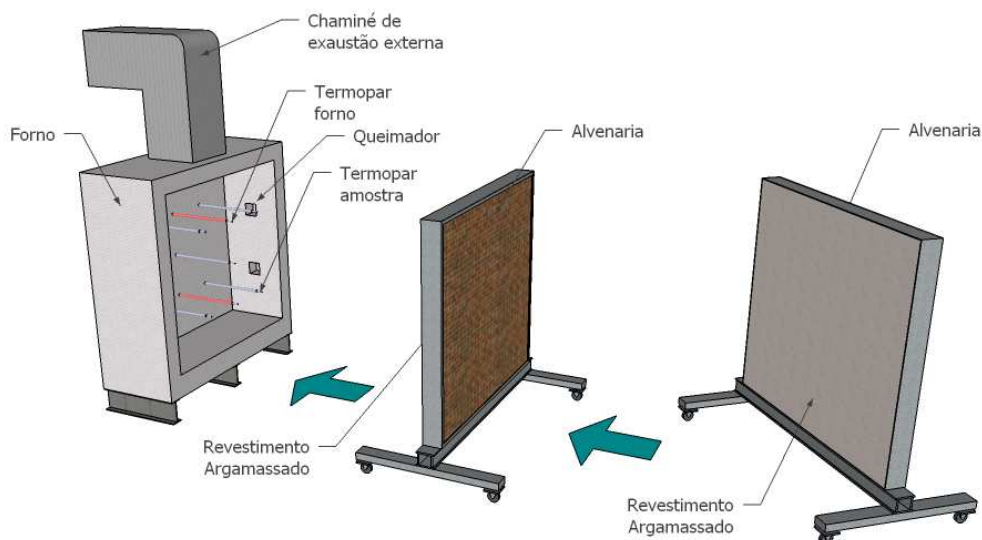


Figura 7 – Esquema do forno e da parede de alvenaria.

Após isso foram realizadas as análises macroestruturais e microestruturais, e por fim confrontando todos os resultados obtidos.

3.1.1 Fatores e níveis de controle

O nível de controle é a temperatura em que os exemplares foram submetidos.

3.1.2 Fatores Fixos

Os fatores fixos adotados na pesquisa são:

- Tipo de cimento: CP II F - 40;
- Tipo de agregado: Areia quartzosa de leito de rio;
- Tipo de bloco cerâmico: nas dimensões de 14 x 19 x 29 cm, utilizado em obras de alvenaria estrutural e vedação, para paredes externas, internas, divisórias entre economias e paredes corta-fogo;
- Traço da argamassa: 1:5 (em volume) utilizando 0,35% de aditivo aerador e 1,2% de aditivo estabilizador de pega, essas porcentagens são sobre a massa do cimento, com a consistência de 260 mm.

3.1.3 Fatores não controláveis

Algumas variáveis do estudo não são possíveis de controle, que são a umidade e temperatura do ambiente durante a moldagem das argamassas e da aplicação do revestimento.

3.1.4 Variáveis de resposta

Através da proposta de pesquisa, para a argamassa e os revestimentos em temperatura ambiente e submetidos a 100, 300, 500, 700 e 900°C, apresentam-se as seguintes variáveis respostas a serem avaliadas:

- Resistência à compressão da argamassa;
- Resistência à tração na flexão da argamassa;
- Absorção de água por capilaridade e total da argamassa;
- Difração de raios X (DRX) na argamassa;
- Módulo de elasticidade dinâmico nas argamassas;
- Determinação da resistência de aderência à tração dos revestimentos;
- Velocidade de propagação da onda ultrassônica nos revestimentos;
- Absorção de água por capilaridade dos revestimentos;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos revestimentos;
- Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) dos revestimentos;
- Relação entre os ensaios de resistência de aderência à tração do revestimento de argamassa realizado na mufla para com o realizado no forno.

3.1.5 Projeto de experimentos

Na Tabela 7 estão apresentados os ensaios que foram realizados nas argamassas e nos revestimentos desta pesquisa com as respectivas quantidades de amostras.

Tabela 7 – Quantidade de ensaios realizados.

	Ensaio	Número médio de Amostras	Número de Temperaturas de Análise	Total de Ensaio
Argamassa	Resistência à Compressão	6	6	36
	Resistência à Tração na Flexão	3	6	18
	Densidade de Massa	3	6	18
	Absorção Total de Água e Absorção Capilar	3	6	18
	Massa Específica e Índice de Vazios	3	6	18
	Difração de raios	1	6	6
	Módulo de elasticidade dinâmico	3	6	18
Revestimento da Etapa I	Resistência de aderência à tração	24	4	96
	Velocidade de propagação da onda	8	4	32
	Absorção por capilaridade	3	6	18
	Índice de vazios	3	6	18
	Microscopia Eletrônica de Varredura	1	6	6
Revestimento da Etapa II	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	1	6	6
	Resistência de aderência à tração	20	4	80
	Absorção por capilaridade	3	5	15
	Índice de vazios	3	5	15
	Microscopia Eletrônica de Varredura	1	5	5
	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio	1	5	5
Quantidade total de amostras				428

3.1.6 Tratamento dos dados

Com o intuito de verificar quais fatores exercem um efeito significativo sobre a resposta, utilizou-se a análise de variância (ANOVA), onde esta análise compara estatisticamente a influência de cada fator de controle sobre suas variáveis de resposta. As análises foram realizadas adotando-se um nível de significância de 95%.

Para resultados que venham apresentar grande dispersão nos resultados e também diferença nas quantidades de dados, foi desenvolvido um modelo binário para a realização de uma análise por meio de regressão linear múltipla. Para esta análise é considerada a variável dependente (Y) a resistência de aderência encontrada, ou seja, a variável a ser explicada pelas variáveis independentes (X), que são as diferentes temperaturas aplicadas ao revestimento.

O modelo proposto pode ser representado pela Equação 1.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} + \dots + \beta_k X_{k,i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Y_i = variável dependente para i;

X_i = variáveis independentes para i;

β = coeficientes parciais de regressão.

Através da análise de regressão linear foi possível identificar os desvios padrão em relação a todos os resultados, podendo identificar os dados que apresentam um maior erro, logo, esses dados que apresentavam mais do que três desvios padrão, foram descartados e com isso obtêm-se resultados mais confiáveis. Após a retirada destes dados é realizada uma nova regressão para verificar se as variáveis independentes apresentam significância em relação a variável dependente.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram definidos e os mesmos estão listados a seguir:

- Cimento Portland: CP II F - 40;
- Agregado miúdo: areia quartzosa de leito de rio;
- Blocos Cerâmicos: nas dimensões de 14 x 19 x 29 cm.

3.2.1 Cimento

A caracterização do cimento utilizado para o chapisco e para a argamassa é realizado através de suas propriedades químicas e físicas, disponibilizada pelo fabricante. As características químicas do cimento estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características químicas do cimento (Lote 03/2015).

Parâmetro	Metodologia	Quantidade (%)	Limites de Norma
MgO	NBR 14656 (ABNT, 2001)	5,7	≤ 6,5
SO ₃	NBR 14656 (ABNT, 2001)	3,3	≤ 4,0
Perda ao fogo	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	4,7	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	0,9	≤ 2,5

Fonte: Fabricante 2015.

Na Tabela 9 está apresentada a caracterização física do cimento utilizado na pesquisa.

Tabela 9 – Características físicas do cimento (Lote 03/2015).

Parâmetro	Metodologia	Valor	Limites de norma
Finura # 200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	0,0	≤ 10,0
Finura # 325 (%)	NBR 12826 (ABNT, 2014)	0,3	-
Blaine (g/cm ²)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	4800	≥ 2800
Consistência normal (%)	NBR NM 43 (ABNT, 2003)	30,7	-
Tempo de pega (min) Início	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	240	≥ 60
Tempo de pega (min) Fim	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	300	≤ 600
Expansão a quente (mm)	NBR 11582 (ABNT, 2012)	0,5	≤ 5,0
Resistência à compressão a 1 dia (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	24,0	-
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	34,6	≥ 15,0
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	39,0	≥ 25,0
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 1997)	45	≥ 40,0

Fonte: Fabricante 2015.

3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo natural utilizado na pesquisa foi de origem quartzosa, extraído do leito rio Jacuí, na região de Porto Alegre-RS. Os ensaios de caracterização do agregado miúdo foram realizados de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 – Caracterização do agregado miúdo.

Ensaio	Metodologia
Distribuição granulométrica da areia	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máxima característica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa específica	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária no estado solto	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

A Tabela 11 apresenta a caracterização do agregado miúdo utilizado para a realização do chapisco.

Tabela 11 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no chapisco.

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)
4,8	2	2
2,4	4	6
1,2	7	13
0,6	17	30
0,3	34	64
0,15	33	97
<0,15	3	100
Total	100	-
Dimensão máxima característica		4,8 mm
Módulo de finura		2,12
Massa específica		2,60 g/cm ³
Massa unitária no estado solto		1,50 g/cm ³

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 12 estão apresentadas as características do agregado miúdo utilizado na argamassa de revestimento.

Tabela 12 – Caracterização do agregado miúdo utilizado no revestimento.

Peneira (mm)	Retida (%)	Acumulada (%)
0,6	1	1
0,3	34	35
0,15	58	93
<0,15	7	100
Total	100	-
Dimensão máxima característica		0,6 mm
Módulo de finura		1,287
Massa específica		2,63 g/cm ³
Massa unitária no estado solto		1,55 g/cm ³

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3 Argamassa Industrializada

A argamassa utilizada foi do tipo industrializada estabilizada em que não há a presença de cal na sua composição. O traço (1:5 em volume) é constituído por cimento, areia, aditivo e água. Essa argamassa possui aditivos incorporadores de ar e estabilizadores de pega, permitindo obter uma argamassa trabalhável por um maior tempo.

A mistura para esta argamassa foi realizada em usina de dosagem e a distribuição, através de caminhões betoneiras. Para os revestimentos da Etapa I e para os prismas a mistura foi realizada em uma argamassadeira, uma vez que a quantidade de material utilizado foi de, no máximo 30 litros de argamassa, o que tornaria inviável a mistura nessa quantidade em um caminhão betoneira. Empregou-se 90 litros para a realização de todos os revestimentos desta etapa e moldagens dos corpos de prova.

Para os revestimentos da Etapa II, a mistura foi realizada em um caminhão betoneira, pois as quantidades foram de aproximadamente 350 litros, podendo assim utilizar esse processo de mistura, num total de 2100 para a confecção das paredes e revestimentos das mesmas.

3.2.3.1 Argamassa de revestimento no estado fresco

Na Tabela 13 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa no estado fresco.

Tabela 13 - Caracterização da argamassa no estado fresco.

Ensaio de Caracterização	Metodologia	Resultados
Índice de Consistência por Espalhamento	NBR 13276 (ABNT, 2005)	255 mm
Teor de Ar Incorporado	NBR NM 47 (ABNT, 2002)	6,7 %
Densidade de Massa	NBR 13278 (ABNT, 2005)	1746,15 kg/m ³

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3.2 Argamassa de revestimento no estado endurecido

Na Tabela 14 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização da argamassa no estado endurecido.

Tabela 14 - Caracterização da argamassa no estado endurecido.

Ensaio de Caracterização	Metodologia	Resultados
Resistência à Compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	4,72 MPa
Resistência à Tração na Flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)	2,97 MPa
Densidade de Massa	NBR 13280 (ABNT, 2005)	1669,7 kg/m ³
Coefficiente de Capilaridade	NBR 15259 (ABNT, 2005)	3,76 g/dm ² .min ^{1/2}
Índice de Vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)	29,1%
Absorção Total	NBR 9778 (ABNT, 2009)	17,0%

Fonte: elaborada pelo autor

3.2.4 Blocos cerâmicos

Os blocos cerâmicos foram caracterizados de acordo com a NBR 15270-3 (ABNT, 2005) e seus resultados médios estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Caracterização dos blocos cerâmicos.

Caracterização Geométrica			Planeza das faces (mm)	Índice de absorção de água inicial ((g/163,55cm ²)/min)	Índice de absorção de água (%)
Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)			
287	139	191	0	14,05	10,9

Fonte: elaborada pelo autor

Cabe ressaltar que devido ao bloco cerâmico ser utilizado como substrato de revestimento, o índice de absorção de água inicial deve ser realizado na face que será submetida ao revestimento, ou seja, a face lateral de acordo com a respectiva norma técnica.

3.2.5 Água

Para a produção das argamassas, foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de São Leopoldo, Rio Grande do Sul.

3.3 MÉTODOS

São apresentados nos itens a seguir os métodos de ensaios realizados para a caracterização das propriedades da argamassa e dos revestimentos produzidos.

3.3.1 Preparação do Substrato

O substrato utilizado foi o bloco cerâmico nas dimensões de 14x19x29 cm. Na Etapa I do programa experimental, o bloco foi serrado obtendo a superfície a ser revestida

(Figura 8), a fim de aperfeiçoar o espaço interno da mufla, em que o mesmo foi colocado para realizar o processo de diferentes temperaturas.

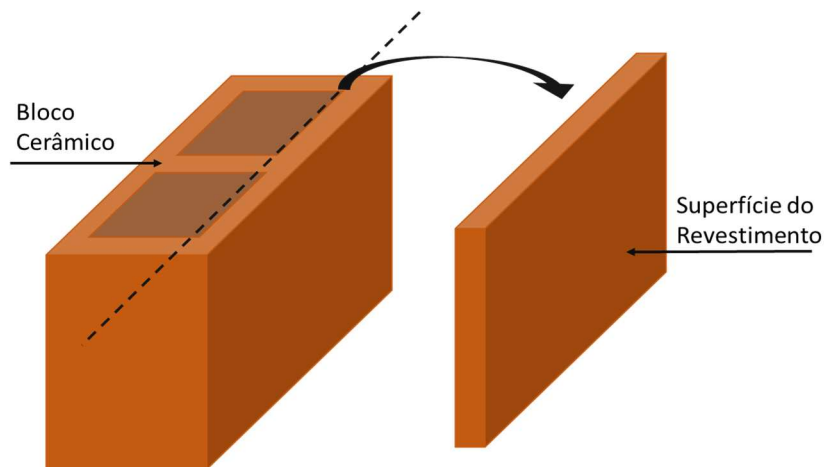


Figura 8 – Esquema para o corte do bloco.

Para a Etapa II não foram necessários realizar cortes no bloco cerâmico, pois para a realização do ensaio no forno foi confeccionada paredes de 3,15 x 3,00 m com os blocos cerâmicos íntegros. A argamassa de assentamento utilizada consiste na mesma que para o revestimento (a fim de manter o mesmo coeficiente de dilatação térmica que a argamassa de revestimento), com uma espessura da junta horizontal e vertical de, no máximo 10 mm, e a mão de obra para a confecção da parede foi de um mestre pedreiro oficial. Esta parede foi produzida no Instituto Tecnológico em Desempenho da Construção Civil (itt Performance), a Figura 9 apresenta o início da produção de uma das paredes.



Figura 9 – Execução da parede de alvenaria.

3.3.2 Preparação da base para o revestimento

Para que se tenha uma maior eficiência da aderência, o substrato cerâmico foi chapiscado em uma única camada de 5 mm. O traço do chapisco foi realizado em volume (1:3), através de um volume conhecido pode-se transformar o volume para massa.

Para a produção do chapisco foi testada uma relação a/c (água/cimento) por um mestre pedreiro oficial, que verificou a trabalhabilidade da mistura, de forma a ajustar a consistência e padronizá-la, após isso o mesmo profissional realizou a aplicação do chapisco nos blocos cerâmicos e na parede.

3.3.3 Produção do revestimento

A argamassa foi aplicada após o período de 72 horas da aplicação do chapisco em uma camada de 20 mm de espessura. A superfície do substrato contemplada na Etapa I é de 29 x 19 cm, já a da Etapa II é de 315 x 300 cm. Essa aplicação foi realizada de forma manual (por um mestre pedreiro oficial), a fim de desprezar alterações na aplicação da argamassa de revestimento para as diferentes etapas. Após o procedimento, as amostras da Etapa I permaneceram armazenadas em sala climatizada com temperatura ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade ($60\pm 10\%$), diferentemente da Etapa II onde as paredes não permanecem em um ambiente climatizado. O processo de cura das amostras foi de 28 dias.

3.3.4 Processo de elevação de temperatura

Após o período de 28 dias de cura dos revestimentos e das argamassas da Etapa I, ambos foram submetidos às diferentes temperaturas previstas, que são: a temperatura ambiente (23°C), 100, 300, 500, 700, 900°C , numa taxa de elevação da temperatura da mufla de $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Para a Etapa II empregou-se a taxa de aquecimento prescrita pela NBR 10636 (ABNT, 1989). O ciclo de aquecimento consistiu no acréscimo de temperatura até cada uma das temperaturas citadas, sempre seguida da manutenção de um patamar nesta temperatura por 30 min.

A Figura 10 apresenta o diagrama de procedimento do ensaio.

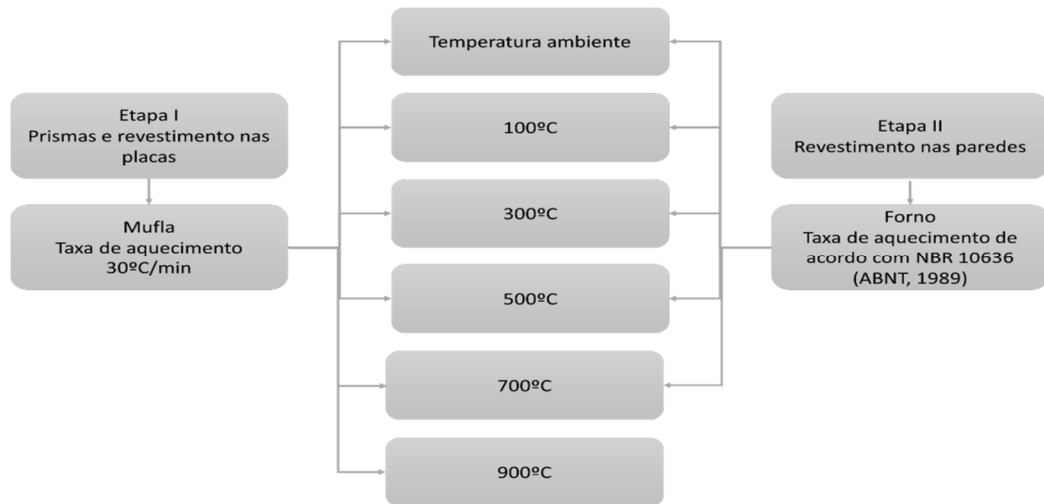


Figura 10 – Diagrama de ensaio.

3.3.5 Caracterização da argamassa

A caracterização da argamassa foi realizada somente no estado endurecido, pois os ensaios de realizados são para identificar a influência da temperatura somente nos corpos de prova de argamassa.

3.3.5.1 Estado endurecido da argamassa em diferentes temperaturas

No estado endurecido da argamassa foram realizados ensaios para todas as condições de temperatura, os ensaios realizados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Caracterização da argamassa no estado endurecido.

Ensaio	Metodologia
Resistência à Compressão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Resistência à Tração na Flexão	NBR 13279 (ABNT, 2005)
Densidade de Massa	NBR 13280 (ABNT, 2005)
Determinação da Absorção Total de Água	NBR 9778 (ABNT, 2009)
Índice de Vazios	NBR 9778 (ABNT, 2009)
Massa Específica	NBR 9778 (ABNT, 2009)
Absorção Capilar	NBR 15259 (ABNT, 2005)
Difração de raios X	-
Módulo de elasticidade dinâmico	NBR 15630 (ABNT, 2009)

Fonte: elaborada pelo autor

3.3.5.1.1 Resistência à Compressão

Para os ensaios de resistência à compressão, foram utilizados seis corpos de prova nas dimensões de 4 x 4 x 4 cm, e rompidos de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3.5.1.2 Resistência à Tração na Flexão

Para os ensaios de resistência à tração na flexão, utilizaram-se três corpos de prova nas dimensões de 4 x 4 x 16 cm, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.3.5.1.3 Densidade de Massa

Conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005), a densidade de massa que consiste através da medida da altura, largura e do comprimento de cada corpo-de-prova em centímetros e a suas respectivas massas em gramas. O ensaio foi realizado em três corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm.

3.3.5.1.4 Absorção Total, Índice de Vazios e Massa Específica.

Para a realização do ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica foram utilizados três corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005).

3.3.5.1.5 Absorção capilar

No ensaio de absorção por capilaridade a determinação foi realizada através de três corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, conforme o procedimento recomendado pela NBR 15259 (ABNT, 2005).

3.3.5.1.6 Difração de raios X

Para a difração de raios X foi coletada uma amostra do centro de um corpo de prova de dimensões de 4 x 4 x 16 cm, para cada temperatura de exposição da amostra, de acordo com a Figura 11.

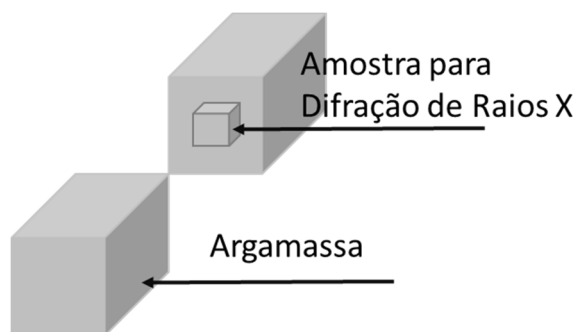


Figura 11 – Amostra da Difração de raios X.

3.3.5.1.7 Módulo de elasticidade dinâmico

A compacidade interna das argamassas foi avaliada com o uso do equipamento de ultrassom Pundit Lab, que possui uma resolução 0,1µs, faixa 0,1 - 9999µs, da marca Proceq. Para tal ensaio, foi realizada a determinação da velocidade de propagação da onda da argamassa após 28 dias de cura no ambiente climatizado e também após ser submetido à alta temperatura.

Através da Equação 2, pode-se realizar o calculo para determinar o módulo de elasticidade dinâmico de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2009).

$$Ed = \rho \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 + 2\mu)}{1 - \mu} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Ed = módulo de elasticidade dinâmico em MPa;

v = velocidade da onda ultrassônica em km/s;

ρ = densidade de massa aparente em kg/m³;

μ = coeficiente de Poisson, utilizado 0,2.

3.3.6 Caracterização do revestimento

No revestimento os ensaios abordam a macro e a microestrutura das amostras.

3.3.6.1 Macroestrutura

Para analisar a macroestrutura foi realizado o ensaio de determinação da resistência de aderência à tração de acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010) com 24 amostras para cada condição. Foi realizado o ensaio de absorção por capilaridade segundo o procedimento da RILEM TC 116 PCD (1999), em três amostras, com adaptação dos tempos de leitura e tamanho da amostra. A determinação do índice de vazios foi adaptada da NBR 9778 (ABNT, 2009), esse ensaio foi realizado em três amostras de argamassa de revestimento extraídas de cada exemplar. Na Figura 12 é possível visualizar a forma dos cortes realizados no revestimento da Etapa I. Também foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico nos mesmos conjuntos (com leituras em dois pontos) que foram submetidos à resistência de aderência à tração.

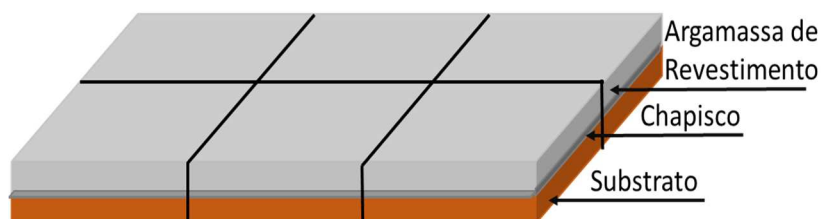


Figura 12 – Amostras de absorção do revestimento.

As amostras analisadas nas alvenarias revestidas foram extraídas do centro da alvenaria, sendo 3 amostras de revestimento para cada determinação.

3.3.6.1.1 Resistência de aderência à tração

Para o ensaio de resistência de aderência à tração foi utilizado o procedimento recomendado pela NBR 13528 (ABNT, 2010). O equipamento utilizado é da marca Dinatest, modelo DS2-DPU-1100, com capacidade máxima de 5000N. Foram realizados 24 ensaios para cada condição, sendo seis determinações por conjunto da Etapa I, conforme Figura 13.

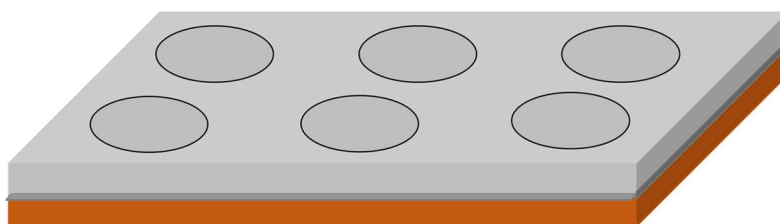


Figura 13 – Disposição das amostras para o ensaio de aderência.

Para o ensaio de resistência de aderência à tração nas alvenarias (Etapa II) foi utilizado o procedimento recomendado pela NBR 13528 (ABNT, 2010). O equipamento utilizado é da marca Dinatest, modelo DS2-DPU-1100, com capacidade máxima de 5000N. Foram realizados 20 ensaios para cada condição. As amostras foram extraídas em um espaço delimitado de 1,5 m² no centro da parede revestida. Optou-se por esta área em função de uma melhor homogeneidade das amostras submetidas ao fogo.

3.3.6.1.2 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade seguiu o procedimento da RILEM TC 116 PCD (1999), adaptado para o revestimento (substrato + argamassas) por Erhart (2014). Neste caso, os conjuntos foram previamente cortados e secos, e impermeabilizados nas laterais com fita adesiva e recebem uma cobertura transparente e impermeável na face superior, não aderida à superfície, de maneira que não tenha interferência da umidade externa. O ensaio se

inicia com a colocação da amostra com a parte do revestimento para baixo imergindo-a em uma bandeja com uma lâmina de água de três milímetros, com nível de água constante.

Os registros das massas foram realizados nos seguintes intervalos de tempo: 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30, 60 minutos e 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

Para cada intervalo de tempo, as amostras são retiradas da bandeja com água, secas superficialmente a fim de remover o excesso de água e tomada a massa da amostra. Os resultados obtidos a partir deste ensaio apresentam o perfil de absorção de água ao longo do tempo. O sistema experimental proposto pela Rilem (1999) é apresentado na Figura 14.

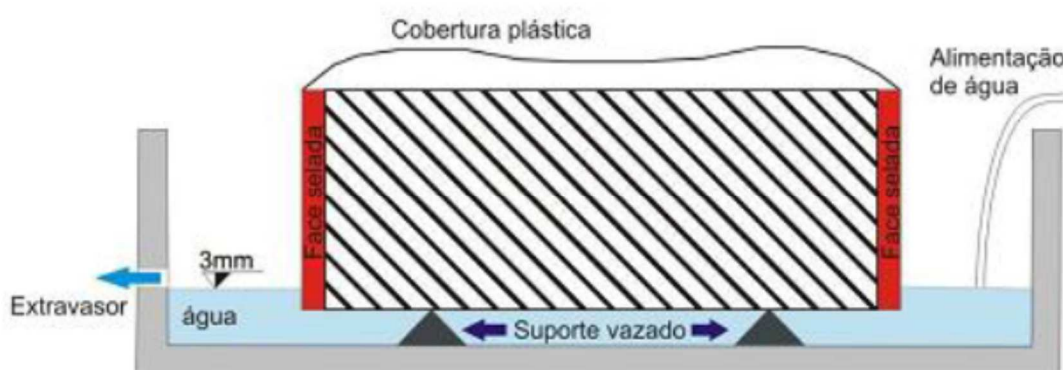


Figura 14 – Método de ensaio utilizado pela RILEM (1999).

Fonte: Rilem (1999) apud Troian (2010).

O ensaio de absorção capilar para os revestimentos da Etapa I foi realizado no sistema de revestimentos (revestimento + substrato). Para os revestimentos submetidos nas temperaturas de 700 e 900° a absorção foi realizada somente no revestimento, sem a presença do substrato, pois a argamassa deslocou do substrato devido ao aumento da temperatura. Nos revestimentos da Etapa II a absorção de capilaridade foi realizada apenas no revestimento, ou seja, sem o substrato.

3.3.6.1.3 Índice de Vazios

O ensaio do índice de vazios foi realizado em três amostras de revestimento para cada temperatura (Etapas I e II), desconsiderando o substrato de acordo com a Figura 15. O método utilizado foi adaptado da NBR 9778 (ABNT, 2005), por utilizar revestimento ao invés de corpos de prova prismáticos.

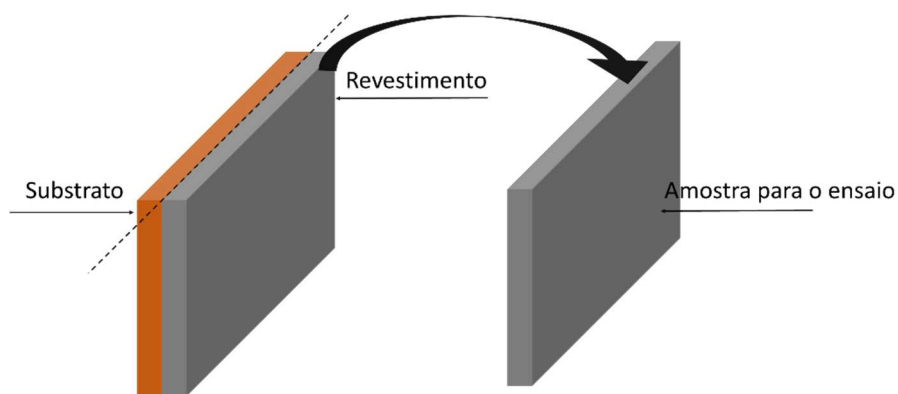


Figura 15 – Amostra do índice de vazios.

3.3.6.1.4 Módulo de elasticidade dinâmico

A compacidade interna dos revestimentos foi avaliada somente para os revestimentos da Etapa I, com o uso do equipamento de ultrassom Pundit Lab, que possui uma resolução $0,1\mu\text{s}$, faixa $0,1 - 9999\mu\text{s}$, da marca Proceq. Para tal, realizou-se a determinação da velocidade de propagação da onda no revestimento após 28 dias de cura no ambiente climatizado e também após ser submetido às diferentes temperaturas.

3.3.6.2 Microestrutura

Para a análise da microestrutura (Microscopia eletrônica de varredura e Porosimetria por intrusão de mercúrio) foi utilizada a amostra que mais se aproximou da média do coeficiente de capilaridade, os ensaios foram realizados no eixo da amostra. A Figura 16 ilustra o segmento utilizado para a obtenção das amostras dos ensaios de microestrutura.

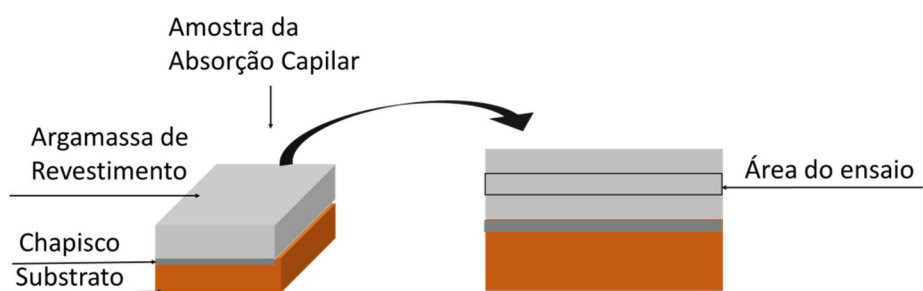


Figura 16 – Área de obtenção da amostra para ensaios de microestrutura.

Para realizar essa caracterização foram utilizados os métodos descritos a seguir.

3.3.6.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a Microscopia eletrônica de varredura foi preparada uma amostra cuja dimensão máxima foi de $10 \times 10 \text{ mm}$. Após este procedimento a amostra passou por um processo de embutimento com resina específica para tal análise. Tão logo, a amostra foi

submetida a uma sequência de lixação a fim de garantir a planeza total da amostra e desta forma evitar qualquer erro de análise realizada no microscópio eletrônico. A amostra foi metalizada para que o corpo de prova se torne condutor, e assim obter uma melhor resolução para visualização da distribuição dos poros presentes na amostra. O procedimento foi realizado no Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (itt Fóssil) e utilizou-se uma ampliação de visualização no microscópio de 50 vezes.

Após a análise verificou-se que não foi possível identificar nenhuma diferença entre as amostras apresentadas, e isso ocorreu em todos os revestimentos para as diferentes temperaturas, pois sua estrutura ou distribuição de poros pela microscopia por uma análise visual apresentou as mesmas características.

3.3.6.2.2 *Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)*

A porosimetria por intrusão de mercúrio foi realizada no Porosímetro de mercúrio micro processado (modelo PoreMaster 33), este equipamento mensura o volume de poros de 200 a 0,0070 μm de diâmetro, com pressões que variam de 0 a 0,34 MPa para o sistema de baixa pressão e de 0,34 a 227,37 MPa para o sistema de alta pressão. No primeiro momento é realizada a intrusão do mercúrio em baixa pressão, identificando assim os macroporos, já no segundo momento a intrusão do mercúrio é realizada em alta pressão, identificando os microporos.

Para a realização desse ensaio, foi preparada uma amostra nas dimensões de 0,7 x 0,7 x 2 cm, uma de cada tipo de revestimento e temperatura submetida.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE ARGAMASSA SUBMETIDOS A AQUECIMENTO EM MUFLA

Com o intuito de identificar o comportamento geral das argamassas submetidas ao aquecimento em mufla, são apresentados na Tabela 17 os resultados obtidos.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Densidade de Massa (kg/m ³)	Coefficiente de Capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Índice de vazios (%)	Absorção total (%)	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
Referência	4,60	2,97	1680	3,76	29,08	17,05	10044
100°C	5,44	3,22	1640	3,64	28,33	16,81	12518
300°C	6,25	4,30	1678	2,40	28,37	16,60	9349
500°C	6,86	3,53	1669	5,01	28,02	16,42	8694
700°C	2,56	0,52	1611	6,82	30,79	18,80	2142
900°C	0,81	0,20	1598	11,68	32,27	19,54	846

Fonte: elaborada pelo autor

Nos itens seguintes será realizada a análise individual de cada ensaio efetuado e suas interações. Também são discutidos os resultados da difração de raios X.

4.1.1 Resistência à compressão

Na Figura 17 e Tabela 18 encontram-se os valores da resistência à compressão das amostras de argamassa submetidas às diferentes temperaturas.

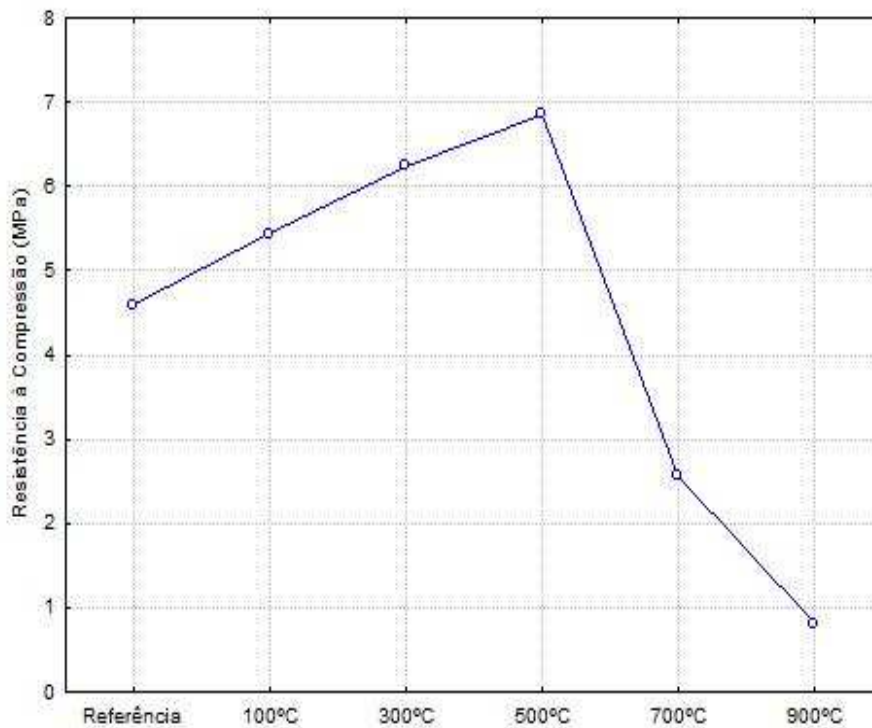


Figura 17 – Resistência à compressão dos corpos de prova de argamassa

Tabela 18 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	4,60	7,05
100°C	5,44	30,63
300°C	6,25	10,50
500°C	6,86	18,10
700°C	2,56	23,48
900°C	0,81	10,01

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se um acréscimo de resistência até a temperatura de 500°C de 49% quando comparada a argamassa de referência, seguida de uma queda brusca a partir desta temperatura. Nos exemplares submetidos à temperatura de 900°C houve uma queda de 82% de resistência à compressão em relação à referência.

Na pesquisa realizada por Cülfik e Özturan (2002) utilizando argamassas de alta resistência, na ordem de 62,9 MPa, identificou-se que com o aumento da temperatura a argamassa apresentou uma queda contínua na resistência à compressão. Apesar de não haver sido observado um acréscimo de resistência em nenhum momento dos ensaios, ao término dos

mesmos na temperatura de 900°C apresentou uma queda de 86% quando comparada a argamassa de referência, semelhante ao resultado encontrado nesta pesquisa.

Yazici, Sezer e Sengul, (2012), trabalhando com uma argamassa de resistência à compressão de 45,3MPa, observaram uma queda contínua de resistência (sem nenhum acréscimo da propriedade) e encerrou seu ensaio com uma queda de 53% na temperatura de 600°C.

Ao contrário dos dois trabalhos citados, no trabalho de Morsy *et al.* (2012) utilizando uma argamassa de 25 MPa, foi verificada que a resistência à compressão quando comparada com a argamassa de referência apresentou um ganho de 24% na temperatura de 450°C. Mas nas temperaturas superiores (até 800°C) houve uma queda de resistência à compressão de 60% em relação à argamassa de referência. Este comportamento é parecido ao da argamassa contemplada nesta pesquisa onde ocorreu um aumento da resistência até a temperatura de 500°C com um ganho de 36% e após isso uma queda considerável da resistência à compressão, que aos 900°C foi da ordem de 82%.

O acréscimo de resistência à compressão observado nesta pesquisa e na de Morsy *et al.* (2012) pode ser explicado por vários fatores. O aumento na resistência à compressão é justificado por uma hidratação adicional dos grãos de cimento não hidratados através dos efeitos de vapor sob a condição chamada de autoclavagem interna (MORSY *et al.*, 2012).

A hipótese também é aceita por Kim, Yun e Park (2013), que salientam que entre 100 e 400°C pode haver um refinamento de poros com a diminuição da porosidade, através de uma hidratação adicional dos grãos de cimento que ainda não estão hidratados, pelo desenvolvimento de uma condição de autoclave, permitindo o surgimento de novos produtos de hidratação nos poros existentes, justificando o aumento da resistência à compressão.

Após os 500°C já não há água quimicamente combinada no C-S-H e nos sulfoaluminatos hidratados, o que resulta na desidratação da pasta de cimento devido à decomposição do hidróxido de cálcio, causando uma perda na resistência. Após 900°C há uma decomposição completa do C-S-H (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os resultados de resistência à compressão foram analisados através da análise de variância (ANOVA), considerando o efeito isolado da temperatura na propriedade, a Tabela 19 apresenta os dados obtidos.

Tabela 19 – Análise de variância (ANOVA) da resistência á compressão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	134,1246	26,8249	30,8255	2,6206	1,06E-09	S
Erro	29	155,0099					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de 'p' inferior a 0,05).

Com o intuito de avaliar entre as temperaturas através de comparação múltipla, a fim de identificar se todas as temperaturas foram ou não significativas entre si, foi realizada uma análise de variância relacionando cada temperatura de acordo com a Tabela 20.

Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,298328	0,001001	0,004266	0,000157	6,4E-09
100°C		0,344161	0,165297	0,006605	0,000259
300°C			0,356975	1,49E-05	7,94E-08
500°C				0,00116	4,55E-06
700°C					0,000202

Fonte: elaborada pelo autor

Ao avaliar os resultados de resistência à compressão das argamassas, pode-se identificar que ao comparar a argamassa de referência com a argamassa submetida à 100°C a temperatura não é significativa, pois o valor de 'p' foi superior a 0,05, mesmo efeito ao comparar a argamassa de 100°C com as argamassas de 300 e 500°C, e entre as argamassas de 300°C para com as de 500°C. Para as demais comparações a análise de variância apresentou um efeito significativo da temperatura.

4.1.2 Resistência à tração na flexão

Na Figura 18 e Tabela 21 estão apresentados os resultados da resistência à tração na flexão das amostras de argamassa submetidas às diferentes temperaturas.

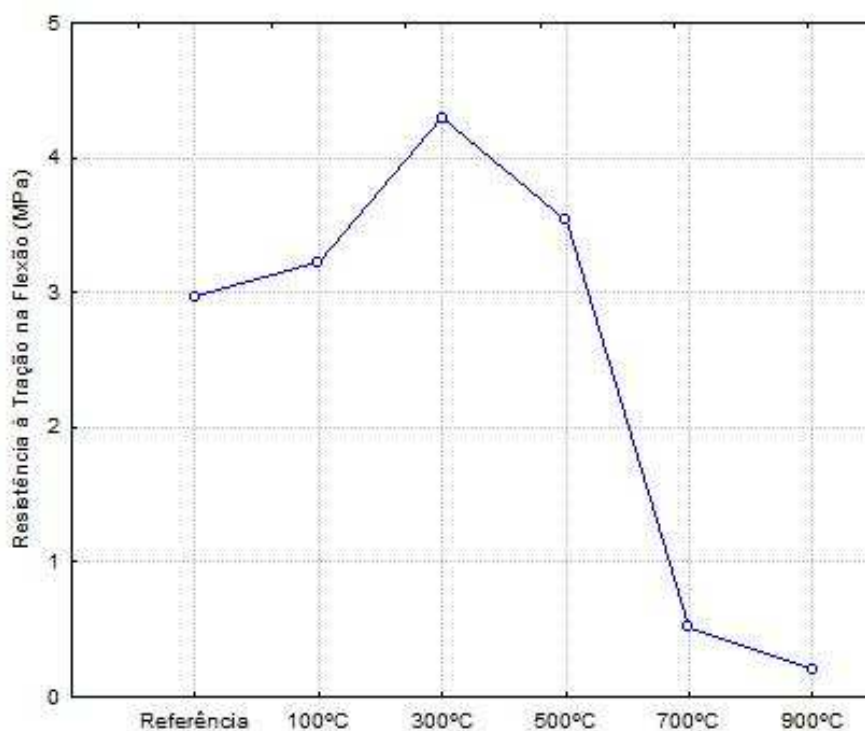


Figura 18 – Resistência à tração na flexão

Tabela 21 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Resistência à tração na flexão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	2,97	4,03
100°C	3,22	24,60
300°C	4,30	13,45
500°C	3,53	12,74
700°C	0,52	15,59
900°C	0,20	8,66

Fonte: elaborada pelo autor

A resistência à tração na flexão apresentou um comportamento similar ao da resistência à compressão, pois também apresentou um acréscimo de resistência seguida por uma redução da propriedade. Há um aumento da resistência à tração na flexão da argamassa submetida à temperatura de 300°C em relação à argamassa de referência, e queda a partir desta temperatura, chegando a uma diminuição de 93% na temperatura de 900°C.

Djaknoun, Ouedraogo e Benyahia (2011) identificaram que em suas argamassas submetidas nas temperaturas de 150, 300, 500 e 700°C a que foi elevada a 300°C apresentou uma resistência à tração na flexão na ordem de 8% superior à referência e as demais apresentaram valores inferiores ao da argamassa de referência. Comportamento observado

nesta pesquisa, onde a argamassa elevada a 300°C apresentou uma maior resistência à tração na flexão quando comparada as demais.

Nas pesquisas de Morsy *et al.* (2012) e Cülfik e Özturan (2002) não foi encontrado nenhum ponto de acréscimo de resistência entre a argamassa de referência e as submetidas às temperaturas. Mas a partir de 500°C ocorreu o decréscimo na resistência à tração na flexão da argamassa de forma mais expressivas em temperaturas superiores a 500°C, chegando até 78% para 800°C e de 92% na temperatura de 900°C, esta queda se assemelha a encontrada nesta pesquisa.

A Tabela 22 apresenta a análise de variância entre os valores de resistência à tração na flexão das argamassas submetidas às diferentes temperaturas.

Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) da resistência á tração na flexão.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	42,7255	8,5451	43,2105	3,1058	2,9E-07	S
Erro	17	45,0986					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de 'p' inferior a 0,05).

Avaliando a resistência à tração na flexão entre as temperaturas através de comparação múltipla, foi realizada uma análise de variância relacionando cada temperatura entre si, apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,60947	0,01758	0,103	7,9E-06	2,4E-06
100°C		0,1316	0,58765	0,00418	0,00273
300°C			0,14621	0,00036	0,00025
500°C				0,00034	0,00021
700°C					0,00264

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que ao comparar qualquer resistência à tração na flexão das argamassas de outras temperaturas com as argamassas elevadas até 700 e 900°C, o efeito da temperatura é significativo, esse mesmo efeito é identificado ao comparar a argamassa de referência com a argamassa submetida a 300°C. Para as demais comparações a análise de variância apresentou um efeito não significativo da temperatura submetida.

4.1.3 Densidade de massa

Os resultados de densidade de massa dos corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas estão apresentadas na Figura 19 e Tabela 24.

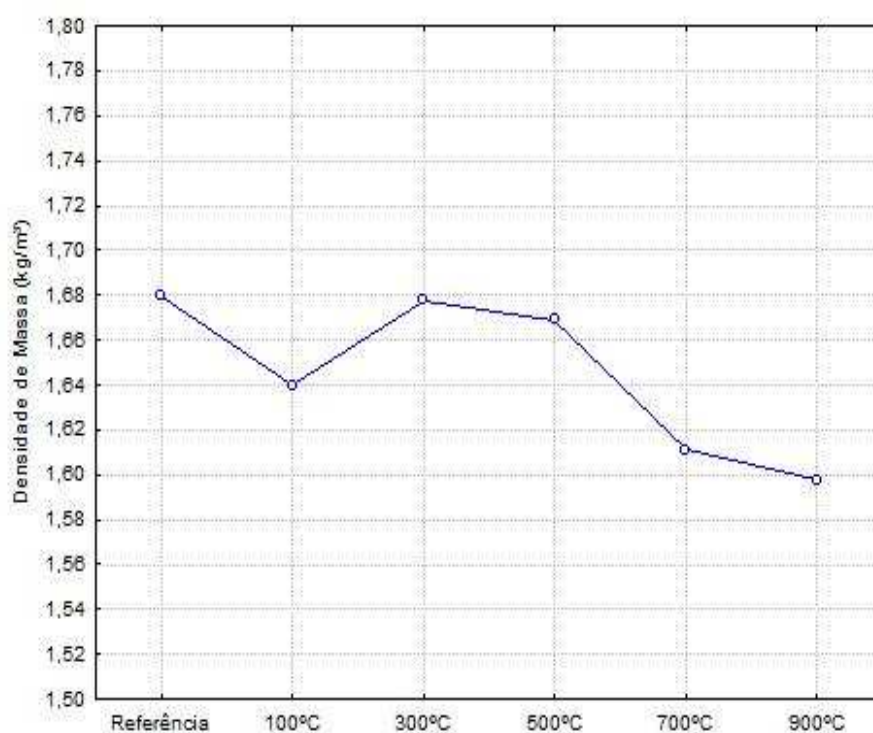


Figura 19 – Densidade de massa

Tabela 24 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Densidade de Massa (kg/m³)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	1680	0,27
100°C	1640	0,69
300°C	1678	0,48
500°C	1669	0,42
700°C	1611	0,39
900°C	1598	0,21

Fonte: elaborada pelo autor

A densidade de massa diminui na medida em que as argamassas são submetidas a maiores temperaturas, sendo que a 900°C há uma queda de 5% nesta propriedade. A densidade de massa se mantém aproximadamente constante até 500°C, ocorrendo uma maior diferença a partir desta temperatura.

A maioria dos processos de desidratação ocorre principalmente nas temperaturas superiores a 500°C, com isso há mudanças nas propriedades físicas que incluem porosidade crescente acompanhada pela diminuição da densidade, este aumento da porosidade pode indicar que os vazios se tornam maiores em tamanho e número de poros. Essa mudança pode ser identificada nos resultados de densidade de massa da argamassa estudada nesta pesquisa submetida em diferentes temperaturas.

Com o intuito de verificar se as densidades de massa são usuais em revestimentos argamassados, a Tabela 25 apresenta densidades de algumas argamassas de revestimento utilizadas por outras pesquisas.

Tabela 25 – Resultados dos ensaios realizados.

Autores	Tipo de Argamassa	Densidade de Massa (kg/m³)
PEREIRA, (2007)	Industrializada	1757
	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de fíler	1890 - 1950
ARNOLD, (2011)	Traço 1:1:6 utilizando Areia de Britagem Basáltica (Britador de Mandíbula) com variação de fíler	1640 - 1680
ROSA, (2013)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de microfinos	1810 - 1850
ERHART, (2014)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural	1882

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que as variações entre as determinações das densidades de massa realizadas por Arnold (2011) contemplam os resultados de todos os autores mencionados e também as densidades desta pesquisa até a temperatura de 500°C, demonstrando que os valores obtidos são de argamassas utilizadas em revestimentos. As argamassas submetidas a 700 e 900°C apresentam resultados de menor densidade de massa com uma maior diferença para os demais, abaixo dos valores encontrados em outras pesquisas.

Através da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 26, os resultados da densidade de massa em função da temperatura em que as argamassas foram submetidas, verifica-se o efeito significativo da temperatura sobre a densidade de massa.

Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) da densidade de massa.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	0,0188	0,0037	72,1378	3,1058	1,57E-08	S
Erro	17	0,0194					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Na avaliação entre as temperaturas através de uma análise de variância, pode-se verificar que as argamassas submetidas nas temperaturas de 100, 700 e 900°C, apresentaram um efeito significativo da temperatura para as demais argamassas, esses efeitos estão apresentados na Tabela 27 através do valor de ‘p’.

Tabela 27 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,004914	0,715198	0,089478	0,000103	1,49E-05
100°C		0,009373	0,019452	0,018233	0,003477
300°C			0,232735	0,000344	9,06E-05
500°C				0,000425	8,9E-05
700°C					0,03024

Fonte: elaborada pelo autor

4.1.4 Índice de vazios e absorção de água total

Na Figura 20 e Tabela 28 estão apresentados os valores do índice de vazios e da absorção de água total dos corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas.

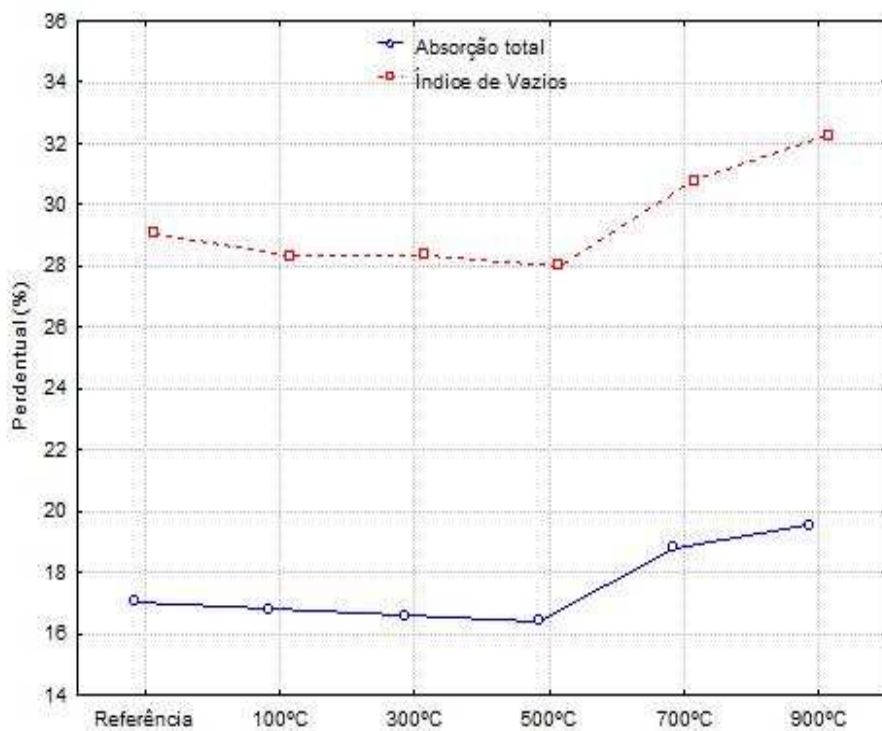


Figura 20 – Índice de vazios e absorção total de água

Tabela 28 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Índice de vazios		Absorção de água total	
	(%)	Coefficiente de Variação (%)	(%)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	29,08	2,21	17,05	2,78
100°C	28,33	2,13	16,81	2,08
300°C	28,37	5,61	16,60	6,08
500°C	28,02	1,06	16,42	1,21
700°C	30,79	2,39	18,80	2,38
900°C	32,27	0,52	19,54	0,45

Fonte: elaborada pelo autor

Houve um comportamento similar entre a variação do índice de vazios e a absorção de água total dos exemplares. As variações nestes índices são pouco expressivas, mas é possível identificar uma tendência de manutenção até a temperatura de 500°C, a partir da qual há um aumento da quantidade de vazios e da absorção de água. A temperatura de 100°C se apresenta como exceção.

Na Tabela 29 está apresentada a análise de variância (ANOVA), para os resultados dos índices de vazios das argamassas em função da temperatura.

Tabela 29 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	43,034165	8,606833	13,02609	3,1058	0,000168	S
Erro	17	50,963022					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de ‘p’ inferior a 0,05), realizando essa análise entre as temperaturas verificamos que até a argamassa submetida à 500°C, não há efeito significativo da temperatura no índice de vazios e que as argamassas submetidas nas temperaturas de 700 e 900°C apresentaram efeito significativo da temperatura para com as demais argamassas, com exceção da relação entre a argamassa elevada a 300°C para com a argamassa de 700°C, esses efeitos estão apresentados na Tabela 30 através do valor de ‘p’.

Tabela 30 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,217129	0,511821	0,060886	0,038312	0,001135
100°C		0,97583	0,466298	0,011027	0,000403
300°C			0,73174	0,074366	0,01341
500°C				0,003785	2,73E-05
700°C					0,027958

Fonte: elaborada pelo autor

A análise de variância para os resultados de absorção de água total em função da temperatura apresentada na Tabela 31, obteve um efeito significativo.

Tabela 31 – Análise de variância (ANOVA) da absorção de água total.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	25,50741	5,101482	19,0017	3,1058	2,51E-05	S
Erro	17	28,72911					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Ao realizar uma comparação múltipla, através de uma análise de variância, o efeito da temperatura foi significativo apenas para as argamassas que foram submetidas a uma temperatura superior à 700°C, como pode ser visto na Tabela 32.

Tabela 32 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,524971	0,525113	0,099863	0,009617	0,000855
100°C		0,749483	0,163826	0,003743	0,000197
300°C			0,771346	0,026094	0,00734
500°C				0,001078	1,54E-05
700°C					0,047354

Fonte: elaborada pelo autor

4.1.5 Coeficiente de capilaridade

Os coeficientes de capilaridade dos corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas estão apresentados na Figura 21 e seus valores na Tabela 33.

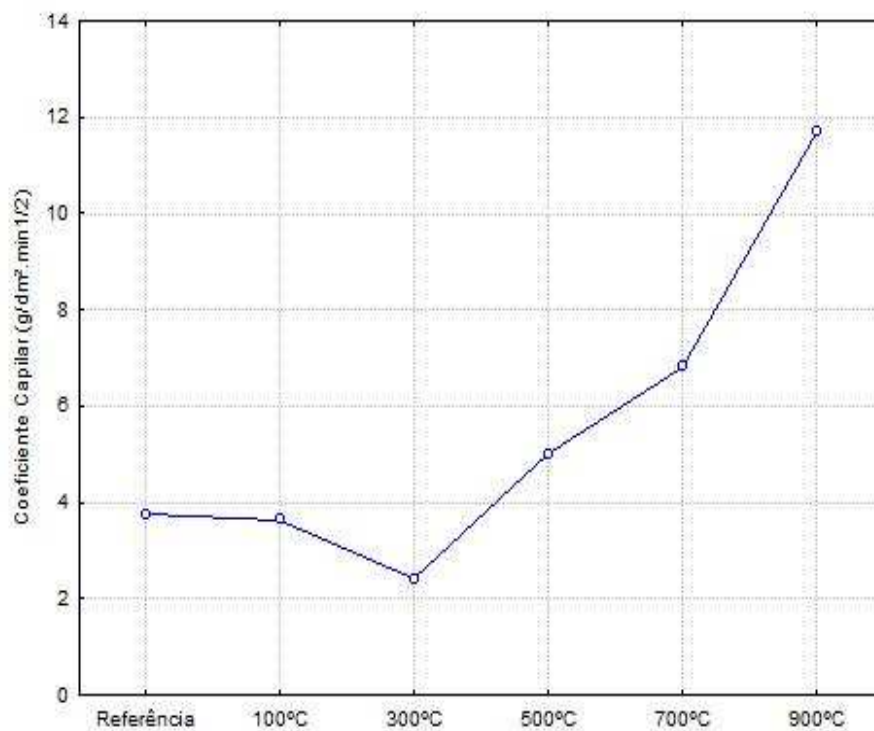


Figura 21 – Coeficiente de capilaridade

Tabela 33 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Coefficiente de Capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Coefficiente de Variação (%)
Referência	3,76	5,99
100°C	3,64	8,87
300°C	2,40	29,97
500°C	5,01	7,50
700°C	6,82	4,11
900°C	11,68	5,70

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se uma diminuição nos coeficientes de capilaridade até 300°C de 36% e um expressivo aumento após esta temperatura. A argamassa submetida à temperatura de 900°C obteve um aumento de 211%, em relação ao coeficiente de capilaridade da argamassa de referência.

Os resultados dos coeficientes de capilaridade foram analisados através da análise de variância (ANOVA), na Tabela 34 estão apresentados os dados obtidos considerando o efeito isolado da temperatura neste coeficiente.

Tabela 34 – Análise de variância (ANOVA) do coeficiente de capilaridade.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	168,7902	33,7580	151,3437	3,1059	2,08E-10	S
Erro	17	171,4669					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de 'p' inferior a 0,05).

Através de comparação múltipla, realizada por uma análise de variância, a Tabela 35 apresenta o valor de 'p' da relação entre cada temperatura.

Tabela 35 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,627689	0,035985	0,007773	0,00123	4,05E-05
100°C		0,053985	0,008827	0,000214	4,72E-05
300°C			0,005148	0,00585	8,12E-05
500°C				0,002577	0,000111
700°C					0,00031

Fonte: elaborada pelo autor

De acordo com o apresentado pode-se identificar que em apenas duas relações o efeito da temperatura não foi significativo, ao relacionar o coeficiente da argamassa submetida à 100°C com a argamassa de referência e com argamassa elevada até 300°C. Para as demais comparações a análise de variância apresentou um efeito significativo da temperatura, pois o valor de 'p' foi inferior a 0,05.

Tendo em vista o grande aumento entre os coeficientes capilares desta pesquisa, a Tabela 36 apresenta coeficientes de capilaridade de algumas argamassas de revestimento utilizadas em outras pesquisas e é possível identificar que, apesar da diferença ser expressiva entre a argamassa submetida a 900°C em relação à argamassa de referência, ainda o coeficiente capilar se assemelha com outras argamassas de revestimento.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios realizados.

Autores	Tipo de Argamassa	Coeficiente de Capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})
PEREIRA, (2007)	Industrializada	0,9
ARNOLD, (2011)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de filer	10,2 a 13,1
ROSA, (2013)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de microfios	12,99 a 17,13

Fonte: elaborada pelo autor

O coeficiente de capilaridade está relacionado com a quantidade e a distribuição dos poros existente na amostra. Nas argamassas com temperaturas de 500, 700 e de 900°C, a porosidade aumenta através do efeito de dissociação dos produtos de hidratação, e com isso aumenta bruscamente o coeficiente capilar.

4.1.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Os módulos de elasticidade dinâmico dos corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas estão apresentados na Figura 22 e seus valores na Tabela 37.

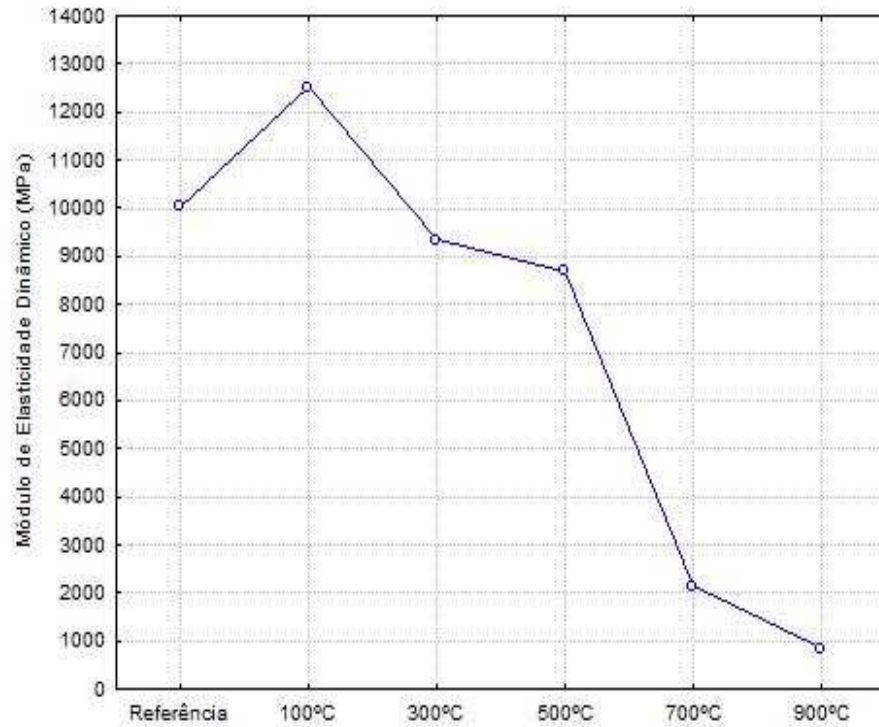


Figura 22 – Módulo de elasticidade dinâmico

Tabela 37 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Referência	10044	4,72
100°C	12518	3,03
300°C	9349	1,66
500°C	8694	1,00
700°C	2142	2,14
900°C	846	1,67

Fonte: elaborada pelo autor

O módulo de elasticidade dinâmico apresentou uma pequena queda até a temperatura de 500°C, e após isso ocorreu uma queda extremamente brusca.

As argamassas apresentaram um módulo de elasticidade dinâmico inferior ao da argamassa de referência. A submetida à temperatura de 300°C apresentou uma redução em seu módulo de 7%, a argamassa com temperatura de 500°C apresentou uma queda de 13% e

as submetidas à temperatura de 700 e 900°C apresentaram uma queda entre 79 e 92%, respectivamente.

Com a finalidade de verificar se os módulos de elasticidade dinâmico encontrados nas argamassas para as diferentes temperaturas são usuais em revestimentos argamassados, a Tabela 38 apresenta algumas argamassas de revestimento utilizadas por outras pesquisas com os valores do módulo de elasticidade.

Tabela 38 – Resultados dos ensaios realizados.

Autores	Tipo de Argamassa	Módulo de elasticidade dinâmico (MPa)
ARNOLD, (2011)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de fíler	5800 - 9200
ROSA, (2013)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de microfinos	4100 - 6000
ERHART, (2014)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural	11081
SENTENA, (2015)	Traço 1:1:6 utilizando Areia Natural com variação de fíler	12960 - 14571
	As mesmas argamassas, porém após 40 ciclos de aquecimento até 80°C e resfriamento até temperatura ambiente	9200 - 8100

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que o traço das argamassas de revestimento utilizada nas pesquisas é basicamente o mesmo, e que mesmo assim ocorre uma grande variação entre as determinações do módulo de elasticidade dinâmico. As argamassas desta pesquisa até a temperatura de 500°C possuem valores similares aos das argamassas de revestimento utilizadas nas pesquisas citadas. As argamassas submetidas a 700 e 900°C apresentam resultados de menor módulo de elasticidade dinâmico com uma maior diferença para os demais, e abaixo dos valores encontrados em outras pesquisas.

A Tabela 39 apresenta a análise de variância entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas submetidas nas diferentes temperaturas.

Tabela 39 – Análise de variância (ANOVA) do módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	3,27E+08	65490759,8	976,5737	3,1058	3,17E-15	S
Erro	17	3,28E+08					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito significativo (valor de 'p' inferior a 0,05).

Ao avaliar o módulo de elasticidade dinâmico entre as temperaturas por meio de uma análise de variância, identificou-se que somente entre a argamassa de referência e a elevada a uma temperatura de 300°C, não houve significância da temperatura. Para as demais comparações a análise de variância apresentou um efeito significativo da temperatura, como pode ser visto na Tabela 40, através dos valores de 'p'.

Tabela 40 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	Referência	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência		0,00212	0,07319	0,00832	8,7E-06	4,7E-06
100°C			0,00018	7E-05	1,2E-06	7,4E-07
300°C				0,0031	1,7E-07	7,5E-07
500°C					3,4E-08	1,1E-08
700°C						1,3E-06

Fonte: elaborada pelo autor

Os exemplares submetidos à temperatura de 100°C, entretanto tem um comportamento distinto, ocorrendo um acréscimo de 25% no módulo de elasticidade dinâmico, pois Benetti (2013) e Aguilar *et al.* (2006) em seus estudos realizados em módulo de elasticidade de concretos identificaram que ao ensaiarem concretos úmidos e secos o comportamento foi distinto obtendo valores de 15 a 20% maior para as amostras com umidade.

4.1.7 Difração de raios X

As difrações de raios X estão apresentadas nas Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28.

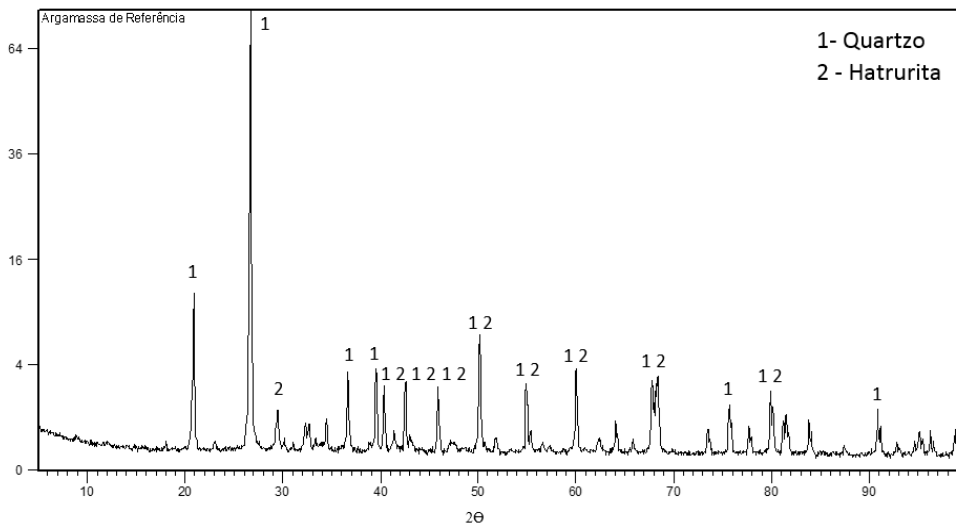


Figura 23 – Difração de raios X da argamassa de referência

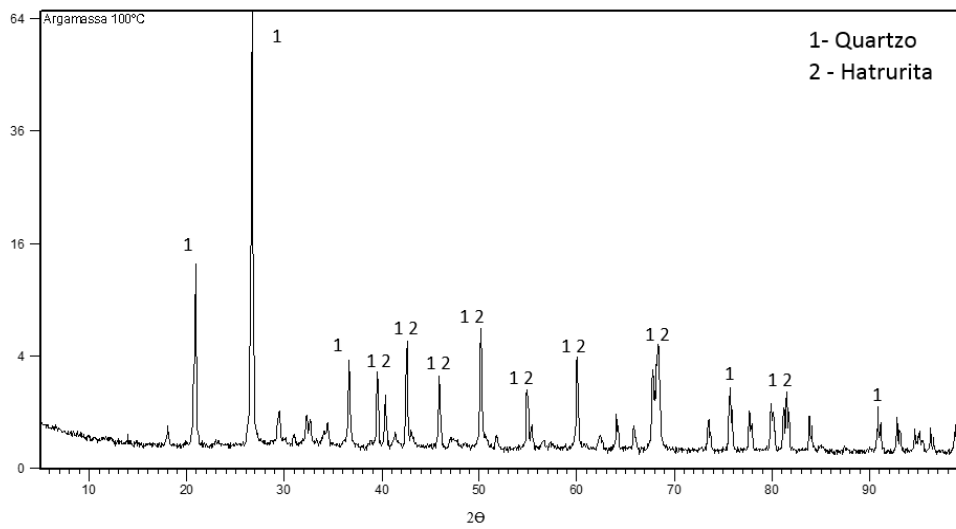


Figura 24 – Difração de raios X da argamassa elevada a 100°C

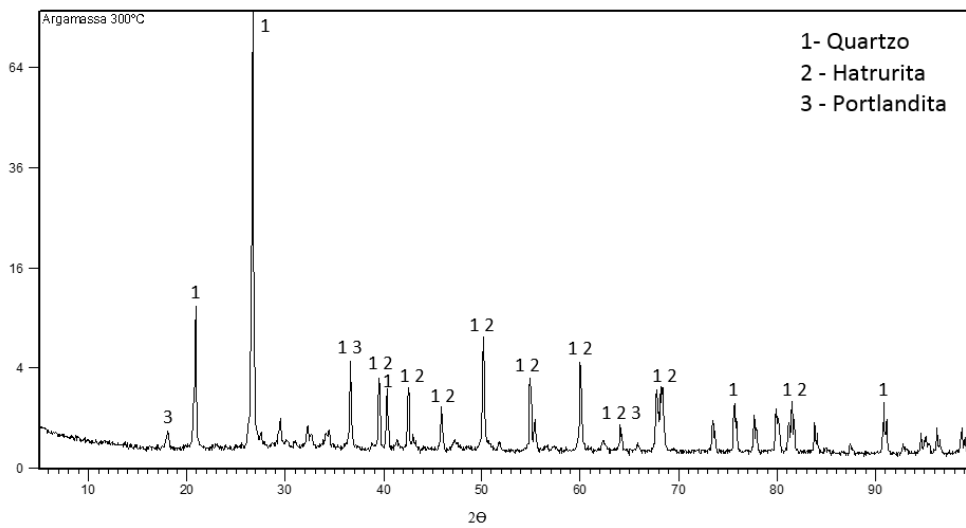


Figura 25 – Difração de raios X da argamassa elevada a 300°C

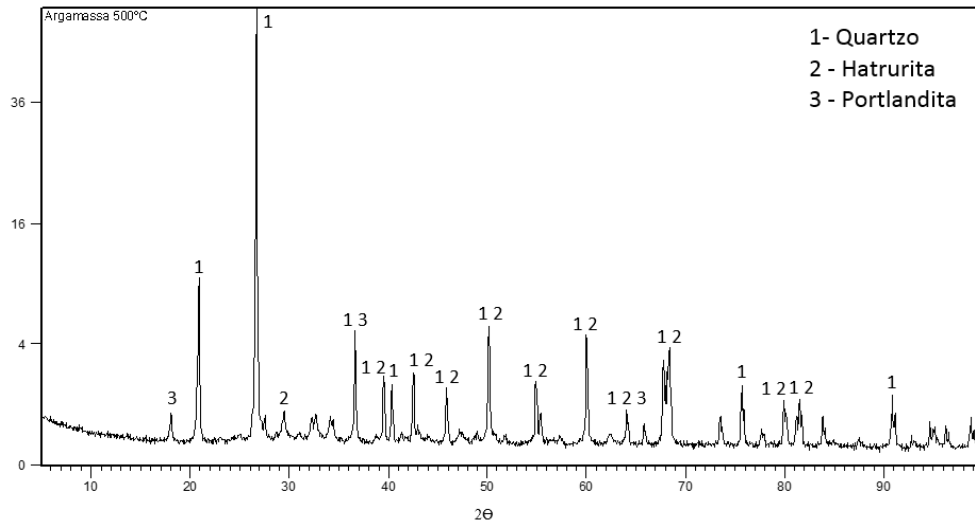


Figura 26 – Difração de raios X da argamassa elevada a 500°C

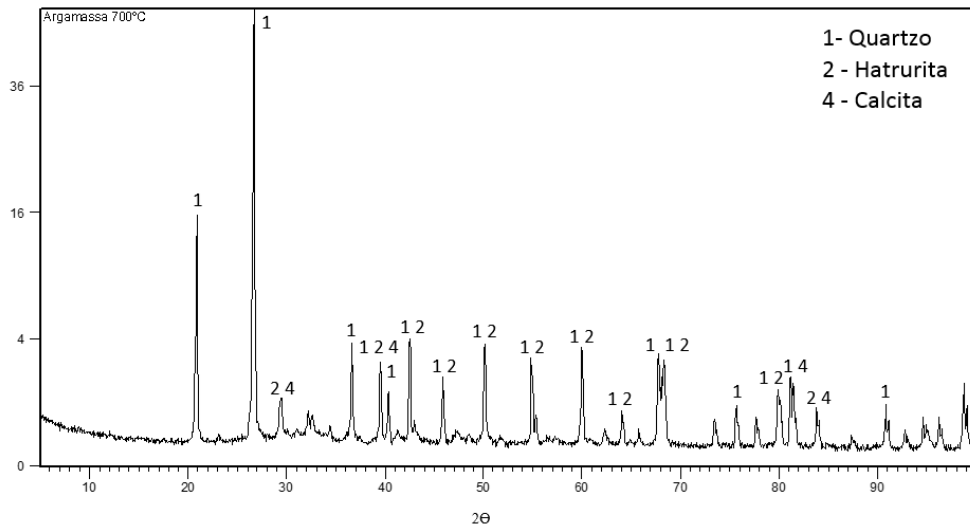


Figura 27 – Difração de raios X da argamassa elevada a 700°C

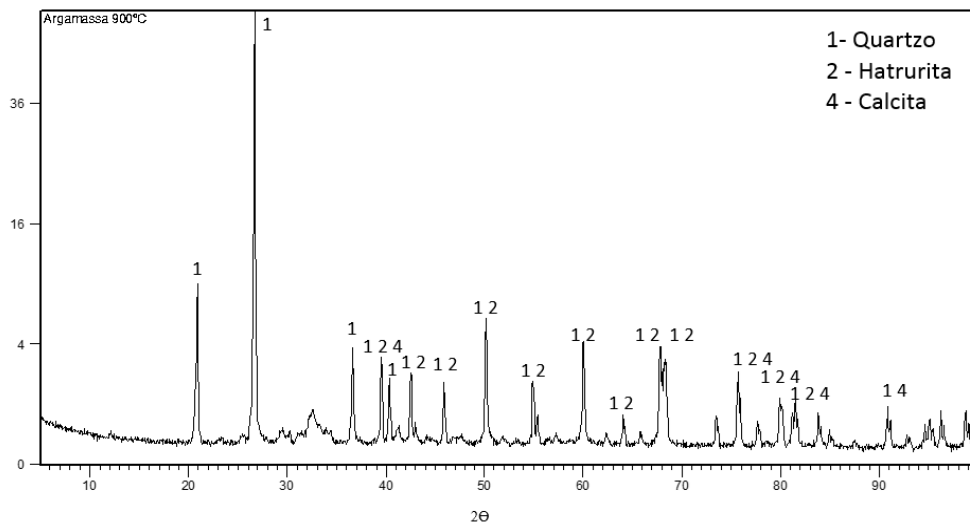


Figura 28 – Difração de raios X da argamassa elevada a 900°C

De uma forma geral a composição mineralógica das amostras não sofreram transformações significativas. Observa-se que o mineral quartzo manteve-se presente em todas as amostras com a mesma porcentagem de ocorrência, assim como o mineral hatrurite (alita). Para as temperaturas de 300 e 500°C, é identificada a presença de portlandita. Por outro lado, as amostras submetidas às temperaturas de 700 e 900 °C, o mineral calcita (que predomina o carbonato de cálcio) foi encontrado. Neste caso, a portlandita não foi identificada.

O quartzo (SiO_2) é o mineral encontrado em todas as amostras, com picos de cristalinidade bem definidos. Outro mineral que é presente em todas as amostras é a hatrurita que é um mineral, cuja fórmula química consiste em Ca_3SiO_5 , classificada como silicato tricálcico (Alita).

A Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é um mineral que predomina o hidróxido de cálcio, encontrado nas amostras de 300 e 500°C. Embora não tenha sido observada a presença da Portlandita, para a argamassa de referência e para a argamassa elevada a 100°C, nessas condições este mineral também se faz presente. Nas pesquisas de, Alarcon-Ruiz *et al.* (2005), Kim, Yun e Park (2013) e Mehta e Monteiro (2014) os autores afirmam que até a temperatura de 500°C o hidróxido de cálcio se mantém constante, e após essa temperatura há uma redução gradativa até sua decomposição.

De acordo com Perim (2013) a calcita $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ presente na amostra pode se dar através da presença de material carbonático (encontrado em pó calcário ou em resíduo da britagem de rochas calcárias) e utilizado como elemento de adição ao cimento, no caso o CP II F, cimento similar ao utilizado na pesquisa. Já Alarcon-Ruiz *et al.* (2005), afirmam que em pastas de cimento até a temperatura de 750°C, há presença de carbonato de cálcio e após isso ocorre uma descarbonatação transformando o carbonato de cálcio em óxido de cálcio. Para esta pesquisa o carbonato de cálcio foi identificado até a temperatura de 900°C.

4.1.8 Análise conjunta dos resultados

Com o objetivo de identificar se há uma relação entre alguns dos resultados apresentados, faz-se necessário estabelecer relações de tendência linear para compreender as tendências do comportamento frente aos dados obtidos.

A Figura 29 apresenta a relação de tendência linear do comportamento das resistências de compressão das argamassas frente a outras propriedades.

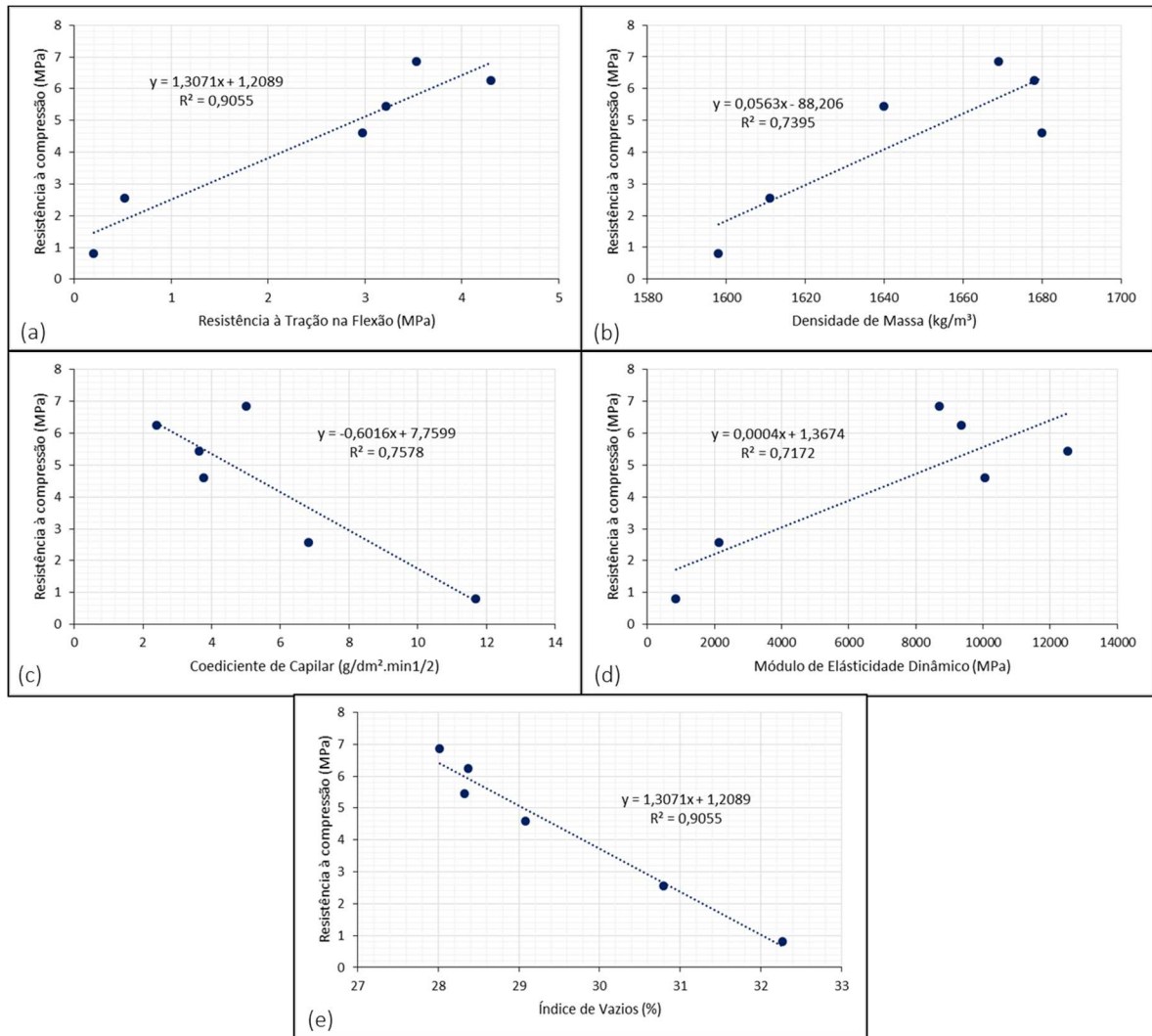


Figura 29 – Relação linear: (a) resistência à compressão e resistência à tração na flexão; (b) resistência à compressão e densidade de massa; (c) resistência à compressão e coeficiente capilar; (d) resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico; (e) resistência à compressão e índice de vazios.

Observa-se que a relação da resistência à compressão e a resistência à tração na flexão apresentou uma tendência de comportamento linear com coeficiente de determinação de 91%, semelhante à tendência obtida em relação à resistência à compressão e o índice de vazios. Neste caso pode-se afirmar que 91% dos resultados da resistência à compressão se justificam pela resistência à tração na flexão e pelo índice de vazios. Já para as resistências à compressão das argamassas relacionadas com densidade de massa, coeficiente capilar e módulo de elasticidade dinâmico esse coeficiente de determinação fica em torno de 73%, mostrando que há uma relação entre as propriedades citadas.

Outra observação pertinente é que ao comparar a resistência à compressão com a resistência à tração na flexão, a densidade de massa e o módulo de elasticidade dinâmico obtêm-se uma correlação linear positiva, ou seja, quando uma variável aumenta a outra

apresenta o mesmo comportamento. Para a relação da resistência à compressão com o coeficiente capilar e com o índice de vazios, a correlação é negativa, pois uma variável aumenta e a outra diminui.

As relações de tendência linear do comportamento das resistências à tração na flexão entre outras propriedades estão apresentadas na Figura 30.

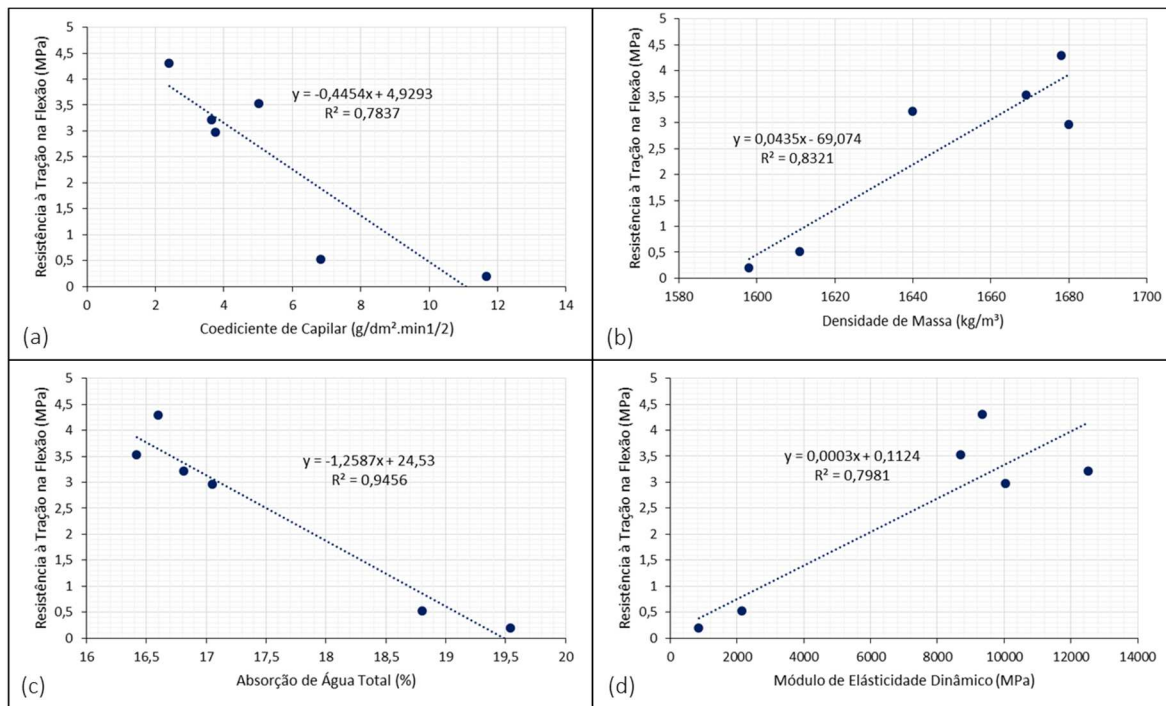


Figura 30 – Relação linear onde: (a) resistência à tração e coeficiente capilar; (b) resistência à tração e densidade de massa; (c) resistência à tração e absorção de água; (d) resistência à tração e módulo de elasticidade dinâmico.

Pode-se observar que a relação da resistência à tração na flexão e a absorção de água total apresentou uma tendência de comportamento linear com coeficiente de determinação de 95%, mostrando que os resultados da resistência à tração na flexão se justificam em 95% pela absorção de água total. Já para as demais relações o comportamento linear superou um coeficiente de 78%. Cabe salientar que na relação entre resistência à tração na flexão entre coeficiente capilar e absorção de água total, a correlação linear é negativa, e para as outras determinações a correlação linear é positiva.

4.2 ENSAIOS EM REVESTIMENTOS SUBMETIDOS A AQUECIMENTO EM MUFLA

O comportamento geral dos revestimentos submetidos ao aquecimento em mufla é apresentado na Tabela 41 através de um resumo dos resultados obtidos. Cabe salientar que

alguns ensaios nas temperaturas de 700 e 900°C não foram possíveis realizar, pois o revestimento deslocou.

Tabela 41 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Sistema de revestimento (substrato + argamassa)				Revestimento			
	Resistência de aderência à tração		Velocidade de propagação da onda		Absorção capilar pelo método da Rilem		Índice de Vazios	
	(MPa)	Coefficiente de variação (%)	(m/s)	Coefficiente de variação (%)	Taxa de Absorção (g/cm ² .h ^{1/2})	Coefficiente de variação (%)	(%)	Coefficiente de variação (%)
Referência	0,22	47,75	2699	2,19	0,595	20,03	26,30	0,62
100°C	0,25	44,48	2636	3,57	0,594	2,74	25,41	0,15
300°C	0,15	46,21	2569	2,03	0,680	10,82	25,61	0,68
500°C	0,08	107,07	2323	4,19	0,706	13,44	26,02	0,98
700°C	-*	-*	-*	-*	1,463**	7,47**	29,07	1,78
900°C	-*	-*	-*	-*	1,413**	3,05**	29,27	1,22

* Não foi possível realizar a determinação, pois o revestimento deslocou-se durante a elevação da temperatura;

** As absorções capilares nessas duas temperaturas foram realizadas apenas no revestimento.

Nos próximos itens encontra-se uma análise individual de cada ensaio efetuado e suas interações. Também são discutidos os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e microscopia eletrônica de varredura.

4.2.1 Avaliação da Resistência de aderência à tração

Através de uma análise visual da forma de ruptura (Figura 31) do ensaio de resistência de aderência à tração, as amostras apresentaram um maior percentual de ruptura na argamassa para todos os casos.

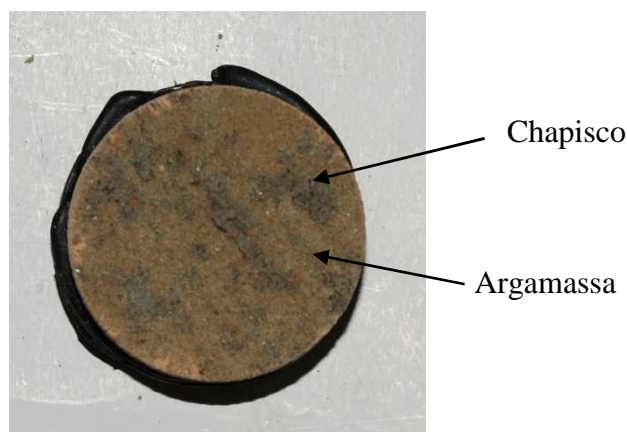


Figura 31 – Amostra subtraída da placa.

Na Figura 32 estão apresentados os valores médios dos resultados da resistência de aderência dos revestimentos submetidos ao aquecimento em mufla, com seus valores máximos e mínimos através das barras de erros. Os valores de resistência de aderência à tração encontram-se no Apêndice A.

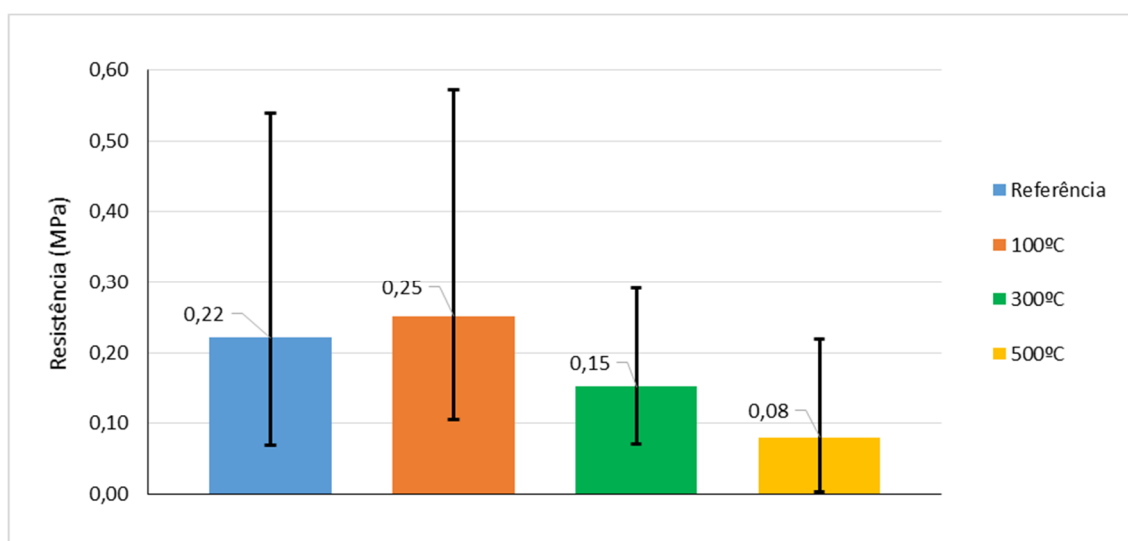


Figura 32 – Resistência de Aderência à Tração

De modo geral observa-se que o coeficiente de variação dos resultados é considerável. Ainda assim, é possível verificar que a resistência de aderência dos revestimentos apresentou um pequeno acréscimo para a temperatura de 100°C e a partir desta temperatura houve uma queda da resistência de aderência de até 64% em relação à referência.

Nas temperaturas de 300 e 500°C houve uma queda na resistência de aderência à tração em relação ao revestimento de referência de 32 e 64%, respectivamente. Essa queda de resistência de aderência foi maior conforme o aumento da temperatura, pois nos revestimentos

submetidos a 500°C foi verificada uma grande variação nos resultados e em alguns dos revestimentos não foi possível registrar a tensão de ruptura do revestimento no ensaio de aderência.

Nos revestimentos submetidos nas temperaturas de 700 e 900°C não foi possível realizar o ensaio, pois ocorreu um deslocamento dos revestimentos, ou seja, a argamassa de revestimento se separou do substrato durante o processo de elevação da temperatura, esse fenômeno pode ser visto na Figura 33.

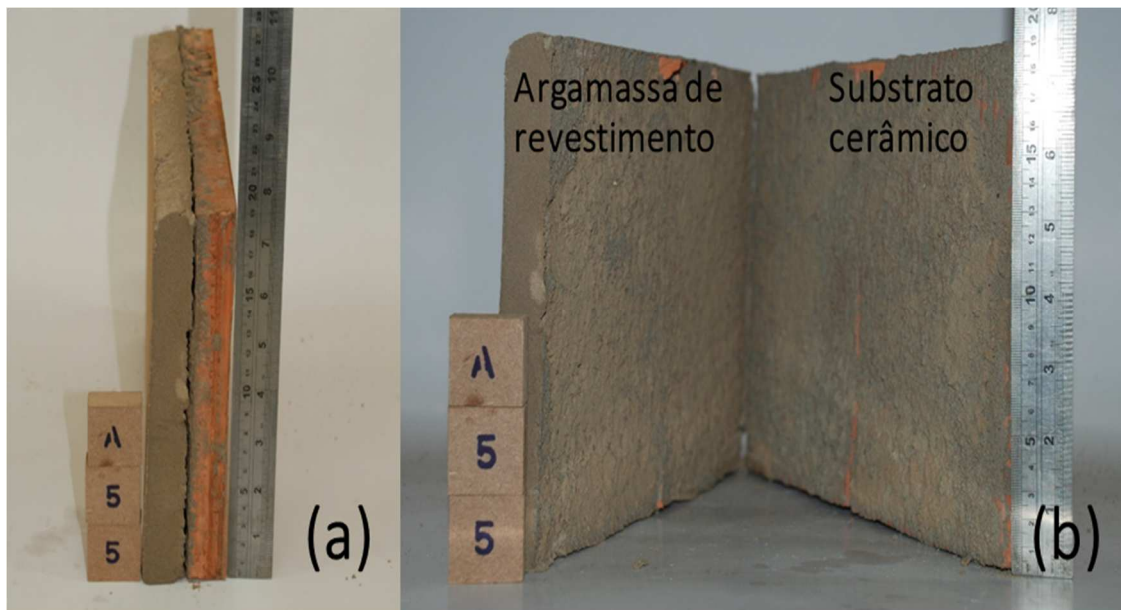


Figura 33 – Falta de aderência do revestimento em temperatura de 700°C; (a) vista de perfil; (b) vista das superfícies internas na região fraturada.

Considerando a grande dispersão dos resultados através do coeficiente de variação obtido nos ensaios de resistência de aderência e também da diferença nas quantidades de dados para cada temperatura, foi realizada uma regressão linear múltipla através do modelo binário apresentado na Tabela 42.

Tabela 42 – Modelo binário entre as variáveis dependentes e independentes.

Variáveis independentes	Variáveis dependentes			
	T0	T100	T300	T500
Referência	1	0	0	0
100°C	0	1	0	0
300°C	0	0	1	0
500°C	0	0	0	1

Fonte: elaborada pelo autor

A Tabela 43 apresenta a análise de regressão para um nível de confiança de 95%.

Tabela 43 – Análise de regressão da resistência de aderência.

Fonte	Coefficiente (β)	Erro Padrão	Valor de P	Efeito significativo
Referência	0,13208122	0,031816523	7,75E-05	S
100°C	0,15621056	0,034013294	1,49E-05	S
300°C	0,07130797	0,033369451	0,035444	S
Constante	0,08045312	0,028457563	0,005841	S

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que na verificação das variáveis independentes na análise de regressão, todas as variáveis se mostraram significativas, ou seja, a variável dependente que é a resistência de aderência apresenta uma mudança na medida em que se altera a temperatura. Através dos dados obtém-se a Equação 3.

$$Ra = 0,080453 + 0,132081.T0 + 0,1562106.T100 + 0,071308.T300 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Ra = resistência de aderência à tração em MPa;

T = variável dependente em °C.

Usando esta relação, os efeitos das temperaturas, podem ser identificados através da Equação 4, por exemplo, para a situação de 500°C resulta na seguinte Equação 4.

$$Ra = 0,080453 + 0,132081.0 + 0,1562106.0 + 0,071308.0 \quad \text{Equação 4}$$

$$Ra = 0,080453$$

4.2.2 Análise da velocidade da propagação da onda

Na Figura 34 estão apresentados os resultados de velocidade de propagação da onda por meio do ultrassom, nos revestimentos submetidos ao aquecimento em mufla.

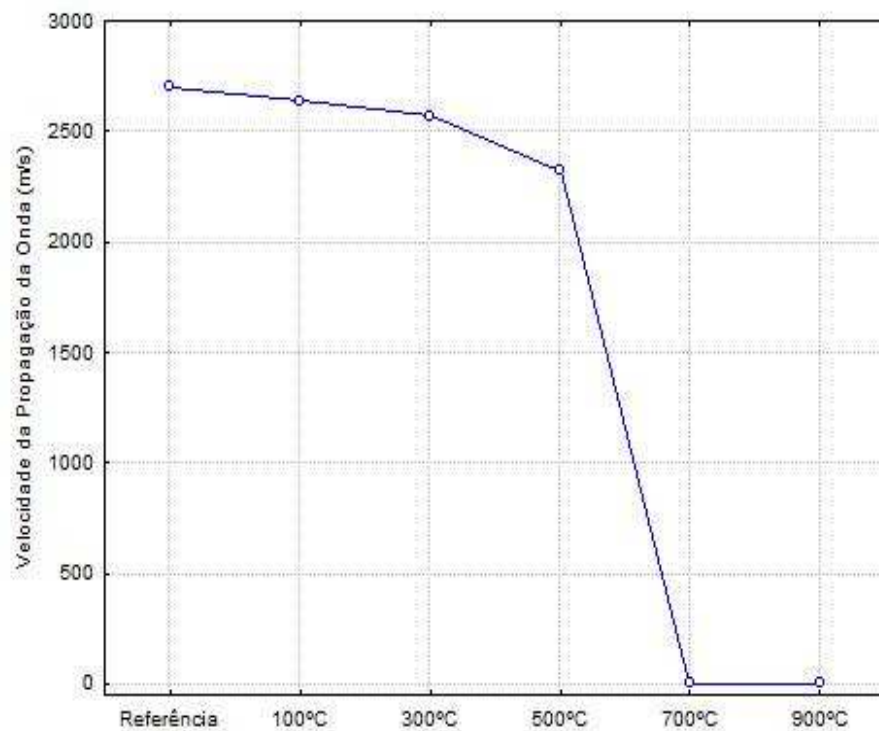


Figura 34 – Velocidade de propagação da onda ultrassônica

Conforme os resultados apresentados é possível identificar que, com o aumento da temperatura, os revestimentos apresentaram uma diminuição na velocidade de propagação da onda ultrassônica, podendo identificar que há um acréscimo da porosidade, pois quanto mais lenta a onda maior o número de poros existente na amostra.

O revestimento submetido a uma temperatura de 100°C apresentou uma queda de 2% da sua velocidade de propagação da onda, seguida por uma queda de 5% do revestimento submetido a 300°C, em relação ao revestimento referência. Já o revestimento em que a temperatura foi até 500°C apresentou uma diferença de 14% quando comparado ao revestimento de referência. A velocidade da onda ultrassônica dos revestimentos de 700 e 900°C não foram mensuradas, pois houve um deslocamento do sobre o substrato.

A Tabela 44 apresenta a análise de regressão linear (através de uma análise binária conforme apresentado na Tabela 42), realizada devido ao número de dados distintos entre as variáveis independentes dos valores de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas nos revestimentos submetidos às diferentes temperaturas.

Tabela 44 – Análise de regressão da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

Fonte	Coefficiente (β)	Erro Padrão	Valor de P	Efeito significativo
Referência	375,77	34,9370261	1,75E-12	S
100°C	313,29	39,4142811	2,93E-09	S
300°C	245,60	39,4142811	4,32E-07	S
Constante	2323,08	29,7943959	6,35E-40	S

Fonte: elaborada pelo autor

De acordo com a verificação das variáveis independentes na análise de regressão, todas as variáveis se apresentaram um efeito significativo para um nível de confiança de 95%, ou seja, a temperatura influencia na velocidade de propagação da onda. A Equação 5 apresenta a equação dos dados.

$$V_{pou} = 2323,08 + 375,77.T0 + 313,29.T100 + 245,60.T300$$

Equação 5

Onde:

V_{pou} = velocidade de propagação da onda ultrassônica em (m/s);

T = variável dependente em °C.

4.2.3 Índice de vazios

Os índices de vazios dos revestimentos submetidos ao aquecimento em mufla estão apresentados na Figura 35.

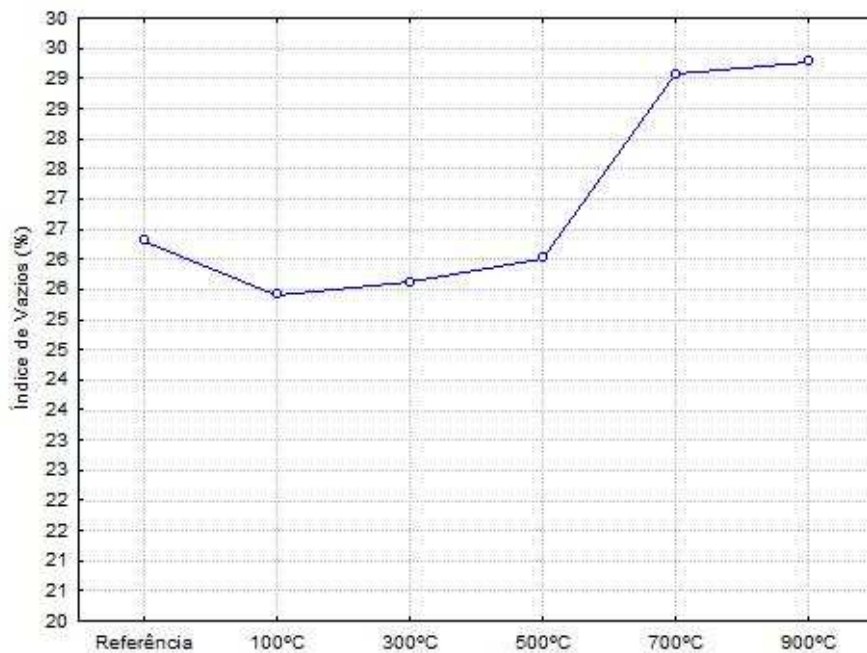


Figura 35 – Índice de vazios

De acordo com os resultados apresentados é possível identificar um comportamento similar entre aos índices de vazios até a temperatura de 500°C. Após essa temperatura houve um acréscimo desta propriedade nas temperaturas de 700 e 900°C.

A análise de variância para os resultados de índice de vazios em função da temperatura apresentada na Tabela 45, obteve um efeito significativo.

Tabela 45 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	5	45,98284	9,196568	106,618	3,105875	1,62E-09	S
Erro	12	47,01798					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

Ao realizar uma comparação múltipla, através de uma análise de variância, o efeito da temperatura não foi significativo apenas ao relacionar o revestimento de 100°C com o de 300°C, o revestimento elevado até a temperatura de 500°C com os revestimentos de referência e o de 300°C e entre os revestimentos das temperaturas de 700 e 900°C, para os demais revestimentos a temperatura apresentou um efeito significativo apesar dos valores serem próximos, como pode ser visto na Tabela 46.

Tabela 46 – Análise de variância (ANOVA) valor - P.

Identificação	100°C	300°C	500°C	700°C	900°C
Referência	0,00075	0,007304	0,176488	0,000901	0,000195
100°C		0,122378	0,015275	0,000257	4,89E-05
300°C			0,085676	0,000391	9,00E-05
500°C				0,000785	0,000212
700°C					0,60602

Fonte: elaborada pelo autor

4.2.4 Absorção capilar pelo método da Rilem TC 116 PCD (1999)

As curvas da absorção capilar média nos primeiros minutos estão apresentadas na Figura 36 e seus valores estão apresentados na Tabela 47. Estes dados apresentados são referentes ao tempo de 3,5 minutos. Os perfis de absorção capilar até 120 horas encontram-se no Apêndice B.

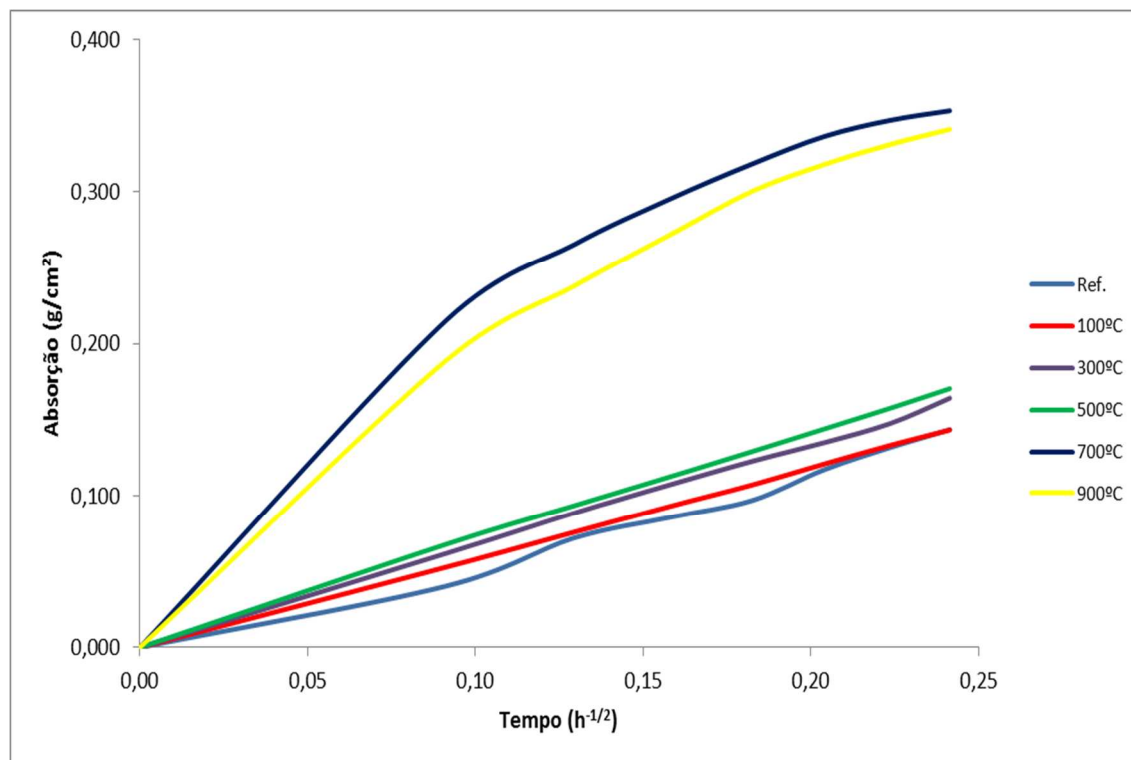


Figura 36 – Absorção Capilar pela Rilem

Tabela 47 – Resultados do ensaio da Rilem aos 3,5 minutos.

Identificação	Absorção (g/cm ²)	Taxa de Absorção (g/cm ² .h ^{1/2})
Referência	0,144	0,595
100°C	0,143	0,594
300°C	0,164	0,680
500°C	0,171	0,706
700°C	0,353	1,463
900°C	0,341	1,413

Fonte: elaborada pelo autor

Percebe-se que a absorção dos revestimentos de argamassa é representada por três perfis de absorção capilar. O revestimento elevado à temperatura de 100°C possui um comportamento similar ao de referência, diferente dos revestimentos de 300 e 500°C que demonstraram uma absorção superior quando comparadas ao de referência, evidenciando outro grupo de absorção. Já os revestimentos elevados a 700 e 900°C obtiveram uma absorção superior aos demais, destacando assim um terceiro perfil. A inclinação da reta está relacionada à velocidade em que ocorre a entrada de água nos exemplares (pelo efeito da capilaridade), uma vez que, quanto mais inclinada a reta, maior a massa de água absorvida em menor tempo.

4.2.5 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Na Tabela 48 estão apresentados os volumes totais de poros medidos pela porosimetria de intrusão de mercúrio, seus diâmetros médios e críticos nos revestimentos submetidos às diferentes temperaturas.

Tabela 48 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Volume total de mercúrio intrudido (cm ³ /g)	Diâmetro médio (µm)	Diâmetro crítico (µm)
Referência	0,1430	0,07349	0,00653
100°C	0,1508	0,06193	0,00662
300°C	0,1452	0,06111	0,00654
500°C	0,1542	0,05821	0,00667
700°C	0,1717	0,05319	0,00658
900°C	0,1902	0,05510	0,00675

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que o volume total de poros dos revestimentos aumenta na medida em que há um aumento da temperatura, ou seja, os revestimentos possuem maior porosidade de acordo com o acréscimo da temperatura. O revestimento submetido à temperatura de 100°C apresentou um comportamento distinto, pois sua porosidade total em relação ao revestimento de referência e ao revestimento submetido a 300°C foi superior.

A partir de uma análise conjunta entre o volume total de mercúrio intrudido e o diâmetro médio do poro, observa-se que apesar do aumento do volume dos poros, há uma diminuição do diâmetro médio em função do acréscimo da temperatura, o que indica que o dano ocorre prioritariamente nos menores poros.

4.2.6 Análise conjunta dos resultados

Com o intuito de identificar se há uma relação entre alguns dos resultados apresentados, faz-se necessário estabelecer relações de tendência linear para compreender as tendências do comportamento frente aos dados obtidos.

Na Figura 37 podemos observar que ao relacionar a resistência de aderência com a velocidade de propagação da onda e com a taxa de absorção, obtêm-se praticamente um coeficiente de determinação de aproximadamente 83 e 93% respectivamente, que indica que a resistência de aderência possui uma maior relação com a taxa de absorção do que com a velocidade de propagação da onda. Cabe salientar que a relação entre a resistência de

aderência para a velocidade de propagação da onda é negativa ao contrário da relação realizada com a taxa de absorção.

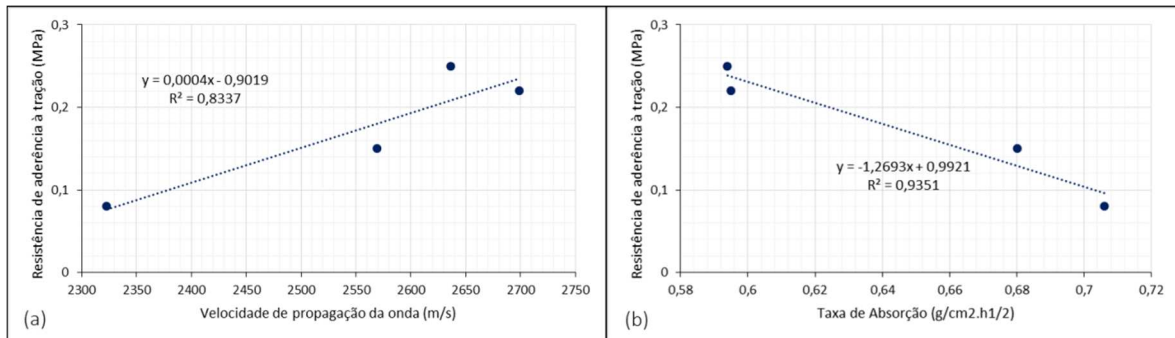


Figura 37 – Relação linear onde: (a) resistência de aderência à tração e velocidade de propagação da onda; (b) resistência de aderência à tração e taxa de absorção.

As relações de tendência linear do comportamento do volume acumulado de mercúrio entre a taxa de absorção e o índice de vazios estão apresentadas na Figura 38.

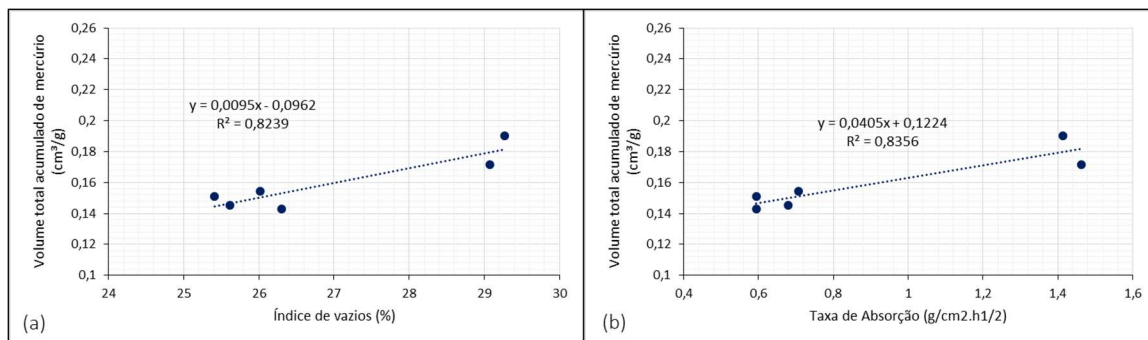


Figura 38 – Relação linear onde: (a) volume total acumulado de mercúrio e índice de vazios; (b) volume total acumulado de mercúrio e taxa de absorção.

Pode-se observar que ambas as relações são semelhantes, onde possuem uma correlação linear positiva, ou seja, quando uma variável aumenta a outra também possui, e também apresentam um coeficiente de determinação em torno de 83%.

Ao relacionar a velocidade de propagação da onda com a taxa de absorção, os dados apresentam um coeficiente de determinação de 76%, mostrando que é possível justificar uma propriedade com a outra, considerando que com o aumento da velocidade de propagação da onda há uma queda na taxa de absorção de água, como pode ser visto na Figura 39.

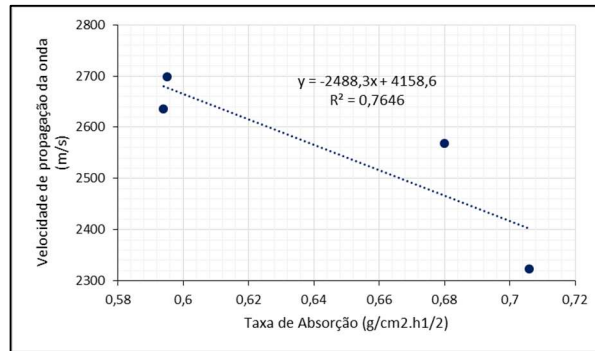


Figura 39 – Relação linear entre a velocidade de propagação da onda e a taxa de absorção de água.

4.3 ENSAIOS EM REVESTIMENTO DE PAREDE EM ESCALA REAL SUBMETIDO À AÇÃO DE FOGO

Na Tabela 49 estão apresentados alguns dos resultados obtidos dos revestimentos submetidos à ação do fogo em escala real.

Tabela 49 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Sistema de revestimento		Revestimento			
	Resistência de aderência à tração		Índice de vazios		Absorção capilar pelo método da Rilem	
	(MPa)	Coefficiente de variação (%)	(%)	Coefficiente de variação (%)	Taxa de Absorção (g/cm².h¹/²)	Coefficiente de variação (%)
Referência	0,64	31,68	24,93	2,07	0,515	16,15
100°C	0,76	23,04	25,10	1,86	0,481	18,18
300°C	0,31	51,06	25,13	1,41	0,631	7,71
500°C	0,14	67,88	25,22	2,33	0,673	34,35
700°C	-*	-*	25,94	4,16	1,231	5,70

* Não foi possível realizar a determinação, pois o revestimento deslocou-se durante a elevação da temperatura.

Nos itens seguintes será realizada a análise individual de cada ensaio efetuado e suas interações. Também serão discutidos os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio e de microscopia eletrônica de varredura.

4.3.1 Avaliação da Resistência de aderência à tração

A análise visual da forma de ruptura (Figura 40) do ensaio de resistência de aderência à tração apresentou um maior percentual de ruptura na argamassa em todos os casos.

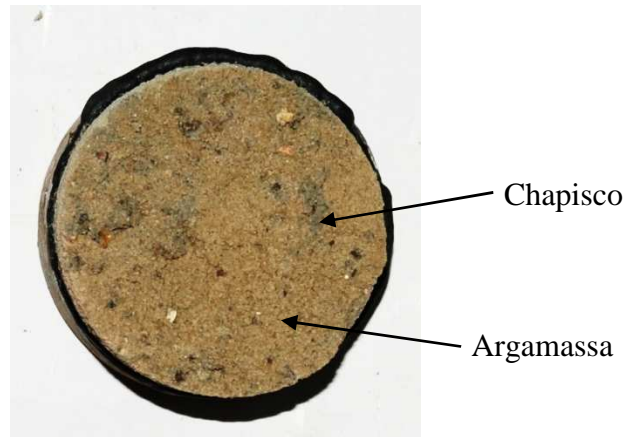


Figura 40 – Amostra subtraída da parede.

Os resultados da resistência de aderência à tração média dos revestimentos submetidos à ação do fogo estão apresentados na Figura 41, com seus valores máximos e mínimos através das barras de erros. Os valores de resistência de aderência à tração encontram-se no Apêndice C.

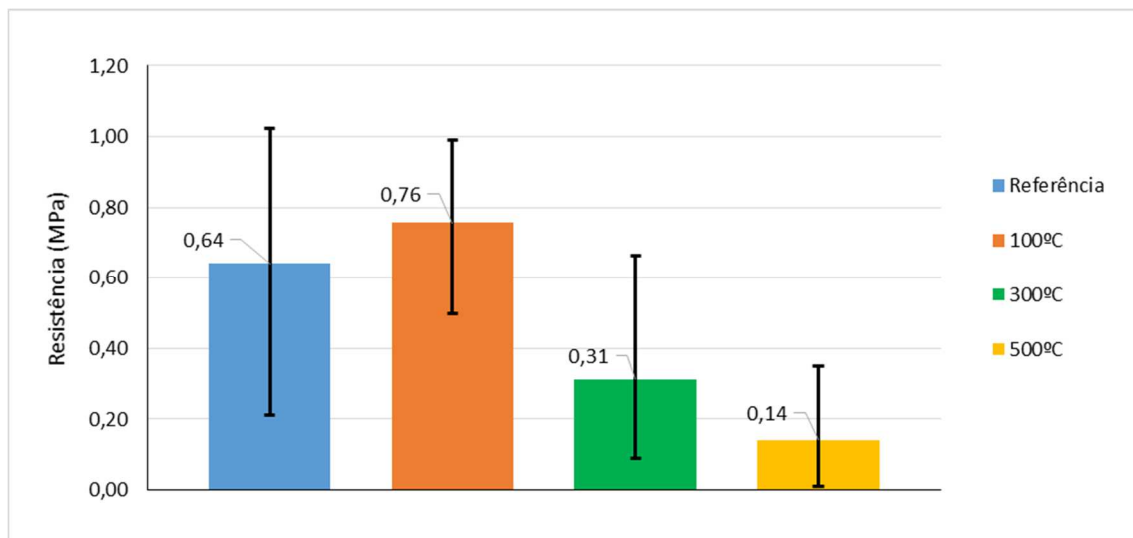


Figura 41 – Resistência de Aderência à Tração

Os resultados de resistência de aderência à tração apresentam uma dispersão considerável nos resultados. Através dos valores médios obtidos observa-se uma tendência de acréscimo da resistência de aderência para a temperatura de 100°C, ao contrário do que ocorre com as demais temperaturas, onde a 500°C há uma queda nesta propriedade pode chegar até 78% quando comparada ao revestimento de referência.

Conforme os resultados apresentados pode-se identificar que há um aumento da resistência de aderência à tração de aproximadamente 19% do revestimento submetido a uma temperatura de 100°C em relação ao revestimento de referência. Diferente da resistência de aderência à tração nos revestimentos submetidos nas temperaturas de 300 e 500°C, onde

apresentaram uma queda em relação ao revestimento de referência na ordem de 52 e 78% respectivamente.

No revestimento submetido a uma temperatura de 700°C não foi possível realizar a determinação, pois a argamassa de revestimento perdeu sua aderência para com a base durante o ensaio como pode ser visto na Figura 42. Pode-se dizer que de acordo com o aumento da temperatura a resistência de aderência à tração dos revestimentos diminui.

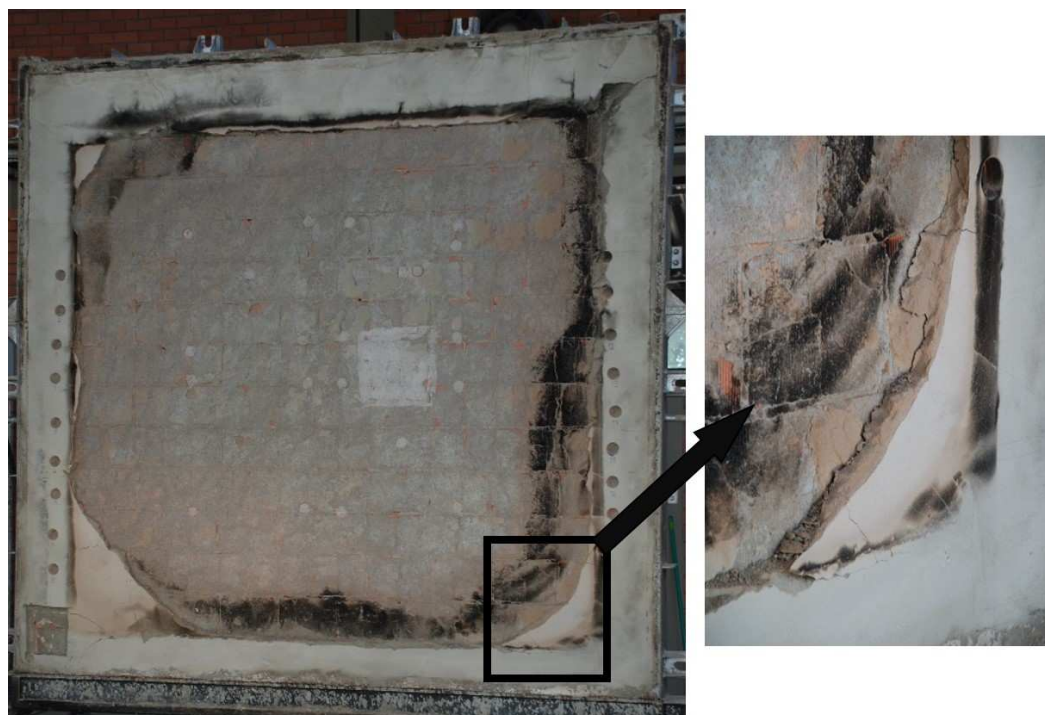


Figura 42 – Deslocamento do revestimento durante o ensaio da temperatura de 700°C

Por apresentar um alto coeficiente de variação dos resultados e números de dados coletados diferentes entre as temperaturas, a fim de verificar a significância da temperatura na resistência de aderência à tração foi realizada uma regressão linear múltipla apresentada na Tabela 50.

Tabela 50 – Análise de regressão da resistência de aderência.

Fonte	Coefficiente (β)	Erro Padrão	Valor de P	Efeito significativo
Referência	0,500352	0,051450	0,001851	S
100°C	0,615540	0,068815	1,47E-15	S
300°C	0,171573	0,058303	5,83E-14	S
Constante	0,141060	0,043923	0,004169	S

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que através da análise de regressão, todas as variáveis se mostraram significativas para um nível de confiança de 95%, ou seja, a variável dependente que é a resistência de aderência apresenta uma mudança na medida em que há uma alteração da temperatura. Através dos dados obtém-se a Equação 6.

$$Ra = 0,141060 + 0,500352.T0 + 0,615540.T100 + 0,171573.T300 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Ra = resistência de aderência à tração em MPa;

T = variável dependente em °C.

4.3.2 Índice de vazios

Os resultados dos índices de vazios dos revestimentos submetidos à ação do fogo estão apresentados na Figura 43.

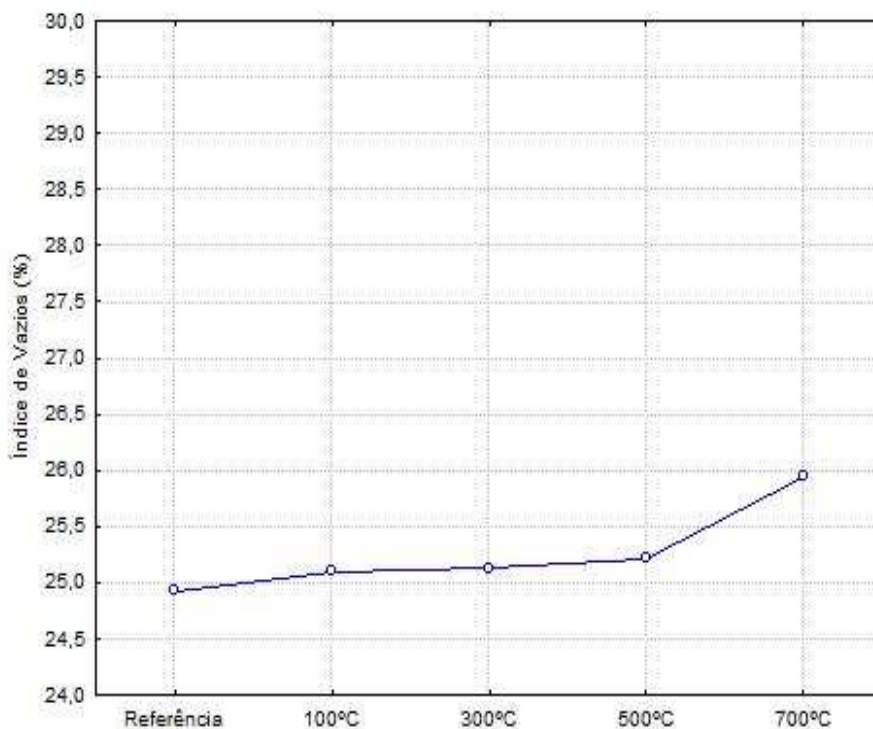


Figura 43 – Índice de vazios

Percebe-se que os índices de vazios até a temperatura de 500°C são similares apresentando um pequeno acréscimo na propriedade no revestimento submetido à temperatura de 700°C.

A Tabela 51 apresenta a análise de variância entre os valores de índice de vazios dos revestimentos de argamassas submetidos nas diferentes temperaturas.

Tabela 51 – Análise de variância (ANOVA) do índice de vazios.

Fonte	GDL	SQ	MQ	F	F crítico	Valor de P	Efeito significativo
Temperatura	4	1,843424	0,460856	1,088272	3,47805	0,413103	NS
Erro	14	6,078175					

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

O resultado de análise de variância apresentou, para um nível de confiança de 95%, efeito não significativo (valor de 'p' inferior a 0,05), ou seja, a temperatura não influenciou para esta propriedade.

4.3.3 Absorção capilar pelo método da Rilem TC 116 PCD (1999)

A absorção capilar foi realizada nos revestimentos sem a presença do substrato e as curvas da absorção capilar nos primeiros minutos estão apresentadas na Figura 44 e seus dados estão apresentados na Tabela 52. Os perfis de absorção capilar até 120 horas encontram-se no Apêndice D.

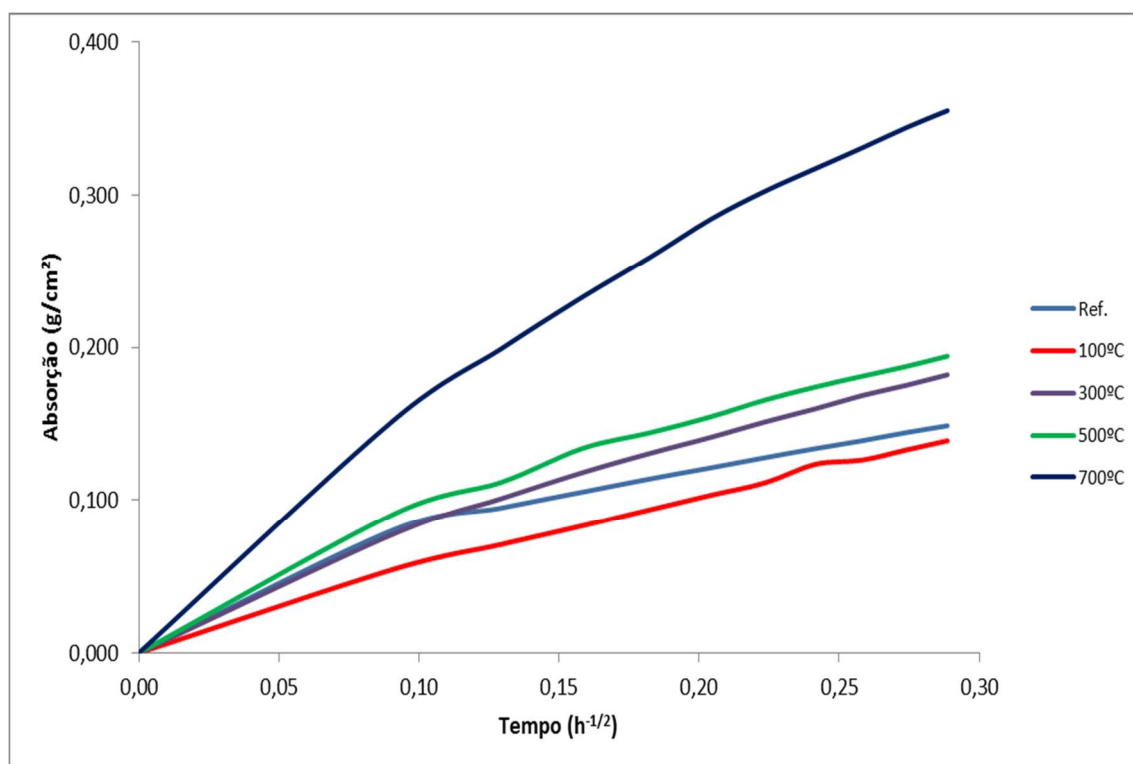


Figura 44 – Absorção Capilar

Tabela 52 – Resultados do ensaio da Rilem aos 5 minutos.

Identificação	Absorção (g/cm ²)	Taxa de Absorção (g/cm ² .h ^{1/2})
Referência	0,149	0,515
100°C	0,139	0,481
300°C	0,182	0,631
500°C	0,194	0,673
700°C	0,355	1,231

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que a absorção dos revestimentos de argamassa possui três grupos de absorção capilar. O primeiro grupo se dá através dos revestimentos de referência com o elevado à temperatura de 100°C, pois ambos apresentam um comportamento similar, o segundo grupo é composto pelos revestimentos de 300 e 500°C que demonstraram uma absorção superior ao revestimento de referência. Já o revestimento elevado à 700°C obteve uma absorção superior aos demais, destacando assim um terceiro perfil.

4.3.4 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Os resultados dos volumes totais de poros medidos pela porosimetria por intrusão de mercúrio dos revestimentos nas diferentes temperaturas submetidas, com seus diâmetros médios e críticos estão apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 – Resultados dos ensaios realizados.

Identificação	Volume total de mercúrio intrudido (cm ³ /g)	Diâmetro médio de poros (µm)	Diâmetro crítico (µm)
Referência	0,159	0,061020	0,006578
100°C	0,147	0,055990	0,006589
300°C	0,161	0,054080	0,006718
500°C	0,168	0,051940	0,006596
700°C	0,173	0,057160	0,006732

Fonte: elaborada pelo autor

Pode-se afirmar que a porosidade total sofre alterações devido às mudanças das temperaturas. Analisando o volume total de poros nos revestimentos submetidos às diferentes temperaturas, pode-se identificar que conforme aumenta à temperatura a quantidade de poros tende a ser maior. O revestimento de referência apresentou um comportamento diferenciado, pois apresentou uma porosidade total superior ao revestimento submetido à temperatura de 100°C.

Ainda pode-se verificar que o volume total de mercúrio intrudido e o diâmetro médio do poro, apresentam um comportamento contrário um do outro, pois com o aumento do volume dos poros, há uma diminuição do diâmetro médio em função do acréscimo da temperatura, isso indica que o dano ocorre principalmente nos menores poros.

4.3.5 Análise conjunta dos resultados

Para verificar se há uma relação entre alguns dos resultados apresentados, faz-se necessário estabelecer relações de tendência linear para compreender as tendências do comportamento frente aos dados obtidos.

A Figura 45 apresenta a relação de tendência linear do comportamento da resistência de aderência à tração com a taxa de absorção de água do revestimento.

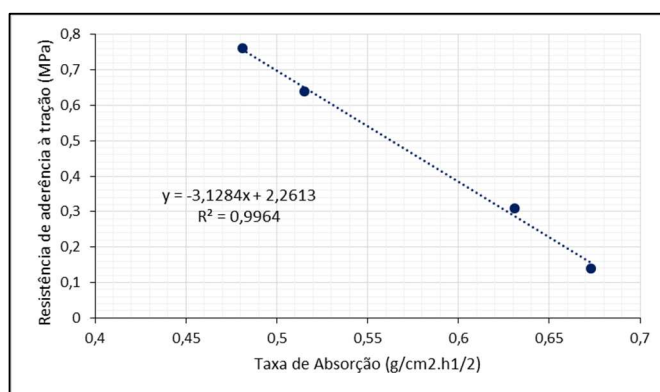


Figura 45 – Relação linear entre a resistência de aderência à tração e a taxa de absorção de água.

Observa-se que a relação da resistência de aderência à tração e a taxa de absorção de água apresentou uma tendência de comportamento linear com coeficiente de determinação de 99%. Através deste coeficiente, é possível estimar a resistência de aderência à tração pela taxa de absorção capilar. Essa correlação linear é negativa, ou seja, quando uma variável aumenta a outra diminui.

Na Figura 46 podemos observar que ao relacionar o volume total acumulado de mercúrio com a resistência de aderência à tração e a taxa de absorção de água total, obtêm-se coeficientes de determinação distintos. A relação volume total com a taxa de absorção apresentou um coeficiente de 63% (através de uma correlação linear negativa), sendo inferior ao da relação volume total com a resistência de aderência que resultou em 81% e uma correlação linear positiva.

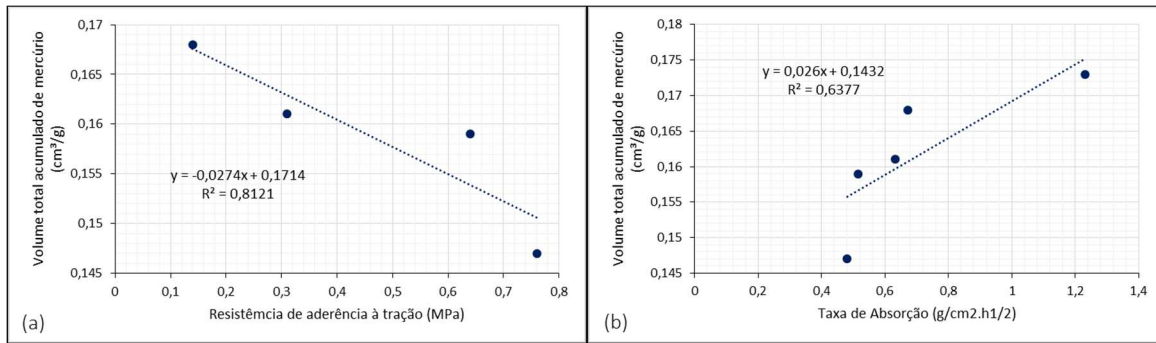


Figura 46 – Relação linear onde: (a) volume total acumulado de mercúrio e resistência de aderência à tração; (b) volume total acumulado de mercúrio e taxa de absorção de água.

5 CONCLUSÃO

No desenvolvimento deste trabalho pode-se chegar a algumas considerações sobre a metodologia aplicada e os resultados obtidos quanto à micro e macroestrutura, circunscritas às condições deste estudo:

A simulação de aquecimento foi realizada por meio de dois métodos de aquecimento, mufla e forno. Nos dois métodos, os resultados apresentaram a mesma tendência de comportamento. O emprego da microscopia eletrônica de varredura, como método qualitativo de análise da microestrutura, evidenciou a similaridade das porosidades e fraturas nas amostras submetidas tanto à mufla quanto ao fogo. Entretanto, a utilização do forno, de uma forma geral, apresentou resultados mais coerentes e satisfatórios, com coeficientes de variação menores e melhor simulação de condições reais, em função do uso de paredes em escala similar a real.

Dentre os métodos de análise utilizados, houve resultados distintos. Os que apresentaram um comportamento mais próximo da degradação ocorrida em função do acréscimo de temperatura foram os de absorção capilar e de porosidade por intrusão de mercúrio, que apresentaram uma forte relação entre seus resultados.

As avaliações de propriedades mecânicas foram, em uma primeira análise, divergentes. As resistências à compressão e à flexão aumentaram durante os primeiros dois patamares de aquecimento, e a partir de então caíram bruscamente. A resistência de aderência, entretanto, apresentou pequeno aumento de valor nos revestimentos submetidos à temperatura de 100°C e teve uma queda contínua a partir desta temperatura.

De modo mais detalhado, pode-se concluir que:

Com relação aos ensaios em corpos de prova de argamassa submetidos a aquecimento em mufla:

Nas argamassas elevadas até a temperatura de 100°C houve uma melhora nas propriedades da resistência à compressão e de tração na flexão, comportamento refletido também a 300°C quando comparado à argamassa de 100°C. A partir de 500°C há uma queda na resistência à tração na flexão, e a partir de 700°C o mesmo ocorre na resistência à compressão. As resistências mecânicas mais baixas foram verificadas nos corpos de prova submetidos à temperatura de 900°C, onde foi constatada uma perda de resistência na ordem de 82%.

O módulo de elasticidade dinâmico aumentou para o corpo de prova elevado a 100°C, e após apresentou uma crescente queda para as temperaturas de 300, 500, 700 e 900°C. O menor módulo de elasticidade dinâmico, encontrado na argamassa submetida à temperatura de 900°C, é cerca de 92% inferior ao da referência.

O coeficiente de capilaridade diminuiu até a temperatura de 300°C, e a partir de 500°C se iniciou um aumento significativo, até a temperatura de 900°C, que apresentou um aumento de cerca de 211% em relação à referência. A absorção de água total apresentou pequena elevação até a temperatura de 500°C, seguida por um aumento significativo até a temperatura de 700°C. Após esta temperatura, ocorre um pequeno aumento na absorção até a temperatura de 900°C.

As variações e as pequenas diferenças entre os resultados do índice de vazios nas diferentes temperaturas em que os corpos de prova foram submetidos demonstram que o ensaio possui pouca eficiência para identificar a diferença causada pelas diferentes temperaturas, apesar de haver um acréscimo de 11% nos exemplares submetidos à temperatura de 900°C.

O aquecimento até a temperatura de 300°C não gerou degradação em nenhum exemplar, se considerarmos o conjunto de propriedades medidas nos exemplares ensaiados. O coeficiente de capilaridade e a resistência à tração na flexão são as propriedades em que primeiro se pode observar os efeitos da elevação de temperatura, sendo que nestas a deterioração já pode ser observada nos exemplares submetidos à temperatura de 500°C. A absorção total e a resistência à compressão só foram afetadas pela elevação de temperatura a partir de 700°C.

Com relação aos ensaios em revestimentos submetidos a aquecimento em mufla:

O revestimento submetido a 100°C apresentou um pequeno aumento na resistência de aderência à tração. Após essa temperatura foi verificada uma queda contínua da aderência até 500°C, onde houve uma queda de 64% em relação à referência. Os revestimentos submetidos a 700 e 900°C apresentaram uma perda total de aderência do substrato.

A velocidade de propagação da onda ultrassônica do sistema composto pela argamassa aplicada sobre o substrato cerâmico apresenta uma pequena queda em função do aumento da temperatura no revestimento, sendo possível fazer a sua determinação até o

revestimento submetido a 500°C. A partir desta temperatura, houve queda do revestimento, e como o ensaio estava sendo realizado no sistema composto por argamassa+substrato não foi possível continuar a medição.

A taxa de absorção capilar não apresentou diferença significativa até o revestimento submetido a 100°C. Os revestimentos submetidos a 300 e 500°C tendem a um pequeno, mas crescente aumento desta taxa. Os exemplares submetidos a 700 e 900°C apresentaram um aumento expressivo da taxa de absorção, quando comparados aos demais revestimentos. Esse comportamento é coerente com o observado na resistência de aderência à tração e na velocidade de propagação da onda ultrassônica, que também apresentaram as maiores degradações nas temperaturas de 700 e 900°C.

Da mesma forma como observado nos corpos de prova de argamassa, o índice de vazios dos revestimentos apresentou resultados próximos até a temperatura de 500°C. Para os revestimentos submetidos a 700 e 900°C, houve um pequeno aumento deste índice.

Embora as observações através da microscopia eletrônica de varredura não tenham permitido identificar diferenças na porosidade entre as amostras de revestimentos nas diferentes temperaturas, por meio de porosimetria por intrusão de mercúrio foi possível se identificar um aumento crescente do volume total de poros, conforme há aumento da temperatura em que o revestimento é submetido. A porosimetria por intrusão de mercúrio pode ser relacionada com a taxa de absorção, pois o comportamento de ambas as características é similar, ou seja, para um aumento da temperatura do revestimento a porosimetria e a taxa de absorção apresentam um aumento, mas não de mesma ordem.

Com relação aos ensaios em revestimento de parede em escala real submetido à ação de fogo:

A resistência de aderência à tração pouco aumentou no revestimento submetido à temperatura 100°C, e a partir desta temperatura inverteu-se o comportamento, com perda da aderência e queda de revestimento a partir de 500°C. Há total falta de aderência à 700°C.

A taxa de absorção de água diminuiu até a temperatura do revestimento de 100°C, quando comparada ao revestimento de referência, e após, aumenta nos revestimentos submetidos a 300, 500 e 700°C, sendo que a 700°C apresenta uma taxa de absorção de aproximadamente 93% superior a do revestimento de referência.

A ruptura por perda de resistência de aderência ocorreu principalmente na argamassa de revestimento, o que demonstra que o principal dano devido ao aquecimento

ocorreu na própria argamassa, e não na interface com o substrato. Portanto, foi possível relacionar o aumento da taxa de absorção de água com a perda da resistência de aderência do revestimento. A maior taxa de absorção ocorreu para o revestimento submetido à temperatura de 700°C, que apresentou a menor resistência de aderência. O volume total de poros, identificado por porosimetria por intrusão de mercúrio, apresentou o mesmo comportamento da taxa de absorção de água. Entretanto, o índice de vazios dos prismas, dos revestimentos submetidos ao aquecimento em mufla, e as amostras extraídas da parede apresentaram resultados muito próximos, o que indica que este índice não é adequado para a avaliação do dano por elevadas temperaturas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho apresentaram-se outras possibilidades de pesquisas, que podem auxiliar no desenvolvimento de outras análises com propósitos semelhantes. Assim, constam para trabalhos futuros as seguintes sugestões:

- Emprego de outro tipo de substrato nos ensaios;
- Utilização de outras argamassas, variando aglomerantes e adições, assim como o traço;
- Uso de técnica de microtomografia para complemento de análise de porosidade dos materiais estudados;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M. T. P.; SILVA, A. P.; CORRÊA, E. C. S.; CETLIN, P. R. **Análise da capacidade de deformação do concreto: módulo de Young x módulo de deformação.** In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECIMAT, 2006, Foz do Iguaçu – Paraná. **Anais...**, 15 a 19 de novembro de 2006. p. 3672 – 3684.

ALARCON-RUIZ, L., PLATRET, G., MASSIEU, E., EHRLARCHER, A., The use of termal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement and Concrete Research.** 2005. v. 35, n 13, p. 609–613.

ANTUNES, G. R. (2010). **Estudo de manifestações patológicas em revestimentos de fachada em Brasília - Sistematização da incidência de casos.** 2010. 199 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

ARAÚJO, G.A.B.C. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades de argamassas com saibro da região de Maceió (AL) para revestimentos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

ARNOLD, D. C. M. (2011). **Análise da influencia da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** 2011. 185 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, RS.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5628: **Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índices de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10636: **Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582: **Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12826: **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: **Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13528: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13749: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14656: **Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-1: **Componentes cerâmicos - Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Terminologia e requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15270-3: **Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15839: **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 12: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 15: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 18: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 43: **Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45: **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 47: **Concreto: determinação do teor de ar em concretos frescos – Método pressiométrico.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 65: **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76: **Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA – ANICER. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>>. Acesso em: 24 set. 2015.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassas: características e peculiaridades.** SINDUSCON-DF, Brasília, 2005, 58 p.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, RS, 2012.

BEZERRA, A. C. S. (2012). **Concreto com fibras curtas de aço submetido à alta temperatura**. Tese de Doutorado, Universidade Federal De Minas Gerais, Minas Gerais, 153p.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 285p.

CÉLIO, M. **Tomografia computadorizada de raios-x como técnica de ensaios não destrutivos de materiais**. Dissertação de mestrado, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 85p.

CHEN, X. T., DAVY, C. A., SHAO, J. F., SKOCZYLAS, F. Experimental and micro-mechanical analysis of the mechanical and transport properties of mortar containing heat-induced micro-cracks. **Cement and Concrete Research**. 2010. v. 32, p. 678–685.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassa de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p. Boletim 68.

COLLATTO, D. (2008). **Utilização de resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes de indústria de papel como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha**. Porto Alegre, RS. Dissertação de Mestrado. UFGRS, 114 p.

CORREA, J. R., LIMA, J. S., BRITO, J. de. Post-fire mechanical performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. **Cement e Concrete Composites**. 2014. v. 53, n 10, p. 187–199.

COSTA, C.N., FIGUEIREDO, A.D.; SILVA, V.P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2002 – Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: NUTAU/FAU-USP, 2002. 15p.

CÜLFIK, M. S., ÖZTURAN, T. Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. **Cement and Concrete Research**. 2002. v. 32, p. 809–816.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., MACHADO, G., 2007. **Microscopia eletrônica de Varredura. Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS. 60 p.

DJAKNOUN, S.; OUEDRAOGO, E.; BENYAHIA, A.A.. Characterization of the behavior of high performance mortar subject to high temperature. **Construction and Building Materials**. 2012. v. 28, n. 1, p. 176–186.

ERHART, R.L. (2014). **Influência da porosidade e rugosidade de substrato cerâmico na aderência de revestimento argamassado com emprego de cinza de casca de arroz no**

chapisco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, São Leopoldo, RS, 175 p.

ESQUIVEL, J.T. (2009). **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Construção Civil), Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, 262p.

ELAQRA, H.; GODIN, N.; PEIX, G.; MILI, M. R.; FANTOZZI, G. Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: Effects of the sand/cement ratio. **Cement and Concrete Research**, Maio. 2007. v. 37, n. 5, p. 703–713.

GONÇALVES, S. R. C. (2004). **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso**. Dissertação de Mestrado, Publicação E. DM-004 A/04, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.

KIM, K.-H. *et al.* An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, 2003. v. 33, p. 363–371.

KIM, K. Y., YUN, T. S., PARK, K. P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. **Cement and Concrete Research**. 2013. v. 50, p. 34–40.

KIRCHHOF, L. D. (2010). **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, RS, 262p.

LEAL, F.E.C.B. (2003). **Estudo do desempenho do chapisco como procedimento de preparação de base em sistemas de revestimento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 257p.

MACIEL, E.F. (2015). **Avaliação da lixiviação de cromo em monólito de concreto por imersão e irrigação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 142p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORSY, M. S., AL-SALLOUM, Y.A., ABBAS, H., ALSAYED, S.H. Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**. 2012. v. 35, p. 900–905.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo, ed. Hemus, 2007.

PAES, I. N. L. (2004). **Avaliação do Transporte de Água em Revestimentos de Argamassa nos Momentos Iniciais Pós-Aplicação**. Tese de Doutorado, Publicação E.TD 008A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 242p.

PAES, I. L.; BAUER, E.; CARASEK, H. Influência da estrutura d poros de argamassas mistas e de blocos de concreto e cerâmico no desempenho de revestimentos. In: VI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS. **Anais...** Florianópolis, 2005, p. 466-476.

PEREIRA, C.H.A.F. (2007). **Contribuição ao Estudo da Fissuração, da Retração e do Mecanismo de Descolamento do Revestimento à Base de Argamassa**. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação: E.TD – 006 A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 195p.

PERIN, J. R. (2013). **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 216p.

PISSARRA, J. F. L. (2014). **Desenvolvimento e implementação numérica de um modelo de análise de risco de incêndio urbano – Mariee – edifícios comerciais, bibliotecas e salas de espetáculo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Construções. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 277p.

PRIMO, V., COELHO, A.L., RODRIGUES, J.P.C. **Análise estatística dos incêndios em edifícios no Porto, 1996 – 2006**. In: I Fórum Internacional de Gestão da Construção – GESCON, 2008, Porto – Portugal. **Anais...**, 11 a 12 de dezembro de 2008. p. 1 – 11.

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

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. RILEM TC 116 PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. **Materials and Structures**, 1999. v. 32, p. 174–179.

ROSA, M. **Análise do efeito do teor de microfinos nas propriedades de argamassas de revestimento com utilização de areia de britagem basáltica**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, RS, 2013.

RUSCHEL, F. (2011). **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso shopping total em Porto Alegre-RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, RS, 133p.

SENTENA, J.A.A. (2015). **Discussão sobre métodos acelerados para a avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassa submetidas a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com filler de concreto**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 144p.

SILVA, F. G. S. (2006). **Proposta de metodologias experimentais auxiliares à especificação e controle das propriedades físico-mecânicas dos revestimentos em argamassa**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 266p.

SOLTANI, F. **Caractérisation de la patê de ciment par des méthodes ultrasonores**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2010.

SOUZA, A. A. A. (2005). **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual De Campinas, Brasília, Campinas, 169p.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Gestão de Resíduos. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.

WENDT, S. C. (2006). **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, RS, 188p.

YAZICI, S., SEZER, G. I., SENGUL, H. The effect of high temperature on the compressive strength of mortars. **Construction and Building Materials**. 2012. v. 35, p. 97–100.

YÜZER, N., AKÖZ, F., ÖZTÜRK, L. D. Compressive strength-color change relation in mortars at high temperature. **Cement and Concrete Research**. 2004. v. 34, n 10, p. 1803–1807.

APÊNDICES

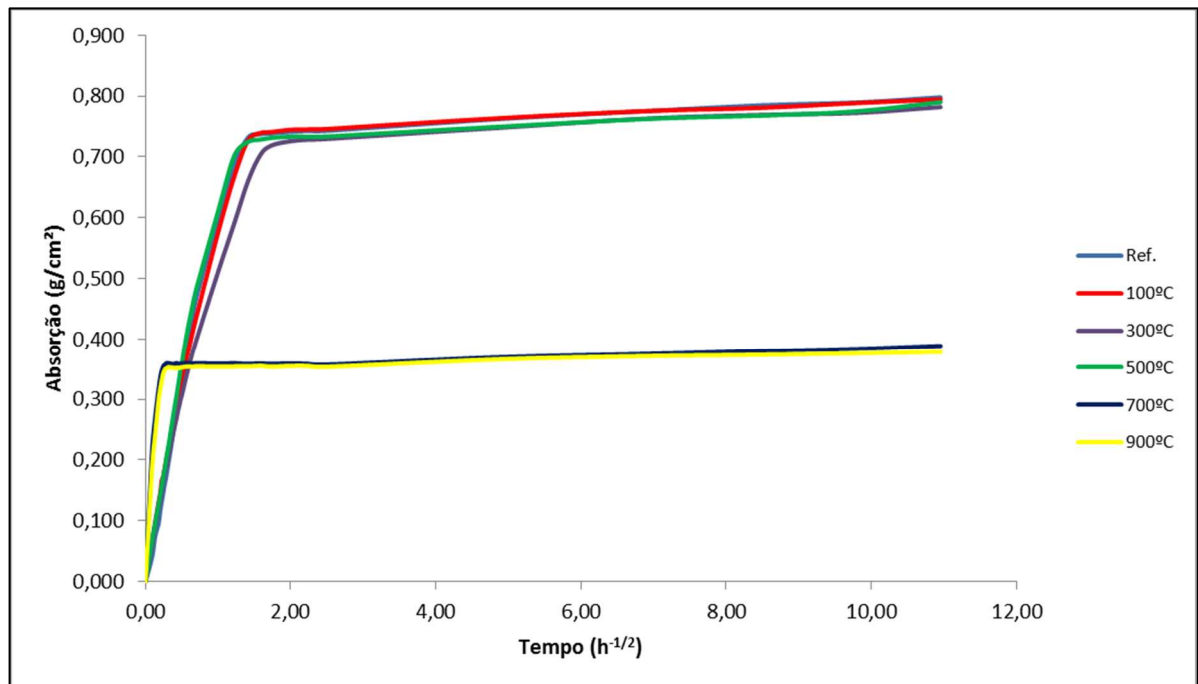
**APÊNDICE A - VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À
TRAÇÃO DOS REVESTIMENTOS SUBMETIDOS À MUFLA**

Ensaio nos conjuntos de referência							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
01-A	45,98	45,26	44,95	45,40	1619	286	0,18
01-B	46,04	46,33	45,97	46,11	1670	230	0,14
01-C	44,9	45,02	44,98	44,97	1588	300	0,19
01-D	46,26	46,38	46,28	46,31	1684	97	0,06
01-E	44,12	43,43	43,47	43,67	1498	161	0,11
01-F	45,32	45,67	45,4	45,46	1623	499	0,31
03-A	41,92	41,83	40,04	41,26	1337	353	0,26
03-B	45,21	44,92	45,16	45,10	1597	92	0,06
03-C	44,27	44,06	43,51	43,95	1517	180	0,12
03-D	44,9	45,02	45,27	45,06	1595	216	0,14
03-E	45,05	45	44,48	44,84	1579	232	0,15
03-F	44,64	43,99	44,9	44,51	1556	315	0,20
04-A	45,14	45,32	45,01	45,16	1602	109	0,07
04-B	44,28	44,29	44,23	44,27	1539	119	0,08
04-C	42,31	41,72	42,19	42,07	1390	106	0,08
04-D	44,7	45,02	44,87	44,86	1581	113	0,07
04-E	45,22	45,54	45,53	45,43	1621	145	0,09
04-F	44,26	44,46	44,92	44,55	1559	159	0,10
05-A	44,92	45,75	45,62	45,43	1621	350	0,22
05-B	45,08	45,35	45,11	45,18	1603	163	0,10
05-C	43,78	44,78	44,52	44,36	1546	294	0,19
05-D	43,47	44,57	47,6	45,21	1606	311	0,19
05-E	43,75	43,83	43,25	43,61	1494	405	0,27
05-F	44,92	44,6	43,8	44,44	1551	323	0,21
11-A	45,44	45,79	44,49	45,24	1607	137	0,09
11-B	46,97	46,91	46,12	46,67	1710	317	0,19
11-C	46,27	46,48	46,74	46,50	1698	91	0,05
11-D	46,15	46,58	46,2	46,31	1684	365	0,22
11-E	46,56	46,64	46,53	46,58	1704	129	0,08
11-F	45,86	46,16	45,92	45,98	1660	96	0,06
72-A	46,03	46,36	45,35	45,91	1656	510	0,31
72-B	45,7	45,47	45,87	45,68	1639	303	0,18
72-C	45,63	46,28	45,95	45,95	1659	422	0,25
72-D	45,31	46,05	45,49	45,62	1634	271	0,17

72-E	46,15	46,18	46,09	46,14	1672	362	0,22
72-F	46,43	46,25	46,49	46,39	1690	396	0,23
31-A	46,96	47,25	46,76	46,99	1734	745	0,43
31-B	46,9	47	46,96	46,95	1732	797	0,46
31-C	47,18	47,02	46,95	47,05	1739	447	0,26
31-D	46,53	46,59	46,7	46,61	1706	125	0,07
31-E	47,07	46,97	47,06	47,03	1737	604	0,35
31-F	46,81	46,84	46,62	46,76	1717	294	0,17
56-A	46,97	47	46,99	46,99	1734	935	0,54
56-B	46,83	46,2	46,76	46,60	1705	439	0,26
56-C	46,28	46,18	46,62	46,36	1688	195	0,12
56-D	46,96	46,81	47,02	46,93	1730	120	0,07
56-E	47,39	47,1	47,15	47,21	1751	518	0,30
56-F	47,23	47,1	47,05	47,13	1744	592	0,34
Ensaio nos conjuntos submetidos a 100°C							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
13-A	44,62	44,44	44,71	44,59	1562	119	0,08
13-D	46,23	46,2	46,45	46,29	1683	231	0,14
13-C	46,01	45,98	46,19	46,06	1666	300	0,18
13-B	45,95	46,07	46	46,01	1662	329	0,20
13-E	45,65	45,93	46,11	45,90	1654	126	0,08
13-F	46,29	46,21	46,46	46,32	1685	196	0,12
14-A	46,33	46,36	46,43	46,37	1689	855	0,51
14-B	45,41	45,47	45,55	45,48	1624	929	0,57
14-C	45,37	44,83	45,45	45,22	1606	334	0,21
14-D	46,41	46,42	46,43	46,42	1692	357	0,21
14-F	46,3	46,2	46,47	46,32	1685	395	0,23
14-E	46,47	46,13	45,55	46,05	1666	175	0,11
15-A	45,63	45,51	45,19	45,44	1622	367	0,23
15-B	45,49	45,47	45,54	45,50	1626	325	0,20
15-C	46,7	46,45	46,17	46,44	1694	567	0,33
15-D	44,81	45,35	45,31	45,16	1602	398	0,25
15-E	45,54	45,79	45,83	45,72	1642	376	0,23
15-F	45,91	45,94	45,65	45,83	1650	301	0,18
16-A	45,4	46,05	45,62	45,69	1640	450	0,27
16-B	46,26	46,24	46,4	46,30	1684	533	0,32
16-C	46,35	46,44	45,58	46,12	1671	546	0,33
16-D	46,34	46,17	46	46,17	1674	329	0,20
16-E	46,6	46,45	46,9	46,65	1709	513	0,30
16-F	45,6	45,97	45,85	45,81	1648	393	0,24

Ensaio nos conjuntos submetidos a 300°C							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
32-A	46,26	45,73	46,14	46,04	1665	275	0,17
32-B	45,11	44,18	44,47	44,59	1561	138	0,09
32-C	45,76	46,31	46,32	46,13	1671	305	0,18
32-D	45,78	45,52	46	45,77	1645	276	0,17
32-E	46,48	45,11	45,03	45,54	1629	157	0,10
32-F	45,71	46,74	46,63	46,36	1688	492	0,29
33-A	46,04	46,39	46,5	46,31	1684	140	0,08
33-B	46,56	46,4	46,15	46,37	1689	132	0,08
33-C	46,24	46,65	46,11	46,33	1686	351	0,21
33-D	46,31	46,25	46,27	46,28	1682	376	0,22
33-E	46,67	46,76	46,14	46,52	1700	120	0,07
33-F	46,21	46,3	46,42	46,31	1684	141	0,08
34-A	46,64	46,75	46,85	46,75	1716	421	0,25
34-B	46,61	46,7	46,98	46,76	1718	432	0,25
34-C	46,71	46,91	46,75	46,79	1719	461	0,27
34-D	46,41	46,43	45,72	46,19	1675	188	0,11
34-E	46,36	46,38	46,26	46,33	1686	388	0,23
34-F	46,46	46,52	45,86	46,28	1682	186	0,11
35-A	46,18	46,57	46,26	46,34	1686	168	0,10
35-B	46,43	46,21	46,54	46,39	1690	175	0,10
35-C	46,71	46,9	46,67	46,76	1717	280	0,16
35-D	43,95	46,43	45,76	45,38	1617	166	0,10
35-E	46,4	46,53	46,42	46,45	1695	243	0,14
35-F	46,08	46,04	46,61	46,24	1680	123	0,07
Ensaio nos conjuntos submetidos a 500°C							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
52-A	45,71	45,78	45,31	45,60	1633	348	0,21
52-B	45,96	45,33	45,76	45,68	1639	121	0,07
52-C	46,01	46,04	46,08	46,04	1665	365	0,22
52-E	45,78	46,03	45,68	45,83	1650	10	0,01
52-F	44,8	45,91	45,11	45,27	1610	41	0,03
53-C	45,71	45,6	45,76	45,69	1640	6	0,00
53-D	45,44	45,11	45,55	45,37	1616	197	0,12
54-B	45,31	45,56	45,24	45,37	1617	8	0,005
54-C	43,94	44,05	43,96	43,98	1519	85	0,06

APÊNDICE B - PERFIS DE ABSORÇÃO CAPILAR ATÉ 120 HORAS DOS REVESTIMENTOS SUBMETIDOS À MUFLA



**APÊNDICE C - VALORES DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À
TRAÇÃO DAS PAREDES SUBMETIDAS AO FOGO**

Ensaio na parede de referência							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
1	47,79	47,61	47,55	47,65	1783	777	0,44
2	47,49	47,46	47,68	47,54	1775	1167	0,66
3	47,45	47,29	47,51	47,42	1766	2126	1,20
4	47,47	47,34	47,56	47,46	1769	1101	0,62
5	47,09	47,37	47,4	47,29	1756	2127	1,21
6	47,62	47,47	47,54	47,54	1775	914	0,51
7	47,61	47,66	47,65	47,64	1783	375	0,21
8	47,63	47,74	47,72	47,70	1787	1829	1,02
9	47,82	47,74	47,66	47,74	1790	1262	0,71
10	47,65	47,65	47,43	47,58	1778	1157	0,65
11	47,69	47,7	47,69	47,69	1787	833	0,47
12	47,71	47,57	47,62	47,63	1782	761	0,43
13	47,43	47,65	47,62	47,57	1777	768	0,43
14	47,57	47,43	47,58	47,53	1774	1617	0,91
15	47,5	47,61	47,55	47,55	1776	776	0,44
16	47,85	47,77	47,68	47,77	1792	1047	0,58
17	47,71	47,66	47,71	47,69	1787	1612	0,90
18	47,81	47,63	47,71	47,72	1788	2343	1,31
19	47,52	47,42	47,56	47,50	1772	1836	1,04
20	47,51	47,46	47,62	47,53	1774	1382	0,78
21	47,37	47,29	47,6	47,42	1766	700	0,40
22	47,53	47,58	47,58	47,56	1777	657	0,37
23	47,6	47,37	47,59	47,52	1774	1631	0,92
24	47,46	47,52	47,55	47,51	1773	1283	0,72
25	47,36	47,29	47,47	47,37	1763	1360	0,77
26	47,32	47,55	47,25	47,37	1763	941	0,53
27	47,62	47,45	47,53	47,53	1775	2676	1,51
28	47,38	47,51	47,52	47,47	1770	890	0,50
29	47,53	47,52	47,65	47,57	1777	1300	0,73
30	47,34	47,47	47,64	47,48	1771	781	0,44
31	47,31	47,32	47,55	47,39	1764	1102	0,62
32	47,31	47,36	47,57	47,41	1766	1155	0,65
33	47,57	47,52	47,5	47,53	1774	1089	0,61
34	47,33	47,45	47,52	47,43	1767	1011	0,57
35	47,48	47,49	47,43	47,47	1770	1004	0,57

36	47,38	47,4	47,45	47,41	1765	2060	1,17
37	46,94	46,97	47,24	47,05	1739	1429	0,82
38	47,13	47,11	47,24	47,16	1747	1277	0,73
39	46,12	47	46,38	46,50	1698	380	0,22
40	46,71	46,56	46,96	46,74	1716	912	0,53
41	47,23	46,64	47,1	46,99	1734	1587	0,92
42	47,13	47,07	47,21	47,14	1745	1383	0,79
43	47,16	46,94	47,28	47,13	1744	1630	0,93
44	44,55	45,8	45,83	45,39	1618	769	0,48
45	47,07	47,2	47,22	47,16	1747	953	0,55
46	46,84	46,98	47,25	47,02	1737	1160	0,67
47	46,98	47,37	46,84	47,06	1740	1703	0,98
48	47,32	47,25	47,17	47,25	1753	2037	1,16
49	47,24	47,5	47,11	47,28	1756	1918	1,09
50	47,22	47,2	47,2	47,21	1750	1618	0,92
51	46,13	45,94	45,82	45,96	1659	1757	1,06
52	45,36	46,86	45,92	46,05	1665	1426	0,86

Ensaio na parede submetida a 100°C

Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
1	47,37	47,51	47,53	47,47	1770	1223	0,69
2	47,61	47,48	47,59	47,56	1777	372	0,21
3	47,54	46,99	46,94	47,16	1747	1480	0,85
4	46,94	47,37	47,11	47,14	1745	492	0,28
5	47,52	47,76	47,56	47,61	1781	247	0,14
6	42,87	43,27	43,34	43,16	1463	1244	0,85
7	47,64	47,59	47,6	47,61	1780	924	0,52
8	47,5	47,42	47,55	47,49	1771	886	0,50
9	47	47,26	47,3	47,19	1749	1645	0,94
10	47,28	47,36	46,6	47,08	1741	1723	0,99
11	47,2	46,28	46,75	46,74	1716	1083	0,63
12	46,6	46,49	46,52	46,54	1701	427	0,25
13	47,5	46,57	46,98	47,02	1736	240	0,14
14	46,46	46,33	46,51	46,43	1693	1235	0,73
15	47,35	47,02	47,04	47,14	1745	520	0,30
16	46,67	47,76	47,4	47,28	1755	1149	0,65
17	47,58	47,53	47,62	47,58	1778	789	0,44
18	47,64	47,48	47,27	47,46	1769	688	0,39
19	47,63	47,16	47,31	47,37	1762	1708	0,97
20	47,58	47,48	47,66	47,57	1778	930	0,52

Ensaio na parede submetida a 300°C

Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
1	47,37	47,47	47,39	47,41	1765	607	0,34
2	47,35	47,4	47,52	47,42	1766	343	0,19
3	47,21	47,36	47,34	47,30	1757	395	0,22
4	47,21	47,27	47,18	47,22	1751	507	0,29
5	47,31	47,49	47,6	47,47	1770	516	0,29
6	47,45	46,96	47,43	47,28	1756	477	0,27
7	47,47	47,65	47,5	47,54	1775	151	0,09
8	47,7	47,27	47,34	47,44	1767	1171	0,66
9	47,77	47,56	47,95	47,76	1792	1151	0,64
10	47,71	47,62	47,47	47,60	1780	481	0,27
11	47,44	47,48	47,49	47,47	1770	878	0,50
12	47,59	47,58	47,52	47,56	1777	971	0,55
13	47,35	47,31	47,3	47,32	1759	159	0,09
14	47,37	47,49	47,47	47,44	1768	636	0,36
15	47,58	47,66	47,67	47,64	1782	319	0,18
16	47,11	47,2	46,82	47,04	1738	563	0,32
17	47,52	47,36	47,38	47,42	1766	288	0,16
18	47,24	47,27	47,48	47,33	1759	681	0,39
19	47,28	47,22	47,3	47,27	1755	388	0,22
20	46,87	47,02	46,85	46,91	1729	456	0,26
21	47,11	47,04	47,07	47,07	1740	450	0,26

Ensaio na parede submetida a 500°C							
Identificação	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro 3 (mm)	Média dos diâmetros (mm)	Área (mm ²)	Carga (N)	Resistência (Mpa)
1	46,85	47,13	47,17	47,05	1739	479	0,28
2	47,15	46,76	46,92	46,94	1731	114	0,07
3	46,05	46,85	45,1	46,00	1662	328	0,20
4	47,17	46,94	47,23	47,11	1743	226	0,13
5	46,97	47,17	47,13	47,09	1742	16	0,01
6	47,12	46,97	47,12	47,07	1740	607	0,35
7	47,35	47,25	47,06	47,22	1751	158	0,09
8	47,16	47,28	46,92	47,12	1744	258	0,15
9	47,42	45,15	47,06	46,54	1701	272	0,16
10	47,19	47,24	47,18	47,20	1750	321	0,18
11	43,16	47,03	47,03	45,74	1643	10	0,01
12	46,95	47	46,9	46,95	1731	341	0,20
13	47,06	47,1	47,03	47,06	1740	174	0,10
14	46,42	46,64	46,49	46,52	1699	56	0,03
15	47,02	47,3	47,03	47,12	1744	13	0,01
16	47,17	46,81	46,6	46,86	1725	27	0,02
17	46,35	46,83	46,37	46,52	1699	386	0,23
18	46,86	46,94	47,15	46,98	1734	149	0,09

APÊNDICE D - PERFIS DE ABSORÇÃO CAPILAR DAS PAREDES SUBMETIDAS AO FOGO ATÉ 120 HORAS

